

Б. И. РАБИНОВИЧ, В. С. МОГИЛАТОВ

СТАНОВЛЕНИЕ ПОЛЯ ПОГРУЖЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ

Рассматриваются новые модификации зондирований становлением поля, в которых погруженный датчик — источник или приемник. Получены аналитические выражения для неустановившегося электромагнитного поля вертикального магнитного диполя, погруженного в горизонтально-слоистый разрез, осуществлены расчеты для некоторых практически важных геоэлектрических моделей. Показано, что приближение установки к объекту поиска повышает разрешающую способность исследования.

В практике нефтепоисковых работ большое развитие приобрел метод зондирований становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), обладающий повышенной разрешающей способностью и детальностью исследований по сравнению с другими методами электроразведки. На Сибирской платформе ЗСБ широко применяется при поисках и прослеживании коллекторов, насыщенных минерализованными водами. Однако метод имеет существенные ограничения при выявлении коллекторов с относительно низкой проводимостью и, что особенно важно, при раздельном изучении нескольких водонасыщенных горизонтов. Как нам кажется, наиболее эффективный путь преодоления отмеченных ограничений возможен с помощью наземно-скважинных методов, где один из датчиков — источник или приемник, размещается в скважине, а второй перемещается по дневной поверхности. Уже само приближение установки к объекту поиска должно повысить (и как будет показано — повышает) разрешающую способность исследований.

Наиболее очевидно применение в качестве помещаемых в скважину датчиков вертикальных электрического и магнитного диполей. Становление поля вертикального электрического диполя, погруженного в горизонтально-слоистое полупространство, рассмотрено в [1]. Ниже исследуется поведение на дневной поверхности компонент поля погруженного вертикального магнитного диполя. В качестве модели среды рассмотрен двух-

слойный разрез, содержащий плоскости S (маломощные хорошо проводящие горизонты), которыми могут быть аппроксимированы водонасыщенные коллекторы на Сибирской платформе.

Расчет кривых становления. На дневной поверхности компоненты электромагнитного поля, создаваемого погруженным вертикальным магнитным диполем с гармоническим возбуждением, в случае произвольной горизонтально-слоистой среды имеют следующий вид:

$$E_{\varphi} = \frac{i\omega\mu M}{2\pi h^2} \int_0^{\infty} \mathcal{J}_1(mr) m X dm;$$

$$H_z = \frac{M}{2\pi h^3} \int_0^{\infty} \mathcal{J}_0(mr) m^2 X dm;$$

$$H_r = \frac{M}{2\pi h^3} \int_0^{\infty} \mathcal{J}_1(mr) m^3 X dm,$$

где

$$X = \frac{Z_2^l}{Z_2^l - Z_1^l} \cdot \prod_{i=1}^{l-1} \frac{2e^{-n_i h_i}}{A_i + B_i e^{-2n_i h_i}}; \quad (1)$$

$$Z_1^i = \frac{1}{n_{(i-1)}} \frac{A_{i-1} - B_{i-1} e^{-2n_{i-1} h_{i-1}}}{A_{i-1} + B_{i-1} e^{-2n_{i-1} h_{i-1}}};$$

$$Z_2^i = -\frac{1}{n_i} \frac{C_i + D_i e^{-2n_i h_i}}{C_i - D_i e^{-2n_i h_i}};$$

$$A_i = 1 + n_i Z_1^i; \quad B_i = 1 - n_i Z_1^i; \quad Z_1^1 = \frac{1}{m}; \quad Z_2^N = -\frac{1}{n_N};$$

$$C_i = n_i Z_2^{i+1} - 1; \quad D_i = n_i Z_2^{i+1} + 1;$$

$$n_i = \sqrt{m^2 - k^2 \sigma_i}; \quad k^2 = i\omega\mu h^2.$$

Здесь M — момент диполя, $h_i \sigma$ — абсолютные мощности и проводимость 1-го слоя, h_i, σ_i — относительные мощности и проводимости слоев ($i = 1, 2, \dots, N$). Слой с индексом N — нижнее полупространство. Имеется в виду, что источник расположен на l -й границе (условной или реальной).

Компоненты поля в режиме становления могут быть получены преобразованием Фурье приведенных выражений для поля в гармоническом режиме. Описанный алгоритм реализован в программе для машины БЭСМ-6.

Выражения (1) позволяют получить полную ($0 \leq t \leq \infty$) кривую становления, однако начальную и конечную стадии процесса гораздо эффективнее рассчитывать с помощью асимптотических выражений. В качестве асимптотического приближения для ранней стадии использовался процесс становления от погруженного в полупространство диполя. В самом деле, если диполь расположен выше подошвы 1-го слоя, то на ранней стадии нижележащая среда не влияет на процесс становления. Выражения для поля погруженного в полупространство вертикального магнитного диполя могут быть получены из [1]. Например, для компоненты E_{φ} имеем:

$$E_{\varphi} = \frac{4Mr}{\pi R^5} \left\{ \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{p^2}{2}} x^{3/2} e^{-x} \left[1 - 2x \left(\frac{z_0}{R} \right)^2 \right] dx - \right. \\ \left. - \frac{z_0}{2R} \int_0^{\frac{p^2}{2}} \left[\frac{3}{2} - x \left(\frac{z_0}{R} \right)^2 \right] x^2 e^{-x \left(\frac{z_0}{R} \right)^2} e^{-x_1} [I_0(x_1) - I_1(x_1)] dx + \right. \\ \left. + \frac{z_0}{2R} e^{-y} [I_0(y) - I_1(y)] \cdot p^6 \cdot e^{-\left(\frac{z_0 p}{R} \right)^2} \right\}, \quad (2)$$

$$y = \frac{1}{2} \left(\frac{rp}{R} \right)^2; \quad x_1 = \frac{x}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2; \quad p = \frac{\sqrt{2\pi R}}{\tau}; \quad R = \sqrt{r^2 + z_0^2}; \quad \tau = \sqrt{\frac{8\pi^2 t}{\mu\sigma}};$$

z_0 — глубина погружения источника.

Что касается поздней стадии, то асимптотическое выражение можно найти, воспользовавшись методом А. Н. Тихонова [2]. В частности для двухслойной среды, содержащей на глубине h в кровле изолирующего основания плоскость S с проводимостью S_a , получим:

$$E_{\varphi} = \frac{M}{4\pi\sigma h^4} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \int_0^{\infty} \mathcal{J}_1(mr) \cdot F_n(m) e^{-\frac{(k_n^2 + m^2)\tau^2}{8\pi^2}} dm \right\}; \\ \dot{B}_z = \frac{M\mu}{4\pi h^5} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \int_0^{\infty} \mathcal{J}_0(mr) F_n(m) m \cdot e^{-\frac{(k_n^2 + m^2)\tau^2}{8\pi^2}} dm \right\}; \quad (3) \\ \dot{B}_r = \frac{M\mu}{4\pi h^5} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \int_0^{\infty} \mathcal{J}_1(mr) F_n(m) m^2 e^{-\frac{(k_n^2 + m^2)\tau^2}{8\pi^2}} dm \right\};$$

где

$$F_n = \frac{2mk_n^2 [2m(m \sin k_n z_0 + k_n \cos k_n z_0) - e^{-m(1-z_0)} (2mk_n \cos k_n + \sin k_n (m^2 - k_n^2))]}{k_n (m^2 + k_n^2) + 2mk_n \sin^2 k_n - (m^2 - k_n^2) \sin k_n \cos k_n},$$

а для k_n есть уравнение

$$\frac{\sin k_n}{k_n} [m^2 (m\gamma - 1) + k_n^2 (m\gamma + 1)] - \cos k_n [m(2 - \gamma m) - k_n^2 \gamma] = 0,$$

где $\gamma = S_n/S_1$.

Выражения (3) эквивалентны Фурье-образам выражений (1), однако они гораздо удобнее для расчетов в случае больших значений параметра становления τ . Нетрудно показать, что в поздней стадии достаточно взять лишь первый член ряда в (3), и расчет сведется к вычислению однократного интеграла. Таким образом полная кривая становления строится в общем случае по результатам работы трех программ. Заметим, что при $z_0 \leq 0,5h$ начальная и конечная асимптоты имеют общий участок, и необходимость расчета по общей программе отпадает.

Рассмотрим полученные кривые становления для каждой компоненты поля. За основную модель примем двухслойный разрез, содержащий в кровле изолирующего основания пластину S с относительной проводимостью $S_n/S_1 = 0,1 \div 1$, где S_1 — проводимость вышележащих отложений. Выбор этого диапазона значений обусловлен тем, что при наземных наблюдениях с подобными установками достаточно уверенное выделение тонкого низкоомного слоя возможно при $S_n \geq S$. Как будет показано ни-

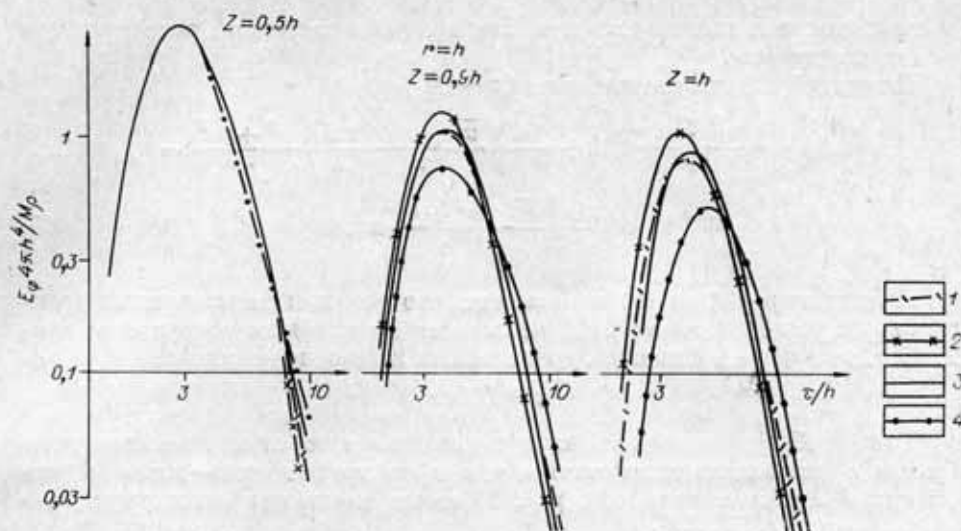


Рис. 1. Кривые становления E_ϕ .

Кривые зондирования для: 1 — полупространства, 2 — двухслойной среды, двухслойной среды с пластиной $S_2:S_1=0,2$, S_1 и 4 — $S_2=S_1$.

же, проводимость $S_n = 0,1-0,2$ является той величиной, обладая которой пласт-коллектор еще может быть достоверно исследован наземно-скважинными методами. Для разреза Сибирской платформы, где значение сопротивления осадочной толщи можно принять равным $75 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, найдем, что относительной проводимостью $0,1-0,2$ обладает слой мощностью 4 м с сопротивлением $0,5-1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ($S_n = 4-8 \text{ См}$), залегающий на глубине 3 км ($S_1 = 40 \text{ См}$).

Становление электрической (E_ϕ) компоненты поля. На рис. 1 приведены кривые становления электрической компоненты поля в зависимости от τ/h при различных глубинах погружения вертикального магнитного диполя (z) и параметрах разреза. Как видим, различие кривых наступает тем раньше, чем ближе к аномалеобразующему объекту расположен диполь. Например, кривые зондирования в однородном полупространстве и двухслойной среде отличаются свыше 30% при:

z/h	0	0,25	0,5	0,75	0,9
τ/h	11,5	11	10,5	9	8,5

Для $z = h$ (диполь в основании разреза) различия начинаются с самого первого мгновения. Так как при $z < h$ в рассматриваемых средах поле на ранних временах совпадает с полем в однородном полупространстве, то анализ кривых становления начнем с этой модели.

Как следует из формулы (2), в ранней стадии процесса становления ($p \rightarrow \infty$)

$$E_\phi = 3M\rho/2\pi r^4 \cdot e_\phi,$$

$$\text{где } e_\phi = \frac{\tau}{z\pi\sqrt{2\pi}} e^{-u_1^2/2} \left(1 - \frac{1}{u_1^2} + \frac{15z^2}{2r^2u_1^2}\right) \text{ при } z > 0 \quad (4)$$

и $e_\phi = 1$ при $z = 0$.

Здесь z — глубина погружения вертикального магнитного диполя, $u_1 = 2\pi z/\tau$. С уменьшением τ и увеличением z электрическое поле уменьшается почти по экспоненциальному закону, а величина e_ϕ не зависит от r — горизонтального расстояния между источником и приемником. Следовательно, электромагнитное поле в точку измерения на дневной поверхности проходит следующим путем: от источника вертикально вверх

до поверхности и далее вдоль нее, как в случае наземного расположения магнитного диполя.

В поздней стадии становления ($p \rightarrow 0$)

$$E_{\varphi} = \frac{16\pi \sqrt{2\pi} M \rho r}{5\tau^5} \left(1 + \frac{5\pi \sqrt{2\pi}}{4} \frac{z}{\tau} - \frac{10\pi^2}{7} \frac{r^2 + 3z^2}{\tau^2} - \frac{15\pi \sqrt{2\pi}}{32} \cdot \frac{5r^2 + 4z^2}{\tau^3} z \right). \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что результаты измерений практически (с ошибкой менее 5%) не зависят от глубины погружения магнитного диполя на временах, определяемых из соотношения:

$$\tau \geq 200z. \quad (6)$$

Таким образом в ранней стадии становления электрическое поле убывает с уменьшением параметра τ , а в поздней стадии — при его увеличении. Максимум поля (см. рис. 1) имеет место при следующих значениях τ/R ($R = \sqrt{r^2 + z^2}$):

z/r	0,05	0,07	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1	2	3	5	7	10	15
τ/R	1,7	1,85	2,0	2,25	2,35	2,45	2,6	2,65	2,65	2,7	2,7	2,75	2,7	2,7

Для $z/r \geq 0,07$ эта зависимость может быть приближенно аппроксимирована выражением (отличие не превышает 5%);

$$(\tau/R)_{\max} = 2,7/(1 + 0,035r/z). \quad (7a)$$

С погрешностью в 10% ордината максимума определяется соотношением:

$$E_{\varphi \max} = 6,2/4\pi R^4 [1 + (z/r)^{7/6}]. \quad (7b)$$

Как видно из рис. 1, кривые зондирования в двухслойном разрезе подобны рассмотренным для однородного полупространства. При $z < h$ они совпадают в ранней стадии, затем, по мере увеличения τ/h , значение E_{φ} для двухслойного разреза (E_{φ}^{gb}) возрастает быстрее. Наибольшее превышение E_{φ}^{gb} над E_{φ}^{ogn} имеет место в области максимума кривой зондирования. Последующее уменьшение эдс происходит более резко в двухслойных кривых зондирования с $\rho_2 = \infty$, что приводит вначале к сокращению различия между этими сравниваемыми графиками, а затем к превышению E_{φ}^{ogn} над E_{φ}^{gb} . В табл. 1 даны значения τ/h , при которых отличие E_{φ}^{gb} от E_{φ}^{ogn} свыше 50%.

Остановимся более подробно на изменении координат максимума кривой зондирования. Влияние изолирующего основания приводит к уменьшению абсциссы максимума, величина которой при $z/r \geq 0,07$ с погрешностью до 10% выражается зависимостью:

$$(\tau(h))_{\max} = 2,7R/[(1 + 0,035r/z)(h + 0,04R)]. \quad (8)$$

Ордината максимума возрастает и при

$$z/h \leq 5(1 - z/h) \quad (9)$$

отличие от соответствующих (т. е. для тех же величин z/r) значений E_{φ}^{ogn} не превышает 20%. При больших горизонтальных расстояниях ордината максимума оценивается по формуле:

$$E_{\varphi \max} = 6,2M(h + 0,2R)/4\pi R^4 S [1 + (z/r)^{7/6}], \quad (10)$$

где S — продольная проводимость слоя.

Появление в кровле основания плоскости S (как отмечалось выше, эта модель соответствует разрезу, содержащему водонасыщенный коллек-

тор) приводит к уменьшению ординаты максимума кривой зондирования (см. рис. 1). Зависимость ее от параметров среды и установки характеризуется при тех же условиях, что и для двухслойного разреза, выражением (10), где S в этом случае — суммарная продольная проводимость.

Возможность реализации установки, регистрирующей E_{φ} -ю компоненту поля погруженного вертикального магнитного диполя, определяется в основном величиной сигнала, который весьма удобно оценить, используя значение максимума поля, зависящее от глубины залегания и проводимости объекта поисков, моментов генераторного и измерительного датчика. Однако одновременно нужно учитывать и разрешающую способность реализуемой установки, определяемую возможностью по измеряемой ею части кривой зондирования решать геологическую задачу. Сопоставление кривых становления поля в разрезах, содержащих плоскость $S(E_{\varphi})$ и без нее (E_{φ}), показывает, что область их наибольшего различия (наибольшей разрешающей способности) не совпадает с максимумом поля. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены графики отношения эдс для трехслойного (четырёхслойного) и двухслойного разрезов ($E_{\varphi}/E_{\varphi_0}$) при $S_n/S_1 = 1$ и 0,2, на которых указаны значения τ/h , соответствующие максимумам E_{φ} . Как видно, при $z \geq h$ (случай $z > h$ исследовался на модели с плоскостью S внутри слоя) максимальной разрешающей способностью обладает ранняя стадия становления. Для $z \leq 0,9h$ наибольшие

различия между трех- и двухслойными кривыми имеют место в поздней стадии, где они, как и в наземной установке, пропорциональны кубу отношения суммарных продольных проводимостей рассматриваемых разрезов. Но наблюдения в этой области процесса становления характеризуются крайне малыми, практически не измеряемыми сигналами. На ранних временах, как следует из рис. 2, графики отношений $E_{\varphi}/E_{\varphi_0}$ имеют экстремум, отражающий повышение разрешающей способности в данном интервале τ/h .

Для сравнения разрешающей способности различных установок кривой зондирования в табл. 2 приведены величины максимальных аномальных эффектов для той части процесса становления, где регистрируемая эдс составляет не менее $0,1 E_{\varphi_{\text{max}}}$. Как видим, в разрезах с $S_n < S_1$ большая разрешающая способность при одинаковых эдс имеет место для $\tau < \tau_{\text{max}}$. При $S_n \geq S_1$ в рассматриваемой области становления на временах больших и меньших τ_{max} разрешающая способность сопоставима, но ано-

Таблица 1

r/h	z/h					
	0	0,25	0,5	0,75	0,9	1
1/4	12,5	12	11,5	11	9,5	8,5
1	13	12,5	12	11,5	10	9
4	17	16,5	16	15,5	15	14,5

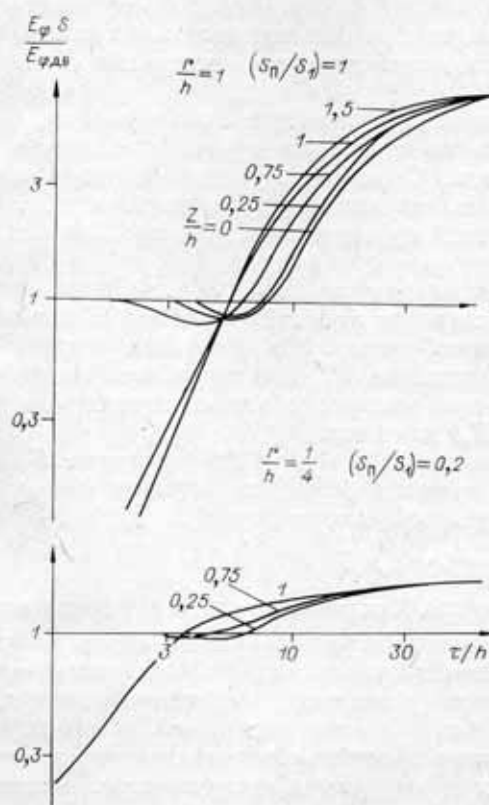


Рис. 2. К оценке разрешающей способности электрического поля.

Область кривых зондирования		$S_n/S_1=1$			
		$v/h=0,9$			
		1	2	4	8
$(\frac{\tau}{h})_{\max}$	$\frac{4\pi h^4}{M\rho} E_{\varphi S_{\max}}$	0,71	0,135	0,0165	0,0019
	$(1-E_{\varphi S}/E_{\varphi})\%$	43	37	35	33
$(\frac{\tau}{h}) > (\frac{\tau}{h})_{\max}$	$\frac{\tau}{h}$, где $E_{\varphi}=0,1E_{\varphi S_{\max}}$	10	15	22	34
	$(1-E_{\varphi S}/E_{\varphi S}\%)$	62	70	75	80
$\frac{\tau}{h} < (\frac{\tau}{h})_{\max}$	$(\frac{\tau}{h})_n$, где $E_{\varphi}=0,1E_{\varphi S_{\max}}$				
	$\frac{\tau}{h}$, где $(\frac{E_{\varphi S}}{E_{\varphi}})_{\max}$	3,3	3,7	4,8	5
	$\frac{4\pi\rho h^4}{M\rho}, E_{\varphi S}$, где $(E_{\varphi S}/E_{\varphi})_{\min}$	0,7	0,065	0,005	0,0003
	$(1-E_{\varphi S}/E_{\varphi})\%$	45	65	70	75

мальный эффект в 30—50%, достаточный для определения параметров разреза, будет получен в ранней стадии при больших величинах сигналов. Например, для $S_n = S_1$ и $z = 0,9h$ это относительное повышение сигнала дано в табл. 3.

Погружение магнитного диполя под проводящую плоскость приводит к некоторому уменьшению сигнала по сравнению с расположением его на той же глубине, но над плоскостью C (табл. 4). Разрешающая способность при этом несколько возрастает, что иллюстрируют данные табл. 4, где приведены величины аномальных эффектов для тех же значений τ/h , где $E_{\varphi} = 0,1E_{\varphi \max}$ при $S_n = S_1$.

Таким образом процесс становления в динамическом диапазоне $(0,1-1) \cdot E_{\varphi \max}$ характеризуется достаточно высокой (особенно в области меньших времен) разрешающей способностью. Это позволяет, задаваясь минимально измеряемой величиной сигнала ($\varepsilon_{\min}$), использовать полученные зависимости, например, (10), при оценке требуемых моментов генераторного (M_r) и измерительного (M_n) датчиков.

Заметим, что, так как в интервале $0,15 \leq z/r < 0,6$ величина $E_{\varphi \max}$ слабо зависит от z (изменения в пределах 10%), то формулу (10) для этих наиболее часто встречаемых условий можно упростить (при $z \approx h$):

$$M_r \cdot M_n = 6 \cdot \varepsilon_{\max} r^2 S. \quad (11)$$

Становление B_z и B_r компонент поля. Как видно из рис. 3, где приведены

Т а б л и ц а 3

Аномаль- ный эф- фект	r/h			
	1	2	4	8
30%	2,6	1,5	1,3	1,2
50%	—	2,2	1,6	1,2

кривые зондирования B_z , скорость изменения вертикальной компоненты вектора магнитной индукции в ранней стадии становления мала. С увеличением параметра τ/h она растет, достигает максимума, уменьшается, меняет знак, снова растет по абсолютной величине, достигает максимума и затем

Таблица 2

$S_n/S_1=1$				$S_n/S_1=0,2$							
$z/h=1$				$z/h=0,9$				$z/h=1$			
r/h											
1	2	4	8	1	2	4	8	1	2	4	8
0,49	0,125	0,0165	0,0019	1,05	0,23	0,03	0,0032	0,87	0,22	0,03	0,0032
25	25	25	25	15	10	10	10	10	10	12	12
11	15	23	35	8	12	18	26	8,3	12	18	26
70	72	75	80	18	23	25	30	23	25	30	35
2,5	3,2	4	4,6				4	2,2	3	3,4	4
				2,6	3,1	3,3					
				0,5	0,05	0,003					
85	90	87	85	25	43	47	45	60	65	60	53

стремится к нулю. Абсцисса точки, где происходит смена знака эдс зависит от параметров разреза (тем сильнее, чем больше разнос установки), почти не меняется с изменением глубины погружения диполя и, например, для двухслойного разреза может быть приближенно оценена из соотношения:

$$(\tau/r)_0 \approx 4. \quad (12)$$

Сопоставление абсолютных значений ординат максимумов кривых зондирования показывает, что первый из них (на ранних временах) характеризуется большей эдс, с увеличением разноса установки различие между ними возрастает. Сугубо ориентировочно величина первого максимума может быть оценена при $r \geq 2h$ по формуле:

$$B_z = 0,4 \cdot M/R^4 S, \quad (13)$$

где $R = \sqrt{z^2 + r^2}$, S — суммарная продольная проводимость разреза.

Характер изменения разрешающей способности в процессе зондирования от параметров разреза и установки на ранних временах совпадает

Таблица 4

r/h	$\frac{4\pi z^4}{M\rho} E_\varphi$				$(1-E_{\varphi S/E_\varphi}), \%$							
					$\tau<\tau_{\max}$				$\tau>\tau_{\max}$			
	r/h											
	1	2	4	8	1	2	4	8	1	2	4	8
0,9	0,475	0,089	0,011	1250	0,45	0,65	0,72	0,73	0,62	0,70	0,74	0,79
1	0,49	0,125	0,0165	18,5	0,86	0,90	0,86	0,84	0,70	0,72	0,76	0,80
1,1	0,375	0,084	0,0105	12	0,83	0,80	0,78	0,75	0,70	0,74	0,78	0,80
1,5	0,39	0,0825	0,01	12	0,83	0,78	0,72	0,68	0,70	0,74	0,78	0,80

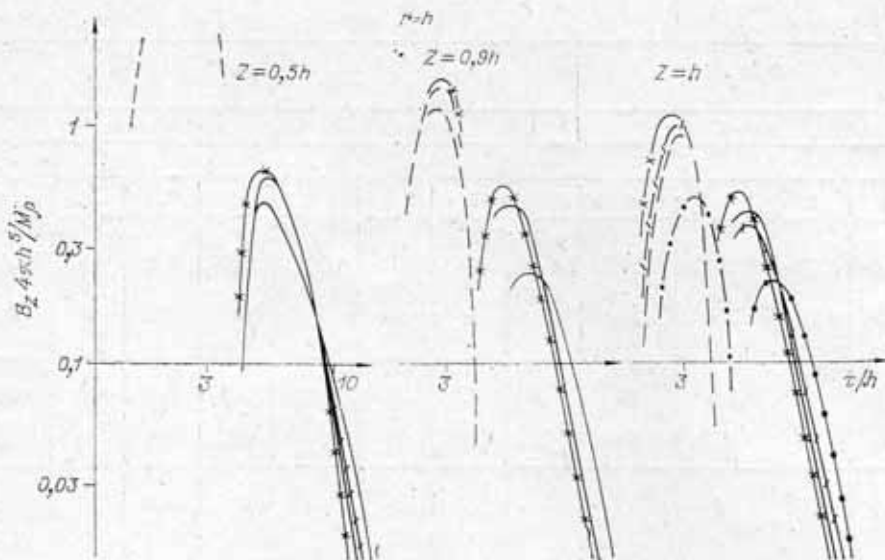


Рис. 3. Кривые становления B_z .
Усл. обозн. на рис. 1.

с рассмотренным выше для E_z -й компоненты поля (см. рис. 2), но отличается в области $(\tau/h)_0$, соответствующей смене знака эдс, где разрешающая способность максимальна. Следовательно, при оценке требуемого момента установки можно ориентироваться на величину первого максимума выражения (13), полагая его значение равным 10^{-5} В. Для рассматриваемых условий ($r = 10^4$, $S = 100$ См) это соответствует следующим требованиям к произведению моментов генераторного и измерительного датчиков:

$$M_r \cdot M_n = 2,5 \cdot 10^{12} \text{ А} \cdot \text{м}^4 \quad (14)$$

Кривые зондирования $\dot{B}_r$ по внешнему виду похожи на кривые $\dot{B}_z^*$: они характеризуются сменой знака эдс и двумя экстремальными точками, при этом ордината более ранней из них приближенно описывается зависимостью (13).

Становление компонент магнитного поля. Характер становления компонент магнитного поля зависит от режима работы, т. е. от того, производятся ли исследования после выключения или включения тока в источнике.

На ранних временах после выключения тока магнитное поле равно постоянному магнитному полю в воздухе:

$$H_z^* = \frac{M(r^2 - 2z^2)}{4\pi R^5}, \quad H_r^* = \frac{3Mrz}{4\pi R^5}, \quad H_z = \frac{Iy}{4\pi R^3}. \quad (15)$$

С течением времени плотность тока перераспределяется, что изменяет и магнитное поле. Графики нормированных компонент поля в режиме выключения для двухслойного разреза приведены на рис. 4. Из них видно, что вертикальная компонента магнитного поля горизонтального электрического диполя H_z с течением времени уменьшается; горизонтальная компонента поля вертикального магнитного диполя H_r^* вначале растет (это особенно заметно на больших удалениях от источника), достигает максимума, а затем уменьшается. Что касается H_z^* компоненты, то она со временем уменьшается, меняет знак, достигает максимума (по абсолютной величине) и далее стремится к нулю.

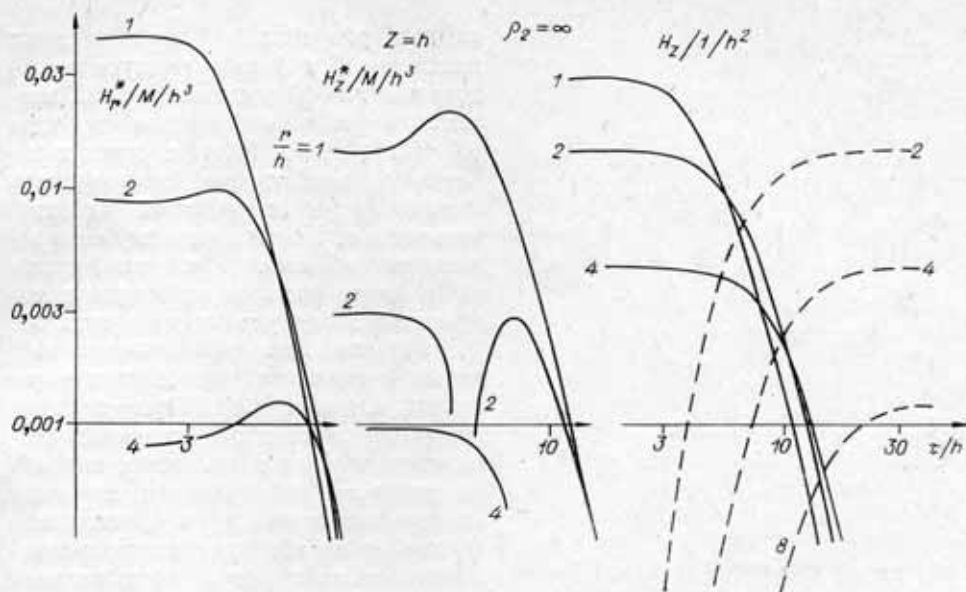


Рис. 4. График нормирования компонент магнитного поля.

Исследование разрешающей способности кривых зондирования (на рис. 5 в качестве примера приведены графики для $z=h$ и $S_a=S_1$) показывает, что наибольшей величиной характеризуется поздняя стадия процесса становления, где, как и в случае размещения всей установки на дневной поверхности, вертикальные компоненты поля электрического и вертикального магнитного диполей зависят от сопротивления среды ρ в степени $3/2$ (или от куба суммарной продольной проводимости), а H_r^* пропорциональна $\rho^{-2}(\sim S^4)$. Однако H_z^* компонента поля, кроме того, обладает высокой чувствительностью к изменению параметров разреза также в области смены знака поля (см. рис. 5). Иная картина становления поля имеет место в режиме включения тока. На ранних временах индуцированные токи сконцентрированы вблизи источника и измеряемые на дневной поверхности магнитные поля малы (см. рис. 4). Они возрастают в процессе становления; компоненты магнитного поля вертикального магнитного диполя (H_r^* и H_z^*) достигают максимума, затем уменьшаются, меняют знак и по мере установления тока в среде стремятся к величине магнитного поля постоянного тока (15). Поэтому наибольшая разрешающая способность компонент поля в режиме включения имеет место на ранних временах (тем больше, чем меньше время становления — см. рис. 5) и в области смены знака.

Оценку возможности применения рассматриваемых схем наблюдений проведем в предположении, что кривые зондирования должны быть зарегистрированы до тех в режиме выключения или с тех в режиме включения времен, при которых аномальный эффект, вызываемый присутствием в разрезе плоскости S , составляет 50% от поля в двухслойной среде (без проводящего слоя). Расчеты показывают, что соответствующие этим временам становления сигналы в режиме включения тока при $S_a=0,2S_1$ несколько больше для разносов $r<4h$ и меньше при больших удалениях от скважины. При $S_a=S_1$ компоненты H_r^* и H_z^* больше в режиме выключения, а H_z^* — в режиме включения тока.

Принимая, как и ранее, моменты генераторных установок

$$I = 2 \cdot 10^4 \text{ А} \cdot \text{м}, M_r = 5 \cdot 10^7 \text{ А} \cdot \text{м}^2$$

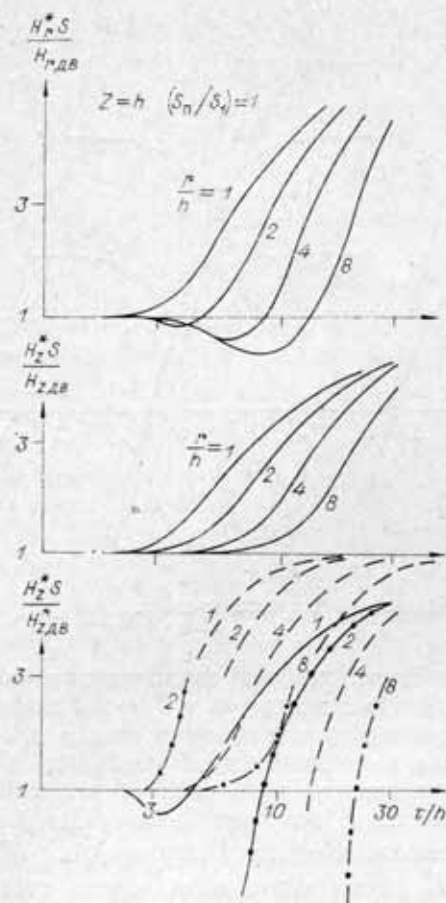


Рис. 5. К оценке разрешающей способности компонент магнитного поля.

расположена между источником и приемником. С увеличением времени начинают влиять нижележащие отложения и в поздней стадии регистрируемые величины эдс такие же, как в наземной установке соответствующего разреза. Поэтому очевидно, что, помещая вертикальный магнитный диполь вблизи верхнего проводящего слоя, удастся тем увереннее выделить его, чем меньше время становления, на котором проводятся измерения (рис. 6).

Для компонент магнитного поля характер зависимости от параметров разреза определяется режимом работы. На ранних временах после выключения тока в источнике наблюдаемое поле близко к полю постоянного тока и слабо зависит от геоэлектрических характеристик среды, а на больших, в поздней стадии становления, — определяется суммарными параметрами. Поэтому степень раздельного проявления горизонтов этих кривых зондирования мала. Иная картина имеет место для компонент магнитного поля, зарегистрированных после включения тока в источнике. В ранней стадии становления их величина обусловлена той частью разреза, которая заключена между генераторной и приемной установками, а в поздней стадии, по мере установления тока, связь с параметрами среды ослабевает. С целью сравнения применимости обоих режимов работы при пораздельном изучении коллекторов, в табл. 6 приведены величины отношений $H_z(1-1)/H_z(2-0)$ компонент поля для разрезов, содержащих две плоскости S с $S_{п1} = S_{п2} = S/3$ (обозначает-

найдем, что при глубине залегания плоскости S в 3 км и радиусе исследования $r = 10$ км компоненты магнитного поля составляют порядка $0,5 \cdot 10^{-3} \gamma$ (табл. 5), т. е. для их измерения необходимо использовать магнитометры с высокой чувствительностью. Уменьшение глубины залегания объекта при сохранении выбранного радиуса приводит к незначительному увеличению сигнала.

Возможности пораздельного изучения нескольких проводящих горизонтов. Одной из наиболее трудных задач для метода зондирования становлением поля в наземном варианте является пораздельное изучение нескольких коллекторов. Оценка возможности ее решения наземно-скважинными методами с погруженным вертикальным магнитным диполем проводилась на примере двухслойного разреза с $\mu = \infty$, содержащего в основании слоя и на глубине h_1 , две плоскости S , равных по проводимости ($S_{п1} = S_{п2} = S/3$), где S — суммарная продольная проводимость всей надпорной толщи).

Из материалов, приведенных выше, вытекает, что на ранних временах процесса становления электромагнитного поля ($E_\phi, B_z^*, \dot{B}_r^*$) определяется геоэлектрическими параметрами той части среды, которая

Таблица 5

Режим работы	h , км	$\frac{S_M}{S_1}$	$H_z \cdot 10^{-3} \gamma$	$H_z \cdot 10^{-3} \gamma$	$H_z \cdot 10^{-3} \gamma$
Выключение	3	$\frac{0,2}{1}$	$\frac{0,9}{4,5}$	$\frac{0,25}{1,5}$	$\frac{0,6}{15}$
	1,25	$\frac{0,2}{1}$	$\frac{2}{5}$	$\frac{0,25}{1,5}$	$\frac{2}{16}$
Включение	3	$\frac{0,2}{1}$	$\frac{0,9}{2}$	$\frac{0,45}{2}$	$\frac{0,55}{7}$

Таблица 6

Режим работы	r/h		
	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$	2
Включение	1,075	1,065	1,03
Выключение	1,65	1,65	1,2

мой $H_z(1-1)$ и одну, имеющую проводимость, равную $S_{n1} + S_{n2}$ ($H_z(2-0)$) и залегающую на глубине верхней

плоскости, где также расположен вертикальный магнитный диполь. Для кривых становления после выключения тока в таблице даны максимальные значения отношений, а в режиме включения — те, которые имеют место на временах, соответствующих минимально измеряемым сигналам $H_z(1-1)$. Хотя эффективность использования последних очевидна, вероятно, целесообразно применять оба режима работы для одновременного изучения проводимости верхней части разреза и всей осадочной толщи.

Таким образом, разрешающая способность компонент элетромагнитного поля (и их производных по времени) при раздельном изучении коллекторов возрастает с уменьшением времени становления. Однако при этом происходит снижение величины сигнала (см. рис. 6). Поэтому конкретную оценку возможностей наземно-скважинных установок проведем для найденных выше минимально регистрируемых значений, равных в случае измерений эдс 10^{-6} В, а магнитных компонент поля — $0,5 \cdot 10^{-3} \gamma$. В табл. 7 приведены величины отношений $F(1-1)/F(2-0)$, полученные для следующих условий: моменты генераторных установок $M_r = 5 \cdot 10^7 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, $I = 2 \cdot 10^4 \text{ А} \cdot \text{м}$, глубина залегания диполя и верхней плоскости S $h = 2,5$ км, интервал между проводящими горизонтами $\Delta = 100$ м ($\Delta/h = 0,04$). Заметим, что в данном случае нельзя сравнивать разрешающую способность компонент поля и их производных, поскольку не сопоставимы принятые минимальные величины сигналов — вольты и гаммы. При анализе однотипных компонент (поле или скорость его изме-

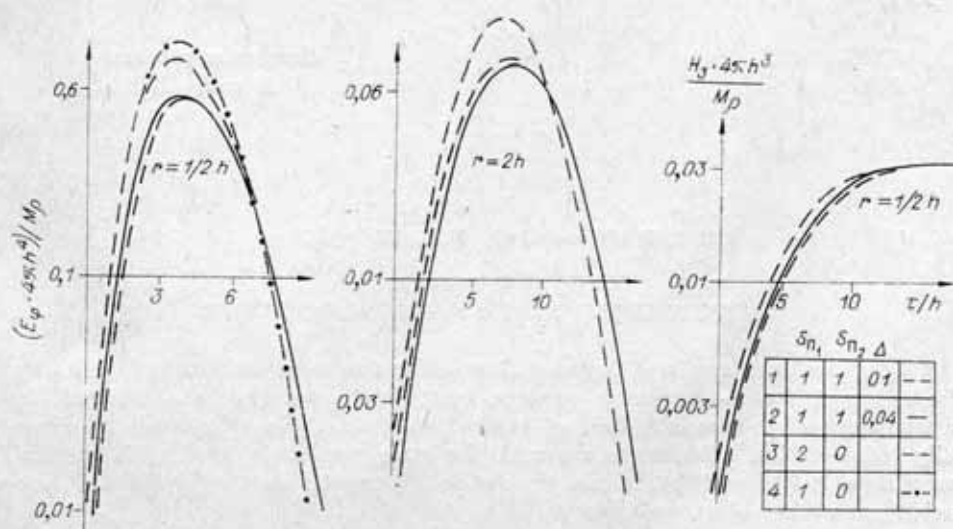
Рис. 6. Кривые становления E_z над разрезом, содержащим две плоскости S .

Таблица 7

r/h	Для компонент					
	E_φ	$\dot{B}_z^*$	$\dot{B}_r^*$	H_z	H_z^*	H_r^*
1/8	2,1	2,1	2,1	1,65	1,8	1,8
1/2	2,0	2,1	2,1	1,65	1,8	1,8
2	1,5	1,55	2,0	1,2	1,2	1,5
4	1,1	1,1	1,75	1,05	1,05	1,2

Таблица 8

Для компонент	Δ/h			
	0,04	0,10	0,20	0,30
E_φ	1,04	1,09	1,16	1,22
$\dot{B}_z$	1,04	1,09	1,16	1,22
$\dot{B}_r$	1,06	1,14	1,25	1,35

нения во времени) нужно учитывать то, что уровень внешних помех был принят для них одинаковым.

Сопоставим полученные данные с аналогичными в наземных установках наблюдений. В табл. 8 приведены значения $F(1-1)/F(2-0)$ при различных величинах относительного интервала между пластинами Δ/h . Если считать минимально необходимым для раздельного изучения горизонтов аномальный эффект в 20%, то наименьший интервал между пластинами не должен быть меньше 25% по отношению к глубине залегания верхней в наземных установках наблюдений B_z и E_φ компонент и 15% при измерении B_r . В наземно-скважинных методах, как видно из табл. 6, пораздельное прослеживание горизонтов ($S_{n1} = S_{n2}$), разнесенных по глубине на расстояние $\Delta = 0,04h$ возможно в радиусе $r = 3,2h$ при измерении E_φ и B_z и $r > 7h$ при регистрации B_r . Допустимый интервал между пластинами S может быть сокращен при уменьшении радиуса опускания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдман М. М., Могилатов В. С. Становление поля вертикального электрического диполя, погруженного в горизонтально-слоистое полупространство.— В кн.: Теор. и опыт применения электромагнит. полей в развед. геофиз. Новосибирск, 1978. (Тр. ИГиГ СО АН СССР).
2. Тихонов А. Н., Скугаревская О. А. О становлении электрического тока в неоднородной слоистой среде.— Изв. АН СССР, Серия геогр. и геофиз., 1950, т. 14, № 4.

СНИИГГуМС
Новосибирск

Поступила в редакцию
18 июня 1979 г.

B. I. Rabinovich, V. S. Mogilato v

NONSTATIONARY FIELD OF SUBMERGED VERTICAL MAGNETIC DIPOLE

Considered are new modifications of sounding due to nonstationary field, where used plunged device — source or receiver. Analytical expressions are obtained for nonstationary electromagnetic field of vertical magnetic dipole, submerged in horizontally bedded section. Calculations are made for some geoelectric models of practical importance. It is shown that in case the device is brought closer to the object of research the resolution of research raises.