

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Г.М. Морозова, Е.Ю. Антонов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Представлены результаты математического моделирования нестационарных магнитных полей возбуждаемых двумя типами источников: горизонтальным электрическим и вертикальным магнитным диполями. Для анализа выбраны геоэлектрические разрезы, типичные для платформенных областей Восточной Сибири. Исследованы возможности выделения и дифференциации глубокозалегающих пластов-коллекторов при измерении горизонтальных и вертикальных компонент нестационарного магнитного поля. Выполнено сопоставление глубинности магнитных и индукционных зондирований.

Зондирование становлением поля, математическое моделирование, нестационарное магнитное поле.

TEM-TDEM SOUNDINGS IN THE EASTERN SIBERIAN CRATON

G.M. Morozova and E.Yu. Antonov

We report forward modeling results for transient magnetic fields excited by horizontal electric or vertical magnetic dipoles. Modeling was performed with reference to resistivity patterns typical of platform areas of East Siberia. We investigate the possibilities to resolve deep reservoirs by measuring the horizontal and vertical components of the transient magnetic field and compare the depth resolution of magnetic and inductive methods.

Transient electromagnetics, mathematical modeling, transient magnetic field

ВВЕДЕНИЕ

В Восточно-Сибирской нефтегазоносной провинции большая часть разведанных нефтяных и газовых запасов располагается в глубокозалегающих древних породах. Открыты первые месторождения в верхнем протерозое и нижнем кембрии в Якутии и Иркутской области [Мандельбаум и др., 1980]. В Иркутской области разведано несколько небольших месторождений (Ярактинское, Братское, Марковское, Аянское, Непское) с ограниченными запасами нефти и газа. Подготовлены к освоению газовые месторождения: Ковыктинское и Хандинское [Торопов, Маньковский, 2004]. В Якутии разрабатываются значительные месторождения газа, такие как Среднеботуобинское, Верхневилучанское. Однако степень изученности осадочных отложений убывает по мере увеличения их возраста и глубины залегания.

Для геологического разреза Сибирской платформы, сложенной в основном карбонатными образованиями, характерно высокое удельное электрическое сопротивление пород [Мандельбаум и др., 1980]. Среднее продольное удельное сопротивление осадочной толщи составляет 50—100 Ом·м. Вместе с тем в кембрийских породах широко распространены рассолоносные горизонты, минерализация вод в которых превышает 300—400 г/л. Породы, насыщенные этими водами, характеризуются значительно более низкими электрическими сопротивлениями, чем вмещающие их среды. Удельное сопротивление песчаников при изменении коэффициента пористости от 10 до 20 % и температуры пласта от 10 до 50 °С колеблется от 0.3 до 5 Ом·м [Мандельбаум и др., 1980]. Резкая дифференциация (в 100 раз) по сопротивлению между водонасыщенной частью пласта и вмещающей средой используется в качестве физической основы для выявления зон коллекторов.

Как было показано в работах [Кауфман, Морозова, 1970] высокой чувствительностью к электропроводности глубоких слоев геоэлектрического разреза обладает метод зондирований становлением электромагнитного поля в ближней зоне (ЗСБ).

В последние годы метод ЗСБ получил дальнейшее развитие благодаря разработке новых методических технологий, применению профильных и площадных систем наблюдений, новому математическому и программному обеспечению, широкому использованию спутниковых систем глобального позиционирования (GPS), разработке аппаратуры импульсных электромагнитных зондирований. В России в течение последних десятилетий созданы новые версии аппаратуры серий «Импульс» (Тригубович Г.М.) и «Цикл» (Балашов Б.П., Захаркин А.К.), разработаны такие новые системы, как «ТЕМ-FAST» (Барсуков П.О., Файнберг Э.Б.), «SGS-ТЕМ» (Поспеев А.В., Стефаненко С.М.).

Таблица 1.

Источник — горизонтальный электрический диполь	
основание-проводник	основание-изолятор
$H_x = \frac{I_x r^2 \sin 2\varphi}{1024\pi} \left(\frac{\sigma_2 \mu_0}{t} \right)^2$	$H_x = \frac{I_x r^2 \sin 2\varphi}{16\pi} \left(\frac{\mu_0 S}{t} \right)^4$
$H_z = \frac{I_x r \sin \varphi}{60\pi \sqrt{\pi}} \left(\frac{\sigma_2 \mu_0}{t} \right)^{3/2}$	$H_z = \frac{I_x r \sin \varphi}{32\pi} \left(\frac{\mu_0 S}{t} \right)^{3/2}$
Источник — вертикальный магнитный диполь	
$H_z = -\frac{M}{2\pi \cdot 15 \sqrt{\pi}} \left(\frac{\sigma_2 \mu_0}{t} \right)^{3/2}$	$H_z = -\frac{M}{16\pi} \left(\frac{\mu_0 S}{t} \right)^3$
$H_r = -\frac{Mr}{128\pi} \left(\frac{\sigma_2 \mu_0}{t} \right)^2$	$H_r = -\frac{3Mr}{64\pi} \left(\frac{\mu_0 S}{t} \right)^4$

Здесь M — момент магнитного диполя, I_x — момент электрического диполя, σ_2 — удельная электропроводимость основания, $S = \sigma_1 h$ — продольная проводимость слоя, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость среды, φ — азимутальный угол.

Как видно, магнитные компоненты поля электрического диполя H_x и H_z пропорциональны в поздней стадии соответственно r^2 и r и продольной проводимости в четвертой и третьей степенях — S^4 , S^3 . Радиальная компонента магнитного диполя H_r пропорциональна разному и продольной проводимости пласта в четвертой степени — S^4 .

Таким образом, измерения на последовательности увеличивающихся разносов (пространственно-временные зондирования [А.с..., 1988]) приведут к увеличению полезного сигнала на данном времени или продлению кривой кажущегося сопротивления ρ_t в сторону больших времен. В целом участки кривой кажущегося сопротивления ρ_t^0 , огибающей семейства кривых ρ_t , формируются на последовательности разносов при наибольшем значении компонент поля, что повышает разрешающую способность пространственно-временных зондирований по сравнению с зондированиями в дальней зоне и глубинность по сравнению с зондированиями в ближней зоне. Изменение конфигурации кривой ρ_t^0 во времени отражает изменение свойств среды с глубиной и не связано со свойствами трансформации.

Возможности пространственно-временных зондирований исследуем для магнитного поля. При площадных работах применение магнитных сенсоров может быть более технологичным по сравнению с традиционным использованием индукционных петель. Естественно, что эти возможности будут в значительной степени определяться параметрами магнитометра: его частотной характеристикой или интервалом времени становления, соответствующим неискаженному измеренному полю, чувствительностью прибора, т.е. минимальным уровнем измеряемого сигнала.

В качестве аппаратуры для измерения магнитного поля можно рассмотреть комбинированную систему, состоящую из аппаратуры SQUID [Chwala et al., 2001], которая имеет временной диапазон от 0.10 до 1000 мс и магнитостатического вариометра (МСВ) [Кротевич, 1972], который позволяет измерять нестационарное магнитное поле на временах от 100 мс. Максимальное время измерения определяется чувствительностью прибора, которая составляет $2.5 \cdot 10^{-6}$ А/м. Минимальные измеримые величины поля $H_{\text{мин}} = 10^{-5}$ А/м с точностью 10 % (10^{-5} А/м $\cong 1.3 \cdot 10^{-2}$ нТл).

Рассмотрим результаты численного моделирования нестационарного электромагнитного поля для типичного геоэлектрического разреза Сибирской платформы [Кондратьев и др., 2004; Агафонов, 2005].

Для условий Сибирской платформы построены две физико-геологические модели с коллектором и без него. Модель без коллектора соответствует разрезу осадочного чехла в условиях Ангаро-Ленской ступени. В разрезе выделено семь основных геоэлектрических горизонтов. В основании осадочного чехла лежит высокоомный (порядка 2000 Ом·м) фундамент.

Модель с наличием коллектора в подсолевом комплексе характеризуется теми же параметрами геоэлектрических горизонтов за исключением слоя-коллектора (модель 1). Проводимость пласта-коллектора, залегаю-

Разработке, созданию и применению новых технологий метода ЗСБ посвящены работы [Захаркин, 1981; Тригубович и др., 1990; Эпов и др., 1990; Эпов, Ельцов, 1992; Агафонов, Поспеев, 2001; Барсуков и др., 2002; Кондратьев и др., 2004; Агафонов, 2005].

Однако, как и прежде, в основном применяются установки с разнесенными и соосными петлями, в которых нельзя в полной мере реализовать возможности метода и воспользоваться преимуществами профильных и площадных зондирований.

Как известно [Кауфман, Морозова, 1970; Нестационарное..., 1971], в поздней стадии становления компоненты нестационарного электромагнитного поля или не зависят от разноса, или пропорциональны ему. Приведем эти зависимости для двухслойных разрезов с проводящим и изолирующим основаниями (табл. 1).

Модель 1		
№ горизонта	ρ , Ом·м	h , м
1	200	200
2	20	300
3	250	600
4	500	1100
5	1	10
6	300	500
7	2000	∞

щего на глубине 2200 м, составляет 10 См. Такие параметры являются вполне достоверными для условий крупнейшего Ковыктинского газоконденсатного месторождения.

Задача состоит в обосновании наиболее эффективного способа выделения пласта-коллектора с удельным сопротивлением 1 Ом·м и мощностью 10 м на глубине 2200 м.

ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ СРЕДЫ

Исследуем магнитное поле горизонтального электрического диполя. Положим момент диполя I_x равным $2 \cdot 10^5$ А·м и рассмотрим поведение параллельной источнику горизонтальной компоненты магнитного поля H_x при значении азимутального угла $\varphi = 45^\circ$.

На рис. 1 приведены кривые кажущегося сопротивления ρ_τ для серии разнесов 2, 4 и 6 км. Расчеты выполнены для сопоставления разрезов — содержащего и не содержащего пласт-коллектор (модель 1 и модель 2 соответственно).

№ горизонта	Модель 2	
	ρ , Ом·м	h , м
1	200	200
2	20	300
3	250	600
4	500	1100
5	300	500
6	2000	∞

Вертикальным штрихом на кривых кажущегося сопротивления отмечены точки, в которых амплитуды сигналов достигают минимального измеримого аппаратурой уровня — $H_{\text{мин}} = 10^{-5}$ А/м. Измерения на последовательности разнесов дают возможность получить продолжительную восходящую ветвь, а значит более точно определять суммарную продольную проводимость осадочной толщи и глубину до фундамента. Кривые ρ_τ продлеваются от 0.06 до 0.2 с. Магнитное поле при времени 0.2 с на разносо $r = 2$ км составляет $2 \cdot 10^{-7}$ А/м, а на разносо $r = 6$ км — $6 \cdot 10^{-6}$ А/м. Максимальное влияние коллектора имеется в зоне S и начинается с области минимума для больших разнесов. Разница по полю превышает 40 %.

Рассмотрим поведение вертикальной магнитной компоненты H_z при азимуте $\varphi = 90^\circ$. Как и для горизонтальной компоненты H_x , измерения на такой же последовательности разнесов дают возможность найти поле на более поздних временах. Времена, на которых можно измерить поле на данной последовательности разнесов, увеличиваются вдвое (рис. 2). Для данного типа разреза с учетом частотной характеристики прибора наиболее благоприятны измерения на разнесах от 2 до 6 км. Сравнение вертикальной компоненты магнитного поля H_z в разрезе, содержащем коллектор (модель 1) и без него (модель 2), показывает более чем 40%-е различие на восходящей ветви в минимуме кривой ρ_τ для больших разнесов. Отметим, что в поздней стадии вертикальная компонента магнитного поля убывает медленнее горизонтальной и превосходит ее по амплитуде. В табл. 2 приведены значения компонент поля и их отношения на временах, соответствующих области минимума кривых ρ_τ .

Рассмотрим поведение переходной характеристики, когда приемником является петля. Расчет индуцированной в приемном контуре ЭДС производился для приемника с моментом 8100 м² и азимутального угла — $\varphi = 90^\circ$.

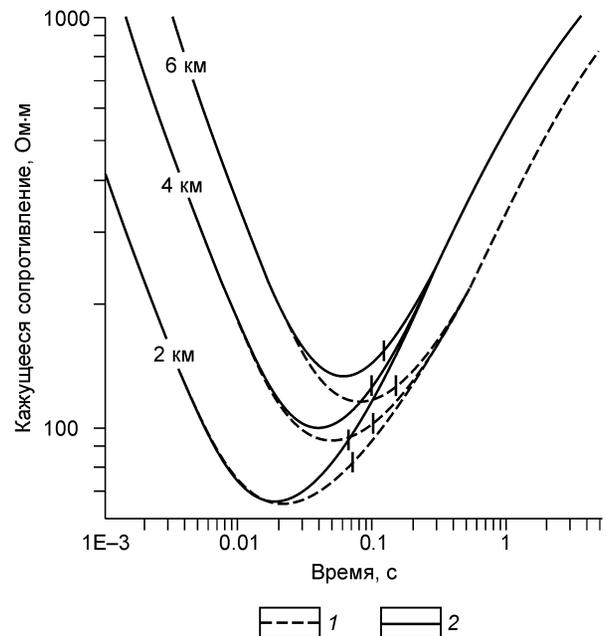


Рис. 1. Установка $I_x - H_x$.

I — модель 1, 2 — модель 2. На кривых — разнос установки. Вертикальным штрихом отмечен порог чувствительности магнитного датчика ($H_x = 10^{-5}$ А/м).

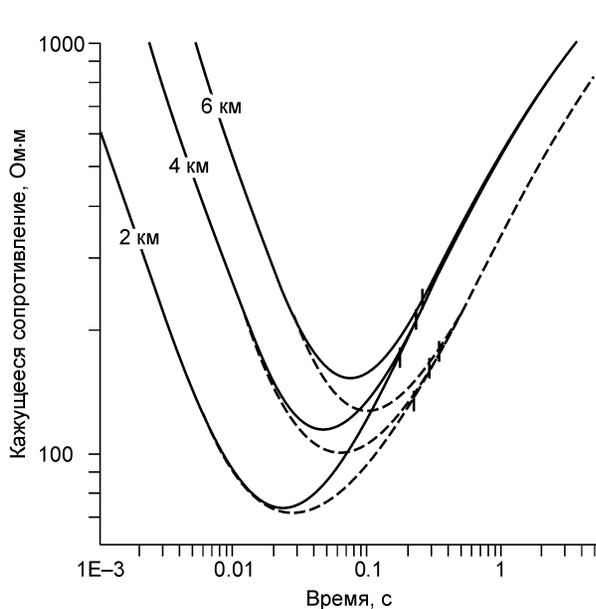


Рис. 2. Установка $I_x - H_z$.

Усл. обозн. см. на рис. 1.

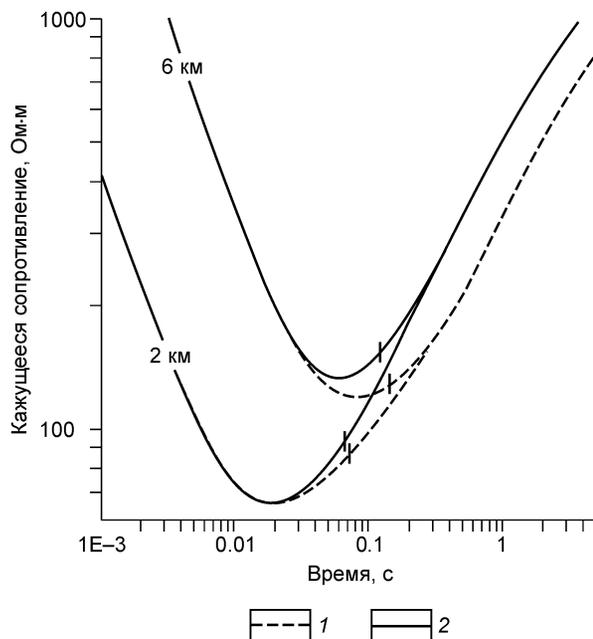


Рис. 3. Установка $I_x - H_x$.

I — модель 1, 2 — модель с погруженным пластом-коллектором.

Особенность этой установки состоит в том, что минимум кривых ρ_t отвечает области перехода от закономерностей волновой зоны, когда ЭДС убывает с расстоянием, к закономерностям поздней стадии, где ЭДС пропорциональна расстоянию. В минимуме кривых ρ_t чувствительность ЭДС к наличию пласта-коллектора мала, а на восходящей ветви ρ_t , где можно различить разрезы с коллектором и без него, малы полезные сигналы, ЭДС представляется долями микровольт.

Таким образом, для выделения глубокозалегающих пластов-коллекторов предпочтительнее измерять нестационарное магнитное поле, а не его производные.

Исследуем глубинность установки, измеряющей горизонтальную компоненту магнитного поля, при возбуждении среды горизонтальным электрическим диполем: $I_x - H_x$. С этой целью увеличим мощность толщи над коллектором за счет четвертого слоя с 1100 до 1600 м, глубина погружения коллектора при этом составит 2700 м. На рис. 3 приведены кривые ρ_t для последовательности разносов. Восходящая ветвь кривой продлевается до более поздних времен. Минимум соответствует значительным величинам поля — $2-20 \cdot 10^{-5}$ А/м. На кривых ρ_t отмечены времена, соответствующие полю 10^{-5} А/м. 30 % аномалия поля, связанная с наличием коллектора, имеется на временах, больших 0.1 с. Таким образом, при погружении коллектора на 500 м возможности его выделения сохраняются.

Понизим продольную проводимость коллектора, уменьшив его мощность до 5 м, тогда продольная проводимость коллектора $S_{кол}$ будет составлять 0.25 проводимости перекрывающей толщи $S_{перекр}$. Сравним результаты расчетов компоненты H_x для двух разрезов, представленных в таблицах (модель 1 и 3).

Модель 3		
№ горизонта	ρ , Ом-м	h , м
1	200	200
2	20	300
3	250	600
4	500	1100
5	1	5
6	300	500
7	2000	∞

Таблица 2.

t, c	H_z	H_z	H_z/H_x	H_z/H_x
	$r = 2 \text{ км}$	$r = 6 \text{ км}$	$r = 2 \text{ км}$	$r = 6 \text{ км}$
0.011	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	3.3	2.0
0.109	$4.9 \cdot 10^{-5}$	$9.6 \cdot 10^{-5}$	13.5	6.7

Таблица 3.

Компонента	t, c				
	0.011	0.021	0.041	0.079	0.10
$H_x^{(3)}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$
$H_x^{(3)}/H_x^{(1)}$	1.0	0.99	0.92	0.85	0.78

В табл. 3 приведены значения компоненты H_x в минимумах кривых ρ_τ , соответствующих измеримым уровням сигналов (см. рис. 1), и дано отношение полей в моделях с коллекторами разной мощности $H_x^{(3)}/H_x^{(1)}$ (модели 3 и 1), разнос установки $r = 6 \text{ км}$.

Как видно, минимумы кривых ρ_τ в основном соответствуют сигналам, превышающим порог чувствительности магнитометра. Отношение полей $H_x^{(3)}/H_x^{(1)}$ меняется от 1.0 на ранних временах, когда поле еще не чувствует коллектора, до 0.78 — на поздних, где $H_x^{(3)}/H_x^{(1)} = (S_2/S_1)^4 \approx 0.78$. Здесь S_1 — продольная проводимость осадочной толщи в первом разрезе, S_2 — во втором. Как следует из рис. 1 и табл. 3, 40%-е различие поля в названных разрезах наступает на временах, где поле равно или меньше чувствительности прибора.

Мы приняли момент электрического диполя $I_x = 2 \cdot 10^5 \text{ А} \cdot \text{м}$, имея в виду амплитуду тока, равную 100 А. Технически трудно обеспечить в заземленной линии ток такой величины из-за высокого сопротивления заземления. Вместе с тем, если чувствительность магнитометра равна $2.5 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}$, то используя накопление, можно обеспечить измерение полезного сигнала, равного по величине чувствительности магнитометра, что позволило бы существенно уменьшить амплитуду тока в питающей линии и минимизировать энергетические затраты при производстве электроразведочных работ.

ИНДУКТИВНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ СРЕДЫ

Рассмотрим традиционную установку с генераторной и измерительной горизонтальными петлями, т.е. чисто индуктивное возбуждение поля. При моделировании момент генераторной петли полагался равным $3.6 \cdot 10^7 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, момент приемной петли — 8100 м^2 . Расчет поля для первого и второго разрезов (модель 1 и 2) при разнесе установки $r = 1 \text{ км}$ показал, что амплитуда сигнала на времени, соответствующем минимуму кривой кажущегося сопротивления, составляет 23 мкВ. Однако влияние коллектора наблюдается только на восходящей ветви кривой, где амплитуда сигнала меньше 1 мкВ. Поле в этой установке в поздней стадии от разноса не зависит.

Пространственно-временные зондирования возможны и в том случае, когда поле возбуждается вертикальным магнитным диполем, а измеряется радиальная составляющая магнитного поля. Момент диполя примем прежним. Радиальная составляющая магнитного поля пропорциональна разносу r в поздней стадии и убывает как r^{-3} на ранних временах. Влияние коллектора прослеживается, начиная с минимума кривых ρ_τ для $r > 4 \text{ км}$. В минимуме кривой ρ_τ аномальное поле составляет 30 % при измеряемом поле более $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ А/м}$, т.е. при индукционном возбуждении поля измерение магнитного поля на последовательности разносов также может дать некоторое преимущество, либо повысить информативность измерений.

В геологическом разрезе Сибирской платформы присутствуют иногда несколько коллекторов. Рассмотрим вопрос о разделении коллекторов в геоэлектрическом разрезе при возбуждении поля электрическим диполем, регистрации горизонтальной компоненты магнитного поля и ЭДС в контуре. Расчеты проведем для двух геоэлектрических разрезов, содержащих один коллектор (модель 4) и два пласта-коллектора (модель 5).

Модель 4			Модель 5		
№ горизонта	ρ , Ом·м	h , м	№ горизонта	ρ , Ом·м	h , м
1	200	200	1	200	200
2	20	300	2	20	300
3	250	600	3	250	600
4	500	700	4	500	700
5	1	10	5	1	10
6	500	400	6	500	400
7	2000	∞	7	1	10
			8	300	500
			9	2000	∞

Задача заключается в разделении влияния двух коллекторов, расположенных на глубинах 1800 м и 2200 м, по измеренным характеристикам поля.

Информация о поведении горизонтальной компоненты магнитного поля в зависимости от разноса и числа коллекторов-пластов приведена на рис. 4. Видно, что измерения необходимо выполнять именно на последовательности разносов, малые разносы $r < 2$ км дают сведения о параметрах верхнего пласта-коллектора. В минимуме кривой ρ_τ поле не зависит от свойств нижнего пласта-коллектора. Проявления аномальной части поля, связанной со вторым пластом-коллектором, становятся больше при увеличении разноса. Значения радиальной компоненты магнитного поля на участках кривой ρ_τ в области первого и в области формирования второго минимумов также приведены на рис. 4. Во временной окрестности первого минимума кривой ρ_τ еще не выполняются закономерности поздней стадии, поэтому максимальное поле в этом временном интервале имеется на малых разносах.

Вопрос о разделении влияния на поле двух пластов-коллекторов исследуем для установки электрический диполь — горизонтальная петля. Как и прежде, электрический момент диполя $I_x = 2 \cdot 10^5$ А·м, момент приемного контура — 8100 м². Установка характеризуется высокой детальностью исследования. Влияние пластов-коллекторов проявляется в формировании двух минимумов на кривых кажущегося сопротивления при высоком уровне сигнала. В первом минимуме ЭДС равна 147 мкВ. На восходящей ветви, вблизи

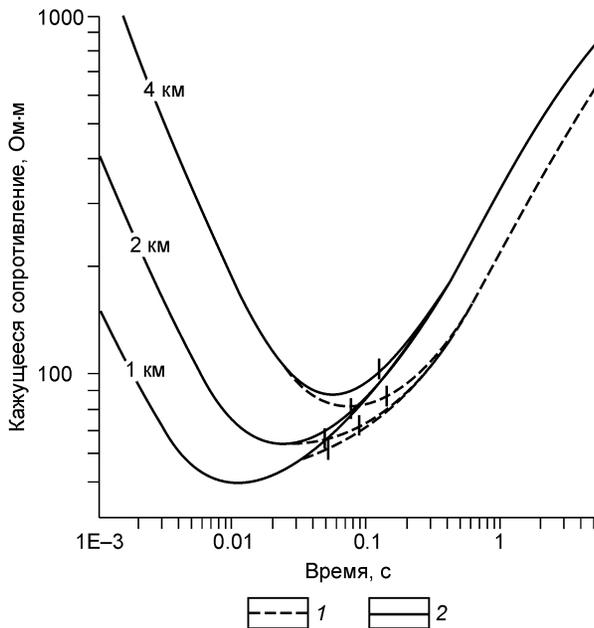


Рис. 4. Разделение влияния двух коллекторов в установке $I_x - H_x$.

1 — один коллектор, 2 — два коллектора.

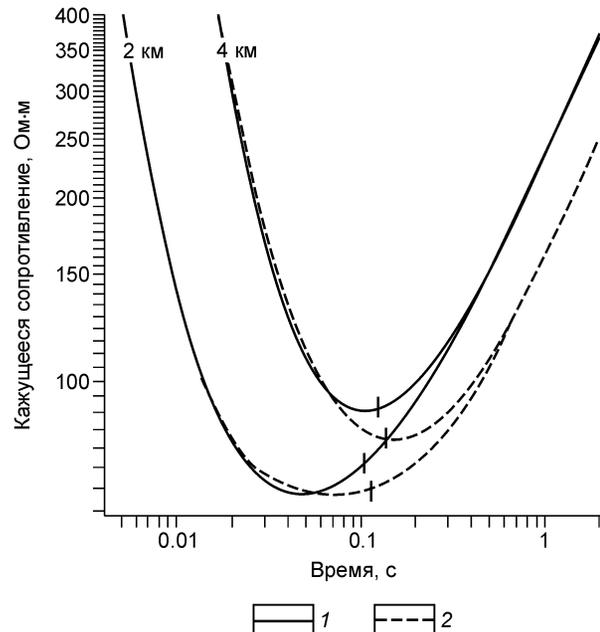


Рис. 5. Разделение влияния двух коллекторов в установке $I_x - Q$.

1 — модель 4 (один коллектор), 2 — модель 5 (два пласта коллектора).

минимума ($t < 0.3$), сигнал составляет величины от десятков до единиц микровольт (рис. 5). В соответствии с табл. 1, при увеличении разности ЭДС возрастает, но это относится к более позднему участку восходящей ветви кривой ρ_τ ($t > 0.5$ с), когда сигналы составляют доли микровольт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для установок: $I_x - H_x$, $I_x - H_z$, $I_x - \partial B_z / \partial t$, $M_z - H_r$, $M_z - H_z$ и $M_z - \partial B_z / \partial t$ средствами математического моделирования были рассмотрены следующие задачи:

- выделение пласта-коллектора при различных глубинах залегания;
- выделение пласта-коллектора при различных соотношениях его продольной проводимости и проводимости вышележащей толщи;
- разделение влияния двух коллекторов, расположенных на различных глубинах.

Численно подтверждены преимущества пространственно-временных зондирований при измерении нестационарного магнитного поля, заключающиеся в увеличении разрешающей способности и глубинности зондирований.

Показано, что это преимущество относится в наибольшей мере к полю электрического диполя. Однако заметим, что вследствие присутствия электрической моды в электромагнитном поле этого источника следует ожидать повышенного влияния неоднородностей разреза по сравнению с индуктивным возбуждением. Этот вопрос будет исследован специально на основе 3-D моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

Агафонов Ю.А. Разработка программно-измерительного комплекса для нестационарных электромагнитных зондирований на основе телеметрических систем наблюдений: Автореф. дис. ... к.т.н. Новосибирск, ФГУГП Иркутскгеофизика, 2005, 20 с.

Агафонов Ю.А., Поспеев А.В. Программно-измерительный комплекс для работ методом ЗСБ // Геофизический вестник, 2001, № 10, с. 8—11.

А.с. № 1500127 (СССР), МКИ G01V3/108. Способ электромагнитных зондирований / Морозова Г.М., Соколов В.П., Неведрова Н.Н. Оpubл. в Б.И., 1988, № 29, 274 с.

Барсуков П.О., Файнберг Э.Б., Хабенский Е.О. TEM-FAST — импульсная электромагнитная технология исследования геологических сред // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. М., ИОФЗ РАН, 2002, с. 20—21.

Захаркин А.К. Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «Цикл». Новосибирск, СНИИГГиМС, 1981, 98 с.

Кауфман А.А., Морозова Г.М. Теоретические основы метода зондирований становлением поля в ближней зоне // Новосибирск, Наука, 1970, 123 с.

Кондратьев В.А., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А., Пашевин А.М., Ольховик Е.А. Результаты применения новых технологий электромагнитных зондирований на юге Сибирской платформы // Разведка и охрана недр, 2004, № 8—9, с. 26—28.

Кротевич Н.Ф. Магнитные микровариационные измерения и аппаратура для магнитотеллурических исследований // Новосибирск, Наука, 1972, 256 с.

Мандельбаум М.М., Рабинович Б.И., Сурков В.С. Прямые геофизические методы поисков месторождений нефти и газа (на примере Сибирской платформы) // Научное наследие академика И.М. Губкина в нефтяной геологии Сибири. Новосибирск, Наука, 1980, с. 48—73.

Торопов С.М., Маньковский А.Г. Информационные системы оценки и регулирования и использования минерально-сырьевых ресурсов // Разведка и охрана недр, 2004, № 8—9, с. 36—39.

Тригубович Г.М., Захаркин А.К., Могилатов В.С. Технологический комплекс для метода переходных процессов // Электромагнитная индукция в верхней части земной коры. М., Наука, 1990, с. 155—156.

Эпов М.И., Ельцов И.Н. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. Новосибирск, 1992, 31 с. (Препринт / ОИГГМ СО РАН, № 2).

Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н. Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований. Новосибирск, 1990, 31 с. (Препринт / ИГиГ СО АН СССР, № 3).

Chwala A., Schultze V., Stolz R., Jsselsteijn R.I., Meyer H.-G., Kretzschmar D. An HTS dc SQUID system in competition with induction coils for TEM applications // Physica C, 2001, v. 354, p. 45—48.