ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

ЕЖЕКВАРТАЛЬНОЕ ОФИЦИАЛЬНОЕ ИЗДАНИЕ САРАТОВСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ ЕВРО-АЗИАТСКОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

АПРЕЛЬ-ИЮНЬ

02/2006

ТЕМА НОМЕРА:

ЭЛЕКТРО-РАЗВЕДКА

ПРОДОЛЖАЯ РАЗГОВОР



ТАКЖЕ В НОМЕРЕ:

Автономные регистраторы ряда РОСА

Методика анализа опытных вибросейсмических работ

15 лет на рынке геофизического оборудования

ИЗВЕСТНОЕ ИМЯ – ИЗВЕСТНЫЕ МАРКИ

ООО «ОЙО-ГЕО ИМПУЛЬС ИНТЕРНЭШНЛ»

Производство и продажа полевого геофизического оборудования

- сейсмоприёмники (геофоны)
- кабельная продукция
- разъёмы
- тестеры
- аксессуары
- сервисные работы
- охранные системы

НОВЫЙ СЕЙСМОПРИЕМНИК GS-30 CT

с нелинейными искажениями < 0.08 и допусками параметров ± 2%

БУКСИРУЕМЫЕ КОСЫ

с самоориентирующимися сейсмоприемниками.

РАЗЪЕМЫ ТИПА

KCL , KCK-2, LCK-2, GSC-4 (HERMA-4), РПТ-21.

СЕРВИСНЫЕ РАБОТЫ ПО РЕМОНТУ И ОБСЛУЖИВАНИЮ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Тестеры и обрывоискатели

КАБЕЛЬНАЯ ПРОДУКЦИЯ

-для телеметрических систем сбора данных

-для линейных систем с числом жил от 2 до 254





Адрес: 450001, Россия, Башкортостан, г.Уфа, ул. Кировоградская, 36
Тел. (3472)-25-39-73, факс (3472)-24-73-44.
E-mail: geoimp@ufanet.ru http:// geoimp.on.ufanet.ru



Содержание

Колонка редактора

Устремляясь вперед, не забудем о пройденном
Турлов П.А. 04

Тема номера: Электроразведка сегодня и завтра

Теория

Об основах высокоразрешающей электроразведки
Сочельников В.В. 05

Геофизические технологии

Изучение вызванной поляризации в широком диапазоне времен (ВП-Ш)
Агеев В.В., Светов Б.С., Амиантов А.С. 10

Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации
Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. 14

TEM-FAST - технология малоглубинной электроразведки
Барсуков П.О., Файнберг Э.Б., Хабенский Е.О. 28

Приборы и системы

Аэрогеофизические вертолетные платформы серии «Импульс» для поисково-оценочных иследований
Тригубович Г.М., Персова М.Г., Саленко С.Д. 18

Телеметрическое электроразведочное оборудование серии «Импульс» для 3D электроразведки на плотных пространственно-временных сетях наблюдений
Тригубович Г.М., Персова М.Г., Балыбердин А.Л. 22

Аппаратура и методика высокоразрешающей электроразведки для широкого диапазона глубин
Небрат А.Г., Федотов А.С., Федотов С.А. 26

Новые возможности современных георадаров, связанные с развитием аппаратной базы
Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В. 35

Обмен опытом

Технологии комплексных электроразведочных исследований многолетнемерзлых разрезов Ямала при решении инженерно-геологических задач
Бучарский Б.В., Бессонов А.Д., Горячев В.В., Киселев В.В. 38

Приборы и системы

Автономные регистраторы РОСА-А для высокоточных сейсмических наблюдений
Сагайдачная О.М., Сагайдачный А.В., Сальников А.С., Шмыков А.Н., Щегольков А.В. 40

Технологии обработки

Методика количественного анализа опытных работ на примере вибросейсмических работ в западном Казахстане
Закариев Ю.Ш., Марутян В.Г., Плешкевич А.Л., Рябов В.Ю., Рябошапко С.М., Цыпышев Н.Н., Мусагалиев М.З. 44

Главный редактор
Турлов П.А.

Научный редактор
Светов Б.С.

Выпускающий редактор
Пимштейн И.Г.

Менеджер проекта
Мокроусова Е.И.

Ответственный секретарь
Слонова Е.Г.

Дизайн, верстка
Мокроусов Д.В.

Адрес редакции:
Россия, 410019, г. Саратов, ул. Крайняя, 129

E-mail: turlov@skbsp.ru

Тел. (845-2) 64-14-32
Fax: (845-2) 64-14-52

Тираж отпечатан в типографии ООО "Формат"
тел.: (845-2) 238-664
Тираж: 500 экз.
Подписано в печать 24.05.06
Дата выпуска 15.06.06
Зак. № 403

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций за номером ПИ №77-7906 от 27 апреля 2001 г.

От редколлегии
Ответственность за подбор и изложение фактов в статьях несут авторы. Редколлегия может публиковать статьи, не разделяя точки зрения авторов.



КОЛОНКА РЕДАКТОРА

Устремляясь вперед, не забудем о пройденном

Турлов П.А., СО ЕАГО, г. Саратов

Читателям, полагаю, уже понятен факт появления второго журнала с той же темой, что и первый в 2006-ом году. Темой, впервые появившейся в нашем журнале - "ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА сегодня и завтра". Отдельные статьи и рекламные материалы по электроразведке публиковались на страницах журнала и раньше, но чтобы целых два номера подряд, - впервые!

Объяснить это можно не только актуальностью проблематики, но и активной позицией научного редактора выпуска Светова Б.С. и главного редактора Турлова П.А., занятой ими при формировании коллектива авторов сборника.

В предлагаемом выпуске журнала, как и в предыдущем, представлены статьи, раскрывающие все многообразие электроразведочных технологий, применяемых в геофизике, как при поисках и разведке месторождений углеводородов, так и при решении других геологических задач.

Читайте, изучайте опыт коллег, внедряйте интересные методические находки и технические решения, сообщайте нам о своих результатах, информируйте о своих достижениях - журнальные страницы в качестве трибуны вам обязательно будут предоставлены.

Наш журнал, анализируя сегодняшний день, все-таки нацелен на будущее, на перспективы развития геофизики. Однако есть вопросы, о способах решения которых мне бы хотелось посоветоваться с Вами, дорогой читатель.

Многие из вас проявили интерес к рубрике нашего журнала "Страницы истории", которую постоянно и успешно наполняет материалами Зайченко В.Ю. А публикация в одном из номеров статьи Архипова А.А. даже помогла восстановить приоритет российских исследователей в решении важной методической задачи. Таким образом редакция пытается разрушить складывающийся в умах общественности стереотип россиянина как Ивана, не помнящего родства. В продолжение этого предлагается идея создания при редакции нашего журнала виртуального геотехнического музея, в котором можно коллекционировать буквально крупицы богатого вклада в развитие геофизического инструментария и сохранить следы творческой деятельности российских геофизиков-прикладников для потомков.

Без вашего участия в сборе фото-, видео- и кино-материалов, а также книжной, статейной инфомации, документов, без ваших воспоминаний о годах творчества, делах, которые создали славу российской науке, без воспоминаний о людях, творивших историю геофизики, никак невозможно реализовать предлагаемую идею. Поэтому я призываю всех читателей журнала (читателей, а не только подписчиков!) поддержать это начинание и принять самое активное участие в его воплощении.

Успехов, удачи, здоровья!

Всегда Ваш
главный редактор П.А.Турлов

НАШИ ПАРТНЕРЫ

ЕАГО

OYO-GEO IMPULSE INTERNATIONAL

СИБГЕОТЕХ

ЗАО «СОЕДИНИТЕЛЬ»

СНИИГГиМС

PHOENIX GEOPHYSICS

ГАЗСНАБИНВЕСТ

ЛОГИС

Центральная геофизическая экспедиция ЦГЭ

GEOSES

Об основах высокоразрешающей электроразведки

Сочельников В.В., Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Геленджик

Введение

В 1967-69 гг. Сидоровым В.А. и Тикшаевым В.В. введен в практику метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) [1]. Уже первые исследования показали, что запись становления электромагнитного поля осложняется осцилляциями, которых по используемым в то время моделям среды и теории не должно было быть. Применение временного и пространственного накопления с компьютерными способами регистрации и обработки резко повысило точность получения переходных характеристик [2,3]. В этой связи значительно повысился интерес к неклассическому поведению этих характеристик, осложненных заметными осцилляциями с нарушением монотонности и, иногда, со сменой знака.

Особенно большой объем материалов получен в морской электроразведке, где измерения проводятся непрерывно на ходу судна и достигается высокая степень накопления и корреляция осцилляций.

Попытки объяснения аномальных процессов развивались в двух направлениях: осцилляции за счет влияния токов смещения, в частности, эффекта Максвелла-Вагнера, и за счет частотной зависимости комплексной проводимости из-за влияния вызванной поляризации (ВП). Можно предложить еще три эффекта, приводящих к осцилляциям переходных характеристик: изменение закона зависимости ВП от времени, индукционная вызванная поляризация (ИВП), вторичный сейсмоэлектрический эффект (ВСЭЭФ). Рассмотрим эти эффекты в перечисленном порядке.

1. Влияние токов смещения

Одно из объяснений осцилляций связывается с влиянием диэлектрической проницаемости, соизмеримым или превышающим влияние электропроводности. Особое внимание при этом уделяется средам с чередующимися тонкими высокоомными слоями [4], создающими эффект Максвелла-Вагнера.

Наиболее полным исследованием по изучению собственно диэлектрической проницаемости является работа R. Alvarez [5]. Она посвящена методике измерения диэлектрической проницаемости ε в образцах, имеющих конечную проводимость σ. Образцы помещаются между металлическими токовыми пластинами и измеряется емкость на переменном токе по отношению к емкости на постоянном токе. При этом доля вклада токов смещения в общий ток на низкой частоте мала и определяется с большими погрешностями. R.Alvarez предлагает помещать между токовой пластиной и образцом материал, представляющий собой почти совершенный диэлектрик, т.е. с пренебрежимо малой электропроводностью. Это существенно уменьшает долю токов проводимости и снижает погрешность измерения.

Возникающий в эксперименте эффект Максвелла-Вагнера (накопление свободных зарядов на границе разрыва) учитывается рассмотрением уравнений Максвелла. Однако оценка влияния токов смещения на результаты становления поля должна проводиться общепринятым способом на основании тех же уравнений Максвелла [6]. Например, время релаксации свободного объемного заряда, возникающего за счет токов смещения в первый момент установления поля, даже для такого диэлектрика, как нефть ($\varepsilon=30\varepsilon_0$, $\sigma=10^{-8}$ Ом·м), составляет 0,01 с. Таким образом, через 0,01 с заряд практически исчезает.

В работе [4] рассматривается влияние эффекта Максвелла-Вагнера для тонких высокоомных слоев с удельным сопротивлением $\rho=10^8$ Ом·м и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=30\varepsilon_0$, часто чередующихся со слоями с гораздо меньшим удельным сопротивлением. Проводится осреднение комплексной электропроводности, учитывающей диэлектрическую проницаемость, $\breve{\sigma}=\sigma-i\omega\varepsilon$. Влияние токов смещения для среды с трещиноватостью 0,01% отмечается при $t < 3$ с. Однако, в этом случае, как можно оценить отмеченным выше способом, токи смещения в самом тонком высокоомном слое превышают 15% от токов проводимости. Поэтому и не удивительно их влияние при осреднении.

Кроме того, эффект Максвелла-Вагнера и соответствующее ему существенное увеличение мнимой части электропроводности возникает только при протекании тока ортогонально слоям. Нетрудно показать, что протекание тока в поперечном направлении для принятых параметров слоев практически невозможно [7].

Выводы:

- реализация эффекта Максвелла-Вагнера, приводящего к резкому увеличению влияния диэлектрической проницаемости, в практических геофизических условиях маловероятно;
- в любом случае токи смещения при осреднении начинают играть роль тогда, когда это явление уже имеет место в отдельном слое.

2. Влияние вызванной поляризации

Реальным фактором, искажающим переходные характеристики, по-видимому, является вызванная поляризация. Дополнительная величина напряженности электрического поля за счет ВП на поверхности наблюдения направлена в ту же сторону, что и первичное электрическое поле [8-10]. Электрическое поле становления при выключении тока направлено между электродами AB в противоположную сторону, а на линии, соединяющей эти электроды, но вне их - в ту же сторону, что и постоянное электрическое поле и поле ВП [1]. Поэтому при выключении тока поле становления вне электродов имеет тот же знак, что и поле ВП, а между электродами - противоположный.

2.1. Изменение закона зависимости ВП от времени.

Можно предложить еще одну возможность объяснения аномальных эффектов переходных характеристик, не выводящую за пределы обычных представлений геоэлектрики. Такая возможность высказана, например, в работе [11]. Это - влияние токов ВП, направленных против токов становления (например, между AB), что может приводить к смене знака регистрируемой характеристики, или, по крайней мере, к появлению минимума.

Известно, что характер спада ВП со временем изменяется: начальная стадия до момента t_0 происходит по экспоненте $\eta\exp(-\alpha t)$ с бо́льшим коэффициентом α, чем в окончной стадии [10]. Здесь η - поляризуемость среды. Учет этого факта может привести к появлению осцилляций на переходной характеристике [12].

Действительно, если ограничиться однородным полупространством, то для установки AMNB в

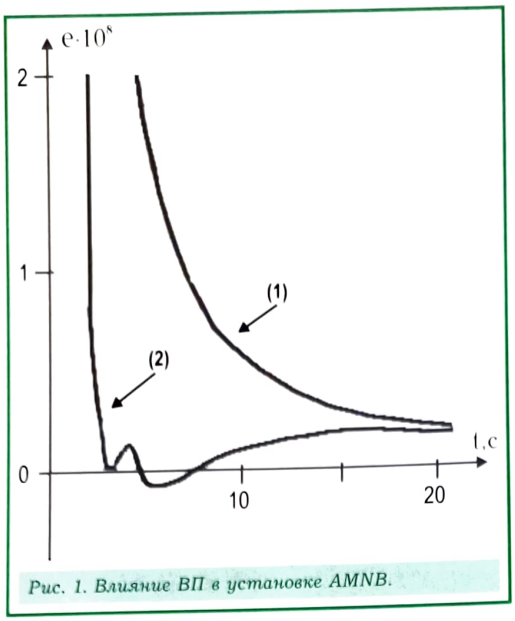


Рис. 1. Влияние ВП в установке AMNB.

режиме выключения питающего тока имеем простые формулы для электрического поля становления E_c и электрического поля $E_{вп}$ [13], которые можно выразить через безразмерные величины e_c и $e_{вп}$:

$$E_c = \frac{I\rho}{\pi L^2} e_c,$$

$$E_{вп} = \frac{I\rho}{\pi L^2} e_{вп}.$$

Здесь: I - сила тока, ρ - удельное электрическое сопротивление, $L = AB/2$ - разнос.

На рис.1 приведены графики e_c (кривая 1) и $e_c+e_{вп}$ (кривая 2) для установки, применяемой в морской электроразведке с L = 750 м при ρ= 3 Ом·м, t_0= 3,6 с, η= 1,5%, α_1=0,53 с$^{-1}$, α_2=0,27 с$^{-1}$. На рисунке отчетливо видны осцилляции на суммарной переходной характеристике, включающие два максимума и два минимума, а также смену знака с плюса на минус и обратно. Очевидно, если учесть изменение коэффициента несколько раз, можно получить большее число осцилляций, не прибегая к учету мнимой части электропроводности за счет ВП или токов смещения.

Однако в случае дипольной установки представленный эффект отсутствует, т.к. сигналы ВП и становления поля складываются.

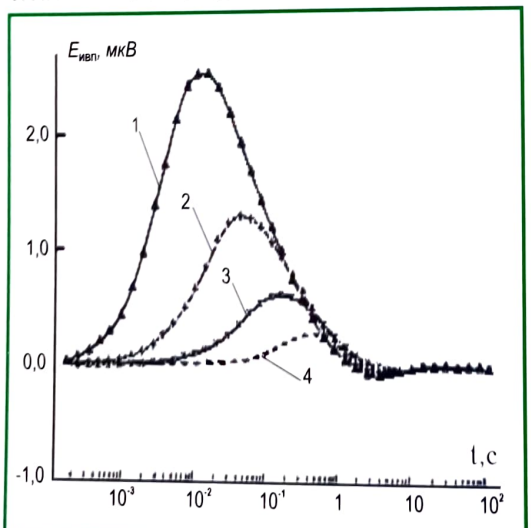


Рис. 2. Кривые э.д.с. для дипольной установки и однородного полупространства.
1-r=325 м, 2-r=650 м, 3-r=1300 м, 4-r=2600 м.

2.2. Индукционная вызванная поляризация.

Для удельного электрического сопротивления в связи с влиянием ВП можно записать выражение [10]

$$\rho(t) = \rho[1 + \eta\varphi(t)],$$

где $\varphi(0)$=1, $\varphi(\infty)$=0 (режим выключения).

При преобразовании этого соотношения в частотную область возникает комплексный характер сопротивления, которым во многих работах объясняются искажения временных характеристик [14-16]. В теоретическом анализе рассматривались осцилляции суммарной переходной характеристики. Так как ВП пропорционально поляризуемости, этот эффект становится заметным при η ~10%. Такие большие значения поляризуемости могут быть свойственны только рудным месторождениям, тогда как в осадочных породах значение не превышает 2-3 % [9].

Интересно поэтому провести анализ становления поля над поляризующейся средой, попытавшись разделить суммарный переходный процесс на составляющие: становление, ВП и т.н. индукционную вызванную поляризацию (ИВП).

В результате процесса установления электрическое поле в проводящей среде после включения или выключения источника изменяется не резко, а плавно [13]. Чем больше глубина залегания слоя, тем позже наступают изменения. Возникает дополнительный источник вызванной поляризации, что приводит к ее изменению: она вначале растет по абсолютной величине, а затем по мере затухания дополнительного источника убывает. Так возникает индукционная вызванная поляризация. Причем, чем больше глубина залегания поляризующегося слоя, тем на более поздних временах будет проявляться этот слой в поле ИВП.

Так как коэффициент поляризации обычно много меньше единицы (η<<1), переходную характеристику удается представить в виде суммы трех процессов: становления, ВП и ИВП [17]:

$$g(t) = g_c(t) + g_{вп}(t) + g_{ивп}(t).$$

Числовые оценки явления ИВП рассмотрим на примере дипольной установки над однородным полупространством и над тонким слоем в случае простейшей зависимости ВП от времени $\varphi(t) = e^{-\alpha t}$.

На рис. 2 представлены кривые сигнала $E_{ивп}$ для дипольной установки с произведением моментов питающего и приемного диполей $I{\cdot}AB{\cdot}MN$=8·10^{9}Ам^2. Установка расположена на поверхности однородного полупространства с параметрами: ρ=3 Ом·м, η=0,01, α=0,5с$^{-1}$ для значений разноса r = 325, 650, 1300 и 2600 м. Из рассмотрения кривых видно, что величина $E_{ивп}$ с ростом времени t растет, достигает максимума и, убывая, достигает отрицательного минимума, а затем стремится к нулю. При разносах $r \le$ 650м величина э.д.с. ИВП в максимуме превышает 1мкВ, т.е. эффект ИВП вполне доступен измерениям с современной аппаратурой.

Пусть теперь электрический диполь с моментом Il располагается на высоте h над параллельной ему горизонтальной плоскостью с продольной проводимостью S. Величину $E_{ивп}$ на оси диполя можно представить через безразмерную величину $e_{ивп}$ в виде [17]:

$$E_{ивп} = \frac{Il}{16\rho Sh^2}\eta e_{ивп}.$$

На рис. 3 представлены графики зависимости $e_{ивп}$ от $\tau = t/2\mu_0 Sh$ ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$Гн/м) для фиксированных значений $\beta = 2\alpha\mu_0 Sh$ и относительного разноса r/h. Как и в случае однородного полупространства, величина $e_{ивп}(\tau)$ растет с ростом τ, достигает максимума, затем, убывая, достигает отрицательного минимума и стремится к нулю. Величина максимума тем больше, чем больше параметр β и уменьшается с увеличением разноса r/h.

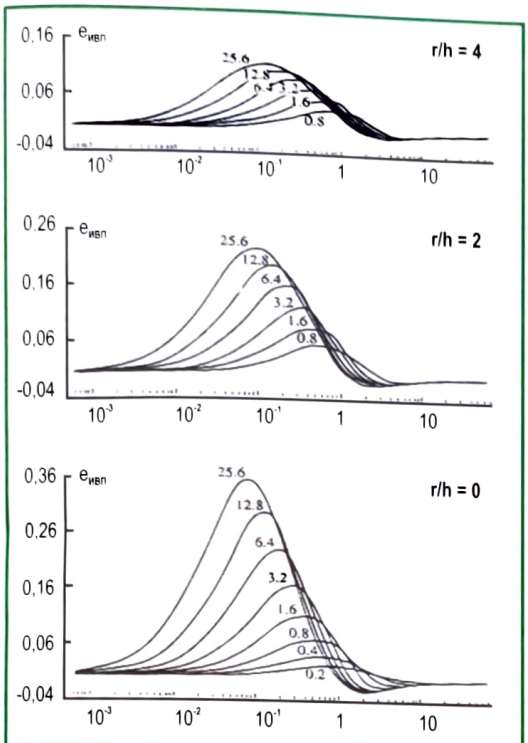


Рис. 3. Кривые $e_{ивп}$ для S-плоскости. Шифр кривых $\beta=2\alpha\mu_0 Sh$.

Выводы:

• явление ИВП может быть реальным фактором возникновения осцилляций до n мкВ на переходных характеристиках, поэтому метод ЗСБ-ИВП вполне пригоден для поисков залежей углеводородов, отличающихся, как правило, повышенной поляризуемостью η, которой пропорционален эффект ИВП [18];

• нормированные характеристики ИВП зависят от параметра $\tau=t/2\mu_0 Sh$, т.е. осцилляции ИВП "расплываются" во времени по мере увеличения глубины h (рис.3); таким образом, видимый период осцилляций ИВП увеличивается с глубиной, однако, видимый период большинства осцилляций, наблюдаемых на практике, мало зависит от глубины.

3. Сейсмоэлектрический эффект

Различают два вида сейсмоэлектрического эффекта, возникающего во влажных горных породах: прямой и обратный [19]. Прямой сейсмоэлектрический эффект по своей физической природе является аналогом потенциала протекания, обратный - аналогом электроосмоса [20]. Оба эффекта связаны с наличием двойного электрического слоя на границе твердой и жидкой фаз. Они обусловлены перемещением зарядов в жидкой фазе под воздействием упругих колебаний, что приводит к появлению электрического поля (прямой сейсмоэлектрический эффект), или перемещением зарядов под воздействием электрического поля, что вызывает упругие колебания (обратный сейсмоэлектрический эффект).

3.1. Прямой сейсмоэлектрический эффект.

Зарегистрированный в практике опытных исследований сейсмоэлектрический эффект по амплитуде достигает величин от 1 до *n* мВ. Предложено применение этого эффекта для непосредственного выделения горных пород и руд с различными электрокинетическими свойствами, а также для разработки вспомогательного для сейсморазведки электрического метода регистрации упругих колебаний [21].

Поэтому представляет несомненный интерес провести теоретическую оценку этого эффекта с целью применения его в указанных направлениях, а также для выяснения его влияния на переходные характеристики становления электромагнитного поля в результате упругого удара при резком включении или выключении электромагнитного источника [22].

Пусть сверху вниз распространяется продольная сейсмическая волна. При этом продольные колебания частиц породы происходят по гармоническому закону $\bar{u}_0=\bar{u}\sin\omega t$.

Слоистость среды будем предполагать горизонтальной. Рассмотрим уединенный горизонтальный капилляр толщиной r (рис.4). Под действием вертикальной составляющей смещения $\bar{u}_0$ капилляр сжимается и разжимается, в результате чего возникает движение жидкости, скорость которого можно оценить. Это приводит к относительному избытку или недостатку первичных зарядов на твердых непроводящих стенках. Усредненная по породе амплитуда плотности зарядов оценивается по формуле [23]:

$$\delta=\frac{4\kappa\sigma\bar{u}}{r^2}, \qquad (1)$$

где κ - коэффициент пористости породы, σ - поверхностная плотность зарядов в капилляре.

В соответствии с [24]:

$$r=\frac{4}{7\cdot10^{-3}}\sqrt{\frac{k_д}{\kappa}},$$

где $k_д$ - коэффициент проницаемости породы, выраженный в Дарси.

Подставляя это выражение в (1), получаем и такую формулу для плотности зарядов при сейсмоэлектрическом эффекте:

$$\delta=\frac{49}{4}\frac{\kappa^2}{k_д}\sigma\bar{u}\cdot10^6. \qquad (2)$$

Формула (2) показывает, что сейсмоэлектрический эффект прямо пропорционален квадрату пористости κ^2, поверхностной плотности зарядов σ в двойном слое и амплитуде смещения упругих колебаний $\bar{u}$ и обратно пропорционален проницаемости $k_д$.

В нашей работе [23] проведена оценка электрического потенциала, создаваемого горизонтальным электрически активным слоем мощностью H_0, расположенным на глубине H в однородном полупространстве. Сейсмический источник располагается на поверхности среды. Для численных расчетов выбраны следующие значения параметров: $H_0=0{,}1$ м, $H=2$ км, $\sigma=0{,}01$ Кл/м^2 [20], $u_0=10^{-4}$мкм в пересчете на 100 г заряда и расстояние 1 км [25]. В результате получены следующие значения потенциала U в точке расположения источника для двух практических случаев [24]:

- высокопродуктивные коллекторы ($k_д=1$ Дарси, $\kappa=0{,}2$), $U=0{,}6$ мВ;
- практически непродуктивные породы ($k_д=10^{-2}$ Дарси, $\kappa=0{,}1$), $U=15$ мВ.

Как видим, эти оценки по порядку величин хорошо согласуются с натурными результатами [21].

Пусть теперь возбуждение упругой волны производится за счет резкого включения или выключения тока в питающей электрической установке. Возбуждающее электрическое поле вблизи электрода на расстоянии R оценивается по известной формуле:

$$E=\frac{I\rho}{2\pi R^2},$$

где I - сила тока, ρ - удельное электрическое сопротивление.

Для условий моря можно положить: $\rho=0{,}3$ Ом·м, $I=200$ А. Тогда $E=10$ В/м на расстоянии 1 м. Это возбуждающее поле в силу обратного сейсмоэлектрического эффекта вызывает механическое напряжение [19]:

$$T_{СГФ}=K_{эм}E, \qquad (3)$$

где коэффициент электромагнитной связи $K_{эм}$ имеет порядок 10^{-3} Н/Вм. С учетом того, что электродов

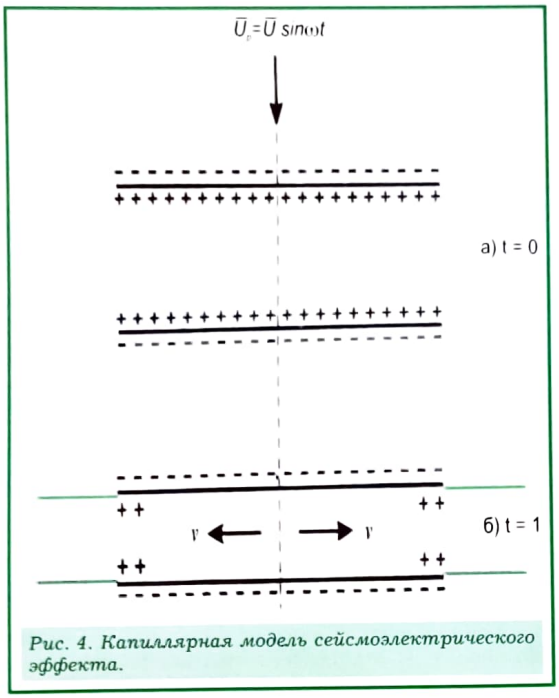


Рис. 4. Капиллярная модель сейсмоэлектрического эффекта.

два, имеем оценку:

$$T_{СЭФ}=2\cdot10^{-2}\text{Н/м}^2.$$

Давление T_c вблизи морского сейсмического источника, эквивалентного 100 г тротила, имеет порядок 10^5Н/м^2 на расстоянии 1 м [26]. Таким образом, электрический удар вызывает сейсмическую волну с интенсивностью, пропорциональной отношению $T_{СЭФ}/T_c=2\cdot10^{-7}$.

Соответственно, будем иметь следующие оценки потенциала для двух рассмотренных выше случаев:

-высокопродуктивные коллекторы, $U=1{,}2\cdot10^{-4}$ мкВ;

-практически непродуктивные породы, $U=1{,}3\cdot10^{-2}$ мкВ.

Такие сигналы практически не могут быть зарегистрированы в процессе становления поля.

Выводы:

- теоретические оценки прямого сейсмоэлектрического эффекта находятся в хорошем согласии с результатами натурных измерений, что подтверждает возможность его использования при геофизических исследованиях;
- сейсмоэлектрический эффект прямо пропорционален квадрату пористости, поверхностной плотности зарядов в двойном слое, амплитуде смещения упругих колебаний и обратно пропорционален проницаемости;
- при проведении исследований методом становления электромагнитного поля сейсмоэлектрический эффект за счет возбуждения упругих колебаний электрическим ударом практически не может наблюдаться.

3.2. Вторичный сейсмоэлектрический эффект.

Предыдущий анализ свидетельствует о том, что ни один из рассмотренных эффектов не дает полного теоретического объяснения осцилляциям на кривых становления электромагнитного поля. Как показывает практика, видимый период большинства осцилляций мало зависит от времени наблюдения (глубины), осцилляции хорошо коррелированы по профилю наблюдения и отражают тонкую внутреннюю структуру геологических разрезов; глубина залегания соответствующих им границ удовлетворительно определяется соответствующими формулами становления электрического поля над S-плоскостью [17].

Установлено, что большинство сейсмических отражений связано с перерывами осадконакопления [27]. Эти перерывы приводят к наличию тончайших прослоев, отделяющих соседние эпохи осадконакопления. Прослои наглядно проявляются в новых модификациях геофизических исследований в скважинах: акустическое телевидение, микронакалонометрия, микрорезистивиметрия [28]. Полученные результаты привели к пересмотру эффективных моделей в сейсморазведке [27].

В работе [28] предложен новый элемент геоэлектрической модели - граница формационного объекта, т.е. перерыва осадконакопления. В соответствии с [27] это специфическое геологическое тело характеризуется большой протяженностью (от сотен метров до сотен километров), упорядоченностью микронапластований, малой мощностью (от нескольких микрон до метра), высокой флюидонасыщенностью порового пространства.

Для нашего исследования особенно важны две последние особенности, показывающие, что радиус пор может достигать 1 мкм, а повышенная влагонасыщенность может увеличить поверхностную плотность зарядов двойного слоя. Коэффициент электромеханической связи в формуле (3) обратно пропорционален квадрату радиуса пор [19]. В соответствии с формулой (1) вторичный электрический эффект прямо пропорционален плотности зарядов двойного электрического слоя и обратно пропорционален квадрату радиуса пор. Все это может привести к резкому увеличению вторичного электрического сигнала, возбуждаемого за счет обратного сейсмоэлектрического эффекта.

Как известно [23], наибольший электрический эффект возникает за счет поперечных сейсмических напряжений. Поперечные напряжения, в свою очередь, наибольшие при возбуждении за счет горизонтальной составляющей электрического поля [19]. Поэтому для приближенных оценок рассмотрим горизонтальную составляющую электрического поля диполя Il в момент его выключения непосредственно под диполем, расположенным на поверхности полупространства с удельным электрическим сопротивлением ρ:

$$E=\frac{I\rho l}{\pi R^3}.$$

Возбуждающее электрическое поле в соответствии с (3) вызовет поперечное напряжение:

$$T_{СЭФ}=\frac{I\rho l}{\pi R^3}K_{ЭМ}.$$

Ему будет соответствовать поперечное смещение с амплитудой [26]:

$$\bar{u}=\frac{T^2}{4\pi^2\delta_п}\frac{\partial T_{СЭФ}}{\partial z},$$

где T - период осцилляций, $\delta_п$ - плотность породы.

В нашем случае с учетом малости толщины границы h по сравнению с глубиной залегания H ($h,z<<H$) имеем:

$$\bar{u}=\frac{3I\rho lK_{ЭМ}HT^2}{4\pi^3\delta_п}\cdot\frac{1}{R^5}.$$

Поперечные колебания пор вызывают появление "вторичных" зарядов с плотностью (1), т.е.

$$\delta=\frac{3I\rho lk\sigma K_{ЭМ}HT^2}{\pi^3r^2\delta_п}\cdot\frac{1}{R^5}.$$

Описанное явление можно назвать вторичным сейсмоэлектрическим эффектом (ВСЭЭФ). Потенциал, создаваемый в месте расположения возбуждающего диполя, можно оценить так же, как в предыдущем разделе. В итоге с учетом малости толщины границы h находим:

$$U=\frac{6Il\rho hk\sigma K_{ЭМ}T^2}{2\pi^2r^2\delta_п H^3}. \quad (4)$$

Оценим величину потенциала по формуле (1), положив в соответствии с приведенными выше рассуждениями: ρ=3 Ом·м, l = 200 А, l = 100 м, h = 0,1 м, κ=0,1, σ =0,01 Кл/м^2, $K_{эм}$= 0,1 Н/Вм, r = 10 мкм, H = 2000 м, T = 0,25 с, δ_n=2,5·10^3 кг/м^3. В итоге получаем оценку U = 5 мкВ, т.е. значение электрического сигнала за счет вторичного сейсмоэлектрического эффекта вполне измеримо при регистрации переходной характеристики в методе ЗСБ.

Выводы:

- из всех рассмотренных эффектов наиболее вероятными для объяснения осцилляций на переходных характеристиках следует считать индукционную вызванную поляризацию ИВП и вторичный сейсмоэлектрический эффект ВСЭЭФ;
- экспериментальные материалы показывают, что процесс становления сопровождается, по крайней мере, двумя видами осцилляций: первый, относительно низкочастотный (0,2 - 2 Гц), растекающийся во времени (рис. 5 а, б, в) и второй, более высокочастотный (2 - 20 Гц), с практическим сохранением частоты за полное время регистрации до 10 - 15 с (рис. 5 г);
- с точки зрения проведенных теоретических исследований низкочастотные осцилляции обусловлены эффектом ИВП, а высокочастотные - вторичным сейсмоэлектрическим эффектом ВСЭЭФ.

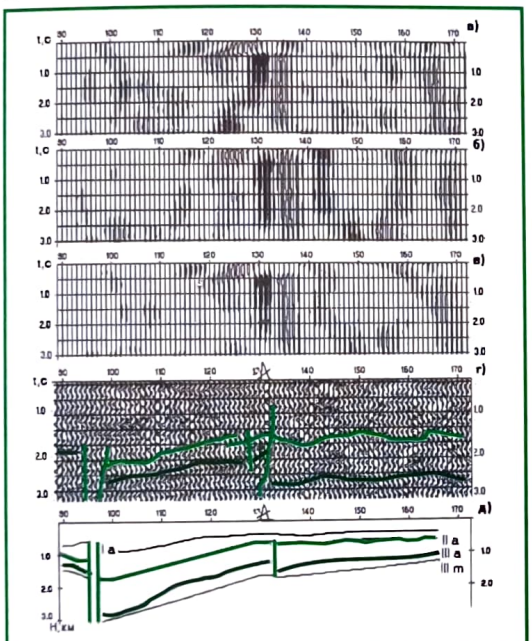


Рис. 5. Пример выделения с помощью относительно низкочастотных осцилляций ИВП прямого эффекта от залежи УВ (структура Одесская,Черное море):
а) - дипольная установка, б) - симметричная, в) - сумма а) и б);
а с помощью относительно высокочастотных осцилляций ВСЭЭФ - получение временного геоэлектрического разреза
г) - в сравнении с сейсмогеологическим
д) - глубинный разрез.

Заключение

Теоретический анализ влияния токов смещения, в частности эффекта Максвелла-Вагнера, влияния ВП и сейсмоэлектрических эффектов показал, что наиболее вероятными для объяснения осцилляций на переходных характеристиках следует считать индукционную вызванную поляризацию ИВП и вторичный сейсмоэлектрический эффект ВСЭЭФ.

Обширные морские экспериментальные материалы показали, что процесс становления сопровождается, по крайней мере, двумя видами осцилляций: относительно низкочастотный тип (0,2 - 2 Гц), растекающийся во времени, и более высокочастотный тип (2 - 20 Гц) с практическим сохранением частоты за все время регистрации.

С точки зрения проведенных теоретических исследований низкочастотные осцилляции обусловлены эффектом ИВП, а высокочастотные - вторичным сейсмоэлектрическим эффектом ВСЭЭФ. Запатентован метод высокоразрешающей электроразведки, включающий комплекс ЗСБ-МТЗ-ИВП-ВСЭЭФ [29]. Разрешение метода сопоставимо с сейсморазведкой.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение моделей негоризонтально-слоистых сред и на разработку практических способов определения параметров вызванной поляризации, пористости и проницаемости, входящих в теоретические оценки активного слоя.

Литература

1. Сидоров В.А., Тикшаев В.В. Электроразведка зондированиями становлением поля в ближней зоне. Саратов, НВНИИГГ, 1969.
2. Тикшаев В.В. Метод зондирования становлением электромагнитного поля с использованием пространственного накопления. Известия АН СССР. Физика Земли, 1984, N3, с.81-88.
3. Небрат А.Г. Индуктивное возбуждение вызванной поляризации горных пород при прямых поисках месторождений нефти и газа. Вестник Московского у-та. Сер.4, Геология, 1990, N5, с.67-70.
4. Губатенко В.П. Эффект Максвелла-Вагнера в электроразведке. Известия АН СССР. Физика Земли, 1991, N5, с.88-98.
5. Alvarez R. Complex dielectric permittivity in rocks: A method for its measurement and analisis. Geophysics, 1973, Vol.38., N5, p920-940.
6. Альпин Л.М. Теория поля. М.: Недра, 1966.
7. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965, 109с.
8. Жданов Л.С., Мараңджян В.А. Курс физики. т2. М.: Наука, 1966, 608с.
9. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980, 392с.
10. Заборовский А.И. Электроразведка. М.: Гостоптехиздат, 1963, 423с.
11. Молчанов А.А., Сидоров В.А., Николаев Ю.В., Яхин М.М. Новые типы переходных процессов при электромагнитных зондированиях. Известия АН СССР. Физика Земли, 1984, N1, с. 100-103.
12. Сочельников В.В.К вопросу об осцилляции переходных характеристик при электромагнитных зондированиях. Физика Земли, 1993, N7, с.83-84.
13. Шейнман С.М. Об установлении электромагнитных полей в земле. Прикладная геофизика, 1947, вып.3, с. 3-55.
14. Каменецкий Ф.М., Тимофеев В.М. О возможности разделения индукционного и поляризационного эффектов. Известия АН СССР. Физика Земли, 1984, N12, с.89-94.
15. Мезенцев А.Н. Осцилляции переходных характеристик поля поляризующихся объектов. Известия АН СССР. Физика Земли, 1985, N 9, с. 103-105.
16. Тикшаев В.В., Лепешкин В.П., Глечиков В.А. Неустановившееся электромагнитное поле в слоистой среде с учетом частотной дисперсии электропроводности. Известия АН СССР. Физика Земли, 1987, N 9, с. 47-54.
17. Сочельников В.В., Небрат А.Г., Попович С.В., Кондюрин А.В. Теория и практические возможности метода ЗСБ-ИВП при поисках нефти и газа. Физика Земли, 1994, N 6, с.56-67.
18. Яневич М.Ю. Индуктивное возбуждение вызванной поляризации горных пород применительно к задаче прямых поисков месторождений нефти и газа. Деп. N 1843-85, с. 22.
19. Полякова Т.А., Черняк Г.А. О некоторых особенностях сейсмоэлектрического эффекта в маловлажных осадочных породах. Деп. N 601-84, с.35.
20. Электрокинетические свойства капиллярных систем. М.-Л., изд-во АН СССР, 1956, 352 с.
21. Нейштадт Н.М., Мазанова З.В., Суворов Н.Д. Сейсмо- и пьезоэлектрические явления в разведочной геофизике. С. Петербург: Недра, 1992, 63с.
22. Алексеева Л.П., Попов Ю.Н., Терехин Е.И. Некоторые особенности кривых зондирования становлением электромагнитного поля. Прикладная геофизика, 1977, вып.88, с.57-62.
23. Сочельников В.В., Небрат А.Г. Теоретические оценки сейсмоэлектрического эффекта и его влияния на переходные характеристики становления поля. Геофизика, N 2, 1997, с. 28-38.
24. Кобранова В.Н. Физические свойства горных пород. М.: Наука. Гостоптехиздат, 1962, 490с.
25. Галкин И.Н. Построение сейсмической модели земной коры. М.: Наука, 1972, 123с.
26. Сейсморазведка. Справочник геофизика. Под ред. В.П. Номоконова. Книга первая. М.: Недра, 1990, 336с.
27. Мушин И.А., Погожев В.М., Макаров В.В. Сейсмические отображения перерывов осадконакопления. Прикладная геофизика, 1995, вып. 129, с. 3-24.
28. Мушин И.А., Сафонов А.С. Геологические предпосылки создания структурно-формационных моделей в сейсмо- и электроразведке. Доклад на международной конференции "Неклассическая геоэлектрика". Саратов, 1995.
29. Игнатов А.М., Сочельников В.В. Система непрерывной морской электроразведки. Св. на полезную модель №17811 от 27.04.01. БИПМ, №12, 2001.

Изучение вызванной поляризации в широком диапазоне времен (ВП-Ш)

Агеев В. В., Светов Б. С., Амиантов А.С., Центр геоэлектромагнитных исследований ИФЗ РАН, г. Москва

При изучении реальной геологической среды геофизическими методами представляет интерес получить не только ее усредненные физические параметры (например, электропроводность), но и петрофизическую характеристику (например, сведения о пористости, проницаемости, флюидонасыщенности и др.). Такую возможность предоставляют методы, изучающие поля, возникающие непосредственно в горных породах в результате происходящих в их поровом пространстве различных физических и физико-химических процессов. К таким методам, в частности, относятся методы вызванной поляризации (ВП) и сейсмоэлектрики (СЭ). Вторичные электрические поля, изучаемые в этих методах, возникают в горных породах под действием приложенного к ним первичного электрического или упругого поля. В этой статье мы рассмотрим технологию и аппаратуру метода ВП, разработанную для решения подобных задач.

Хотя характер электрокинетических процессов в горных породах, приводящих к появлению ВП, в основных чертах, изучен и существование ее зависимости от таких петрофизических параметров, как пористость, проницаемость, флюидонасыщенность не вызывает сомнений, построение строгой теории самого явления в силу чрезвычайно сложного и разнообразного строения горных пород вряд ли возможно. По-видимому, основные надежды установления таких зависимостей приходится возлагать на лабораторное исследование процессов ВП на образцах горных пород с известными петрофизическими свойствами. Однако и на этом пути необходимо формализовать процесс спада ВП таким образом, чтобы стало возможным его сопоставление с количественно охарактеризованными петрофизическими параметрами. Подобная формализация возможна на основе аппроксимации переходной характеристики ВП достаточно простыми выражениями, зависящими от небольшого количества параметров. Для описания процессов ВП разными исследователями были предложены различные эмпирически подобранные аппроксимационные конструкции [Комаров, 1980, Кормильцев, 1980, Pelton et al., 1983], среди которых чаще всего используется формула Cole-Cole, описывающая частотную дисперсию удельного сопротивления (проводимости):

$$\rho(p) = \rho_0 \frac{1 + \frac{\rho_\infty}{\rho_0}(\tau p)^C}{1 + (\tau p)^C},$$

где ρ_0, ρ_∞ - удельные сопротивления на бесконечно низких и бесконечно высоких частотах. В этом случае поляризационный процесс характеризуют три параметра (ρ_0 предполагается известным из измерений на постоянном токе):

$\eta = \frac{\rho_\infty - \rho_0}{\rho_\infty}$ - стационарная поляризуемость,

τ - постоянная времени поляризации,

$0 \le C \le 2$ - показатель степени, определяющий ширину экспоненциального спектра переходной характеристики ВП.

Адекватность этой формулы изучаемому явлению следует из того обстоятельства, что она является простейшей алгебраической формой входных передаточных функций, к классу которых принадлежит и электропроводность среды [Светов Б.С., 1992]. Формула Cole-Cole хорошо описывает экспериментальные данные в широком диапазоне времен (от микросекунд до десятков секунд).

Обработка зарегистрированных переходных процессов ВП сводится к подбору параметров η, τ и C, минимизирующих расхождение между экспериментальными данными и их Cole-Cole аппроксимацией. Однозначность решения этой задачи в значительной мере зависит от временного диапазона измерений. Например, если есть данные только на ранних временах (меньших, чем постоянная времени τ), то устойчиво определяется поляризуемость η, а параметры τ и C могут меняться в очень широких пределах. Наоборот, на больших временах (больших, чем τ) реализуется высокая чувствительность к параметру C при широких пределах области эквивалентности по η и τ. Для однозначного определения всех поляризационных параметров необходимым требованием к входным данным является их широкополосность. Для устойчивого определения всех трех параметров нужно зарегистрировать процесс ВП в диапазоне времен, составляющем не менее 4-5 порядков. В противном случае приходится обходиться определением какого либо одного параметра не полностью характеризующего поляризационный процесс (например, кажущейся поляризуемости). Это может быть оправдано при решении таких традиционных для ВП задач, как поиск рудных тел, определение уровня грунтовых вод или при необходимости использовать большие (до нескольких километров) разносы АВ, когда значительная часть переходной характеристики определяется индукционным становлением поля и только на поздних временах получается информация о поляризуемости. Здесь, однако, используется лишь малая часть информационного ресурса, заложенного в методе ВП. Когда же нужно обнаружить объект и одновременно определить его петрофизические свойства, необходимо определять все поляризационные параметры. Это выполнимо только при широкополосных измерениях.

В ЦГЭМИ ИФЗ РАН разработана аппаратура ВПШ-2, предназначенная для наземных и скважинных измерений ВП, а также для лабораторных исследований на образцах горных пород. Она позволяет изучать спад поля в диапазоне от первых микросекунд до 100 секунд. В таком широком диапазоне особое значение приобретает борьба с внешними электромагнитными помехами. Чтобы эффективно бороться с помехой, необходимо для разных временных участков применять различное накопление и использовать разные методические приемы, учитывающие специфику помехи. Так, в

микросекундном диапазоне приходится накапливать до тысячи импульсов и, чтобы это происходило в обозримое время, использовать достаточно короткие токовые последовательности импульсов. В миллисекундном диапазоне, где основной является помеха промышленной частоты 50 Гц и ее первые гармоники, оказывается наиболее эффективным использовать кратность периода разнополярной токовой последовательности с промышленной частотой. При вычитании полупериодов полезный сигнал удваивается, а промышленная помеха с гармониками погашается. При этом в отличие от процедур фильтрации в полезный сигнал не вносится никаких искажений.

Аппаратура ВПШ-6 работает в 4 различных частотно-временных диапазонах. Генератор создает знакопеременную последовательность прямоугольных токовых импульсов заданной длительности со скважностью равной 1. Длительности импульсов тока и пауз согласованы в 4 диапазонах с измерителем и синхронизируются при выключении тока на расстояние до 1,5 км. На небольших расстояниях (до 100 м) возможна синхронизация с помощью коаксиального кабеля. При больших расстояниях используется радиоканал.

Генератор работает от аккумулятора 24 В и создает стабилизированный ток от 4 мА до 1 А (выбирается оператором) с шагом 2. Максимальная мощность 200 Вт, максимальное выходное напряжение 600 В. Длительности импульсов тока и пауз в разных диапазонах равны: 1 диапазон - 256 мкс; 2 диапазон - 30 мс; 3 диапазон - 1,28 с; 4 диапазон - 100 с.

Шестиканальный измеритель конструктивно представляет собой отдельный блок с автономным питанием и с встроенным одноплатным компьютером PCM-3350 (процессор NS Geodge GX1-300 MHz) с экраном TFT-LCD (640×480) и 6 выносных усилителей. Выносные усилители располагаются непосредственно в точках измерения. Входным является дифференциальный усилитель (INA111) со схемой защиты от сигналов более 8 В. Далее следует усилитель с гальванической развязкой AD215 (полоса усилителя 120 кГц) и буфер согласования с коаксиальным кабелем - AD8019. Сквозной коэффициент передачи выносного усилителя можно устанавливать $K_п$=1 или $K_п$=10.

Измерения выполняются и в момент пропускания тока и в паузах с разными коэффициентами усиления, задаваемыми программно. На эти усилители сигнал поступает через интеграторы, которые в каждом временном диапазоне имеют свою длительность, обеспечивающую дискретизацию 1024 отсчета измеряемой величины на период. Далее следует коммутатор, который коммутирует выход одного из выносных усилителей на АЦП. В качестве АЦП используется AD7674 (18-бит, частота измерения 600 кГц, напряжение питания 5 В, ток потребления 30 мА). Так как заданная максимальная частота измерения 200 кГц, то для шести каналов используется две идентичные схемы - АЦП с тремя аналоговыми каналами и коммутатор на три канала с частотой переключения 600 кГц. Число периодов измерений для накопления может изменяться от 1 до 1024. В каждом диапазоне предусмотрена калибровка каналов от внутреннего генератора и режим записи фонового поля. Возможно включение режекторных фильтров на частоты 50 и 100 Гц. Двунаправленный интерфейс с компьютером (LPT порт) обеспечивает управление режимами измерений ВПШ-6, необходимые чувствительности каналов, а также передачу информации в компьютер.

Результатом измерений, подлежащих последующей интерпретации, является совокупность переходных характеристик ВП в нескольких временных диапазонах. На рис. 1 приведен пример такой записи лабораторных измерений ВП на кернах песчаников. В процессе интерпретации подбираются такие поляризационные параметры модели Cole-Cole, при которых достигается минимум невязки расчетных и экспериментальных данных во всех диапазонах.

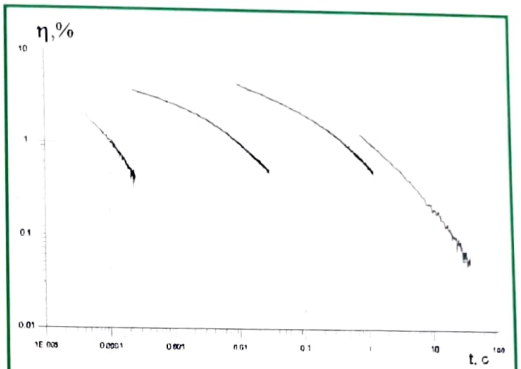


Рис. 1. Пример записи переходных характеристик ВП в 4 временных диапазонах при лабораторных исследованиях керна песчаника.

Разработанная программа интерпретации предназначена для выполнения расчетов временных и частотных характеристик при работе с генераторной линией АВ конечной длины и приемными электрическими (либо магнитными) приемниками над одномерными горизонтально слоистыми разрезами с частотно зависимыми удельными сопротивлениями. Расчеты выполняются для произвольной заданной геометрии установки и произвольного геоэлектрического разреза (до 10 слоев). Программа ориентирована на применение при интерпретации полевых данных, полученных с созданной аппаратурой ВПШ-6. Поэтому в ней основные вычислительные параметры (временные и частотные диапазоны, форматы данных и т.п.) согласованы с аппаратурными параметрами. Вместе они создают законченный комплекс для работ методом ВП от этапа проектирования методики работ на конкретном объекте, оценки ожидаемых сигналов, до интерпретации полученных материалов.

Удобный интерфейс программы позволяет выводить на экран полевые кривые становления поля в паузе после выключения токового импульса и расчетные модельные кривые и проводить одномерную интерпретацию, изменяя параметры слоистой модели.

Полевые экспериментальные работы проводились в наземном и скважинном вариантах, в основном, с целью решения гидрогеологических и инженерных задач. Поскольку определение связи измеряемых процессов ВП с петрофизическими параметрами среды представляет наибольший интерес при скважинных исследованиях, ограничимся иллюстрацией одного из каротажных экспериментов. Он был поставлен в г. Вологде в скважине, пройденной на глубину 100 м, в детально описанных четвертичных песчано-глинистых отложениях. Был применен трехэлектродный зонд A0,75M0,25N с неполяризующимися медно-купоросными измерительными и свинцовыми питающими электродами. Измерения выполня-



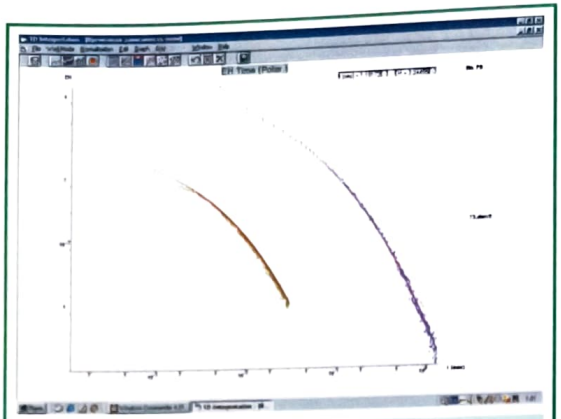


Рис. 2. Пример кривых спада ВП на глубине 75 м в скважине и подобранные при интерпретации модельные кривые.

лись во 2 и 3 диапазонах. В первом диапазоне полученные данные были искажены из-за паразитной емкости подводящих проводов, а 4 диапазон приводит к недопустимо долгому для каротажа процессу измерений. Измерения выполнялись с шагом 1 м. В комплексе с каротажем ВП был проведен гамма каротаж, который хорошо характеризует глинистость пород. На рис.2 показан пример кривых спада ВП на глубине 75 м и подобранные модельные кривые с параметрами Cole-Cole η=8,5%, τ=80 мс, C=0,45.

По результатам обработки измеренных данных получены представленные на рис.3 каротажные кривые поляризационных параметров и кажущегося удельного сопротивления. Необходимо заметить, что стационарная поляризуемость, которая фигурирует в формуле Cole-Cole и подбирается при интерпретации, представляет собой асимптотическое значение, на которое выходит поляризационная кривая на очень ранних временах. Эта величина непривычно велика для тех, кто имел дело с кажущейся поляризуемостью, измеряемой, например, через 0,5 с после выключения тока, когда кривая ВП уже спадает до привычных долей процента. Слева приведен схематический геологический разрез по данным бурения. Четвертичные отложения до глубины 101 м представлены тремя слоями: сверху суглинки и глины московской морены, ниже флювиогляциальные пески с линзами суглинков и алеврита (основной водоносный горизонт), его подстилают суглинки днепровской морены с линзами песков и глин.

Пунктиром приведена кривая кажущейся поляризуемости, полученная в 3 временном

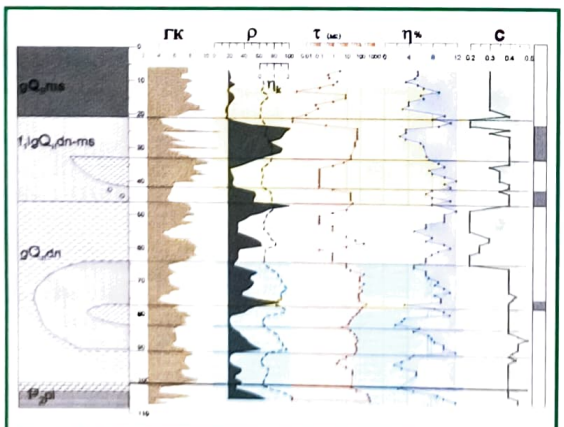


Рис. 3. Результат каротажа ВП в гидрогеологической скважине.

диапазоне на времени 0,5 с. Это традиционно изучаемый параметр в методе ВП. Видно, что кривая практически полностью коррелируется с кривой кажущегося удельного сопротивления и поэтому не несет существенной независимой информации. Иная ситуация наблюдается с подобранными по Cole-Cole параметрами поляризации. С изменением геологического разреза наблюдается изменение соотношения η и τ. Желтым и голубым фоном выделены участки разреза, где увеличение поляризуемости сопровождается уменьшением постоянной времени (желтый фон) и обратное поведение одновременного нарастания и спада (голубой фон). По комплексу этих параметров можно выделять перспективные интервалы с повышенным коэффициентом фильтрации (они отмечены штриховкой в правой колонке на рисунке). Эти интервалы удовлетворяют следующему сочетанию величин параметров – повышенное удельное сопротивление, низкое значение поляризуемости (соответствует хорошо промытым пескам), высокое значение постоянной времени (высокая зернистость песка).

Возможность получать и анализировать несколько независимых поляризационных параметров (η, τ и C) в отличие от традиционно применяемой в методе ВП кажущейся поляризуемости, существенно повышает информативность метода.

В результате интерпретации установлены следующие закономерности.

1. Все три поляризационных параметра хорошо коррелируют с литологией, с каротажем сопротивления и с гамма-каротажем.

2. Чистая глина и чистый песок характеризуются наименьшими величинами стационарной поляризуемости (2-3%). Поляризуемость песчано-глинистой толщи доходит до 12% в зависимости от соотношения глинистой фракции в песке и его зернистости.

3. Постоянная времени изменяется в очень широких пределах от единиц микросекунд до сотен миллисекунд.

4. Неожиданным стала очень четкая зависимость показателя C от геологии. До сих пор большинство исследователей обращают на этот параметр мало внимания, часто просто закрепляя некоторую среднюю величину и подбирая только поляризуемость и постоянную времени. Значение C меняется при пересечении геологических границ. Какую физически содержательную информацию о среде несет этот параметр пока сказать сложно. Полагают, что параметр C характеризует степень однородности породы, в частности по гранулометрическому составу. Чем лучше отсортирована песчано-глинистая смесь, тем большие значения C следует ожидать.

5. Пески хорошо выделяются по удельному сопротивлению. По поляризуемости можно детализировать пески на чистые промытые, с пониженной поляризуемостью, и более глинистые. В дальнейшем планируется переходить к количественным оценкам фильтрационных параметров.

Литература

1. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980, 391 с.
2. Кормильцев В.В. Переходные процессы при вызванной поляризации. М.: Наука, 1980, 112 с.
3. Светов Б. С. О частотной дисперсии электрических свойств среды. Физика Земли, 1992 г., N 4 с. 62-70.
4. Pelton W.H., Sill W.R., Smith B.D. Interpretation of complex resistivity and dielectric data. Geophysical transactions, 1983, vol.29, No 4, pp.297-330.

СИБГЕОТЕХ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ КОМПАНИЯ















Аппаратура и оборудование серии “ИМПУЛЬС” для решения поисково-оценочных и инженерно-геологических задач

- рудные объекты
- кимберлиты
- углеводороды
- источники водоснабжения
- изучение рудных полей
- изучение структуры россыпных месторождений
- картирование разломной тектоники
- изучение ВЧР
- решение инженерно-геофизических задач



Изготовитель:
Инженерная компания
"СибГеоТех"
630099, г. Новосибирск-99,
ул.Потанинская, 6а ком. 101
E-mail: tgm@online.nsk.ru
тел. (383) 292-42-77

Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации

Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова;
Шевнин В.А., Институт нефти, Мексика

Введение

Электроразведка методом сопротивлений остается одним из основных методов при малоглубинных геофизических исследованиях. Развитие этого метода привело к появлению новой методики, которая нацелена на изучение сложно построенных сред и которая позволяет проводить интерпретацию в рамках двумерных моделей. Хотя такая методика применяется уже более 10 лет [Griffiths and Barker, 1993; Бобачев и др., 1996], она до сих пор не получила общепринятого названия в отечественной литературе (*сплошные электрические зондирования, многоэлектродные зондирования, электротомография*). В англоязычной литературе наиболее часто употребляется два термина: *Resistivity Imaging* и *Electrical Resistivity Tomography*. Термин **электротомография** вошел в «Свод Правил» Госстроя России [СП 11-105-97, 2004] и будет использоваться в нашей работе.

Электротомография

Электротомография - это целый комплекс, включающий в себя как методику полевых наблюдений, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных. Ее особенностью является многократное использование в качестве питающих и измерительных одни и те же фиксированные на профиле наблюдений положения электродов. Это приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при существенном увеличении плотности измерений по сравнению с обычным методом вертикальных электрических зондирований. Такой подход позволяет с одной стороны работать с современной высокопроизводительной аппаратурой, а с другой стороны применять эффективные алгоритмы моделирования и инверсии. Интерпретацию данных электротомографии можно проводить в рамках двумерных и трехмерных моделей. Это принципиально расширяет круг решаемых электроразведкой задач за счет исследования сред, значительно отличающихся от «классических» горизонтально-слоистых. Благодаря электротомографии и использованию алгоритмов подавления искажающего влияния верхней части разреза, можно повысить качество и одномерной интерпретации [Бобачев и др., 1995]

Отметим следующие методические особенности этой технологии, которые отличают ее от обычного метода ВЭЗ.

1. Линейный шаг по разносам, позволяющий многократно использовать одни и те же места заземлений питающих электродов для различных положений приемных линий.

2. Высокая плотность наблюдений, необходимая для двумерной интерпретации.

3. Небольшой, в сравнении с методом ВЭЗ, диапазон разносов, который определяется числом используемых в установке электродов и расстоянием между ними. Это, естественно, ограничивает и интервал изучаемых глубин.

4. Комбинирование различных электроразведочных установок, которое практически не встречается при работах методом ВЭЗ. Тем самым удается увеличить объем независимых измерений электрического поля, используя различные виды возбуждения и приема электрического поля, и компенсировать недостатки отдельных установок, существенно повышая надежность интерпретации. Например, совместное использование установок Шлюмберже и дипольной осевой заметно увеличивает разрешающую способность, особенно на малых разносах.

В области использования электротомографии применительно к трехмерным моделям геоэлектрического разреза ситуация пока более сложная. С одной стороны, существуют разработанные подходы к измерениям и программы интерпретации [Loke and Barker, 1996b], которые требуют довольно больших объемов измерений. С другой стороны, наш опыт показывает, что результаты двумерной инверсии пока получаются гораздо более реалистичными. В целом надо отметить, что существующая полевая аппаратура и программные средства пока недостаточно разработаны и не позволяют получить трехмерные геоэлектрические модели с детальностью и надежностью, которая требуется для дальнейшей геологической интерпретации.

Разрешающая способность (т.е. количество деталей геоэлектрического разреза, устойчиво проявляющихся в электрическом поле) и, соответственно, качество интерпретации данных электротомографии тесно связано с числом и плотностью измерений на одном профиле. Их число обычно достигает первых тысяч, поэтому вопрос о производительности полевых измерений имеет принципиальное значение и во многом определяет возможность практического использования этого метода. Для достижения максимальной эффективности при проведении полевых работ применяется специальная аппаратура с программируемой автоматической коммутацией электродов [Griffiths and Barker, 1993; Бобачев и др., 1996; Dahlin, 2001]. Далее для краткости мы будем использовать термин многоэлектродная аппаратура.

Многоэлектродная аппаратура

Термин «многоэлектродная» часто путают с более привычным понятием «многоканальная», поэтому поясним эти термины.

Многоканальная аппаратура позволяет одновременно или последовательно измерять разность потенциалов на нескольких (8-24) приемных диполях, соединенных многожильным кабелем («косой»). Такой подход обычно используется при работах методом вызванной поляризации (ВП) и речных зондированиях (рис.1).

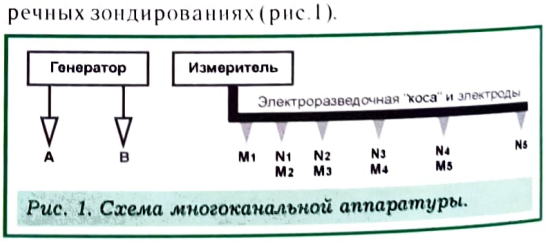


Рис. 1. Схема многоканальной аппаратуры.

В *многоэлектродной* аппаратуре тоже используется большой набор электродов (обычно от 48 до 96 штук), соединенных в виде электроразведочной косы. В отличие от многоканальных систем каждый электрод может использоваться не только как приемный, но и как питающий (рис. 2А). Таким образом, один раз установив и подключив электроды можно провести весь комплекс

Таблица 1. Примерные производственные характеристики полевых работ методом электротомографии с многоэлектродной аппаратурой.

Число электродов	Расстояние между электродами, м	Длина профиля, м	Интервал разносов (AB/2), м	Примерное время развертывания установки	Число измерений	Время измерений методом сопротивлений	
						Одноканальная станция	10-канальная станция
48	4	188	6 - 94	40 мин	300 - 1000	30 минут - 1,5 часа	6 - 20 минут
	10	470	15 - 235				
96	4	380	6 - 190	1,5 часа	1000 - 3000	1,5 - 4,5 часа	20 минут - 1 час
	10	950	15 - 475				

профильных измерений.

Использование одних и тех же электродов в качестве приемных и питающих может приводить к ошибкам измерений, связанных с поляризацией электрода при пропускании тока. После выключения тока поляризация постепенно уменьшается. Если во время разрядки проводить измерения с использование такого электрода можем получить искаженный сигнал [Dahlin, 2000]. Наиболее существенны такие ошибки для работ методом ВП. Чтобы повысить качество съемки нужно оптимизировать порядок измерений.

При работах на длинных профилях после проведения измерений с одной расстановкой электродов физически перемещается только часть электродов (технология "roll-along"). В связи с этим для существенного сокращения времени измерений применяют системы, состоящие из нескольких независимых кос.

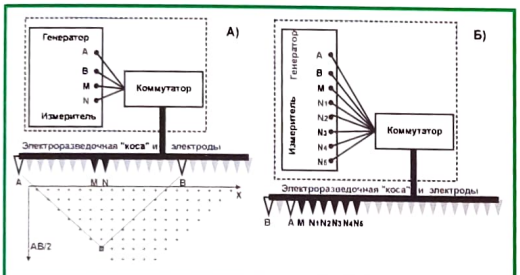


Рис. 2. А) Многоэлектродная аппаратура. Б) Многоканальная многоэлектродная аппаратура.

Стремление повысить производительность многоэлектродной аппаратуры привело к появлению *многоканальных многоэлектродных* станций (Syscal-Pro, Iris Instruments; SAS4000, ABEM). Такие комплексы позволяют одновременно получать значения разности потенциалов на нескольких приемных диполях (рис. 2Б). Число таких каналов невелико: от 4 до 10 штук, но такой подход дает принципиальную возможность увеличить скорость полевых наблюдений в число раз, соответствующее числу каналов. Кроме того, быстрые измерения открывают новые возможности для использования электроразведки при мониторинге различных геологических и технических процессов.

В таблице 1 приведены примерные производственные характеристики полевых работ с многоэлектродной аппаратурой при нормальных условиях заземления и типичном числе электродов в современной аппаратуре.

Электротомография с одноканальной аппаратурой

Хотя именно многоэлектродная аппаратура обеспечивает максимальную производительность при полевых работах методом электротомографии, она обладает рядом серьезных недостатков:

- высокая стоимость (25-75 тыс. долларов);
- большой вес электроразведочного комплекса порядка 100-200 кг, включающего измеритель, генератор, источник питания, комплект электродов (50-100 штук) и кос;
- трудности при работах с большими токами, необходимыми при глубинных исследованиях, особенно методом ВП;
- ограниченный диапазон разносов, который определяется числом электродов, поддерживаемых аппаратурой.

Поэтому работы методом электротомографии часто проводят с обычной одноканальной или многоканальной аппаратурой. При этом сетка разносов и шаг по профилю подбирается таким образом, чтобы выполнялось основное требование методики электротомографии - минимизация числа используемых положений электродов при увеличении плотности наблюдений. Определяющим параметром установки является минимальное расстояние между электродами (a), равное минимальной длине приемного диполя. Шаг по профилю выбирается кратным этому расстоянию, а значения разносов удовлетворяют условию - $AB=(2N+1)a$, где N любое целое число.

Основной проблемой при работах с обычной аппаратурой является низкая производительность труда. Для этого приходится разрежать шаг по профилю и сетку разносов, теряя детальность результатов, особенно на малых глубинах. Опыт показывает, что в зависимости от решаемых задач, имеющегося времени шаг между зондированиями может достигать пяти расстояний между электродами.

В качестве примера рассмотрим полевые работы с диапазоном разносов AB от 3 до 250 м. При работах с многоэлектродной аппаратурой потребуется одновременно использовать не менее 126 электродов с шагом 2 метра. При этом только в одной точке профиля длиной 250 м будет достигнута максимальная глубинность. При использовании одноканальной аппаратуры для такого диапазона разносов допускается работать с 10 метровым шагом по профилю. В таблице 2 показан пример сетки разносов, соответствующей технологии электротомографии.

Таблица 2. Пример сетки разносов для работ методом электротомографии при расстоянии между электродами 2 м.

MN	2	2	2	2	2	2	2	2	14
AB/2	3	4	5	7	9	11	15	19	19
MN	14	14	14	14	14	14	14	14	
AB/2	25	35	45	55	65	85	105	125	

Возможности измерителя тоже влияют на производительность труда. Разработчики современной аппаратуры (особенно цифровой) уделяют мало внимания повышению скорости измерений,

предпочитая повышать точность измерений. Однако при 400 измерениях в день увеличение времени каждого из них всего на 9 секунд приводит к дополнительному часу работы в поле.

При глубинных работах методом электротомографии с использованием больших токов приходится ограничивать число линий АВ, так как трудно обеспечивать необходимое хорошее заземление питающих электродов. В этом случае можно рекомендовать использование несимметричных установок с достаточно большой длиной линии АВ и расположением приемных диполей как внутри, так и снаружи АВ (рис. 3). В этом случае на малых разносах у нас будет трехэлектродная установка, а на больших - либо Шлюмберже, либо дипольная осевая. При работах по такой методике наблюдений 5-7 перекрывающихся линий АВ могут обеспечить получение объема данных достаточного для двумерной интерпретации.

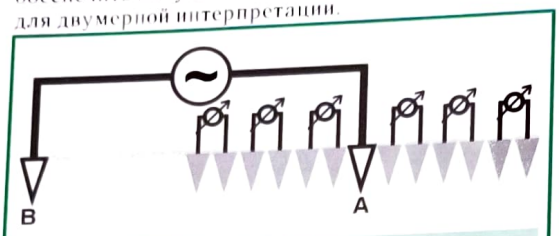


Рис. 3. Пример несимметричной четырехэлектродной установки.

Программное обеспечение для электротомографии

Для работ методом электротомографии используются следующий комплекс программ.

1. Подготовка протоколов с описанием методики измерений. Обычно такие программы входят в комплект поставки многоэлектродной аппаратуры. Часто эти программы не обладают достаточной гибкостью, поэтому мы совместно с ними используем программу «x2ipi» (МГУ).

2. Программы визуализации, предварительной обработки полевых данных и подавления эффектов приповерхностных неоднородностей [Бобачев и др. 1995; Ritz et al., 1999]. На этом этапе также используются программы, поставляемые с аппаратурой, разработки Московского университета: "MEDIAN", "MPC", "x2ipi".

3. Программы автоматической двумерной инверсии, прежде всего в рамках "гладких" моделей [Loke and Barker, 1996a]. Использование моделей с плавным изменением удельного сопротивления является стандартным способом регуляризации алгоритмов инверсии и позволяет во многих случаях оперативно, без учета априорной информации и даже при минимальной квалификации пользователя получать удовлетворительную интерпретацию данных электротомографии. Такой подход за последние 10 лет получил на западе повсеместное распространение. Наиболее распространенной программой инверсии является программа "Res2dInv" (Geotomo, Малайзия). Отметим также российскую разработку - "ZondRes2D" (СПбГУ, Санкт-Петербург).

4. Очевидно, что полностью автоматическая инверсия не всегда удовлетворяет квалифицированного интерпретатора. Поэтому на базе результатов автоматической инверсии рекомендуется проводить подбор в рамках одномерных и двумерных моделей с использованием программ двумерного моделирования: "Res2dMod" (Geotomo, Малайзия), "ie2dp" (МГУ). Такой подбор позволяет наиболее полно учесть априорные данные.

В традиционном методе ВЭЗ работают с кривыми кажущегося сопротивления, которые удобно представлять в виде псевдо-разреза кажущегося сопротивлений. Как уже говорилось выше, в электротомографии часто используют измерения в различными типами установок (таблица 3).

Кажущееся сопротивление будет функцией, зависящей не от разноса и пикета, а от положения всех четырех рабочих электродов. Соответственно, все программное обеспечение для электротомографии должно уметь работать с такими типами данных. Например, стандартная процедура устранения «ворот» и потеря информации о длине MN недопустима при двумерной интерпретации.

Практическое применение электротомографии

В нашей стране использование электротомографии рекомендовано Госстроем России (СП 11-105-97). Применение двумерной электроразведки целесообразно при всех детальных (масштаб 1:2000 и крупнее) геофизических исследованиях при инженерно-геологических и гидрогеологических изысканиях, изучении геологического разреза на малых и средних глубинах при поисках и разведке полезных ископаемых, а также в менее традиционных областях применения малоглубинной геофизики - изучении археологических памятников, решении геоэкологических и других задач.

Для изучения геоэлектрических разрезов, значительно отличающихся от горизонтально-слоистых, применение электротомографии является необходимым условием для надежной интерпретации. Такое сложное строение обычно характерно для рудных зон и зон тектонических нарушений, оползней, насыпных и искусственных грунтов в зонах городской застройки, многолетнемерзлых пород, при крутом падании слоев и при наличии карста.

Практический пример

Рассмотрим практический пример использования электротомографии. Исследования выполнены на месте древнего городища дьяковского времени (I - IV вв.), расположенного на окраине с. Знаменское Одинцовского района Московской области. Городище расположено на высоком правом берегу р. Москвы, на высоте относительно уреза воды

Таблица 3. Сравнение «классического» метода ВЭЗ и электротомографии.

методика	Метод ВЭЗ	Электротомография
аппаратура	одноканальная	обычно многоэлектродная
шаг по разносам	логарифмический	линейный
шаг по профилю	сравним с максимальным разносом	сравним с минимальным разносом
диапазон разносов	широкий (2 - 3 декады)	ограниченный (1 - 1,5 декады)
электроразведочная установка	Шлюмберже или дипольная	стандартные, произвольные или комбинирование установок
число измерений на одном профиле	десятки и первые сотни	сотни и первые тысячи
интерпретация	одномерная	1D - 2D (3D)

около 20 м. Оно имеет диаметр около 50 м, хорошо выраженные два рва и один вал между ними высотой около 1 м. Общий перепад высот в пределах исследуемой площадки памятника составляет около 2 м. При этом наклон рельефа в районе вала достигает 40 градусов, а его внутренний и внешний склоны расположены под заметным углом друг к другу. Перед тотальными раскопками городища с чисто методический целью были выполнены опережающие комплексные геофизические работы, направленные на получение полной характеристики археологического объекта, в том числе и в физических полях. В частности, по системе радиальных профилей, начинающихся в центре площадки и заканчивающихся на напольной стороне, была проведена электротомография.

Профиль длиной 45 м отработан с помощью двух трехэлектродных установок Шлюмберже AMN и MNB. Максимальный разнос составлял 10м. Минимальный разнос АО - 0,75 м. Использовалась только одна линия MN длиной 0,5м. Шаг по профилю наблюдений составил 1 м. Сетка разносов АО и ОВ была следующая: 0,75; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9 и 10 м. Глубина исследования при этом составила около 4 м.

Полевые данные представлены в виде псевдоразрезов кажущегося сопротивления, которые построены с учетом рельефа (рис.4). Эффективная глубина рассчитана по следующей формуле [Edwards, 1977]:

$$H_{эф} = \frac{AO}{2,63}.$$

Большая разница в кажущемся сопротивлении для прямой и встречной установки указывает на то, что изучаемый разрез существенно отличается от одномерного.

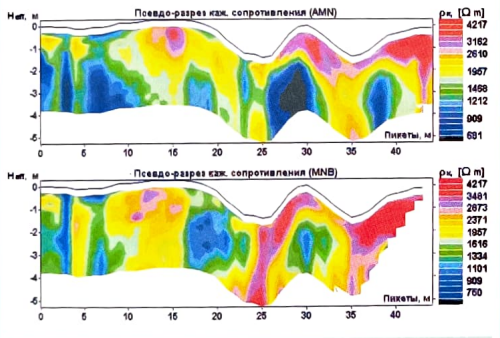


Рис. 4. Псевдо-разрезрезы кажущегося сопротивления.

Результат автоматической двумерной инверсии показан на рис. 5. На нем выделяется яркая аномалия, указывающая на наличие внутреннего вала, сложенного песками и расположенного на 13 пикете (повышение рельефа дневной поверхности). Внутренний вал хорошо совпадает по форме со вторым валом, который явно выражен в рельефе, и отличается от него несколько большей шириной (около 10 м). Вероятно, более поздние обитатели городища частично его разрушили, расширяя жилую часть. Кроме этого, в конце профиля структура геоэлектрического разреза указывает на наличие третьего, внешнего вала, ось которого расположена в районе 42 пикета.

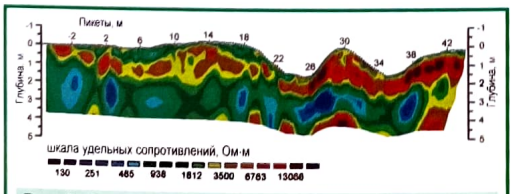


Рис. 5. Результаты электрической томографии на участке «Знаменское городище».

Подстилающими породами, на которых расположен культурный слой городища являются суглинки (примерная глубина кровли 1,5 м). По результатам двумерной инверсии видно, что рвы были вкопаны в суглинки по крайней мере на 70-80 см. В более позднее время они были занесены песчаным материалом в результате обрушения валов. Особенно хорошо видны заглубления в районе 25 и 35 пикетов. С учетом этого можно сделать вывод, что высота вала относительно днища рва первоначально достигала 3 м.

Последующие раскопки, выполненные археологами на городище два месяца спустя, полностью подтвердили результаты геофизической интерпретации.

Заключение

Для изучения двумерных разрезов разработана и активно применяется методика электротомографии. Эта технология значительно расширяет область применения метода сопротивлений и вызванной поляризации, повышает точность, разрешающую способность и геологическую эффективность метода сопротивлений, позволяя проводить надежную интерпретацию для сложно построенных сред. Такое качество интерпретации во многих случаях недостижимо при использовании методов ВЭЗ и ВЭЗ-ВП.

В настоящее время актуальной задачей является внедрение данной методики и соответствующей аппаратуры в повседневную практику производственных организаций. Это требует, как материальных затрат на приобретение необходимой аппаратуры и обучение персонала, так и организационных мероприятий по дальнейшему нормативному обеспечению методик.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Б.С. Светову за полезные дискуссии при подготовке статьи.

Литература

1. Dahlin, T. 2000. Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using mulli-electrode arrays. Geophysical Prospecting, , 48, 181-187.
2. Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. Computers & Geosciences 27, 1019-1029.
3. Griffiths, D.H., Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. J. Appl. Geophysics 29, 211-226.
4. Edwards, L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. Geophysics, 42, 1020-1036.
5. Loke, M.H. and Barker, R.D.. 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting. 44, 131-152.
6. Loke, M.H., Barker, R.D., 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. Geophysical Prospecting 44, 499- 523.
7. Ritz, M., Robain, H., Pervago, E., et al. 1999. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. Geophysical Prospecting 47 (2): 85-101
8. Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Урусова А.В., Шевнин В.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред. // Физика Земли 1995 - N 12 - с.79-90.
9. Бобачев А.А., Модин И.Н., Перваго Е.В., Шевнин В.А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред. М., 1996, 50 с. // Разведочная геофизика. Обзор. АОЗТ "Геоинформмарк". Выпуск 2.
10. СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства геофизических исследований» / Госстрой России. - М.: ПНИИИС Госстроя России, 2004. - 49 стр.



Аэрогеофизические вертолетные платформы серии «Импульс» для поисково-оценочных иследований

Тригубович Г.М., Персова М.Г., Саленко С.Д., ФГУП «СНИИГГиМС», г. Новосибирск

Технические средства для маловысотной аэрогеофизики

Заметной тенденцией развития аэрогеофизики, которое получило широкое распространение на Западе в последние годы, является использование вертолетных разведочных платформ. По своим техническим характеристикам вертолетные платформы существенно превосходят самолетные системы, благодаря новым техническим решениям в области специальных авианесущих конструкций, мощного электромагнитного канала, приближения геофизических сенсоров к объекту исследования. На рис. 1, 2, 3 представлен внешний вид и основные технические и конструкторские решения платформ А1, А2 и А4, разработанных в России (2000 г., СНИИГГиМС, Сибгеотех, НГТУ), патент РФ №2201603.

Основной отличительной особенностью аэрогеофизических платформ является переход на новую конфигурацию источника вихревого электромагнитного поля, что обеспечивает высокий магнитный момент источника $M > 10^6$ А·м^2 при П-образной форме тока. Аэрогеофизические платформы серии «Импульс-А» предназначены для проведения высокоразрешающих комплексных низкопрофильных аэрогеофизических исследований методами становления поля, гамма-спектрометрии, магнитометрии и теплометрии. Глубинность электромагнитного канала платформы «Импульс-А4» до 500 м. Способ перемещения платформ - на штатной подвеске под фюзеляжем вертолета Ми-8. Используется трос-кабель длиной до 50 м. Высота полета платформы 30-50 м от поверхности исследования. Скорость полета 100-120 км/час. Ресурсное разовое время работы аэрогеофизического оборудования при автономном питании составляет 3 часа. При отборе мощности от генератора вертолета (P = 10 кВА) ресурс ограничивается полетным временем вертолета.

Локализация зон эпигенеза над залежами углеводородов. Теоретические и практические результаты

Наличие мощного электромагнитного канала на платформах серии «Импульс», который отсутствует во всех других отечественных и зарубежных аэросистемах, работающих в настоящее время в России, позволяет получать актуальную информацию о модификации вещественного состава в зонах эпигенеза до глубин 500 метров в условиях Восточной Сибири. Для этого стандартно могут быть использованы гамма-спектрометр, магнитный и электромагнитный каналы.

На сегодняшний день в результате исследований зоны эпигенеза верхней части разреза над залежами УВ можно считать доказанной вертикальную миграцию легких фракций УВ. Интенсивность наблюдаемых геофизических аномалий заметно зависит от условий образования залежей. Феноменологической основой решения задачи локализации зон эпигенеза является измененная микроструктура и вещественный состав, что приводит к достаточно прогнозируемой модификации геофизических полей, в том числе и электромагнитных характеристик. Ореольные изменения, образовавшиеся при миграции легких фракций, доходят до верхних горизонтов и становятся доступными для изучения современными аэрогеофизическими системами. Миграция легких фракций углеводородов из залежей, по-видимому, также сопровождалась выносом магнитных материалов и радиоактивных элементов уранового ряда. Эти пути восходящих потоков отображаются зонами

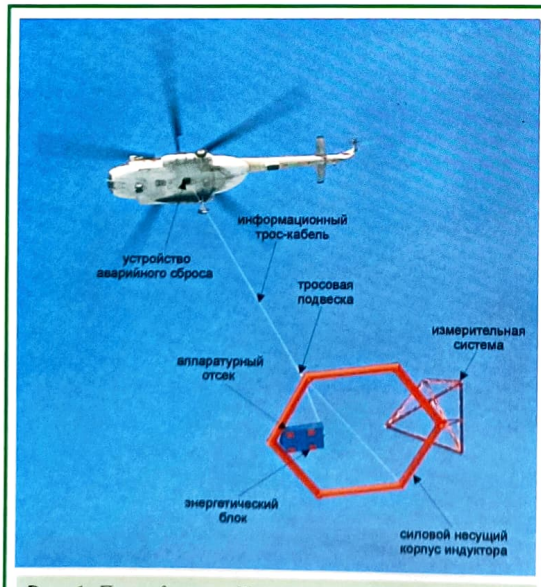


Рис. 1. Платформа «Импульс-А1».

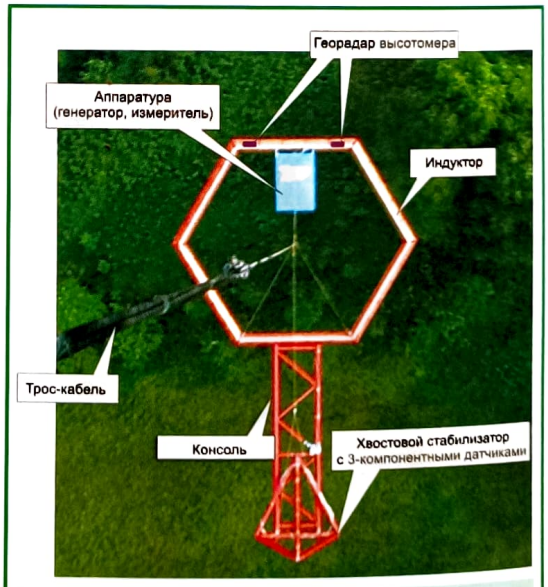


Рис. 2. Платформа «Импульс-А2».



Рис. 3. Платформа «Импульс-А4».

аномально высоких содержаний урана и аномалиями магнитного поля. Форма аномалий зависит от структурно-тектонических особенностей формирования залежей.

Результаты трехмерного математического моделирования распределения сигнала становления поля над зоной эпигенеза представлены на рис. 4 в виде электрограмм относительной аномалии в диапазоне времен от 100 мкс до 10 мс. Как видно, края залежи на электрограмме вертолетной съемки отмечаются знакопеременной аномалией, обусловленной контактом блоков повышенного и пониженного сопротивления с преобладающей положительной частью. Ширина вертикальной зоны пониженного сопротивления влияет на уровень аномалии и на ее пространственное положение.

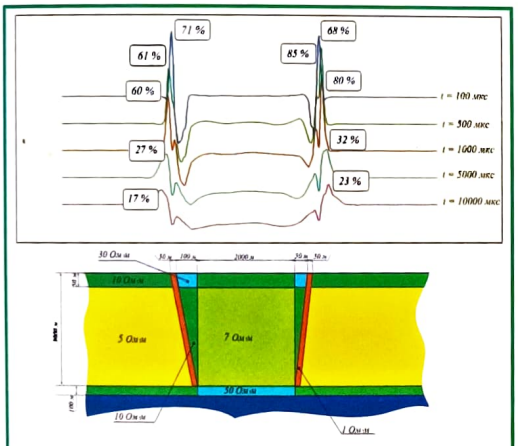


Рис. 4. Модель зоны эпигенеза над залежью УВ с электрограммой вертолетной съемки.

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных работ. Полевые работы проводились с использованием вертолетной платформы "Импульс-А2" на Верхтарском нефтяном месторождении. Для съемки был использован индуктор с дипольным моментом $M=10^5$ А·м^2, форма тока 1/2 Sin с амплитудой 1000 А, длительность тока 2 мс, высота полета платформы (25-30) м от поверхности земли, скорость (100-120) км/час, расстояние между профилями 2 км. Зона эпигенеза над залежью УВ отображается положительной кольцевой аномалией, что согласуется с теоретическими представлениями, описанными выше и коррелируется с проекцией водонефтяного контакта.

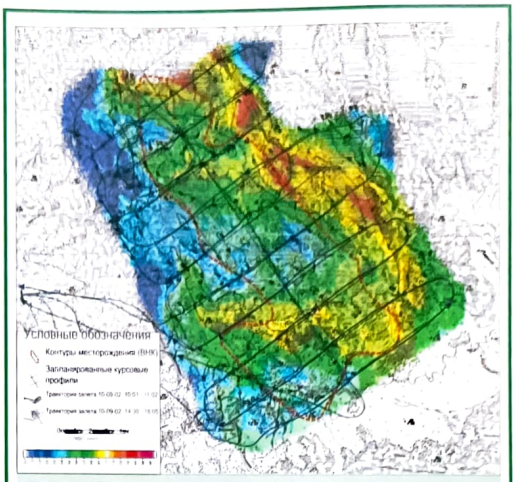


Рис. 5. Результаты исследований над залежью УВ (Верхтарское месторождение).

Проектирование аэроразведочных исследований на примере задачи поиска сульфидных объектов

Неотъемлемой частью выполнения аэроразведочных работ является этап проектирования исследований, результатом которого является оценка уровня сигнала, уровня откликов от поисковых объектов (абсолютных и относительных), времени проявления объекта для различных положений приемно-генераторной конструкции относительно объекта. На основании этих оценок делается выбор токовой диаграммы и диаграммы измерений и проектируется сеть профилей. Для оперативного выполнения этих работ разработаны и в настоящее время используются программные комплексы конечноэлементного моделирования [2] COAXIAL (моделирование осесимметричных полей) и GEOPREP (моделирование полей становления в трехмерных средах).

Пример проектирования аэроразведочных работ была оценка возможности аэро-электромагнитных зондирований для поиска сульфидных объектов в геоэлектрических условиях Судана (Gossan type deposits, Arabian belt). В процессе проектирования электромагнитных исследований была проведена оценка влияния вертолета при определении глубины зондирования, оценка проявления поискового объекта

σ См/м \ h,м	5	10	20	30	40	50
1	+	–	–	–	–	–
5	+	+	–	–	–	–
2	+	+	–	–	–	–
10	+	+	+	–	–	–
20	+	+	+	+	–	–
50	+	+	+	+	+	–
100	+	+	+	+	+	+

Рис. 6. Таблица поискового объекта.

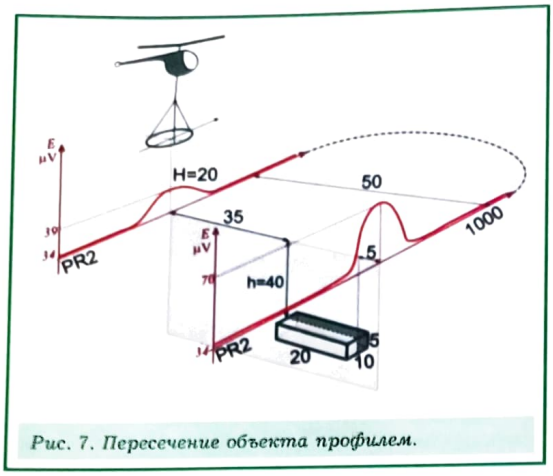


Рис. 7. Пересечение объекта профилем.

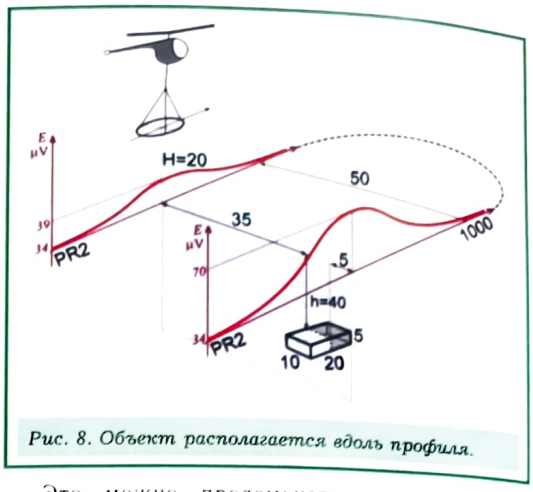


Рис. 8. Объект располагается вдоль профиля.

для различном расположении профилей относительно объекта, а также оценка возможности выделения объектов, лежащих на разных глубинах.

Результаты оценки глубинности приведены в таблице (рис. 6), где знаком «+» отмечены положительные варианты решения задачи обнаружения поискового объекта по значимому аномальному сигналу. Для проектирования сети профилей было выполнено трехмерное моделирование. Сульфидный объект размером 10×20×5 м^3 с сопротивлением ρ = 0,02 Ом·м залегает на глубине 40 м. Расстояние между профилями положим равным 50 м, высоту полета вертолета - 60 м, а высоту платформы от поверхности Земли - 25 м. Для случая, когда объект расположен поперек профилей (рис. 7) и и профили располагаются недалеко от проекции ближнего края объекта, измеряемый сигнал на ближайшем к объекту профиле достигает значения E1 = 69 мВ при фоновом значении E2 =34 мВ в момент времени t = 210 мкс после выключения импульса тока в генераторе. Для случая, когда объект лежит вдоль профилей, между которыми находится объект, (рис. 8) и расстояние от проекции края объекта до ближайшего профиля составляет 5 м, а до второго профиля - 35 м, на ближайшем к объекту профиле сигнал достигает значения E1= 70 мВ на фоне E2= 34 мВ и E1= 39 мВ на фоне E2= 34 мВ на втором профиле. При наихудшем положении объекта, когда он лежит вдоль профилей и равноудален от них, измеряемый сигнал достигает E1= 51 мВ на фоне E2=34 мВ.

Использование трехмерной интерпретации для восстановления морфологии локального объекта по данным электроаэроразведки

Как правило, интерпретация аэроразведочных данных проводится с использованием одномерных моделей. Иногда этого бывает достаточно для локализации объекта, и количественные оценки глубины его залегания и размеров не требуются.

Во многих случаях использование одномерной интерпретации не дает удовлетворительных результатов. Не дает точной информации об объекте и использование двумерной интерпретации, поскольку существует зона эквивалентности: радиус-глубина. Для точного определения глубины и размеров объекта и исключения влияния приповерхностных неоднородностей необходимо применение трехмерной интерпретации [3].

Это можно продемонстрировать на следующем примере. На рис. 9 показаны электрограммы распределения E(t) для набора времен при съемке с вертолета над объектами с различными радиусами, сопротивлениями и глубиной залегания. Поскольку в зоне максимума проявления объекта (-30 м, 30 м) сигналы от этих объектов совпадают, то очевидно, результаты одномерной и даже двумерной инверсии также совпадут. В боковых относительно проекции центра объекта точках сигналы уже существенно отличаются. Поэтому 3D инверсия, использующая всю снятую информацию в совокупности, может достаточно точно восстановить обобщенную морфологию объекта.

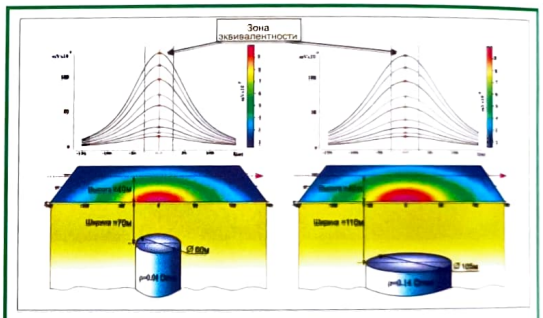


Рис. 9. Профилирование над объектами, эквивалентно проявляющимися в эпицентральной зоне.

В качестве практического примера трехмерной инверсии приведем восстановление морфологии объекта по данным, полученным с использованием вертолетных платформ на Канадском щите. Результатом подбора является трехмерное тело, изображенное на рис. 11. На рис. 11а показан вид «спереди» (из координаты (-50, -200)), на рис. 11б вид «сзади» (из координаты (-50, 200)).

На рис. 10 показано экспериментальное и подобранное теоретическое распределение E(t) для одного из моментов времени t=1 мс. Ошибка площадного подбора поискового объекта в поле параметра E(t) не превышает 15%.

Выводы

- Использование вертолетных геофизических платформ нового поколения позволяет подойти к решению широкого круга задач, решавшегося ранее только при помощи наземной геофизики.
- Глубинность опоискования при максимальном магнитном моменте может достигать

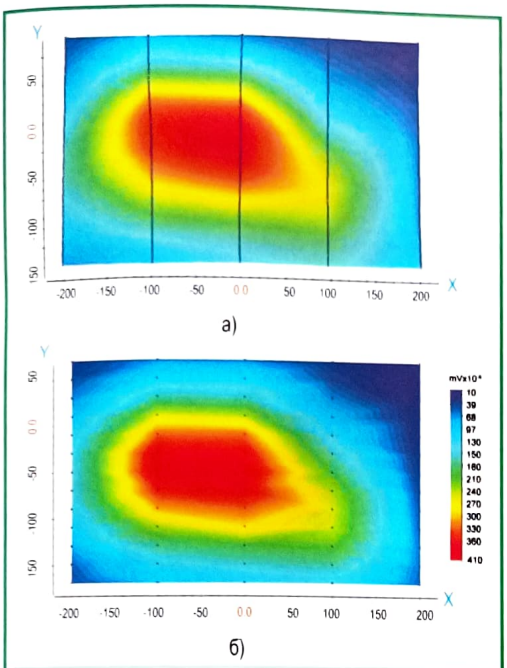


Рис. 10. Экспериментальное и теоретическое распределение ЭДС в момент времени 1 мс.
а) План распределения E(t) - экспериментальные значения;
б) План распределения E(t) - теоретические значения.

500 метров и более. Как показывает мировая практика, низкопрофильная вертолетная аэрогеофизика за счет высокой пространственно-временной плотности измерений позволяет обнаруживать новые объекты, там,

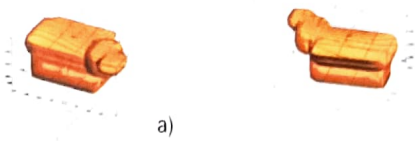
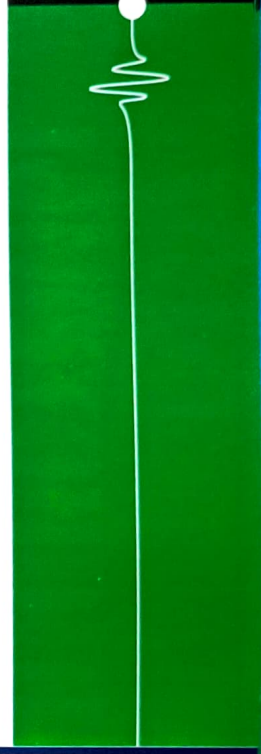


Рис. 11. Модель подобранного объекта:
а) вид «спереди»; б) вид «сзади»

где ранее уже была проведена наземная геофизика.

- Стоимость комплексных вертолетных аэрогеофизических съемок на порядок меньше стоимости аналогичных видов наземной съемки.
- Высокая разрешающая способность вертолетной съемки на сверхнизких высотах позволяет решать инженерно-геологические и технологические задачи.





Литература

1. Патент РФ №2201603 Устройство для аэрогеофизической разведки /Тригубович Г.М., Саленко С.Д., Обуховский А.Д., Шатилов К.А. приоритет 27.05.2002
2. G.Trigubovich, M.Persova, Y.Soloveichik, A.Chernyshev, M.Royak "Estimation of 3D TEM Sounding Possibilities in Search of Local Objects"// Extended abstracts of 66th EAGE Conference & Technical Exhibition Madrid, Spain, P208, 1316 June 2005.

World Leader in Magnetotellurics
PHOENIX GEOPHYSICS

- Многофункциональная и специализированная электроразведочная аппаратура для всех наземных ЕМ методов. Высокоточная GPS синхронизация всех приборов.
- Датчики, приёмники, генераторы, мониторинговые системы, вспомогательное оборудование.
- Полный комплект аппаратурно-технических средств и программного обеспечения для выполнения полевых измерений, обработки и интерпретации. Русифицированная документация. Сдача под ключ на объекте Заказчика.
- Централизованное обучение обслуживающего персонала и курсы повышения квалификации в России. Гарантийное сервисное обслуживание в течение трех лет

PHOENIX GEOPHYSICS
Toronto

Системы в полном комплекте для поисков, разведки, мониторинга и научных исследований

Тел: +1 416 491-7340 Факс: +1 416 491-7378 www.phoenix-geophysics.com mail@phoenix-geophysics.com

Телеметрическое электроразведочное оборудование серии «Импульс» для 3D электроразведки на плотных пространственно-временных сетях наблюдений

Тригубович Г.М., Персова М.Г., ФГУП«СНИИГГиМС», г. Новосибирск;
Балыбердин А.Л., ООО «Сибгеотех» г. Новосибирск

1. Аппаратура. В настоящее время в инженерной компании «Сибгеотех» разработана сканирующая аппаратура «Импульс-Д» для высокопроизводительных измерений электромагнитного поля от контролируемого источника для решения задач геологии, гидрогеологии, экологии и инженерно-геологических изысканий методами зондирований становлением поля. При этом глубинность исследований составляет от 0,5м до 300м и определяется размерами и геометрией приемно-генераторной конструкции, мощностью коммутаторов тока P=(0,2; 1; 20) кВА, частотными характеристиками и магнитным моментом приемных датчиков. В процессе разработки аппаратуры применена современная элементная база, позволившая существенно уменьшить габариты оборудования и увеличить производительность геофизических исследований. Регистрация переходного процесса ведется в равномерной арифметической шкале с шагом дискретизации 100 нс, с записью всех единичных реализаций и цифровым препроцессингом в реальном времени. Аппаратура сертифицирована Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии РФ. Получен сертификат об утверждении средств измерений (pattern approval certificate of measuring instruments) RU.C.29.007.A № 19682, зарегистрированный в государственном реестре под № 28482-04. Комплект «Импульс-Д» показан на рис. 1.

Для малоглубинных поисково-оценочных и инженерных изысканий применяется профильно-площадные зондирования с фиксацией антенн, а также непрерывное сканирование в движении с высоким пространственно-временным разрешением на скорости 0,5 - 5 м/с. В качестве арматуры для приемно-генераторных антенн используются пневматические каркасы высокого давления и стеклопластиковые конструкции. Одна из приемно-генераторных установок показана на рис. 2.



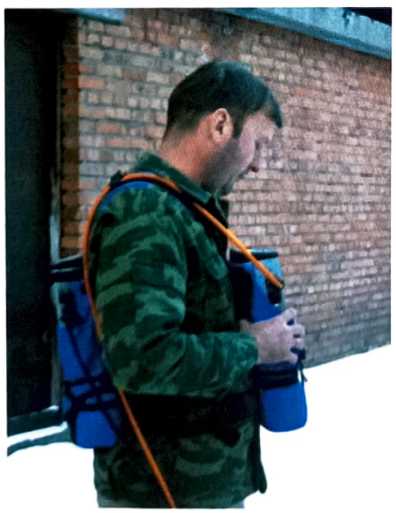


Рис. 1. "Импульс-Д" комплект: генератор, измеритель и антенный блок.



Рис. 2. Пневматическая приемно-генераторная установка для съемки в движении.



Рис. 3. Генгруппа 10 КВт и измерительный комплект "Импульс-Д" для больших глубин.

Для глубинных исследований наиболее эффективной является технология зондирований от закрепленного источника. В качестве источника электромагнитного поля используются незаземленный контур, либо заземленная линия. Необходимый уровень тока обеспечивается с помощью мощного генераторного модуля. Синхронизация генераторного и измерительного модулей осуществляется GPS-приемниками. Для измерений используются компактные активные датчики (рис. 3).

2. Технологические аспекты площадных и профильных измерений при работе становлением поля. При проведении электромагнитных зондирований становлением поля традиционно

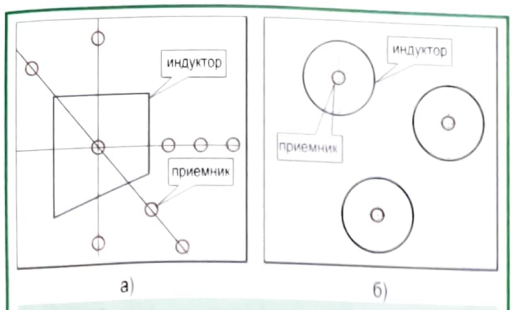


Рис. 4. Установки, используемые при работе становлением поля:
а) установка с соосными генераторной и приемной петлями;
б) установка с закрепленной петлей.

используется установка с соосными или «связанными» генераторной и приемной петлями, перемещаемыми по площади или отдельным профилям. Однако, как показала теория и практика, технология с закрепленным источником и перемещаемым приемным датчиком гораздо экономичнее и обладает не меньшей разрешающей способностью.

Конфигурация источника может быть произвольной и определяться конкретной полевой ситуацией. Учет геометрии приемно-генераторной конструкции, а также форма импульсов тока выполняется на этапе интерпретации.

Внедрению площадной технологии съемки от закрепленного источника препятствовали в основном трудности, связанные с телеметрическим сбором площадной информации и интерпретацией удаленных от источника характеристик электромагнитного поля. В настоящее время эти проблемы преодолены. Попытки же использовать простые трансформации в виде кажущихся сопротивлений для многоразносных зондирований не позволяют локализовать поисковые объекты из-за несоответствия аномалий сопротивления в исследуемой среде аномалиям измеренных на дневной поверхности значений сигнала E(t), как по месту их расположения в плане, так и по знаку аномалии.

Как известно, одной из проблем при электромагнитных зондированиях является неоднородность верхней части разреза, когда целевой объект перекрыт геологическими «объектами-помехами».

Основной идеей технологии при работе в этих условиях является разделение влияния глубинного целевого объекта и объектов-помех за счет временной дифференциации. Продемонстрируем это на примере четырехслойной среды типа КН (h_1=500 м, ρ_1=15 Ом·м, h_2=1500м, ρ_2=100 Ом·м, h_3=50 м, ρ_3=1 Ом·м, h_4=∞, ρ_4=200 Ом·м), вмещающей дискообразную модель залежи углеводородов с радиусом R=1500м, ρ=100 Ом·м, h=50 м в интервале глубин 2000-2050 метров. В верхней части разреза находятся два низкоомных и один высокоомный объекты, имитирующие трещиноватые формации как геологические помехи. Эта геоэлектрическая модель залежи УВ соответствует условиям Восточной Сибири. План и разрез показаны на рис. 5.

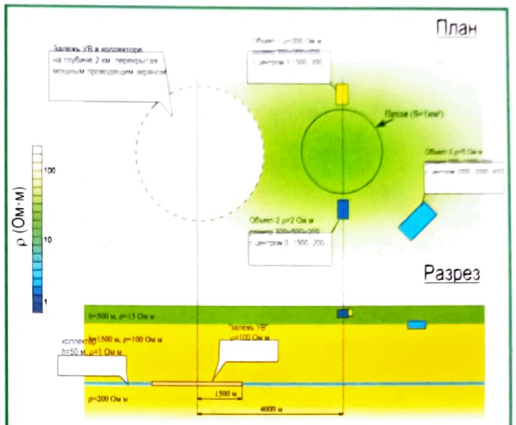


Рис. 5. Геоэлектрическая модель.

На рис. 6 показаны распределения аномальных токов в объеме и распределение аномальной E(t) на поверхности Земли в различные моменты времени после выключения тока в источнике. Как видно, на ранних временах на конфигурацию поля влияют только приповерхностные объекты, далее в некотором диапазоне времен влияют и приповерхностные помехи и глубинный объект, и, наконец, на поздних временах (начиная с 200 мс) на конфигурацию поля доминирующее влияние оказывает глубинный целевой объект.

Однако, довольно часто на практике встречаются ситуации, когда влияние неоднородностей в верхней части разреза остается существенным и на тех временах, где должен проявляться

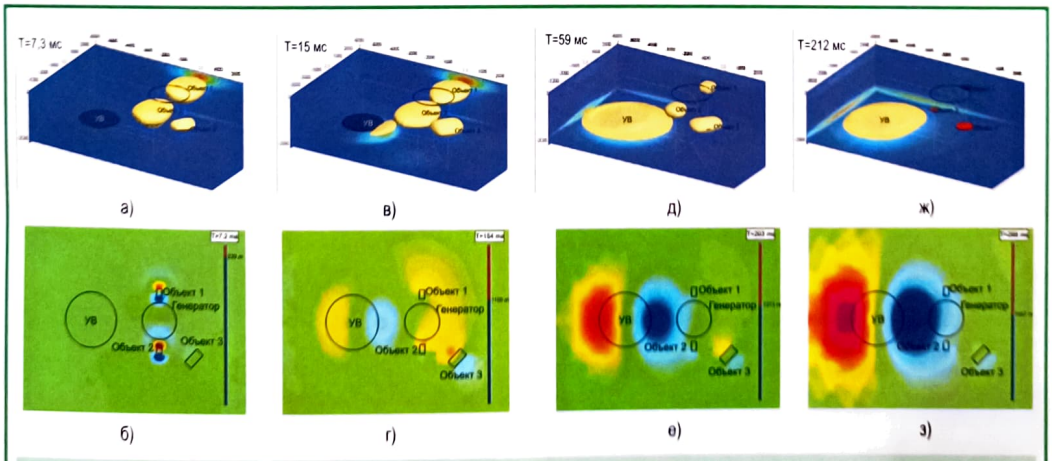


Рис. 6. Распределения аномальных токов в объеме (а,в,д,ж) и аномальной ΔE(t) по поверхности Земли (б,г,е,з) в различные моменты времени после выключения тока в источнике.



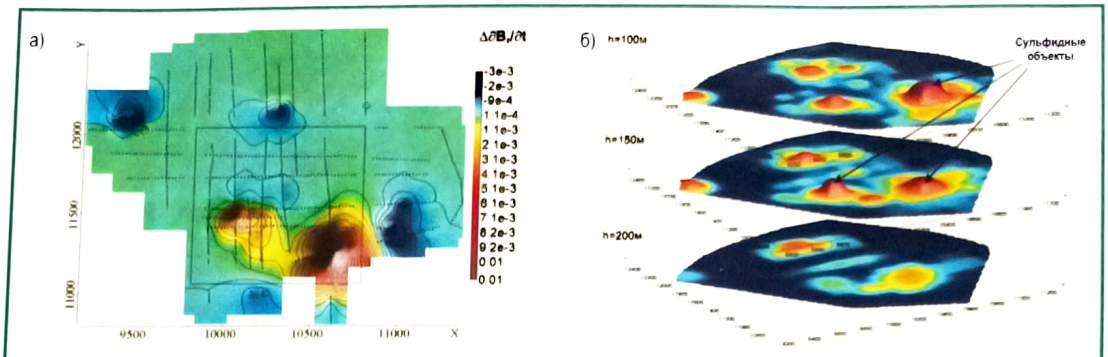


Рис. 7. а) план аномального поля E(t) на времени t = 1 мс;
б) результат реконструкции поля в виде поглубинных изоповерхностей распределения проводимости на трех уровнях.

целевой объект. В этом случае наблюдается некоторое суммарное поле, по которому, на первый взгляд, невозможно определить наличие глубинного объекта. Возможность выявления поискового объекта в такой ситуации может дать полный цикл учета влияния верхней части разреза на основе построения ее цифровой модели и расчета вклада в суммарный процесс во всем информативном диапазоне времен.

Для более точного определения параметров верхней части разреза следует применить трехмерную интерпретацию [1,2]. Несомненно 3D-интерперетация является достаточно трудоемкой и трудно формализуемой, однако дает необходимый по точности результат в виде параметров неоднородной ВЧР и позволяет «увидеть» глубинные поисковые объекты.

Трехмерная интерпретация основана на высокоточном и быстром конечно-элементном моделировании нестационарных электромагнитных полей в средах, содержащих трехмерные объекты произвольной формы. Высокая точность и скорость прямого расчета достигается за счет предложенных авторами специальных вариационных постановок и вычислительных схем, основанных на разделении осесимметричной и трехмерной частей рассчитываемого поля [3], и использования нерегулярных (многоузловых) параллелепипедоиальных, призматических и шестигранных конечных элементов в зависимости от формы трехмерных объектов [4].

К настоящему моменту расчет одной трехмерной задачи занимает примерно 10 мин при погрешности в суммарном поле около 5%, а расчет одной осесимметричной задачи (все объекты являются соосными с источником поля) занимает 3-5 с при погрешности в суммарном поле около 2%. Самый последний уровень точности позволяет обеспечить расчет с погрешностью ниже 1%. При этом требуемое время счета одной трехмерной задачи будет составлять около 3-4 часов, а осесимметричной - порядка 1 мин. Эта точность расчетов может потребоваться в заключительной фазе интерпретации.

Заметим, что использование трехмерного подхода весьма необходимо не только для площадных зондирований. При профильных зондированиях в сложнопостроенных средах без применения трехмерной интерпретации можно пропустить поисковый объект или выделить ложный. Пример трехмерной интерпретации в условиях неоднородной части разреза приведен на рис. 9.

3. Трехмерная интерпретация площадных зондирований. На одном из участков Бирюсинского золоторудного района в Восточных Саянах был проведен поиск с одновременной разведкой залежей сульфидных руд и зон золото-сульфидной минерализации. Плотная сеть наблюдений в условиях горной местности обеспечивалась телеметрическими зондированиями от закрепленного источника (1000×1000) м.

В результате были выявлены аномалии повышенной проводимости, рис. 7(а). Трехмерная инверсия площадных данных позволила построить объемное распределение проводимости в исследуемом объеме, рис. 7(б) и выделить крупные сульфидные тела, положение которых подтвердилось последующим бурением.

На рис. 8 представлены результаты трехмерной инверсии площадных данных, полученных (ЯНИГП ЦНИГРИ, «Сибгеотех») при поисково-оценочных исследованиях на кимберлиты в республике Якутия (Саха).

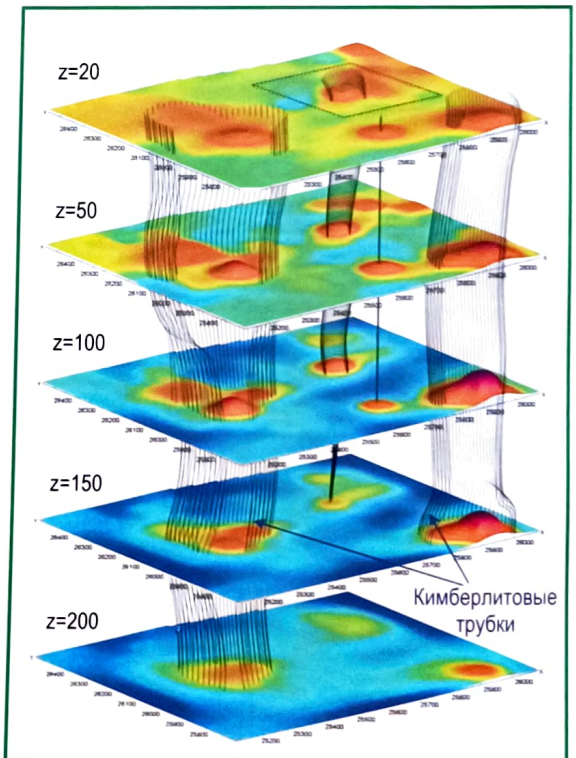


Рис. 8. Результат объемной реконструкции геологической среды по данным 3D-инверсии на участке Хатат.

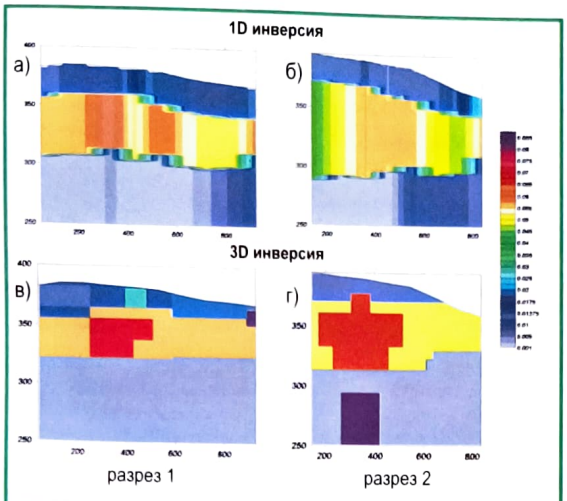


Рис. 9. Сравнение результатов 1-D и 3-D инверсий.

4. Трехмерная интерпретация профильных зондирований. Если в технологии площадных зондирований с закрепленным источником необходимость 3D интерпретации очевидна и является неотъемлемой частью технологии, то для профильной съемки традиционной и самодостаточной является интерпретация на основе одномерных моделей горизонтально-слоистых сред. Однако, как уже отмечалось выше, задача обнаружения объекта возможна лишь в случае его высокого контраста. Параметризация выделенного таким образом объекта не может считаться удовлетворительной.

В качестве примера такой ситуации покажем два поисковых участка, где решалась задача локализации слабоконтрастного объекта, под проводящим слоем-экраном. Результаты 1D интерпретации на рис. 9 (а) и рис. 9 (б) в виде двух разрезов сопротивлений показывают изменение сопротивления в самом экране. Однако после применения объемной 3D интерпретации на рис. 9 (в) и рис. 9 (г), было получено, что на разрезе 1, рис. 9 (в) действительно нет целевых подэкранных объектов и все изменения связаны только с неоднородностями в верхней части разреза, а на разрезе 2, рис. 9, (б), есть целевой подэкранный объект, который одномерная интерпретация не обнаруживает.

5. Наземная сканирующая система наблюдений с движущейся приемно-генераторной конструцией. Экспериментальные исследования ВЧР с использованием сканирующей технологии показали свою эффективность и производительность, в десятки раз превышающую известные аналоги. Анализ пространственно-временного распределения поля в движении дает надежную основу в рамках существующих электрофизических предпосылок для локализации поисковых объектов и решения структурных задач.

Скорость сканирования 0,5-5 м/с, пространственная плотность не менее 0,1 м, глубинность опоискования: со связанной приемно-генераторной установкой - 100 м, от закрепленного источника - до 1000 м. Предназначена для проведения детальных площадных исследований территорий средних размеров, где возможно непрерывное перемещение несущей пневмоконструкции шириной до 4 м (вездеход, снегоход). Исследования могут также быть выполнены по сейсмическим профилям и гидросети. Внешний вид системы и результаты сканирования показаны на рис. 10.

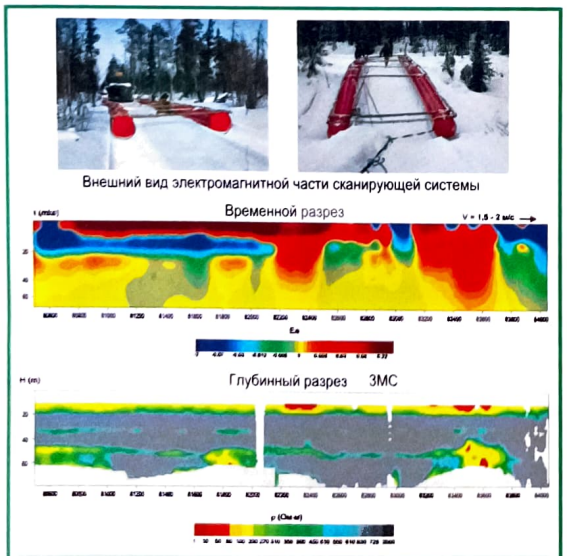


Рис. 10. Внешний вид электромагнитной части сканирующей системы и результаты сканирования.

Выводы:

- Телеметрическое оборудование серии «Импульс» позволяет эффективно организовать сбор площадной информации для систем наблюдений с закрепленным источником, «связанных» приемно-генераторных конструкций и сканирующих исследований при непрерывном измерении в движении.
- Использование трехмерных инверсий данных становления поля обеспечивает решение фундаментальной задачи реконструкции площадного распределения поля в объемное распределение проводимой среды и позволяет решать сложные поисково-оценочные задачи, повышает достоверность геофизического прогноза.
- Использование плотных пространственно-временных систем наблюдений в электроразведке становлением поля открывает перспективы для решения широкого круга задач, в том числе нефтепоисковых задач, задач мониторинга резервуаров, детального изучения морфологии рудных узлов, кимберлитовых полей, инженерно-геологических задач и др.

Литература

1. G. Trigubovich, M. Royak, Y.Soloveichik, A.Chernyshev and M.Persova. 3D procedure of conductivity reconstruction using transient electromagnetic sounding date system. // Extended abstracts of 65th EAGE Conference & Technical Exhibition - Stavanger, Norway, P155, 2-5 June 2003.

2. G.Trigubovich, M.Persova, Y.Soloveichik, A.Chernyshev, M.Royak "Estimation of 3D TEM Sounding Possibilities in Search of Local Objects"// Extended abstracts of 66th EAGE Conference & Technical Exhibition - Madrid, Spain, P208, 13-16 June 2005.

3. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Моисеев В.С., Тригубович Г.М. Моделирование нестационарных электромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов //Физика Земли, 1998. - № 10. - С. 78-84.

4. Persova M.G., Soloveychik Y.G., Shilak D.V., Trigubovich G.M., Abramov M.V. "Software for solution of 3D problems of electrical survey by transient electromagnetic field using finite elements method"// Proceedings of 9th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology (KORUS-2005). - Novosibirsk, June 26-July 2, 2005, Russia. - P. 93-96.



Аппаратура и методика высокоразрешающей электроразведки для широкого диапазона глубин

Небрат А.Г., Федотов А.С., Федотов С.А., "ВНИИГеофизика", г. Москва

Повышение эффективности геофизических работ при поиске и разведке полезных ископаемых, проведении геоэкологических исследований, а также при решении инженерно-геологических задач связано с необходимостью комплексного использования сейсмических и электромагнитных полей. Здесь важную роль играет глубинность исследований в зависимости от поставленных геологических задач. По этому параметру геофизические исследования для промышленно доступных зон можно подразделить на три группы:

- геофизические исследования верхней части разреза (ВЧР) до 100 - 200 м;
- геофизические исследования с целью поисков рудных полезных ископаемых, угольных месторождений, удобрений до глубин 500 - 1000 м;
- геофизические исследования на нефть и газ до глубин 500 - 5000 м.

Следует отметить, что для ВЧР, в отличие от глубинных слоев, характерны существенная изменчивость, как геометрических форм, так и физических свойств геологических объектов, большое влияние на нее природных (экзогенных, гидрогеологических и т.д.) и техногенных процессов.

Для задач, связанных со строительством зданий и сооружений, используются интегральные методы оценки параметров геологической среды: метод преломленных волн для сейсморазведочных исследований и электроразведка методом ВЭЗ.

Однако, повышение разрешающей способности и детальности исследований, как по вертикали, так и по латерали, обеспечивает применение методики отраженных волн многоволновой сейсморазведки и методики зондирования становлением поля в электроразведке. Вопросы эффективного использования многоволновой сейсморазведки методом отраженных волн отражены в статье [1].

В широком диапазоне глубин комплексирование сейсмических исследований с электромагнитными позволяют выполнять разработанные ООО «Велко» модификации электроразведочных станций МПП «ЭЛЛИСС-ПП», обеспечивающие регистрацию данных в диапазоне частот 250 Гц - 250 кГц. Приведем далее основные характеристики указанных систем.

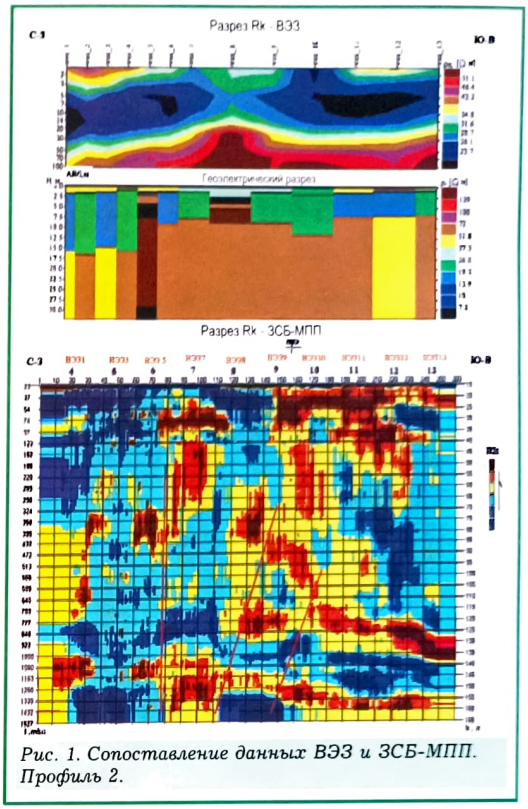


Рис. 1. Сопоставление данных ВЭЗ и ЗСБ-МПП. Профиль 2.

Таблица 1. Основные характеристики электроразведочной станции «ЭЛЛИСС-ПП» для высокочастотного диапазона.

Число каналов	1 - 24
Коэффициент предварительного усиления, дБ	0, 12, 24, 36, 48
Динамический диапазон, дБ	90
Период дискретизации, мкс	2
Уровень шума, приведенный ко входу, мкВ, не более	0,5
Нелинейные искажения, %, не более	0,1
Масса блока (1 канал), кг	1
Габариты блока (1 канал), мм	180 x 85 x 70
Мощность потребления, Вт	2
Температурные условия работы измерительного блока С°	-40... +70
Система питания: аккумуляторная батарея, напряжение, В	12
Интерфейс для подключения к компьютеру типа Note Book	LPT, USB

Таблица 2. Основные характеристики электроразведочной станции «ЭЛЛИСС-ПП» для низкочастотного диапазона.

Число каналов	1 - 96
Коэффициент предварительного усиления, дБ	0, 12, 24, 36, 48
Динамический диапазон, дБ	120
Фильтры нижних частот, Гц	100, 200, 400, 800, 1600, 3200
Период дискретизации, мкс	0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4
Уровень шума, приведенный ко входу в полосе 128 Гц при максимальном усилении, мкВ	0,15
Нелинейные искажения (при максимальном усилении), %, не более	0,002
Мощность потребления, Вт/канал, не более	0,25
Масса блока (1 канал), кг	1
Габариты блока на 1 канал, мм	180 x 85 x 70
Температурные условия работы измерительного блока С°	-40... +70
Система питания: аккумуляторная батарея, напряжение, В	12
Интерфейс для подключения к компьютеру типа Note Book	LPT, USB

Для задания тока в варианте работы по технологии ЗС-Б используется коммутатор тока до 10 А, работающий от входного напряжения 12 - 24 В, с фронтом спада тока около 1 мкс при работе на петлю в несколько витков диаметром 1 - 1,5 м.

Вышеуказанная аппаратура «ЭЛЛИСС-ПП» используется для технологии высокоразрешающей электроразведки в диапазоне глубин для верхней части разреза (до 400 - 500 м) и глубинных исследований до 3 - 5 км.

Технология высокоразрешающей (ЗСБ - ВСЭФ) малоглубинной электроразведки защищена патентом [2].

Применяемая система измерений и специальное программное обеспечение позволяют получать **временной геоэлектрический разрез** с весьма высокой степенью разрешения. Впервые удалось выделить осцилляции электромагнитного поля, несущего информацию о геологическом строении до значений частот 1500 - 1700 Гц. Применение таких частот позволяет выделять и изучать геологические напластования мощностью в первые метры.

Производительность, точность, оперативность получения данных в сравнении с традиционными ВЭЗ и СЭП существенно выше. Качество и достоверность материала, получаемого с помощью новой технологии электроразведки, оценено в сравнении с результатами классического профиля ВЭЗ (рис. 1).

Технология может активно применяться при гидрогеологических, инженерно-геологических изысканиях, в рудной геофизики и пр.

Для глубинных исследований на нефть и газ используется низкочастотная модификация станции «ЭЛЛИСС-ПП»:

С учетом технических возможностей системы разработана технология электромагнитных исследований в трех модификациях:

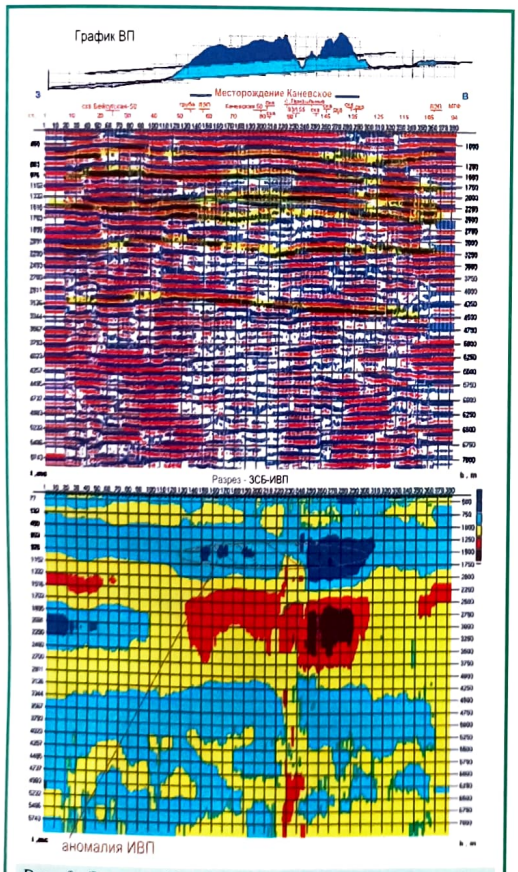


Рис. 2. Эталон-Профиль через известное месторождение.

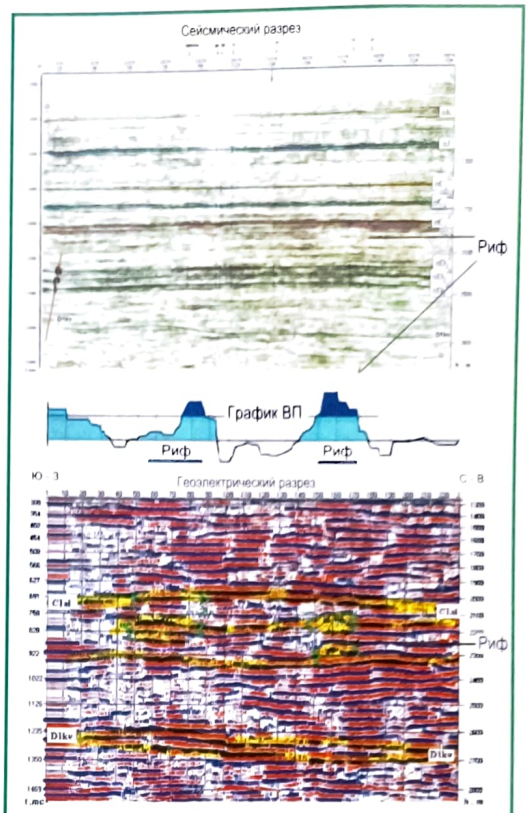


Рис. 3. Пример работ выполненных комплексом сейсморазведка - электроразведка. Поволжье.

1. Стандартный метод вызванной поляризации (ВП), позволяющий получать информацию о наличии или отсутствии залежи УВ в плане, без привязки по глубине;

2. Технология ЗСБ-ИВП (индикационной вызванной поляризации), позволяющая получать информацию о наличии залежи УВ, с привязкой по глубине [3];

3. Технология ЗСБ-ВСЭФ, позволяющая получать временные геоэлектрические разрезы с высокой степенью разрешения.

В качестве иллюстрации приведем примеры применения технологии на практике. На рис. 2 показаны результаты работ на профиле-эталоне, проходящем через известное крупное месторождение УВ. Отмечаются интенсивные аномалии параметры ВП и параметра ЗСБ-ИВР. На временном геоэлектрическом разрезе отчетливо видна ловушка - антиклинальный перегиб. Кстати, в западной части профиля также на временном разрезе отмечен антиклинальный перегиб, но отсутствуют аномалии ВП и ЗСБ-ИВП. Пробуренная ранее наших работ на этой складке скважина оказалась сухой.

Есть положительные результаты применения технологии и при изучении рифогенных объектов. Примером могут служить работы, выполненные комплексом сейсморазведка - электроразведка в Поволжье (рис.3). Отмечается хорошее совпадение при выделении рифовых построек по данным МОВ-ОГТ и ЗСБ-ВСЭФ, и четкое проявление их в аномалиях ВП. Комплекс независимых данных существенно повышает вероятность выделения залежи УВ.

Литература

1. Федотов С.А. Оптимизация технологии малоглубинных исследований с сейсмостанцией «ЭЛЛИСС» Приборы и системы разведочной геофизики №4(06) 2003. С.15. Саратов.
2. Патент № 17634. Авторы: Небрат А.Г., Сочельников В.В.
3. Патент № 93041480125 G01V3/08. Авторы: Небрат А.Г., Сочельников В.В.

TEM-FAST - технология малоглубинной электроразведки

Барсуков П.О., Файнберг Э.Б., Хабенский Е.О., ЦГ ЭМИ ИФЗ РАН, г. Москва

Технология TEM-FAST была создана в 1992-93 гг. на основе хорошо известного и популярного во всем мире метода зондирований становлением поля (ЗС/ЗСБЗ или TEM/TDEM). Метод ЗС, использующий магнитные приемные и излучающие антенны (петли и индукционные датчики), обеспечивал максимальную глубинность исследований при минимальных размерах зондирующей установки. При предельной глубине исследований 200-300 м лучшие мировые TEM-системы обеспечивали производительность порядка 2-3 зондирований в час. Однако процесс обработки и интерпретации данных был весьма сложным и занимал достаточно много времени, что существенно увеличивало стоимость исследований. Эти два недостатка (низкая производительность и высокая стоимость) резко снижали шансы ЗС в конкуренции с другими методами малоглубинных геофизических исследований.

Разработчики TEM-FAST ставили перед собой две основных задачи: резкое увеличение производительности полевых исследований ЗС и максимальную автоматизацию процессов обработки и интерпретации данных. Эти задачи были успешно решены в разработанной системе.

В TEM-FAST технологии в качестве генераторной и приемной антенн используется одна и та же квадратная или прямоугольная незаземленная петля (так называемый однопетлевой вариант ЗС). При этом сразу достигаются две цели: измеряется изменение магнитного потока во времени через контур петли, максимально интегрируя эффекты от приповерхностных неоднородностей в окрестности антенны, и в разы повышается производительность полевых работ, поскольку отпадает необходимость раскладывать вторую петлю или индукционный датчик. Кроме того, регистрируемый переходной процесс обладает рядом уникальных, полезных свойств, которые используются при сглаживании данных и построениях трансформаций.

Аппаратура TEM-FAST 48HPC обеспечивает генерирование импульсов тока и измерение процесса становления поля в антеннах с размерами от нескольких сантиметров до полукилометра. Кондиционные измерения и интерпретацию данных зондирований можно проводить с антеннами размером от (10×10) м^2. Измерения с сантиметровыми и метровыми антеннами проводятся для физического моделирования, исследований физических свойств горных пород или поисков уникальных объектов. Процесс измерения полностью автоматизирован и управляется карманным компьютером (Pocket PC).

Третьим элементом технологии является компьютерная программа TEM-RESEARCHER, осуществляющая обработку, интерпретацию данных ЗС и подготовку информации для финального отчета.

Аппаратура TEM-FAST-48 HPC

На рис.1 представлен полевой комплект аппаратуры TEM-FAST 48 HPC.



Рис. 1. Аппаратура TEM-FAST 48 HPC и карманный компьютер HP Ipaq 2210.

Наиболее важной характеристикой любой аппаратуры метода ЗС, применяемой для малоглубинных исследований, является длительность собственного переходного процесса, т.е. процесса становления, зависящего от инерционных свойств системы генератор-антенна-измеритель. Понятно, что кондиционные измерения сигналов ЗС возможны лишь во временном диапазоне, в котором собственный процесс системы отсутствует (после так называемой «мертвой зоны»). Чем короче собственный процесс, тем на более ранних временах можно производить измерения и тем меньше минимальная глубина ЗС. На рис.2 представлены характеристики собственного процесса и сигнала ЗС в антенне (20×20) м^2.

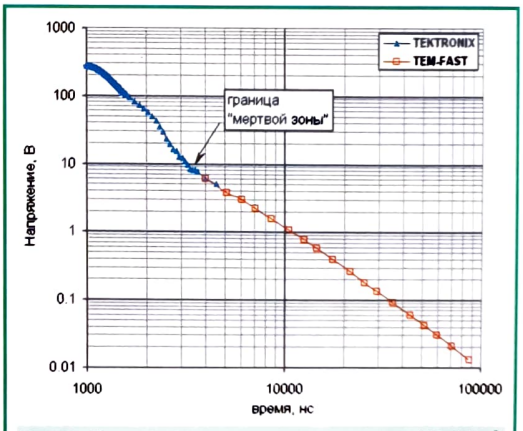


Рис. 2. Напряжение на терминалах петли (20×20) м^2 после выключения тока 1А. Левая ветвь - измерения осциллографом Tek THS720A, а правая - TEM-FAST 48 HPC. Собственный процесс системы генератор - петля - измеритель заканчивается на времени ~3500 нс.

Собственный процесс зависит от многих факторов: размера антенны, выходной емкости силового транзистора, величины шунтирующего петлю резистора и т.д. В системе TEM-FAST 48 при использовании антенн (20×20) - (100×100) м^2 из проводов с сопротивлением от 40 до 8 Ом/км (ПВ-4, ПВА, ПГВА 0,5-2,5 мм^2) «мертвая зона» соответственно занимает диапазон от 3,5 мкс до 20 мкс. На сегодняшний день это лучший

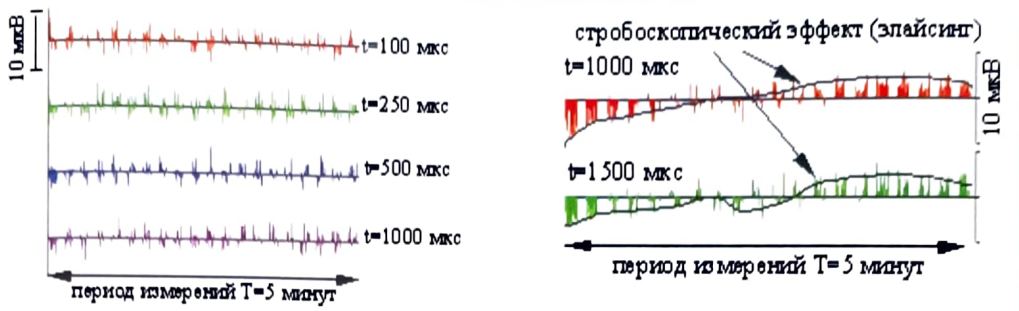


Рис. 3. Контроль и анализ электромагнитных шумов TEM-FAST 48 HPC.

результат среди промышленно выпускаемых в мире ТЕМ систем [4].

Как уже отмечалось, процесс измерений и обработки сигнала производится под управлением карманного компьютера, который контролирует режим работы, качество данных, накапливает сигнал по специальному кодовому алгоритму с целью обеспечения наилучшего соотношения сигнал/шум. Для обеспечения стабильности и точности измерений на уровне 0,1% каждые полсекунды проводится автоматическая калибровка прибора, устраняющая аддитивные (дрейф аналоговых цепей) и мультипликативные (дрейф усиления и величины тока) погрешности. Одновременно с измерениями отклика среды на каждой временной задержке производятся измерения электромагнитного шума (рис. 3). Знание характеристик этого шума важно при сглаживании (фильтрации) данных, устранении элайсинговых эффектов и др.

Выходными измеряемыми величинами являются: E(t)/I - нормированная на ток переходная характеристика и ERR(t) - величина погрешности измерений для каждого времени t.

Аппаратура позволяет измерять сигналы в диапазоне от 4 мкс до 16 мс.

Собственные шумы измерителя не превышают 100 нВ (rms), что позволяет при времени накопления 2,5 минуты надежно измерять сигналы величиной ~1 мкВ.

После 2-3 минут измерений (обычно этого достаточно даже при экспериментах в городских условиях) оператор видит на экране компьютера переходные процессы, оценки погрешностей, характеристики шумов и т.д. (рис. 4).

Кроме того, в карманном PC имеется программа трансформации кривых становления в зависимость кажущегося сопротивления от глубины исследований. Это позволяет оператору непосредственно в полевых условиях получать информацию об исследуемом разрезе.

Трансформация кривых E(t)/I в ρ(h)

В электроразведке принято в качестве интерпретационного параметра использовать кажущееся удельное сопротивление $\rho_a(t)$ такого однородного полупространства, реакция которого в момент времени t совпадает с экспериментально измеренным сигналом. Традиционно в ЗС, $\rho_a(t)$ вычисляют по асимптотической формуле поздних времен для ближней зоны становления поля, когда выполняется условие $t/(\sim\rho R^2/\rho_a(t)) >> 1$:

$$\rho_a(t) = \left[\frac{\sqrt{\pi}}{20}\frac{\mu^{5/2}R^4}{t^{5/2}E(t)/I}\right]^{2/3} \qquad (1)$$

где E(t)/I - измеряемая величина нормированного

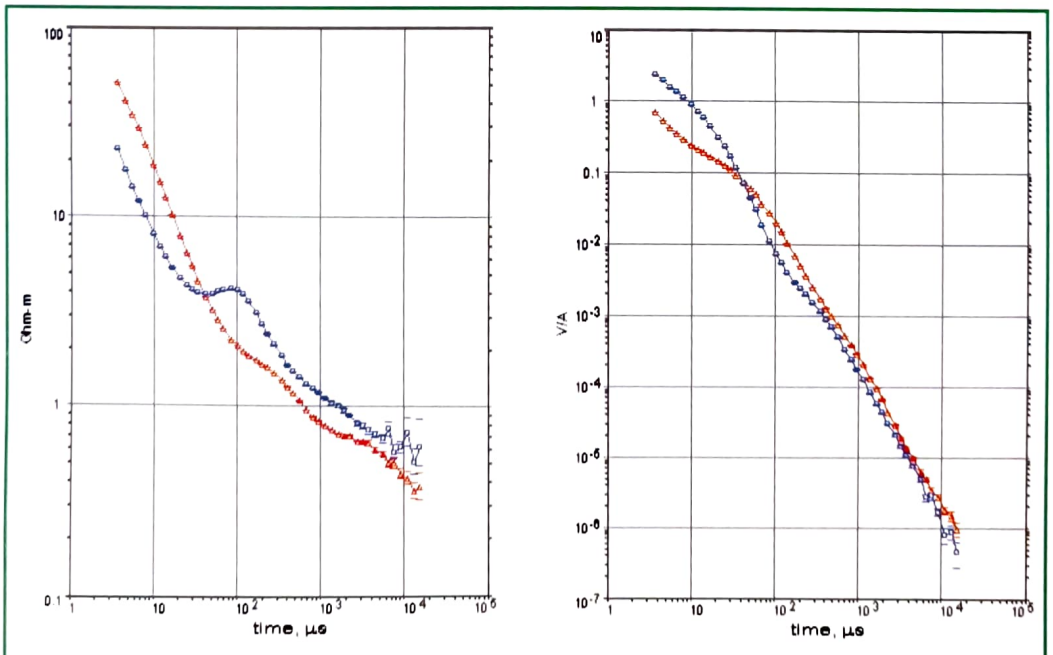


Рис. 4. Кривые кажущегося сопротивления (слева) и переходные характеристики E(t)/I (справа) с погрешностями измерений, соответствующие двум ЗС с антеннами (25×25) м².



напряжения на терминалах антенны, а $R=L/\rho^{1/2}$ - эффективный радиус квадратных одновитковой антенны со стороной L.

Однако можно ввести кажущееся сопротивление, рассчитанное по полной формуле становления, справедливой для любой стадии переходного процесса. В совмещенных антеннах для однородного полупространства ЭДС равна:

$$E(t)/I = \mu\pi R^2 \int_0^\infty \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \left[\frac{1}{\pi t/\tau} - e^{t/\tau} erfc(\sqrt{t/\tau}) \right] J_1^2(\lambda r) d\lambda , \quad (2)$$

где $\tau = \frac{1}{\rho} \frac{\mu}{\lambda^2}$.

Кажущееся сопротивление $\rho_f(t)$ можно получить, решая уравнение (2) относительно ρ, в левой части которого стоит измеренная величина напряжения.

Кажущиеся сопротивления, рассчитанные по асимптотической формуле ближней зоны (1) и по полной формуле, совпадают на поздних временах и существенно отличаются на ранних, где $t/(\sim\rho R^2/\rho_a(t)) < 1$ (рис. 5).

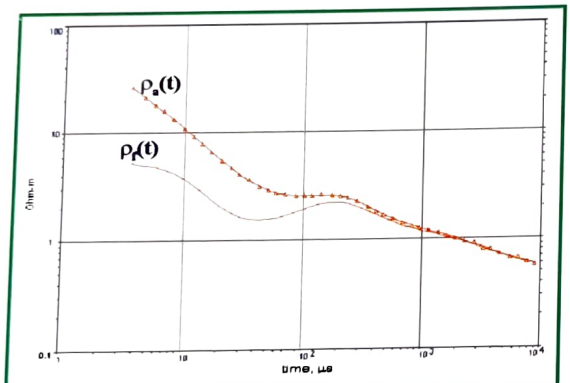


Рис. 5. Кажущиеся сопротивления, рассчитанные по асимптотической $\rho_a(t)$ и полной формуле становления поля $\rho_f(t)$.

Отметим, что $\rho_f(t)$, в отличие от $\rho_a(t)$, на всех стадиях переходного процесса ведет себя подобно кажущему сопротивлению в методах постоянного тока (ВЭЗ или ДЭЗ).

Преобразование $E(t)\rightarrow\rho(h)$ в TEM-FAST следует идеям известных трансформаций МТ-данных (Ниблета, Бостика, Молочнова, Ле-Вьета), однако имеет ряд особенностей, позволяющих изменять разрешающую способность (детальность) $\rho(h)$ в зависимости от типа и контрастности исследуемого геоэлектрического разреза. Для преобразования $E(t)\rightarrow\rho(h)$ используются две функции: $\rho_f(t)$ - кажущееся сопротивление, рассчитанное по полной формуле и ее производная по времени $d\rho/dt=\rho'_f(t)$. Процедура вычислений $\rho_f(t)$ и $\rho'_f(t)$ (решение уравнения (2)) относятся к классу неустойчивых задач и требуют специального алгоритма сглаживания исходных данных $E(t)$. Алгоритм сглаживания подробно описан в работе [1] и основан на представлении переходного процесса $E(t)$ в виде суперпозиции экспонент, где действительная функция $E(s)$ действительного показателя экспонент s называется экспоненциальным спектром.

Использование дополнительной информации о поведении спектра $E(s)$ существенно повышает устойчивость решения. Например, для однопетлевого варианта ЗС при любом распределении частотно независимой электропроводности в исследуемой среде экспоненциальный спектр положителен при всех значениях s. Отсюда следует, что

$$E(t) = \int_0^\infty E(s) e^{-st} ds \quad (3)$$

сами сигналы становления $E(t)$ и все их временные производные обладают свойством «совершенной монотонности» [2,3]

$$\frac{d^n E(t)}{dt^n} = (-1)^n \int_0^\infty s^n E(s) e^{-st} ds$$
$$(-1)^n \frac{d^n E(t)}{dt^n} > 0 , \quad n \geq 0 \text{ и } t > 0 \quad (4)$$

Это означает, что переходной процесс не может изменить свою полярность, а также ни одна из его временных производных не меняет знака. Если же измеряемый в совмещенной приемно-излучающей антенне процесс убывает немонотонно, изменяя полярность, это однозначно свидетельствует о частотной зависимости проводимости исследуемой среды (индукционно вызванная поляризация или IP-эффект). Отметим, что такое утверждение несправедливо для разнесенных приемно-генераторных антенн ЗС.

Таким образом, сначала производится сглаживание экспериментальных данных, аппроксимация суперпозицией экспонент, согласно (3), а затем вычисляется кажущееся сопротивление по полной формуле $\rho_f(t)$.

Далее вычисляется корректирующий коэффициент

$$k(t) = \frac{1}{(1-\nu)^{3/2}} , \quad (5)$$

где $\nu = \frac{t}{\rho_f(t)} \frac{d\rho_f(t)}{dt} = \frac{d \ln \rho_f(t)}{\ln t}$ $\quad abs(\nu) < 1$

а затем и $\rho(h)$:

$$(5.1)$$

Эффективная глубина исследования h для каждого времени t определяется как

$$h = \sqrt{\frac{t\,\beta(res)}{\mu_0}} . \quad (5.2)$$

Функция $\beta(res)$ имеет размерность [Ом·м] и может изменяться от величины ρ_t «нетрансформированного» сопротивления) до величины ρ_h из (5.1).

Изменения значений $\beta(res)$ существенно изменяет вид кривой $\rho_h=\rho(h)$ и разрешающую способность трансформаций. Для слабоконтрастных сред $\beta\rightarrow\rho_h$, а для контрастных $\beta\rightarrow\rho_t$, для сред со средним уровнем контрастности $\beta=(\rho_h\rho_m)^{1/2}$.

Соотношение между ρ_h и ρ_m в $\beta(res)$ регулируется специальным параметром resolution (res) - «разрешающей способностью трансформаций», который исследователь может изменять либо самостоятельно, или же, включив автоматический режим, поручить программе трансформаций:

$$\ln(\beta(res)) = \ln(\rho_m) + \frac{\ln(\rho_h) - \ln(\rho_m)}{10} * res$$
$$0 \leq res \leq 10$$

Построение разреза ρ(h) производиться в автоматическом режиме без привлечения какой-либо дополнительной информации. Поскольку при вычислении ρ(h) не требуется задавать количество слоев, построенные разрезы, несмотря на то, что они, по сути, являются псевдоразрезами, во многих случаях более объективно отражают распределение сопротивления с глубиной, чем инверсия данных в классе слоистых сред.

Рис. 6 иллюстрирует изменение разрешающей способности трансформаций при изменении расстояния между двумя тонкими хорошо проводящими слоями глин (ρ=3 Ом·м), залегающими среди достаточно высокоомных пород (ρ=70 Ом·м). Кусочно-однородный график-модель, гладкая кривая-трансформация. При расстоянии h=3м слои неразличимы, с увеличением расстояния между слоями разрешение увеличивается.

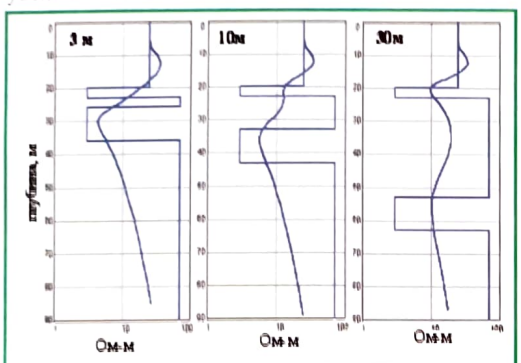


Рис. 6. Пример трансформации ρ(h) (индексы - расстояние между слоями).

Пример использования трансформаций ρ(h) в резко неоднородных средах приведен на рис. 7. Исходные данные получены в результате физического моделирования TEM-FAST на алюминиевых пленках в масштабе 1:400. Использовались антенны 20 витков, (10×10) см^2. Черными линиями показано истинное расположение алюминиевых пленок разной толщины. Хорошо видно, что основные черты разреза легко угадываются на псевдоразрезе, хотя, естественно, точного совпадения нет.

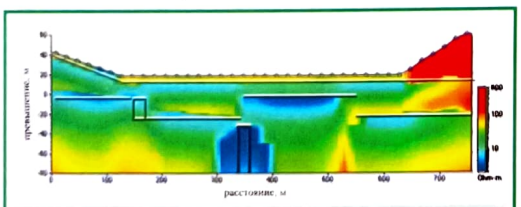


Рис. 7. Геоэлектрический псевдоразрез, построенный по трансформациям ρ(h).

В таблице 1 приведены технические характеристики аппаратуры TEM-FAST 48 HPC.

Программа обработки и интерпретации данных ЗС TEM-RESEARCHER

После окончания полевых исследований данные из полевого карманного компьютера копируются в настольный PC. Специальная программа конверсии позволяет контролировать корректность установленных координат и высотных отметок точек наблюдения (обычно задаются оператором по GPS в процессе полевых измерений).

Первой процедурой обработки данных является построение псевдоразрезов по только

Таблица 1. Технические характеристики TEM-FAST 48 HPC.

Генератор

- время выключения токового импульса (I=1 A), мкс
  (25×25) м^2, не более 4
  (50×50) м^2, не более 8
  (100×100) м^2, не более 20
- Амплитуда токовых импульсов, А ,выборочно 1/4
- Отношение импульс/пауза 3/1
- активное сопротивление нагрузки, Ом ..... 0 - 20
- индуктивность нагрузки (I=1A), Гн ..... < 0,01

Приемник

- Полоса частот, МГц, не менее 4
- Допустимое постоянное напряжение на входе, мВ ..... -2 ..5
- Количество автоматически регистрируемых задержек 48
- подавление промышленных помех 50/60 Гц, дБ, не менее 60
- Внутренний шум (rms - ср.кв. значение), мкВ
  (накопление 3 мин, I=1 А, нагрузка 4 Ом), не более 0,1
- Динамический диапазон, max /min ..... 10В /1 мкВ
- Измеряемые величины:
  Е.Д.С./ток ..... В/А
  погрешности измерений ..... В/А, %
- Возможные типы измерительных установок:
  однопетлевой с размерами антенн, м^2 ..... до 500×500
  «петля в петле» - размер генераторной
  петли, м^2, не более ..... 500×500
  оптимальная конфигурация -
  одна петля площадью, м^2 ..... (20×20) ÷ (100×100)

Минимальное время измерений, с 18

Энергопотребление

- Штатная внутренняя батарея ..... 12В, 2000 мА·ч
- Максимальное количество зондирований со штатной батареей:
  (I=1А, накопление 3 мин), не менее 70
- Потребление в режиме - «sleep», мкА, не более 1
- Среднее потребление в режиме -
  «work» I=1А, мА , не более 350
- время работы Pocket PC Ipaq 2110, ч, не менее 8

Другие характеристики

Работа с IBM-совместимым PC OS DOS/Win95/98/ME/Win2000/XP
Pocket PC OS WinCE и ее модификации (порт RS 232)

Вес, кг, не более 1,5
Вес карманного PC Ipaq 2110, кг, не более 0,2
Размеры, мм ..... 103×27×310
Температурный диапазон работы, °С ..... -20. . .65
Изменение температуры, °С /мин, не более 3
Степень защиты корпуса прибора IP15 (65)
Производительность исследований
4 чел., (100×100) м^2, 3С /час ..... до 12

что полученным данным ЗС. Эта операция выполняется в автоматическом режиме и занимает около минуты. В результате исследователь получает псевдоразрез подобный тому, что показан на рис.6. На основе полученного разреза можно судить об основных особенностях исследуемой среды. Более детальную информацию можно получить на основе одномерной (1D) инверсии.

Величины сопротивлений и мощности слоев вычисляются из минимума функционала невязки вычисленных и экспериментальных данных. При этом учитывается погрешность и априорная информация. Стартовую модель выбирают, исходя из имеющихся геологических пред-



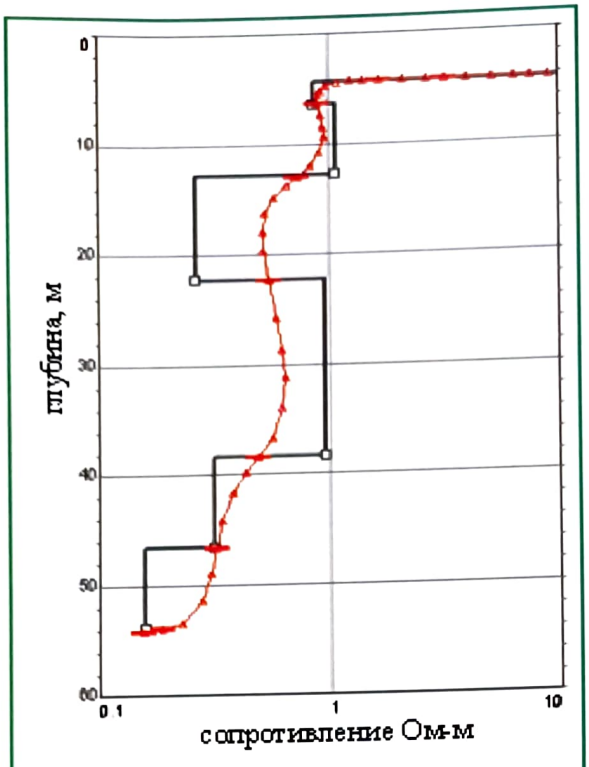


Рис. 8. Определение стартовой модели 1D инверсии по трансформации ρ(h).

ставлений о разрезе, или на основе псевдоразреза ρ(h), рис. 8.

Отталкиваясь от стартовой модели, определяется модель среды, ТЕМ-отклик от которой наиболее близок к исходным данным. Эта процедура называется инверсией и, как известно, относится к классу неустойчивых задач. Неустойчивость инверсии проявляется в том, что к одной и той же исходной переходной характеристике E(t), измеренной с некоторыми погрешностями err(t), можно подобрать целый ряд эквивалентных моделей среды, ТЕМ-отклики от которых $E_m(t)$ на каждом времени t, будут удовлетворять неравенству:

$$|E(t)-E_m(t)|<err(t), \qquad (6)$$

т.е. отклонения модельных E_m и исходных E откликов лежат в пределах погрешностей измерений err. Чем меньше погрешности err и шире временной диапазон измерений сигналов ЗС, тем уже класс эквивалентных моделей среды.

Другая, весьма существенная проблема заключается в том, что для определения параметров реальной трехмерной геологической структуры (3D) используются 1D данные (профильные, например) и 1D инверсия. Понятно, что в этом случает требование близости исходных и модельных ТЕМ-откликов (6) не гарантирует получение истинного представления о реальной структуре исследуемой среды.

Однако, несмотря на казалось бы абсолютно тупиковую ситуацию с применением 1D инверсии к 3D структурам, выход все же есть. Как уже отмечалось, однопетлевой вариант ЗС обеспечивает максимально возможную локальность исследований. Результаты физического моделирования и специальные натурные исследования позволяют утверждать, что в неоднородных средах сигнал в совмещенных антеннах слабо зависит от областей изучаемой среды, находящихся вдали от контура антенны. Иллюстраций этого утверждения может служить рис. 9, на котором показаны результаты 1D инверсии данных физического моделирования (рис. 7).

Несмотря на то, что истинная структура среды далека от одномерной, результат 1D инверсии можно считать приемлемым. Грубые ошибки наблюдаются лишь на резких границах слоев и вблизи центральной вертикальной структуры. В правой части профиля плоскость антенны наклонена к горизонту на 23°, тем не менее, границы слоев на этом участке профиля определяются с приемлемой для практики погрешностью. Модельные исследования показывают, что сигнал в совмещенной антенне L×L практически не зависит от неоднородностей, расположенных дальше, чем на L от контура петли.

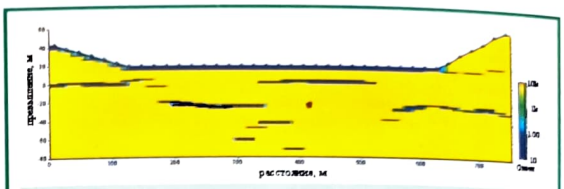


Рис. 9. Результат 1D инверсии данных физического пленочного моделирования (см. рис. 7).

Принципиальную роль в получении устойчивого, «геологически адекватного» результата инверсии данных ЗС играет априорная информация о разрезе. Перед началом инверсии данных, измеренных по площади или профилю, исследователь должен как минимум задать предельные значения сопротивлений и мощностей слоев, что в 90% случаев автоматически приводит к получению приемлемого геологического результата.

При отсутствии информации о геоэлектрическом строении исследуемой территории (что весьма часто бывает) надежные и устойчивые результаты можно получить при совместной 1D инверсии данных ЗС и методов постоянного тока ВЭЗ или ДЭЗ. Как известно, ВЭЗ весьма чувствителен к электрически изолирующим горизонтам, в то время, как ТЕМ - к хорошо проводящим. Совместная инверсия данных ТЕМ и ВЭЗ позволяет одновременно повысить чувствительность электроразведочных исследований, как к проводникам, так и к изоляторам. Если в распоряжении исследователя имеются результаты измерений обоих методов, то программа DC-TEM-RESEARCHER позволяет

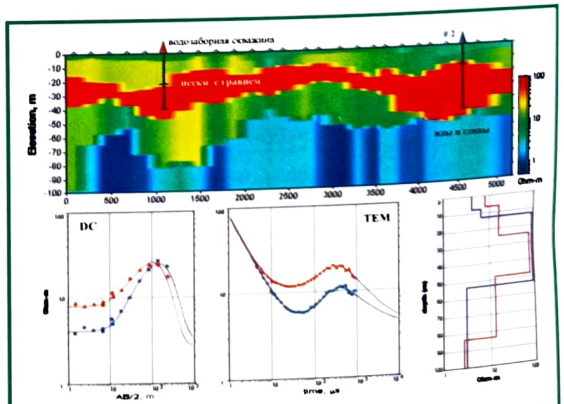


Рис. 10. Совместная инверсия данных TEM-FAST, антенны (25×25) м² и ВЭЗ (AB=500м) при гидрогеологических исследованиях в Египте (1994 г.).

найти 1D модель среды, для которой одновременно TEM и ВЭЗ отклики удовлетворят неравенствам (6) с соответствующими исходным данным. Пример совместной инверсии ВЭЗ(DC) и TEM-FAST данных по гидрогеологическому профилю приведен на рис. 10.

Рис. 11 иллюстрирует инверсию TEM-FAST данных при региональных исследованиях в платформенных областях. В качестве априорной информации заданы максимальные и минимальное электрические сопротивления пород и количество слоев (по каротажу).

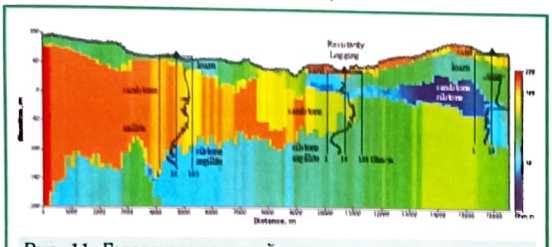


Рис. 11. Геоэлектрический разрез по региональному профилю (антенны 100×100 м²) и данные каротажа сопротивлений (Алроса-Поморье, 2005 г.).

Рис. 12 иллюстрирует данные TEM-FAST полученные при поисках кимберлитовых трубок. При инверсии никакой априорной информации задано не было. Данные были проинтерпретированы, а затем совмещены с геологическим разрезом.

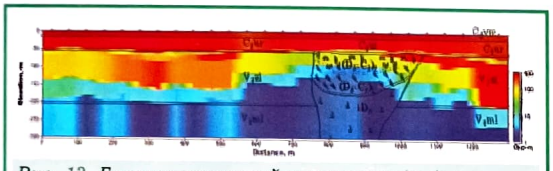


Рис. 12. Геоэлектрический и геологический разрезы через кимберлитовую трубку - антенны (100×100)м². 1D инверсия проведена без привлечения какой-либо априорной информации. Геологические данные Алроса-Поморье, 2005 г.

При площадных исследованиях возникает необходимость автоматической инверсии весьма больших объемов данных (несколько тысяч точек ЗС). Для решения такой задачи предусмотрен специальный алгоритм, который стабилизирует инверсионную процедуру, используя в качестве стартовой модели для каждой точки результат инверсии в соседних точках площади исследования. Кроме того, для получения геологически адекватного результата инверсии необходимо как можно точнее задать предельные значения сопротивлений и мощностей слоев. Пример автоматической инверсии площадных данных ЗС приведен на рис. 13.

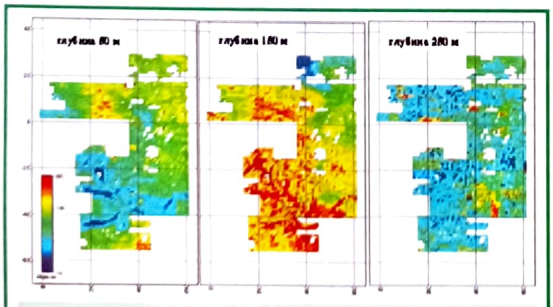


Рис. 13. 1D инверсия площадных данных TEM-FAST. 3500 зондирований с антеннами (100×100) м². Удельное сопротивление пород на различных глубинах. Инверсия в рамках 5-слойного разреза с сопротивлениями от 10 до 300 Ом·м. Обработка всего массива данных заняло около 12 часов на PC 3,3ГГц. TEM-FAST съемка компании «Терра», 2002 г.

Применение TEM-FAST технологии

Описанная технология импульсных электромагнитных зондирований может быть применена всюду, где соблюдаются три условия:

- искомый объект находится на глубине в пределах 300 м от поверхности;
- объект отличаться от вмещающей среды по сопротивлению, как минимум, в 1,5 раза;
- эффективный размер локального объекта соизмерим с глубиной его залегания.

Прежде всего, TEM-FAST применяется для решения геологических и гидрогеологических задач: региональные картирование, поиски алмазоносных трубок в благоприятных условиях, месторождений электрически контрастных руд, поиски россыпей золота и алмазов, картирование водоносных горизонтов, водоупоров и т.д.

Однако, за десятилетие использования технологии, как минимум в 25 странах мира, область применения существенно расширилась. Так, например, на рис. 14 показаны результаты TEM-исследований археологического объекта - египетских пирамид.

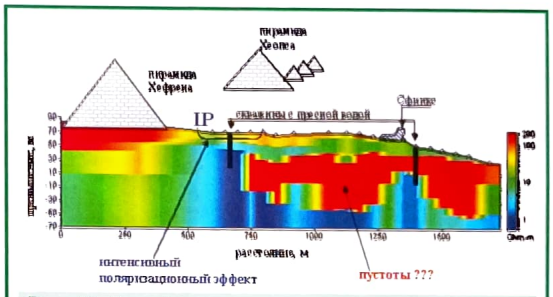


Рис. 14. Исследования геологического строения плато Гиза (Египет 1994 г.).

Исследования, начатые как чисто геологические, дали неожиданный результат: между всемирно известными объектами Сфинкс-пирамиды Хеопса и Хефрена была обнаружена область с аномально высоким электрическим сопротивлением. Предположительно ее связывали с пустотами в известковых отложениях плато Гиза, которые содержат минерализованную воду и обладают весьма низкими сопротивлениями (до единиц Ом·м по данным ВЭЗ). В 2000 году в указанном месте были обнаружены глубокие подземные галереи. Остается загадкой природа локальной зоны (более гектара) интенсивного поляризационного эффекта у подножья пирамиды Хефрена.

На рис. 15 представлен геоэлектрический разрез, полученный при исследованиях региональных разломных нарушений на Тянь-Шане. В левой части профиля обнаружена обширная зона низких сопротивлений, которая предположительно связана с выходом термальных вод.

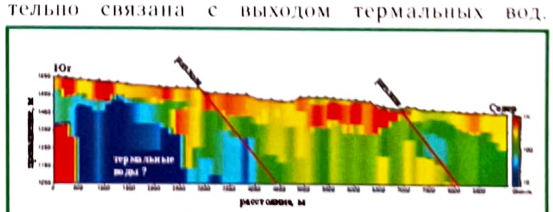
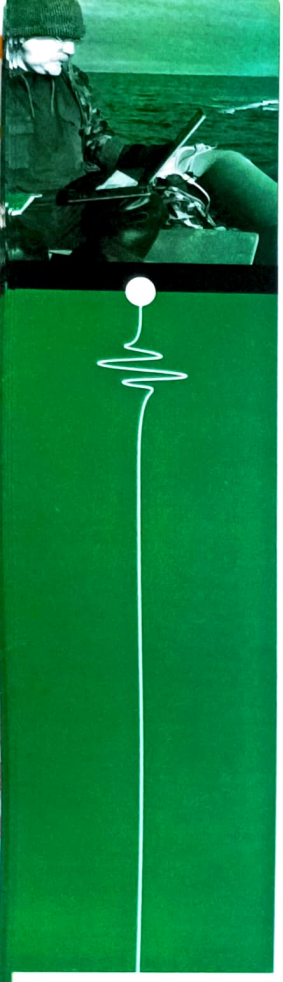


Рис. 15. Геоэлектрический разрез, полученный при исследовании региональных разломов - антенны (100×100) м². Тянь-Шань, 2005 г.



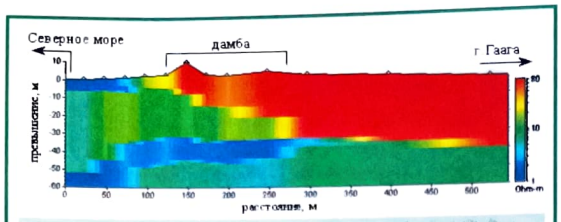


Рис. 16. Результат TEM-FAST исследований береговых дамб вблизи г. Гаага - антенны (25×25) м², Нидерланды 2004 г.

Однако наиболее удивительным результатом, полученным при исследованиях, является наклон разломных зон: с Юга на Север.

В соответствии с современными геологическими представлениями тянь-шаньские разломы должны падать с Севера на Юг.

Еще одна область применения TEM-FAST технологии - это исследования защитных дамб Нидерландов, страны, огромная часть территории которой располагается ниже уровня моря. На рис. 16 представлен геоэлектрический разрез через защитную дамбу, отделяющую предместья г. Гааги и Северное море.

«Низкоомный язык» морской воды проникает под дамбу и распространяется на расстояние не менее 100-150 м вглубь суши. В дамбах высотой 10-12м пробурены наблюдательные скважины глубиной ~15м, предназначенные для гидрогеологического мониторинга. Однако, как выяснилось, просачивание морской воды происходит по значительно более глубоким горизонтам пород (30-40 м ниже уровня моря).

Заключение

Система импульсных электромагнитных зондирований TEM-FAST является удобным и надежным геофизическим инструментом, применяемым при решении геологических, гидрогеологических и геоинженерных задач. Возможности и области применения системы постоянно расширяются, как за счет исследовательской работы авторов, так и клиентов, использующих ее в своей профессиональной деятельности.

Часть представленных в работе материалов любезно предоставлена компанией «Алроса-Поморье» и геофизиками «ТЕРРА» (Архангельск), за что авторы искренне им благодарны. Авторы также выражают благодарность Gad el-Qady (Египет) и Б.С.Светову, принимавших активное участие в египетской экспедиции, другу и соратнику О.А.Сусину (СИНЭКО, Севастополь), а также сотрудникам Геодинамического полигона РАН в Бишкеке за помощь в проведении исследований на Тянь-Шане.

Литература

1. Светов Б.С., Барсуков П.О. Трансформация квазистационарных переходных процессов геоэлектрики в эквивалентные волновые. Изв АН СССР, Физика Земли, 1984, 8, с.29-37.
2. Губатенко В.П. Тикшаев В.В. Об изменении знака электродвижущей силы индукции в методе становления электромагнитного поля. Изв АН СССР, Физика Земли, 1979, 3, с.95-99.
3. Weidelt P. Response characteristic of coincident loop transient electromagnetic system. Geophysics 1982, v.47, p.1325-1330.
4. V.Albouy, P.Andrieux, V.Descloitres, H.Robain, J.Vassal, K.Sorrensen., Time Domain Electromagnetism. Comparison between 3 commercial systems Report IRD, Centre de Recherche Geophysique of Garchy, France, IRD, October 2001.

ЕАГО

СКБ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

ОАО «Саратовнефтегеофизика»

Геотех-2006

Саратов,
5-6 сентября 2006 г.

Научно-техническая конференция
«Современные технологии регистрации геолого-геофизических данных при проведении поисково-разведочных работ на нефть и газ»

"Встречи на Волге"

Традиционная встреча профессионалов, посвятивших себя обозначенной в тематике конференции проблеме, вновь собирает специалистов организаций самых разных профилей: научных, разведочных, промысловых, производственных. Наши постоянные участники знают насколько результативно живое общение и обмен мнениями на этих встречах.



Целевой сбор на проведение конференции 2000-00 за одного участника направляется безналичным перечислением по реквизитам:

Получатель - Саратовское региональное отделение межрегиональной общественной организации "Евро-Азиатское геофизическое общество",
ИНН 6452051820, КПП 645201001,
Р/с 40703810856070101637 ,
в Саратовском ОСБ №8622 г. Саратова,
БИК 046311649, к. сч. 30101810500000000649
Назначение платежа:
"Целевой сбор на проведение конференции".

Организаторы конференции ждут старых друзей и приглашают новых участников

Заявки на участие в конференции и тезисы выступлений принимаются до 25 августа 2006 г. В заявке необходимо указать Ф.И.О. участников, темы доклада, необходимость выставочных площадей.

ОРГКОМИТЕТ

Адрес: 410019, Саратов, ул. Крайняя,129 Тел: (8452) 64-14-32; факс: (8452) 64-14-52: e-mail: turlov@skbsp.ru

Новые возможности современных георадаров, связанные с развитием аппаратной базы

Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В., ООО «ЛогиС», г. Москва

Глубина зондирования и разрешающая способность с практической точки зрения являются важными параметрами, определяющими спектр задач, решаемых с помощью георадаров. В общем случае глубина зондирования зависит от удельного электрического сопротивления среды и потенциала георадара.

Общеизвестно, что с уменьшением частоты зондирования уменьшается удельное затухание электромагнитной волны в среде и, как следствие, увеличивается глубина зондирования. Например, для сухого песка удельное затухание (Г) на частоте 10 МГц составляет Г=0,2 дБ/м, а на 1000 МГц - Г8 дБ/м. Таким образом, уменьшение рабочей частоты георадара - один из путей увеличения глубины зондирования.

Вторым важным фактором, влияющим на глубину зондирования, является энергетический потенциал, т.е. отношение напряжения передатчика к чувствительности приемника. Очевидно, что чем больше амплитуда импульса передатчика и чем выше чувствительность приемника, тем большую глубину зондирования можно получить. Но здесь есть несколько технических проблем.

В передатчиках низкочастотных антенных блоков георадаров «Око» используются наборы лавинных транзисторов, обеспечивающих суммарную выходную амплитуду импульса передатчика =600÷700В при частоте повторения импульсов до 100 кГц. При этом возможность дальнейшего увеличения амплитуды транзисторных передатчиков за счет наращивания числа транзисторов практически исчерпана.

Генераторы на основе вакуумных разрядников, способны формировать импульсы до 3÷5 кВ, но при этом снижается частота повторения примерно на 3 порядка.

Формирователи импульсов на основе диодных обострителей также позволяют увеличить амплитуду импульсов возбуждения в несколько раз, однако при этом значительно растет мощность потребления и практически на порядок снижается допустимая частота работы передатчика по сравнению с транзисторными схемами.

Таким образом, увеличение амплитуды импульсов возбуждения передатчика выше 1000 В приводит к существенному снижению скорости зондирования. Кроме того, могут возникнуть серьезные вопросы с электромагнитной совместимостью и безопасностью оператора.

Увеличивать чувствительность приемного устройства можно за счет увеличения коэффициента усиления приемного устройства, но и здесь есть свои ограничения. Уровень шумов приемного тракта (включая антенну) всех современных георадаров в основном определяется уровнем внешних помех от наземных радиоустройств. Так что повышение чувствительности входного усилителя приемника не дает положительного эффекта.

Существует другой метод повышения чувствительности - за счет когерентного накопления. Исходя из предположения о случайном характере эфирных помех, выигрыш в отношении сигнал/шум равен $\sqrt{N}$, где N - величина накопления. Таким образом, при отсутствии мешающих собственных системных помех, глубинность георадаров можно существенно наращивать за счет накопления. Поэтому механизм когерентного накопления рассматривается в качестве основного перспективного фактора повышения глубинности георадаров. Это иллюстрируется на рис.1, где представлены две радарограммы, снятые при помощи георадара «ОКО» с АБ-700 по одному и тому же профилю с различными накоплениями (радарограмма слева снята с накоплением =1, радарограмма справа снята с накоплением =64).

На радарограмме слева максимальная глубина зондирования, ниже которой отраженные сигналы полностью маскируются случайными помехами, находится чуть ниже 2,0 м. На правой радарограмме максимальная глубина возрастает до 4,0 м, что является следствием увеличения накопления.

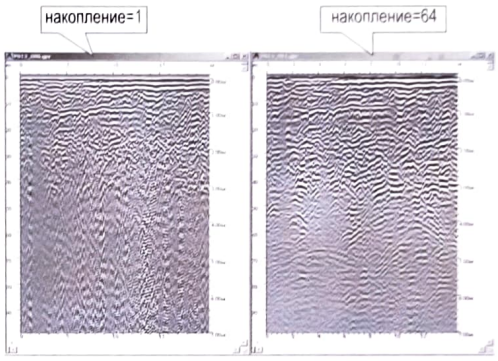


Рис. 1. Пример радарограмм, снятых по одному профилю с различными накоплениями. Слева - накопление равно 1, справа - 80.

Однако метод когерентного накопления имеет существенный недостаток - в N раз снижается скорость зондирования. Классический для георадаров метод стробоскопического преобразования позволяет получить только один временной отсчет на один цикл излучения передатчика, что приводит к значительным потерям времени при наборе трассы. К этому прибавляется уменьшение скорости в N раз за счет накопления, плюс потери времени на пересылку и обработку данных. В итоге даже при работе передатчика на частоте 100 кГц при накоплении N=1 реальная скорость зондирования получается примерно 30...50 трасс в секунду. При накоплении N=10 скорость зондирования снижается до 3...5 трасс в секунду, что уже мало для нормальной работы.

В низкочастотных антенных блоках георадарах «Око» последних модификаций для значительного увеличения величины накопления реализован «многоточечный» режим, который позволяет на один импульс излучения передатчика получать несколько временных отсчетов. В настоящее время на один излученный импульс производится оцифровка по восьми временным стробам с 14 разрядным разрешением. Одновременно с учетом существенного увеличения скорости обмена данными между антенным блоком и ноутбуком

удалось на порядок повысить уровень синхронного накопления сигналов. В итоге реальная скорость зондирования получается примерно 130–150 трасс в секунду. В дальнейшем скорость оцифровки будет наращиваться по мере появления соответствующей элементной базы.

Использование в георадарах «Око» для накапливаемых данных 32 разрядной сетки позволяет практически без ограничения наращивать величину накопления. Проводились экспериментальные работы с накоплением в десятки тысяч раз.

Также были отработаны варианты возможного повышения глубины зондирования за счет понижения рабочих частот антенных блоков. За последний год был запущен в производство экранированный антенный блок АБ-90, с центральной частотой 90 МГц. Этот антенный блок имеет на наш взгляд максимально допустимые конструктивные размеры для экранированных антенн.

Дальнейшее понижение рабочих частот возможно только по линии неэкранированных дипольных антенных блоков. Традиционный дипольный вариант с размещением излучающих элементов перпендикулярно несущей раме имеет определенные ограничения при работе по пересеченной местности (кусты, деревья и т.д.). В настоящее время разработан дипольный антенный блок, имеющий полугибкую линейную конструкцию. Он выполнен с использованием армированных сменных рукавов Ø66 мм с двухсторонним латексным покрытием, внутри которых расположены плоские дипольные излучатели, и полностью герметичен. Приемный и передающий отсеки врезаны в разрывы рукава. Общая длина антенного блока изменяется в зависимости от частотного диапазона. Представляется обоснованным использовать такой антенный блок в диапазоне частот 25 ÷ 100 МГц. Конструкция данного антенного блока, получившего название «Тритон», позволяет легко маневрировать по пересеченной местности. Герметичная оболочка дает возможность производить подводное зондирование при фиксированном заглублении или путем перемещения по дну водоема. Внешний вид антенного блока «Тритон» приведен на фото (рис.2).



Рис. 2. Антенный блок «Тритон».

Таким образом, для увеличения глубины зондирования в георадарах "ОКО" используется наиболее перспективные направления: увеличение накопления, увеличение числа отсчетов на один излученный импульс и понижение рабочей частоты антенного блока.

Проведенные сравнительные испытания антенного блока «Тритон» с центральной частотой 50 МГц и антенного блока АБД продемонстрировали основные особенности и отличия антенного блока «Тритон»:

- в отличие от АБД, конструкция антенного блока «Тритон» позволяет осуществлять зондирование без отрыва от поверхности даже на сильно пересеченной местности (отсутствие отрыва увеличивает глубинность зондирования и уменьшает помехи от переотражений);
- герметичность корпуса антенного блока «Тритон» позволяет успешно решать задачи, связанные с подводным зондированием, исследование донных слоев, а также поиск и локализация объектов на больших глубинах ниже профиля дна;
- легкий, по сравнению с АБД, вес, меньшие габариты и неразборная конструкция антенного блока «Тритон» обеспечивают повышенную надежность и высокую производительность.

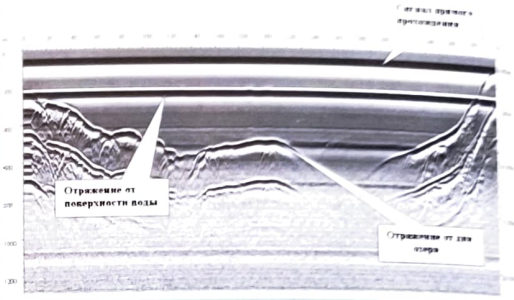


Рис. 3. Результаты испытаний антенного блока «Тритон».

Результаты испытаний антенного блока «Тритон» на озере в г. Раменское представлены на рис.3. Антенный блок был затоплен на глубину 4,0м, сканирование проводилось в непрерывном режиме с накоплением 128.

Существующее программное обеспечение реализует наиболее применимые стандартные математические алгоритмы, которые помогают оператору произвести правильную интерпретацию радарограмм. Различного рода алгоритмы фильтрации позволяют устранить некоторые типы маскирующих помех. Наличие дифрагирующих объектов позволяет провести оценку скорости распространения радиоволн в средах с неизвестными параметрами. Так же могут быть использованы операции обработки, которые позволяют улучшить разрешающую способность аппаратуры по угловым координатам и дальности.

Георадары в настоящее время активно используются для обследования дорожной одежды. Георадарные профили после интерпретации позволяют воспроизвести картину слоев, как основания, так и верхней части дорожной одежды.

Однако использование контактных антенных блоков затрудняло получение хороших результатов по самой верхней части из-за расположения на этих участках мощного сигнала прямого прохождения. К тому же, в этих условиях для подавления прямого сигнала нельзя использовать операцию "вычитание среднего", так как при этом теряется информация от горизонтальных слоев. Единственным выходом из сложившейся ситуации является использование рупорных антенн с некоторым отрывом от поверхности. Создание рупорного антенного блока АБ-1700-Р позволило разрешить эту проблему.

Этот антенный блок позволяет проводить изучение самой верхней части изучаемой среды. Высота подвеса антенного блока выбирается около 20-30 см. Сам антенный блок монтируется на удобном быстросъемном креплении к задней части автомобиля (рис.4). Решение задачи зондирования с автомобиля потребовало увеличения быстродей-



Рис. 4. Рупорный антенный блок АБ-1700-Р, смонтированный на автомобиле.

ствия всей системы.

Иногда георадарное зондирование, особенно на максимальных глубинах, в силу различных причин не дает приемлемых результатов. Единственным выходом из этой ситуации является использование скважинного георадара.

Использование таких георадаров может дать много дополнительной информации, которую нельзя получить другими методами. Сдерживающим фактором по этой технологии является необходимость создания разведочных скважин и более сложная интерпретация результатов зондирования. Для решения задач по скважинному зондированию был разработан комплекс для работы в скважинах с диаметром не менее 100 мм.



Рис. 5. Георадарный скважинный комплекс.

Скважинный георадарный комплекс (рис.5) имеет сменные направленные экранированные антенные блоки с центральной частотой около 700 МГц. В составе комплекса также имеется автоматическое поворотное устройство и ручное устройство для подъема-опускания штанги со встроенным датчиком перемещений. На рис.6 приведена радарограмма, полученная при обследовании буронабивных скважин на строительстве очистных сооружений на Краснопресненской набережной, г. Москва.

Дальнейшее улучшение основных характеристик георадарных систем в последнее время привело к возможности использования георадаров для выявления движения за стенами. На рис.7 приведены результаты зондирования через стену при движении человека с удалением до 7,0 м.

Приведенные выше достижения в совершенствовании георадаров за последние годы существенно расширили спектр решаемых георадаром задач и активизировали их применение в различных областях.

Появление герметизированных антенных

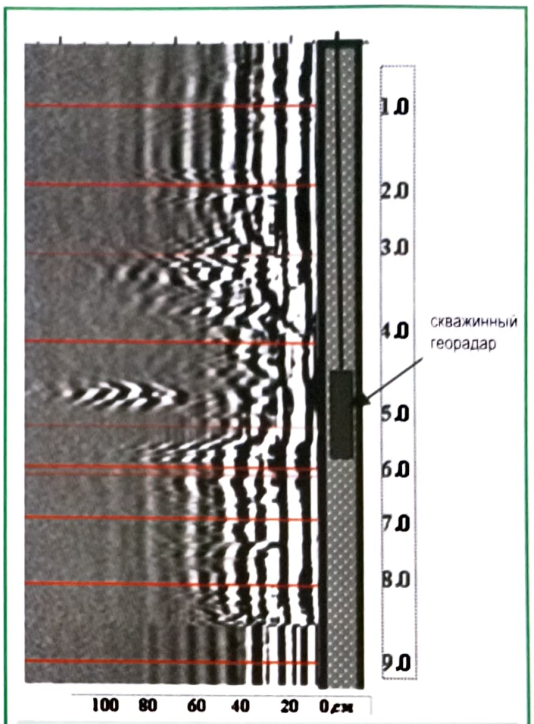


Рис. 6. Радарограмма зондирования буронабивной скважины глубиной 10,0 м.

блоков «Тритон» позволяет увеличить глубинность исследований при обнаружении объектов на дне водоемов.

Георадары нового поколения открыли новые возможности при решении различных задач в антитеррористической деятельности, в том числе для обнаружения людей в схронах, за стенами и препятствиями, при выявлении контрабанды и т.д.

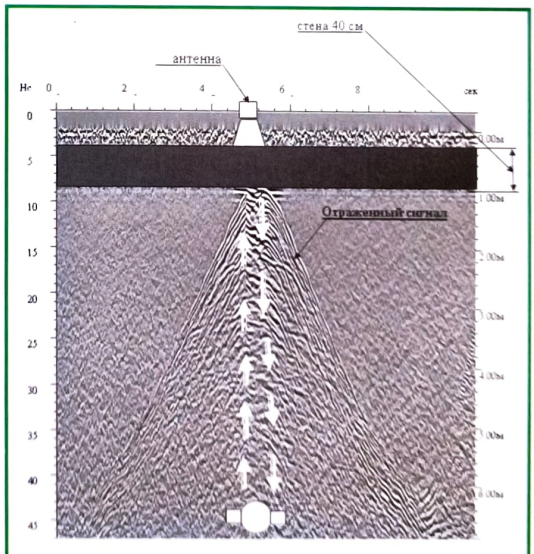


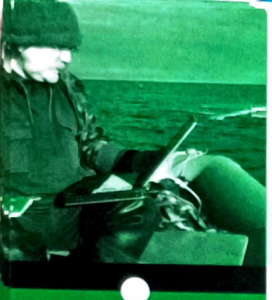
Рис.7. Радарограмма с рупорной антенной.

Литература

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В., «Введение в георадиолакацию» учебное пособие - М.: Издательство МГУ, 2004

2. Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В. «Некоторые результаты применения георадара «ОКО», Тез. Доклада, 4-я международная научно-практическая конференция «Георадар-2004.

3. Бугаев А.С. и др. «Обнаружение и дистанционная диагностика состояния людей за препятствиями с помощью РЛС». Радиотехника, 2003 г., №7.



Технологии комплексных электроразведочных исследований многолетнемерзлых разрезов Ямала при решении инженерно-геологических задач

Бучарский Б.В., Бессонов А.Д., Горячев В.В., Киселев В.В., ООО «Газснабинвест», г. Саратов

Проблема изучения строения верхней части разреза в условиях развития толщи многолетнемерзлых пород весьма актуальна, как при проведении инженерных изысканий, так и при производстве геофизических и буровых работ в районах Крайнего Севера. Информация о физических параметрах разреза, полученная по материалам используемых в настоящее время отдельных дистанционных геофизических методов, как правило, не однозначна и допускает существование большого количества вариантов моделей изучаемого разреза. Единственно возможный путь в данной ситуации - комплексирование наиболее информативных геофизических методов исследующих различные физические поля не только при производстве полевых работ, но и на этапе интерпретации полученных материалов с привлечением современных комплексных технологий.

ООО «Газснабинвест» выполняет комплексные электроразведочные исследования при инженерно-геологических изысканиях проводимых ОАО «ВНИПИгаздобыча» в составе геофизических работ на объектах проектируемых трасс магистральных газопроводов и обустройства Бованенковского, Харасавэйского НГКМ полуострова Ямал. Электроразведочный комплекс включает методы вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) и электропрофилирования (ЭП), метод зондирований становлением электромагнитного поля в ближней зоне (малоглубинная модификация - МЗСБ).

1. Решаемые геологические задачи

- Детальное изучение инженерно-геокриологических условий верхней части разреза на участках проектируемых трасс газопроводов и площадках проектируемого строительства инженерно-технических сооружений.
- Изучение геофизических характеристик пород для определения литологического состава и геокриологических условий верхней части инженерно-геологического разреза.
- Картирование подошвы сезонно-талого слоя (СТС).
- Определение глубин залегания поверхности многолетнемерзлых пород (ММП).
- Изучение строения толщи ММП до глубин 300-400 м.
- Выявление зон таликов, растепления грунтов.

2. Полевые методики и технологии

Весь комплекс геофизических исследований выполняется по единой координатной сети профилей и пикетов. Шаг пикетов по профилям и расстояние между профилями определяется необходимой детальностью исследований на линейных или площадных объектах изысканий (на линейных объектах: трассы автодорог, газопроводов - от 250 до 50 м, на площадках - от 100 до 20 м.).

Для детального изучения геоэлектрических характеристик СТС, верхней части толщи ММП и выделения геоэлектрических аномалий по профилю в интервале глубин от 0,2 до 10 м применяются методы электроразведки на постоянных низкочастотных токах: вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), электропрофилирование (ЭП), бесконтактные электрические зондирования. В методе ВЭЗ измерения кажущегося сопротивления $\rho_к$ выполняются с использованием прямолинейной четырехэлектродной экспресс-установки (ВСЕГИНГЕО, Шарапанов И.Н.,1978) с закрепленной питающей линией AB длиной 35-50 м при изменяющихся линейных размерах измерительной установки MN.

Кроме серийного прибора АЭ-72 применяется современная цифровая аппаратура ЭРП-1 (совместная разработка МЧП «Линия» и ООО «Геоскан-М», 2005). В аппаратуре ЭРП-1 применено совмещение аналоговой и цифровой обработки сигнала. При обработке сигнала используется накопление и дополнительный метод снижения шумов. Результаты измерений, время и дата их выполнения сохраняются в памяти.

Более глубинные исследования геоэлектрического разреза реализуются на тех же пикетах применением многоразмерных зондирований методом индуктивной электроразведки МЗСБ. Начальная и конечная глубины определяются применяемыми размерами осесимметричных приемно-генераторных индуктивных установок в соотношениях: $H_{min} \cong 0{,}5L$; $H_{max} \cong 3\text{-}4L$ (для высокоомных интервалов разреза). Используются серийные аппаратурные комплексы типа «Цикл», «Импульс» (г. Новосибирск) и блоки электроразведочной аппаратуры собственной разработки.

Комплексированием полевых методов и технологий электроразведки, изучающих стационарные электрические (ВЭЗ, ЭП) и импульсные электромагнитные поля (МЗСБ), по единой координатной сети достигается расширенный диапазон исследуемых глубин ВЧР, детальность и локальность зондирований, учет влияния индукционной вызванной поляризации.

Скоростные характеристики геокриогенных разрезов изучаются сейсмическими методами (МПВ, МОВ-ОГТ) по единой координатной сети профилей.

3. Обрабатывающие комплексы и программное обеспечение

Для обработки и интерпретации данных электроразведки ВЭЗ используется программа IPI2Win (А.А.Бобачев, И.Н.Модин, В.А.Шевнин, ООО «Геоскан-М», 2004), разработанная для автоматической и полуавтоматической (интерактивной) одномерной интерпретации материалов различных модификаций вертикальных электрических зондирований. Пользователем программы, специалистом-геофизиком при интерпретации, способом подбора теоретических кривых $\rho_к$ достигается решение геологической задачи. Нацеленность программы IPI2Win на получение геологического результата является ее отличительной особенностью по сравнению с ранее используемыми программами автоматического решения обратной задачи. Возможность использования различных подходов к интерпретации в данной программе, в том числе и формальный, в зависимости от сложности

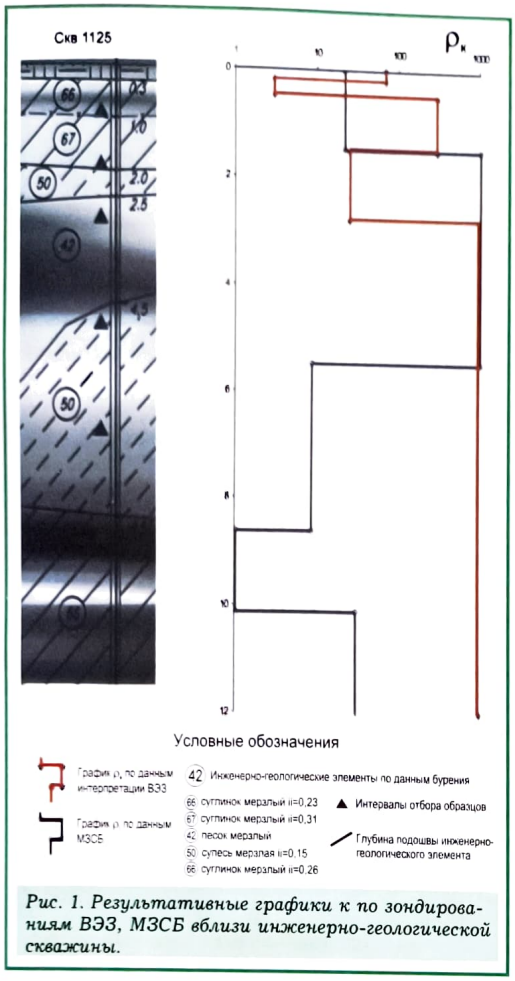


Рис. 1. Результативные графики к по зондированиям ВЭЗ, МЗСБ вблизи инженерно-геологической скважины.

решаемой геологической задачи, полноты априорной параметрической информации позволяет интерпретатору в интерактивном режиме из множества эквивалентных выбрать оптимальное решение обратной задачи с построением геоэлектрического разреза.

Обработка и интерпретация данных МЗСБ выполняется с использованием программного пакета «Кагр 95-05» (Горячев Д.В., НВ НИИГГ, ООО «Газснабинвест»). В пакете программного обеспечения реализуются этапы попикетной и профильной обработки (препроцессинг, интерактивные режимы фильтрации, селективная отбраковка и трансформация первичного сигнала в геоэлектрические параметры), а также построения результативных разрезов в интерпретируемых геоэлектрических параметрах.

По пикетам электрозондирований (ВЭЗ + МЗСБ) строятся сводные графики интерпретационных геоэлектрических параметров (Рис.1) и геоэлектрические разрезы. Геоэлектрические слои по определенным геоэлектрическим параметрам (удельная электропроводность (σ), продольное электрическое сопротивление (ρ)) отождествляются с инженерно-геологическими элементами разреза, выделяемыми по данным бурения опорных инженерно-геологических скважин и лабораторных анализов проб грунтов (рис.1).

Комплексная интерпретация геолого-геофизических материалов получаемых при инженерно-геологических изысканиях выполняется по компьютерным технологиям «COMINTER» (Смилевец Н.П., Соколова И.П., НВ НИИГГ). В комплексную интерпретацию привлекаются данные бурения опорных скважин и лабораторных анализов. Конечным результатом является получение физико-геологических моделей разреза по профилям карт комплексных геофизических параметров, а также прогнозные оценки литологических, гидрогеологических и геокриологических характеристик в интервале ВЧР, дополняющих данные бурения опорных скважин на междускважинных участках профиля изысканий (рис.2).

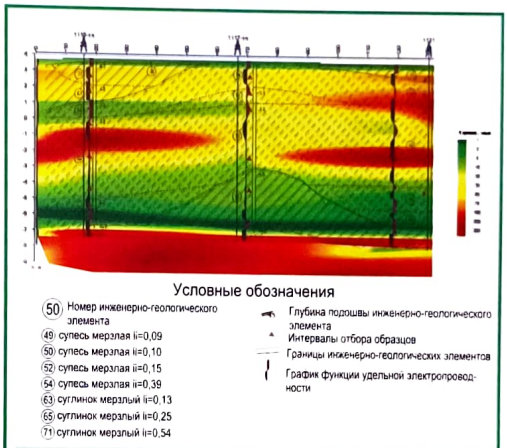


Рис. 2. Фрагмент геолого-инженерного и геоэлектрического разреза.

Накопленный опыт проведения комплексных геофизических исследований в условиях многолетнемерзлых интервалов ВЧР районов Крайнего Севера и получаемые результаты свидетельствуют о высокой геологической и экономической эффективности комплексирования инженерно-геологических и геофизических методов для решения ряда задач инженерной геологии на этапе проектирования строительства линейных сооружений, промплощадок при обустройстве нефтегазоконденсатных месторождений.

Вниманию авторов

Материалы, представляемые для опубликования в журнале должны отвечать следующим требованиям.

Статья представляется в электронной версии на компакт-дисках емкостью 640-700 Мб. Форматы текстового файла должны быть в виде Microsoft Word for Windows (версии 6.0 или выше). Графические приложения и таблицы, выполненные электронным образом, представляются в отдельных файлах формата MS Excel (версии 4.0 или выше) или в формате CorelDRAW версии 7.0 и выше. Все контуры и графики на рисунках, а также все цифры и надписи должны быть выполнены четко, чтобы при уменьшении они легко читались. Рисунки присылаются в виде растровых файлов форматов: *TIF, с разрешением не менее 250 точек на дюйм (допускается LZW-сжатие), *JPG с качеством не менее 12-ти. Максимально допустимый размер иллюстраций - А4. Подрисуночные подписи представляются в виде отдельного списка. Математические уравнения должны быть выделены четким и ясным шрифтом. Все математические символы скалярных величин набираются курсивом, а векторные - жирной прямой заглавной буквой. Вместе со статьей в редакцию направляются краткие сведения об авторах, необходимо указать Ф.И.О., город, место работы, и должность.

От редколлегии: Ответственность за подбор и изложение фактов в статьях несут авторы. Редакция может публиковать статьи, не разделяя точки зрения авторов.



Автономные регистраторы РОСА-А для высокоточных сейсмических наблюдений

Сагайдачная О.М., Сагайдачный А.В., Сальников А.С., Шмыков А.Н., Щегольков А.В.,
ФГУП «СНИИГГиМС», г. Новосибирск

Введение

Сейсмические методы исследований являются одним из основных источников знаний о внутреннем строении и эволюции земной литосферы. Современные задачи, решаемые на этапе глубинных сейсмических исследований, включают определение прогнозных критериев нефтяных и рудных провинций, что обусловливает повышение требований к детальности и точности инструментальных наблюдений. Достоверные и детальные сведения о скоростной характеристике земной коры являются основой для комплексной интерпретации и анализа данных других геофизических полей, для оценки геодинамических процессов, происходящих в сейсмоактивных регионах.

Обеспечение геологической эффективности сейсмических исследований, особенно в сложных сейсмогеологических условиях, где наблюдаются значительные уровни регулярных помех одновременно со слабыми сигналами (регулярная помеха может превышать полезный сигнал на 50 дБ, например при использовании вибрационных источников упругих колебаний), прямым образом связано с достижением необходимой точности регистрации сигналов в поле. Поэтому в современных сейсмических станциях используются цифровые регистраторы с максимально возможным количеством разрядов, построенные на основе 24-х разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), которые обеспечивают мгновенный динамический диапазон выше 100 дБ. При выполнении глубинных сейсмических исследований приходится дополнительно решать нетривиальные задачи доставки, расстановки и эксплуатации сейсмического оборудования в условиях отсутствия не только подготовленных сейсмических профилей, а просто дорог. В этом случае применение телеметрических сейсмостанций с развертыванием достаточно громоздкого кабельного хозяйства крайне затруднено и оптимальным решением является сбор и регистрация сейсмических данных с использованием автономных регистраторов.

Автономные регистраторы позволяют выполнять сейсмические наблюдения в заданных пунктах приема в течение длительного времени с высокой надежностью, которая определяется, в том числе и автономностью устройства. Современный уровень развития микроэлектроники позволяет практически убрать ограничения на автономность, связанные с сохранением больших объемов зарегистрированных данных. В настоящее время существует твердотельная Flash-память объемом до 4 Гбайт, которая может быть использована в широком температурном диапазоне от - 40°С до 60°С. Подобный размер памяти обеспечивает режим непрерывной регистрации в течение нескольких суток, что позволяет полностью или частично отказаться от фиксированной по времени работы с искусственными источниками возбуждения (взрывными и вибрационными).



Рис. 1. Общий вид автономного 4-х канального сейсмического регистратора РОСА-А.

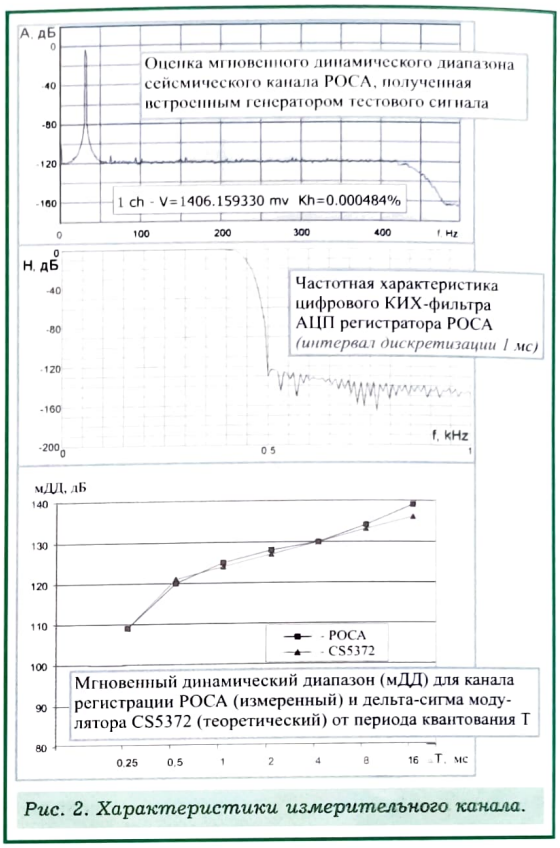


Рис. 2. Характеристики измерительного канала.

Имеющийся опыт по созданию сейсмической аппаратуры позволил разработать автономный высокоточный регистратор РОСА-А и на его основе организовать бескабельную распределенную систему регистрации и сбора данных для выполнения глубинных сейсмических исследований, сейсмологического и сейсмического мониторинга [2, 3, 5].

Схемотехнические решения сейсмического канала измерения

Автономный регистратор сейсмических колебаний РОСА-А, общий вид которого приведен на рис. 1, разработан на новейшей элементной базе: многократно программируемых логических матрицах сверхвысокой степени интеграции, прецизионных малошумящих аналоговых компонентах, интегральных источников питания, высокоскоростных элементов телекоммуникаций. Техническое решение защищено патентами [4, 6].

Аналоговый канал регистрации автономного модуля РОСА-А схемотехнически построен на

основе 24-х разрядного канала измерения телеметрического портативного сейсмического регистратора РОСА. Измерительный канал регистратора РОСА, включающий в себя аналого-цифровой преобразователь и усилитель, реализован на комплекте микросхем известной фирмы Cristal Semiconductor, Co. (США). АЦП построен с использованием дельта-сигма модулятора 4-ого порядка CS5372. В качестве справки отметим, что данный модулятор CS5372 имеет наилучшее, из всех коммерчески доступных модуляторов, отношение сигнал/шум в полосе частот до 1000 Гц. Обработка последовательного непрерывного потока данных от модулятора и получение 24-х разрядного слова (отчета) в АЦП выполняется с использованием разработанного оригинального цифрового КИХ-фильтра нижних частот. Построенный цифровой фильтр имеет высококачественные параметры: узкая частотная переходная полоса, высокая равномерность в диапазоне частот пропускания, подавление в частотной полосе задержания превышает 120 дБ (рис. 2).

Применение дельта-сигма модулятора CS5372 совместно с фильтром собственной разработки позволили получить 24-х разрядный АЦП, превосходящий по основным параметрам (мгновенный динамический диапазон, уровень собственных шумов, коэффициент нелинейных искажений) АЦП, реализованный в регистраторе СТС-24Р с использованием комплекта CS5321 (Таблица 1). Величина реального мгновенного действующего диапазона для сейсмического канала измерения РОСА показана на графике, приведенном на рис. 2. Канал имеет 24 эффективных разряда АЦП (около 140 дБ мДД) на периоде квантования 16 мс, 23 разряда (136 дБ мДД) - на периоде 2 мс, 22 разряда (115 дБ мДД) - на периоде 1,0 мс.

Функциональные характеристики и технические параметры автономного регистратора

Автономный сейсмический регистратор РОСА-А, структурная схема которого приведена на рис. 3, содержит следующие основные функциональные блоки:

- четырехканальный 24-х разрядный АЦП;
- устройство управления;
- блок внутреннего контроля;
- генератор тестовых сигналов;



Рис. 3. Структурная схема автономного регистратора РОСА-А.

- твердотельную Flash-память;
- GPS-приемник;
- высокостабильный термостатированный тактовый генератор;
- модуль энергонезависимой памяти.

Конструктивно 4-канальный автономный модуль в основной части реализован на одной печатной плате (рис.1), на второй плате установлен тактовый генератор и индикация.

Система управления работой регистратора реализована на перепрограммируемых логических матрицах сверхвысокой степени интеграции фирмы Altera, обеспечивающих одновременную организацию нескольких независимых вычислительных процессов. Устройство управления выполняет следующие основные функции:

- настройка АЦП в соответствии с выбранным режимом регистрации;
- синхронизация внутренних часов модуля;
- управление режимами энергосбережения и регистрации;
- мониторинг технического состояния модуля.

Внутреннее программное обеспечение регистратора хранится в перезаписываемой Flash-памяти, объем которой достаточен для возможных расширений и модернизаций в будущем.

При программировании режима работы АЦП, помимо задания частоты квантования и коэффициента усиления, возможно конфигурирование входов АЦП на работу с внутренним генератором тестовых сигналов для диагностики параметров канала регистрации без использования дополнительных приборов. Контролируются следующие

Таблица 1. Сравнение технических параметров сейсмических регистраторов

параметры	СТС-24Р	РОСА	РОСА-А	Reftek model 130-01
тип	телеметрический		автономный	
количество каналов регистрации	6	4	4	3 (6)
аналого-цифровой преобразователь	24 разряда			
интервал дискретизации, мс	0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16,0	0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16,0		1; 2; 4; 8; 10; 20; 25; 50; 100; 200; 1000
регистрируемые частоты, Гц	0-1600	0-3200		0-400
мгновенный динамический диапазон, дБ	более 120			
коэффициент нелинейных искажений, %	менее 0,002	менее 0,0003		
взаимные влияния между каналами, дБ	менее минус 110			менее минус 70
действующее значение напряжения шума канала, приведенное ко входу при усилении, мкВ (дБ)	менее 0,2 (36)			менее 0,5
потребляемая мощность на канал в рабочем режиме, Вт	менее 0,33	менее 0,25	менее 1,7	
способ питания, аккумулятор	на модуль	на 60 каналов	на модуль	
габариты регистратора, мм	242×242×150	200x98x75	245x105x70	343x185x135
масса регистратора, кг	менее 5	менее 1,35	1,2	2
диапазон рабочих температур, °С	от минус 40 до плюс 60			от минус 20 до плюс 60
максимальная длительность регистрации	200 000 отсчетов		практически не ограничено	
погрешность синхронизации GPS, мкс	—		<1	
объем энергонезависимой памяти, Гб	—		до 4	
нестабильность частоты опорного генератора	—		$<10^{-8}$	
время автономной работы, суток	—		не менее 10	



параметры: шумы, максимальный неискаженный сигнал регистрации, коэффициент нелинейных искажений, подавление синфазной помехи, коэффициент взаимного влияния, идентичность коэффициентов усиления, сопротивление и импульсная характеристика подключенного геофона, правильность настроек регистрации. Генератор тестовых сигналов регистратора построен на принципах дельта-сигма цифрового аналогового преобразователя и обеспечивает уровень нелинейных искажений сигналов меньше 0,0003%. Реализованные параметры внутреннего генератора тестовых сигналов определяют высокое качество автономного метрологического обеспечения.

В регистраторе реализовано два варианта синхронизации внутреннего времени: с использованием GPS-приемника и при помощи встроенного высокостабильного тактового генератора. С помощью GPS-приемника возможно наиболее точно синхронизовать работу любого количества регистраторов вне зависимости от продолжительности автономной работы. Поэтому синхронизация регистратора осуществляется, насколько это возможно, от GPS-приемника, и только при нестабильности приема радиосигналов регистратор переходит в режим синхронизации с использованием внутреннего генератора.

Источник питания регистрирующего модуля содержит все необходимые функции управления энергосбережением. Наихудшим, с точки зрения энергопотребления, является режим непрерывной регистрации с синхронизацией от термостатированного генератора. При этом ориентировочная продолжительность работы модуля от стандартного аккумулятора (12 В, 30 Ач) составляет 10 суток.

В качестве энергонезависимой памяти используются промышленные Flash-карты емкостью от 256 Мб до 1 Гб, с возможностью их замены и считывания отдельно от устройства. Для записи информации на карту используется стандартная файловая система FAT16, которая обеспечивает многоуровневое защищенное хранение и высокую скорость передачи (перенос на другие носители) больших объемов информации.

Для конфигурирования автономного регистратора используется любой персональный компьютер, например Notebook, с USB портом и предустановленной операционной системой, поддерживающей файловую систему FAT и накопители USB Mass Storage (MS Windows ME 2000, XP 2003 Server, Linux с ядром > 2.4, MacOS 9 MacOS X и так далее).

USB-интерфейс регистратора соответствует стандартам: USB 1.1 Full-speed и USB Mass Storage Class Bulk-Only Transport, Revision 1.0. Применение USB-порта позволяет легко организовать управление регистратором с использованием широкого перечня вычислительной техники. При подключении к компьютеру регистратор представляется пользователю как жесткий диск (аналогично опознаванию USB FlashDrive или цифрового фотоаппарата), доступный для записи и чтения файлов. Для программирования режима работы пользователю достаточно сформировать, используя стандартные средства операционной системы (Блокнот, WordPAD), в корневой директории этого диска файл «config.txt», содержащий информацию о предстоящих сеансах работы. Программное обеспечение регистратора позволяет создать на этом диске текстовый файл report.txt с информационными сообщениями о состоянии модуля, GPS, проведенных сеансах и т.п., который так же доступен к прочтению стандартными средствами операционной системы. Помимо этого файла на диске формируются бинарные файлы, содержащие данные сейсмических записей, которые можно для их просмотра и дальнейшей обработки конвертировать в требуемый формат с помощью поставляемого программного обеспечения. В состав этого обеспечения входит конвертер файлов в формат SEG-Y, разработанный «Society of Exploration Geophysicists», а также библиотека функций для реализации собственных вариантов хранения и архивации записей.

В полевых условиях можно выполнить оперативный многооперационный контроль за системой регистрации сейсмических данных: устройство обладает функциями самодиагностики и самотестирования с документированием результатов в виде файлов внутри встроенной Flash-памяти. При установке на местности оператору доступна индикация подключения геофона по уровню принятого сигнала.

По техническим характеристикам разработанный автономный регистратор РОСА-А (таблица 1) сопоставим с лучшими образцами, предназначенным для сбора и регистрации сейсмических данных глубинных исследований, к которым, прежде всего, относятся зарубежные модели Reftek фирмы REFRACTION TECHNOLOGY, Inc. (США).

Результаты испытаний

В настоящее время экспериментальный образец автономного сейсмического регистратора РОСА-А испытан в полевых условиях. Были проведены сравнительные одновременные сеансы регистрации сейсмических данных с использованием автономного 4-х канального регистратора РОСА-А, телеметрического 6-ти канального регистратора станции СТС-24Р и сейсмологической станции «Байкал».

Следует отметить, что телеметрическая сейсмостанция СТС-24Р была изготовлена по заказу МПР России для проведения региональных и глубинных сейсмических исследований. В период 2001 - 2004 гг. станция применялась при вибросейсмических исследований методами

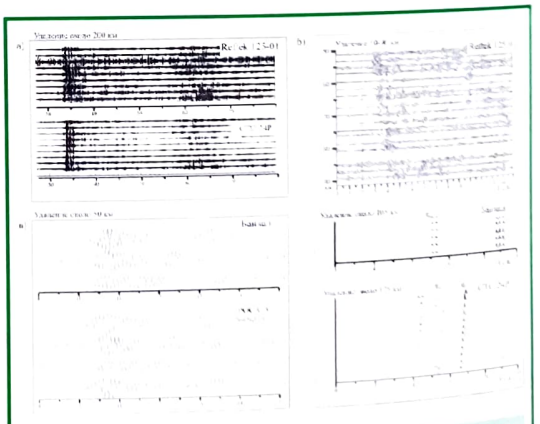


Рис. 4. Фрагменты сравнительных коррелограмм, полученных с использованием различных регистраторов:
а) региональный геофизический профиль п. Быстровка (Новосибирская обл.) - г. Новокузнецк (Кемеровская обл.), источник - 100-тонный стационарный вибратор ЦВ-100;
б) опорный геофизический профиль 2-ДВ (Магаданская обл.), источник - 40-тонный передвижной вибратор ЦВП-40;
в) геофизический полигон СО РАН п. Ключи (Новосибирская обл.), источник - 40-тонный вибратор ЦВП-40;

КМПВ и ГСЗ на региональном профиле п. Быстровка (Новосибирская обл.) – г. Новокузнецк (Кемеровская обл.) и геотраверсе 2-ДВ (Магаданская обл.), которые проводили ФГУП «СНИИГГиМС» совместно с Геофизической службой СО РАН [1, 3]. В качестве источников сейсмических колебаний использовались мощные вибраторы ЦВ-100 и ЦВП-40 (100-тонный стационарный и 40-тонный передвижной), обеспечивающие генерацию ЛЧМ – свип в диапазоне частот от 6 Гц до 11 Гц. Длительность одного вибросейсмического сеанса составляла около одного часа. При выполнении этих полевых наблюдений использовалась и специализированная регистрирующая аппаратура – автономные сейсмические регистраторы Reftek и сейсмологические станции «Дельта-Геон» и «Байкал». На опорном геофизическом профиле 2-ДВ отечественная регистрирующая аппаратура (станции СТС-24Р и «Байкал») устанавливались, как правило, на самых больших удалениях до 250 - 300 км для получения на непрерывных многоканальных расстановках «опорных» данных преломленных и отраженных волн от поверхности Мохоровичича. Качество полученного полевого материала можно оценить как хорошее, на коррелограммах уверенно выделяются волны в первых вступлениях от границ в верхней части земной коры (осадочного чехла), поверхности кристаллических пород и поверхности Мохоровичича. На рис. 4 (а, б) приведены фрагменты сравнительных коррелограмм, которые иллюстрируют возможности регистрирующего канал станции СТС-24Р при выполнении глубинных наблюдений.

Испытания автономного модуля РОСА-А проводились с использованием 40-тонного вибратора ЦВП-40, расположенного на геофизическом полигоне СО РАН (п. Быстровка, Новосибирская обл.). Расстояние от 40-тонного вибратора составляло около 50 км. Были зарегистрированы вибрационные сеансы длительностью около одного часа с линейно-частотно-модулированными и монохроматическими сигналами в диапазоне от 6,25 Гц до 11,23 Гц. Обработка и сравнение результатов наблюдения, полученных автономными регистраторами РОСА-А и телеметрическими регистраторами СТС-24Р, показали, что технические параметры испытуемых регистраторов соответствуют заявленным характеристикам. Полученные сейсмозаписи (виброграммы, коррелограммы и импульсные сейсмограммы) показывают высокое качество (по значению динамического диапазона, уровню помех, соотношению сигнал/шум, разрешенности записи) регистрирующего канала РОСА-А, которое не ниже, чем для станции СТС-24Р.

В дальнейшем с автономным регистратором РОСА-А выполнялись непрерывные, продолжительностью до 10 суток, наблюдения с запрограммированным режимом записи, согласованном с расписанием работы вибрационного источника. Рабочее расписание регистратора сохраняется в энергонезависимой Flash-памяти в специальном файле. Наблюдения проводились одновременно со станцией «Байкал», установленной на платформе в термостатированном павильоне, расположенном на геофизическом полигоне СО РАН (п. Ключи, Новосибирская обл.). Регистрация проводилась с использованием трехкомпонентного датчика СК-ШВ и вертикальных геофонов СВ-5. На рис. 4 приведены сравнительные записи полученных коррелограмм, практическая идентичность которых доказывает возможность выполнения достаточно длительных высокоточных сейсмических (вибросейсмических) наблюдений с использованием данных автономных регистраторов.

Заключение

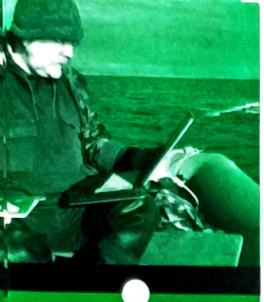
На основе автономных регистраторов РОСА-А можно построить бескабельную пространственно распределенную систему для выполнения длительных высокоточных сейсмических измерений при проведении глубинных исследований и сейсмического активного и пассивного мониторинга. Технологический интерфейс предлагаемой бескабельной системы сбора сейсмических данных обеспечивает возможность работы с различными источниками упругих колебаний, в том числе и с вибраторами, при практически неограниченном количестве точек наблюдений.

Предлагаемая бескабельная система сбора сейсмических данных имеет следующие отличительные характеристики:

- свободный режим работы с сейсмическими, в том числе и вибросейсмическими, источниками колебаний;
- возможность организации сейсмического мониторинга;
- практически неограниченное количество точек наблюдений;
- экономичность, отсутствие аналого-цифровых телеметрических линий связи (сейсмических кос);
- многоуровневое защищенное хранение и высокую скорость передачи больших объемов информации на основе файловой системы FAT16;
- высокоточная внешняя синхронизация по сигналам спутниковой системы GPS;
- оперативный многооперационный контроль системы регистрации сейсмических данных в полевых условиях с документированием результатов в виде файлов внутри встроенной Flash-памяти;
- широкий частотный диапазон регистрации: до 3,2 кГц на частотах квантования 8 кГц;
- возможность использования цифровых акселерометров, выполненных по MEMS-технологии;
- возможность работы в особо сложных условиях эксплуатации.

Литература

1. Еманов А.Ф., Кузнецов В.Л., Сагайдачная О.М., Сальников А.С., Соловьев В.М. Технология региональных исследований методом ГСЗ с вибрационным источником / Приборы и системы разведочной геофизики, 2004, 3.
2. Сагайдачная О.М., Сагайдачный А.В., Шмыков А.Н. Опыт построения российских многоканальных телеметрических станций для сейсмических исследований (СТС-24, СТС-24Р, РОСА)/ Приборы и системы разведочной геофизики, 2003, 2.
3. Сагайдачная О.М., Мальцев А.И., Птицына Т.С., Сагайдачный А.В., Сальников А.С., Шмыков А.Н. Отечественная многоканальная телеметрическая станция СТС-24Р для сейсмических исследований/ Геофизический вестник, 2002, 10.
4. Сагайдачная О.М., Сагайдачный А.В., Шмыков А.Н., Щегольков А.В. Многоканальная телеметрическая система сбора сейсмических данных/ Патент №2244945 (RU) на изобретение, приоритет от 01.08.2003 г.
5. Сагайдачная О.М., Сальников А.С., Шмыков А.Н. Бескабельная распределенная система регистрации для глубинных сейсмических исследований / II Международный симпозиум «Активный геофизический мониторинг литосферы Земли» Материалы докладов. Новосибирск, 2005.
6. Сагайдачный А.В., Шмыков А.Н. Бескабельное устройство для регистрации сейсмических данных / Патент №41376 (RU) полезная модель, приоритет от 24.05.2004 г.



Методика количественного анализа опытных работ на примере вибросейсмических работ в западном Казахстане

Закариев Ю.Ш., Марутян В.Г., Плешкевич А.Л., Рябов В.Ю., Рябошапко С.М., Цыпышев Н.Н., ОАО ЦГЭ, г. Москва;
Мусагалиев М.З., АО НК «КазМунайГаз», г. Астана

Введение

Основное назначение опытно-методических работ состоит в оптимизации выбора условий возбуждения-приема сейсмических колебаний. Указанная оптимизация осуществляется в тех достаточно узких рамках, которые определены принятыми заранее основными проектными решениями, как-то: типом источника возбуждения (взрывной, вибрационный); типом сейсмической съемки (2D, 3D); номинальной кратностью съемки; максимальным удалением источник-приемник и т.п. В силу организационно-технических причин начало проведения опытно-методических работ приурочивается, как правило, к началу производственных работ, когда фактически уже определены такие узко технические параметры съемки, как-то: коэффициент и величина базы группирования приемников или источников; суммарная нагрузка на грунт для виброисточников или вес заряда и глубина его заложения при взрывных работах. При этом опытно-методические работы зачастую служат лишь подтверждением заранее принятых технических решений, а иногда превращаются в простую формальность. Другим фактором, который снижает значимость результатов проведения опытно-методических работ, является фактическое отсутствие разработанной методики объективного анализа качества сейсмических данных. В отсутствие такой методики критерием оптимальности принятых технических и методических решений является визуальный анализ бумажных выводов полученных сейсмограмм, основанный на опыте и интуиции участвующего в этих работах геофизика, результаты которого, как правило, невозможно объективно охарактеризовать. В последние годы наметился некоторый перелом в таком субъективном подходе к анализу результатов опытно-методических работ. Во многом это связано с появлением современной, компактной и мощной вычислительной техники и соответствующего математического обеспечения, которое позволяет проводить количественный анализ сейсмических данных с элементами их обработки. В статье представлены практические методики компьютеризированного количественного анализа сейсмических данных. Наряду с применением более традиционных оконных оценок будут представлены новые методики количественной оценки качества сейсмических данных, применение которых поможет объективнее оценивать результаты опытных работ. Указанные методики были применены к результатам опытно-методических работ, проведенных в Западном Казахстане на площадях Акинген, Забурунье и Карамандыбас. Помимо иллюстрации их применения по результатам оценивания сделаны некоторые важные выводы, которые касаются не только собственно опытно-методических работ, но и основных производственных.

Критерии качества исходных сейсмических данных и методы его количественной оценки

Основным критерием качества полевых сейсмических данных следует считать их пригодность для последующей полноценной, качественной обработки, сложность которой продолжает возрастать из года в год. Последнее связано с возрастающей сложностью решаемых геологических задач. Традиционно качество полевых сейсмических данных связывают, прежде всего, с качеством прослеживания отраженных сейсмических волн от опорных и целевых отражающих горизонтов, их частотным составом, а также с уровнем регулярных волновых помех, главными из которых при наземных работах являются поверхностные волны. Традиционным средством количественного оценивания качества сейсмограмм являются разнообразные оконные оценки. К числу наиболее популярных принадлежат оконные оценки амплитуд и временных частот сейсмической записи в выбранных пользователем пространственно-временных окнах. Указанные окна выбираются, исходя из основных особенностей наблюдаемых сейсмограмм. Так, наземную сейсмограмму можно разделить на три основные области, которые обозначим M, R и S. Кратко охарактеризуем каждую из них.

Область «микросейсм» M, расположенная до теоретических первых вступлений, содержит действительные микросейсмы, техногенные и ветровые помехи в случае взрывных источников, а при работе с виброисточниками - значительные по уровню регулярные корреляционные шумы, обычно оторачивающие интенсивные прямую волну и волны первых вступлений. Корреляционные шумы обусловлены боковыми «лепестками», окружающими главный максимум функции взаимной корреляции теоретического свипа-сигнала с отраженным сигналом либо сигналом прямой волны. Указанные шумы имеют тенденцию слабо затухать либо вообще не затухать при значительных временных сдвигах от главного максимума. Хотя эти помехи чаще всего не составляют большой проблемы на малых временах при обработке отражений от неглубоких горизонтов, они могут затруднить обработку отражений от глубоких горизонтов, поскольку связанные с ними волны наблюдаются на значительных временах. Здесь амплитуды полезных отражений в силу фактора геометрического расхождения могут оказаться соизмеримыми или даже меньшими амплитуд корреляционного шума. Отметим, что уровень корреляционных шумов зависит от частотного диапазона и особенностей формы свипа.

Область конуса поверхностных «рэлеевских» волн R содержит волны-помехи, которые могут на порядок и более превышать по амплитуде полезные отраженные волны. Эти волны имеют, обычно, сравнительно низкую частоту колебаний и низкие кажущиеся скорости. Их важной особенностью является сравнительно медленное ослабление в сравнении с полезными отраженными волнами с ростом времени наблюдения, что связано с различиями функций расхождения. Обычные объемные волны в среднем убывают с ростом времени наблюдения из-за фактора геометрического расхождения, как $1/T$, тогда как поверхностные, «каналовые» волны убывают значительно медленнее - как $1/T^{1/2}$. Указанные волны обычно составляют одну из главных проблем при сейсмической обработке, роль этих помех объективно возрастает с ростом времени наблюдения.

«Сигнальная» область сейсмограммы S расположена ниже области M и волн первых вступлений, вне конуса R интенсивных поверхностных волн. Наблюдаемые в этой области сейсмограммы синфазности полезных отраженных волн часто бывают маскированы плотным фоном интенсивных среднескоростных квазирегулярных волн-помех,

имеющих разнообразную природу. Часто на фоне этих волн, имеющих близкий к полезным отражениям частотный состав, не удается уверенно выделить полезные отражения без предварительной частотной фильтрации указанных помех. Обычно волны, наблюдаемые в области S, из-за неупругого поглощения в среде вкупе с фактором геометрического расхождения в среднем ослабляются, как $1/t^2$ с ростом времени наблюдения, что обусловило популярность применения фактора стационаризации сейсмической записи по времени t^2.

Исходя из указанного представления сейсмограмм, популярным способом их оценки является вычисление средних по модулю амплитуд AM, AR, AS и средних (или преобладающих) частот FM, FR, FS в окнах, расположенных в пределах указанных областей M, R и S (рис.1, а), а также отношений полученных оконных оценок типа AS/AM и AS/AR. Последние могут условно интерпретироваться как оценки отношения сигнал/помеха. Условность такой интерпретации состоит в том, что оценка AS необходимо содержит в себе долю квазирегулярных волн-помех, которая может существенно превышать энергетически долю полезных отраженных волн. То же замечание касается оценок частотного состава. Кроме того, сами по себе величины отношений AS/AM и AS/AR характеризуют лишь относительное изменение свойств изучаемых сейсмограмм. Они не имеют самостоятельного значения в качестве меры абсолютной величины отношения сигнал/помеха. Тем не менее, указанные простейшие оценки помогают установить ряд важных особенностей изучаемых сейсмограмм, как-то:

- относительная интенсивность источника колебаний - величина AS, измеренная по сейсмограммам ОПВ;

- относительный уровень поверхностных волн-помех и «микросейсм» - величины отношений AS/AR и AS/AM (либо сами величины AR и AM), измеренные по сейсмограммам ОПВ;

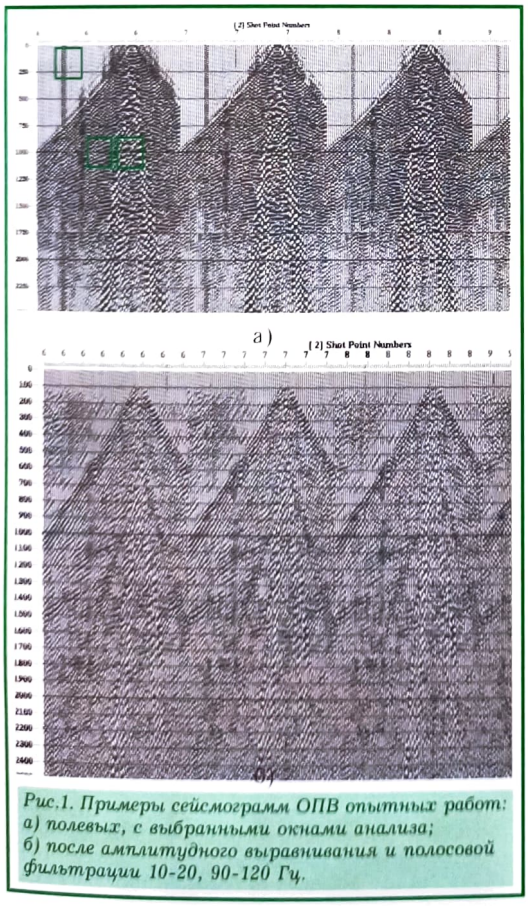


Рис.1. Примеры сейсмограмм ОПВ опытных работ: а) полевых, с выбранными окнами анализа; б) после амплитудного выравнивания и полосовой фильтрации 10-20, 90-120 Гц.

- преобладающий (средний) частотный состав колебаний в разных областях сейсмограммы - величины FM, FR, FS, измеренные по сейсмограммам ОПВ.

Указанные оценки, число которых составляет шесть, могут быть рекомендованы как необходимый минимум при анализе данных опытно-методических работ и при мониторинге полевых сейсмограмм в ходе проведения основных производственных работ. Помимо этого, при анализе значительных по объему совокупностей данных производственных работ могут использоваться еще две полезные оценки - AM и FM, выполненные по сортировкам (сейсмограммам) ОПП, - отражающие структуру и уровень техногенных помех (дороги, населенные пункты, работающие нефтепромыслы и т.п.).

Среди иных оконных оценок необходимо упомянуть статистическую оценку S/N отношения сигнал/помеха, которая претендует на свою универсальность в качестве меры абсолютной величины этого отношения. Указанная оценка исходит из модели помех некоррелированных в профильном направлении, т.е. модели белого шума. Такое предположение, не имеющее связи с реальным сейсмическим экспериментом, позволяет на основе сравнения функций взаимной корреляции и автокорреляции трасс изучаемой сейсмограммы оценивать энергетическую составляющую указанного белого шума относительно коррелированной части сейсмограммы. Формальное применение указанной оценки к реальным сейсмическим данным часто приводит к несуразным результатам, что дает основание рекомендовать полностью отказаться от ее практического использования. Подтверждающий сказанное практический пример использования данной оценки приведен в следующем разделе при анализе реальных данных опытно-методических работ на площади Акинген (рис.3).

Заметим, что указанные выше оконные оценки не дают прямого ответа на основной вопрос о качестве сейсмических данных. В лучшем случае эти оценки позволяют косвенно оценить относительные изменения качества производственных сейсмограмм, контролируя их общий амплитудно-частотный уровень, связанный с условиями возбуждения-приема, а также относительную интенсивность регулярных помех типа поверхностных волн и промышленных помех. Указанные оценки обычно затруднительно применять при дифференцировании по качеству результатов опытно-методических работ, имеющих целью оптимизацию условий приема-возбуждения колебаний, что особо касается работ с виброисточниками. Данное обстоятельство послужило причиной разработки альтернативной методики получения количественной оценки отношения сигнал/помеха, к изложению которой мы приступим.

Напомним, что одним из основных методов стандартной обработки является накапливание сигналов отраженной волны вдоль ее синфазности по сейсмограммам ОСТ с последующей нормализацией результата по числу слагаемых. Целью данного накапливания является выделение полезного сигнала отраженной волны на фоне разнообразных помех. Со статистической точки зрения результат указанного накапливания представляет собой среднее арифметическое, служащее, при известных предположениях, несмещенной оценкой с минимальной дисперсией полезного сейсмического сигнала на фоне случайных помех - его математического ожидания. Наряду с найденной величиной этой точечной оценки важной ее характеристикой является выборочная дисперсия или среднеквадратический разброс, характеризующий меру разброса входящих в оценку среднего арифметического отдельных слагаемых. Ясно, что



чем менее будут различаться друг от друга входящие в сумму слагаемые, тем менее зашумлены исходные данные и тем более надежная оценка математического ожидания будет получена. Для иллюстрации сказанного можно рассмотреть два крайних случая. Первый случай – отсутствие коррелированного сигнала вдоль известной оси синфазности. В этом случае среднее арифметическое будет близко к нулю, а выборочная дисперсия или корень из нее – стандартное отклонение, – сравнительно велики. Второй случай, отвечающий полному отсутствию помех или искажений сигнала, – полностью повторяющийся сигнал вдоль оси синфазности от трассы к трассе. Здесь среднее арифметическое совпадет с каждым отдельным слагаемым, а стандартное отклонение будет равно нулю. Сказанное позволяет предложить следующую естественную меру отношения сигнал/помеха, ρ которую определим безразмерной величиной модуля отношения среднего арифметического к стандартному отклонению:

$$\rho = |\bar{a}| / \sigma,\ \bar{a} = \frac{1}{N}\left(\sum_N a_i\right),\ \sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_N (a_i - \bar{a})^2}, \quad (1)$$

где $a_i = a_i(t)$ - амплитуда i-й сейсмической трассы, измеренная вдоль известной синфазности волны t (например, вдоль теоретического годографа ОСТ или ОПВ заданной отраженной волны). При таком определении величина отношения сигнал/помеха для конкретной отраженной волны будет зависеть от времени t, поскольку полезный сигнал представляет собой переменную функцию времени. Для того чтобы получить одну единственную оценку отношения сигнал/помеха для заданной отраженной волны можно использовать разные способы. Можно, например, осреднить переменную по времени оценку в некотором временном интервале, охватывающем полезный сигнал:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{M}\sum_{|j|\le[M/2]} \rho(t_j),$$

где $t_j = t + j\Delta t \in \Delta T$ - сдвинутая по времени синфазность внутри заданного временного интервала, центрированного относительно линии синфазности $t = t(x)$. Поскольку из-за переменной формы сейсмического сигнала большая доля значений $\rho_j = \rho(t_j)$ будет иметь в указанном временном интервале ΔT сравнительно малую величину, осредненная указанным образом величина отношения сигнал/помеха будет иметь низкие значения и поэтому будет маловыразительной. Указанный недостаток может быть устранен, если осреднять не первые, а более высокие степени ρ_j, приписывая, тем самым, больший вес их большим значениям:

$$\bar{\rho}_k = \left(\frac{1}{M}\sum_{|j|\le[M/2]} \rho^k(t_j)\right)^{1/k}, \quad (2)$$

где допустимо $1 \le k \le \infty$. Практика расчетов показала, что подходящими значениями являются, в частности, $\bar{\rho}_2$, $\bar{\rho}_8$ и $\bar{\rho}_\infty$. Заметим, что $\bar{\rho}_{k-1} \le \bar{\rho}_k \le \bar{\rho}_{k+1}$, а $\bar{\rho}_\infty = \max_j \rho(t_j)$ в заданном интервале ΔT центрированном относительно линии синфазности $t = t(x)$. Результаты практических расчетов указанных оценок (1)-(2) будут приведены в последующем разделе.

Приведем некоторые свойства указанных оценок. Во-первых, следует подчеркнуть, что данные оценки характеризуют средневзвешенное либо пиковое отношение сигнал/помеха исходных (не суммарных) сейсмических данных. Во-вторых, данные оценки позволяют оценить статистический эффект накапливания. Именно, при синфазном накапливании N сейсмических трасс с оцененным исходным отношением сигнал/помеха $\bar{\rho}_i$ суммарная трасса будет иметь отношение сигнал/помеха $\bar{\rho}_S = \sqrt{N}\bar{\rho}_i$. Это позволяет дать более обоснованную оценку желаемой кратности накапливания при проектировании сейсмической съемки. В соответствии с формулами (1) величина оценки отношения сигнал/помеха $\bar{\rho}_i$ зависит от разброса амплитуд сигнала вдоль синфазности отраженной волны. Заметим, что этот разброс может быть обусловлен не только волновыми помехами различной природы, но и различием амплитудного уровня отдельных трасс, обусловленным различиями условий приема, а также геометрическим расхождением. Кроме того, значительное влияние может оказать статический разброс времен вступления сейсмических сигналов относительно теоретической синфазности. С учетом сказанного, для получения не заниженной, а более реалистичной оценки отношения сигнал/помеха перед ее расчетом рекомендуется стационаризовать сейсмические записи умножением их амплитуд на T^2. Часто оказывается желательным выполнить также элементы обработки, как-то фильтрацию низких частот для подавления поверхностных волн, а также балансировку амплитуд отдельных трасс с помощью нормировки либо АРУ. При этом будет получена более реалистичная оценка отношения сигнал помеха, которой можно реально достичь в ходе стандартной обработки.

Практическая реализация указанной методики требует оценить теоретическую форму синфазности выбранной отраженной волны на сейсмограммах ОПВ, полученных в ходе проведения опытно-методических работ. Имеющийся опыт позволяет рекомендовать следующую последовательность действий. В начале следует с помощью подбора подходящего полосового фильтра наиболее уверенно выделить желаемую синфазность отраженной волны на фоне помех, а также выполнить амплитудную балансировку сейсмических трасс. После этого, с помощью имеющихся интерактивных программных средств нужно выполнить корреляцию отраженной волны на отдельных сейсмограммах, приближенно оценив форму ее синфазности. Для этого в разработанных программных системах экспресс-обработки и анализа полевых сейсмических данных FN и FNE имеются полуавтоматические средства корреляции и уточнения формы синфазности. Далее, если требуется, отдельные сейсмограммы, входящие в серию проведенных экспериментов, могут быть статически уравнены - для устранения постоянных временных сдвигов между отдельными сейсмограммами. Затем все сейсмограммы накапливаются по координате ОПП. Это делается с целью подавления нерегулярного шума и оптимизации условий выделения синфазности интересующей отраженной волны, а также для исключения субъективного элемента в оценке формы синфазности отражения, из-за адаптации ее формы к отдельной, частной сейсмограмме, - выполняется полуавтоматическая корреляция синфазности отраженной волны по суммарной сейсмограмме. Практический опыт показал, что результаты данной корреляции целесообразно сгладить либо с помощью скользящего среднего, либо аппроксимировать ее гладкой теоретической кривой по методу наименьших квадратов. Устойчивые и реалистичные результаты удается получить при аппроксимации по методу наименьших квадратов наблюденной синфазности отражения отрезком параболы, которая и отождествляется с ее теоретической формой. Затем полученная оценка формы синфазности последовательно применяется к каждой отдельной сейсмограмме ОПВ, входящей в серию проведенных экспериментов, для получения соответствующих оценок отношения сигнал/помеха $\bar{\rho}_2$, $\bar{\rho}_8$ и $\bar{\rho}_\infty$.

Заметим, что в качестве альтернативы предложенной мере отношения сигнал/помеха (1)-(2)

могут быть успешно использованы оценки нормированных функций взаимной корреляции или функции подобия по ансамблю сейсмических трасс [1,2]. Эти оценки, популярные при построении спектров скоростного анализа, обычно изменяются синхронно с представленными оценками (1)-(2). В отличие от последних они уже не имеют столь наглядной физической интерпретации.

Практический пример: анализ результатов опытно-методических работ на площади Акинген

В ходе опытно-методических работ на данной площади были проведены традиционные серии экспериментов, содержащие переборы: числа накапливаний, длины свипа, его верхней граничной частоты, величины его начального конуса, нагрузки на грунт, а также способ группирования вибраторов - на линейной базе или по углам квадрата. На рис.1,а представлены примеры типичных необработанных сейсмограмм опытных работ, на которых можно проследить синфазности полезных отраженных волн. Одно из отражений имеет синфазность с вершиной на времени около t_0=1000 мс. При построении оконных оценок использовалось окно S шириной 300 мс, охватывающее указанную синфазность. Окно R, имеющее сходную конфигурацию, было расположено на том же времени в конусе поверхностных волн; окно M было расположено на времени до теоретических первых вступлений. При анализе полученных сейсмограмм обратила на себя внимание их разнородность с точки зрения уровня их амплитуд. Для количественной оценки этого явления были рассчитаны амплитудные оконные оценки AS, графики которых представлены на рис.2 с разбивкой по сериям отдельных, взаимосвязанных экспериментов и приведены полученные результаты.

На рис. 2,а представлена зависимость амплитуд сейсмограмм в окне S от верхней граничной частоты свипа. Полученная зависимость близка к обратной пропорциональной - увеличение верхней частоты свипа в 1,5 раза с 80 до 120 Гц приводит к уменьшению амплитуды сейсмограммы примерно в 1,5 раза (при прочих равных условиях). Увеличение длины начального конуса свипа в пределах от 250 до 1000 мс практически не приводит к изменению амплитуды записи в окне S, что демонстрирует рис.2,б. Увеличение длины свипа в диапазоне от 8 до 16 (с), а также увеличение числа накапливаний с 2 до 8 привело к пропорциональному росту амплитуд соответствующих сейсмограмм (рис.2,в,г).

При анализе зависимости амплитуд от числа накапливаний при работе со станциями SN фирмы «SERCEL» чрезвычайно важным является станционный параметр, характеризующий следующее условие: до или после суммирования производится корреляция со свипом. В проведенных экспериментах корреляция выполнялась до суммирования. В ином случае зависимость от числа накапливаний является квадратичной.

Изменение нагрузки на грунт в диапазоне от 40 до 70% привело к значимому - в 2, 7 раза, - увеличению амплитуд записи (рис.2,д). Характер зависимости - нелинейный.

Изучение амплитудных характеристик сейсмограмм в окне R области распространения поверхностных волн свидетельствует в основном о синхронном поведении оценок AR и приведенных выше оценок AS. Важное исключение составляют те эксперименты, которые приводят к увеличению относительной величины начального конуса свипа DT/T, где DT - величина начального конуса, T - длина свипа. Так увеличение его относительной величины с 2% до 8% (в основном, за счет увеличения начального конуса с 250 до 1000 мс) привело к подавлению поверхностной волны и увеличению отношения AS/AR приблизительно 1,8 раза (рис.2,е). В изучаемом диапазоне величин эта зависимость близка к параболической. Кроме того, имеется слабый, но устойчивый рост отношения AS/AR с ростом верхней граничной частоты свипа, и уменьшение этого отношения при увеличении длины свипа. Объяснение указанных трендов будет дано позднее.

Продемонстрируем применение к реальным данным статистической оконной оценки отношения сигнал/помеха S/N, основанной на сравнении

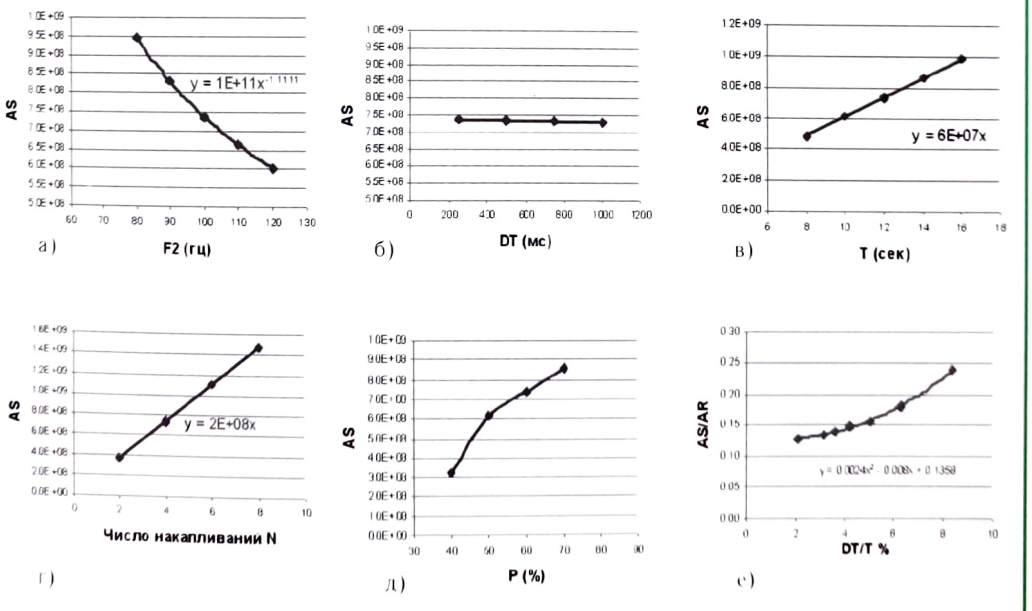
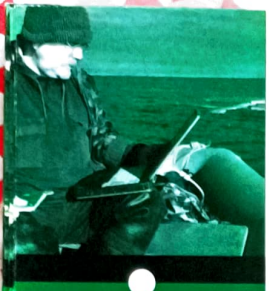


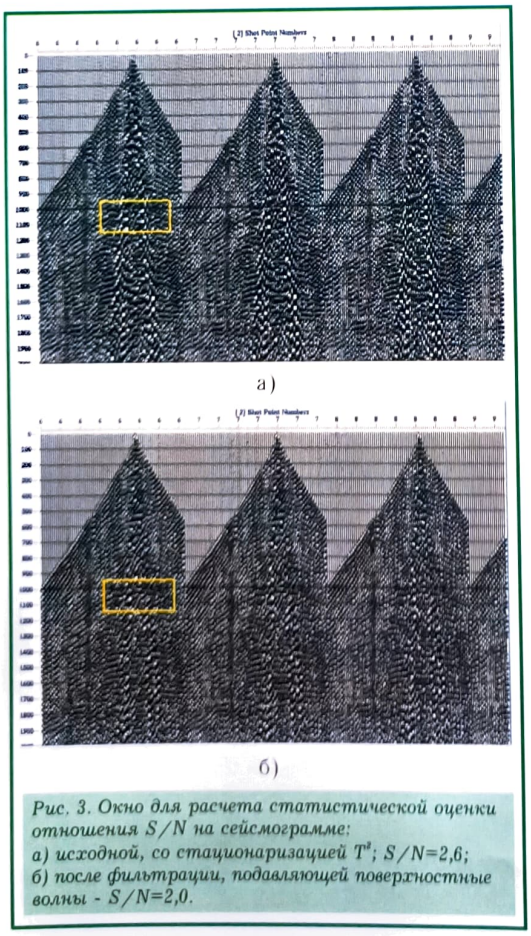
Рис. 2.
а) зависимость амплитуды AS полезной части записи от верхней граничной частоты свипа F2;
б) зависимость амплитуды AS полезной части записи от величины конуса DT (мс);
г) зависимость амплитуды AS полезной части записи от числа накапливаний N;
д) зависимость амплитуды AS полезной части записи от величины нагрузки P (%);
е) зависимость отношения оконных оценок амплитуд AS/AR от относительной величины конуса DT/T %;



взаимно корреляционной и автокорреляционной функций сейсмических трасс. На рис.3 приведен пример сейсмограммы: а) до фильтрации, б) после полосовой фильтрации, позволившей ослабить поверхностную волну и существенно улучшить прослеживаемость полезного отражения. По этой сейсмограмме были рассчитаны указанные оценки отношения сигнал/помеха до и после фильтрации. Оценка отношения сигнал/помеха до фильтрации была равной S/N=2,6 , а после фильтрации значимо уменьшилась и стала равной S/N=2,0. Очевидно, что причиной абсурдного результата стала настройка данной оценки на регулярную помеху - поверхностную волну как на полезную волну. Можно полагать, что такое свойство указанной оценки является фатальным недостатком, который препятствует ее практическому использованию.

Коротко остановимся на оконных оценках частотного состава сейсмограмм опытных работ. На рис.4 представлены графики преобладающих частот записей в окнах M,R и S - FM, FR и FS, - в проведенной серии экспериментов. Оконная оценка преобладающей частоты была построена на основе первого нуль-пересечения осредненной в окне анализа автокорреляционной функции сейсмических трасс, входящих в окно. Время указанного первого нуль-пересечения полагалось равным 1/4 преобладающего периода колебаний, откуда и получалась оценка преобладающей частоты. Опыт практических расчетов позволяют рекомендовать именно эту оценку в качестве надежной и устойчивой величины преобладающей частоты. Альтернативная оценка в виде максимума амплитудно-частотного спектра характеризуется своей неустойчивостью и, как следствие, недостоверностью, а другие оценки типа средневзвешенной частоты амплитудного спектра или его медианы, обычно дают завышенные значения преобладающей частоты.

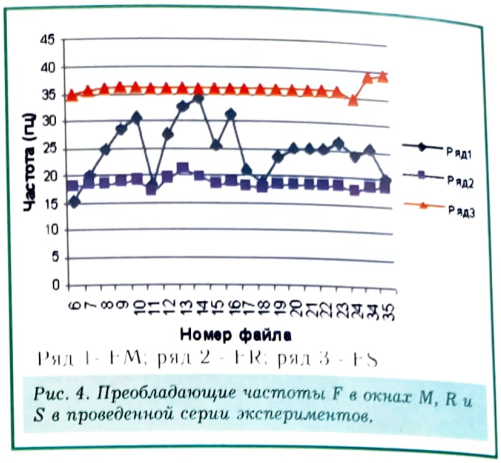
Результаты анализа преобладающих частот сейсмической записи свидетельствуют, что оценки



а)

б)

Рис. 3. Окно для расчета статистической оценки отношения S/N на сейсмограмме:
а) исходной, со стационаризацией T^2; S/N=2,6;
б) после фильтрации, подавляющей поверхностные волны - S/N=2,0.



Ряд 1 - FM; ряд 2 - FR; ряд 3 - FS

Рис. 4. Преобладающие частоты F в окнах M, R и S в проведенной серии экспериментов.

преобладающих частот FS в области полезных отражений практически не зависят от условий проведения экспериментов за исключением замены линейного группирования источников на группирование типа «квадрат». При этом оценка преобладающей частоты FS увеличилась с 35-36 Гц до 39 Гц. Как было установлено в ходе дальнейших исследований, данное повышение частоты записи связано с заметным ухудшением прослеживаемости отраженных волн и увеличением фона нерегулярных помех, что и стало причиной указанного повышения частоты.

Подводя промежуточные итоги проведенного анализа оконных оценок результатов опытно-методических работ, можно сделать определенные выводы. На амплитуду сейсмограмм ОПВ значимо повлияли следующие факторы.

1. Величина верхней граничной частоты свипа. Зависимость от ее величины близка к обратной пропорциональной. Так, увеличение верхней граничной частоты с 80 Гц до 120 Гц привело к уменьшению средней амплитуды сейсмограмм примерно в 1,5 раза (при прочих равных условиях).

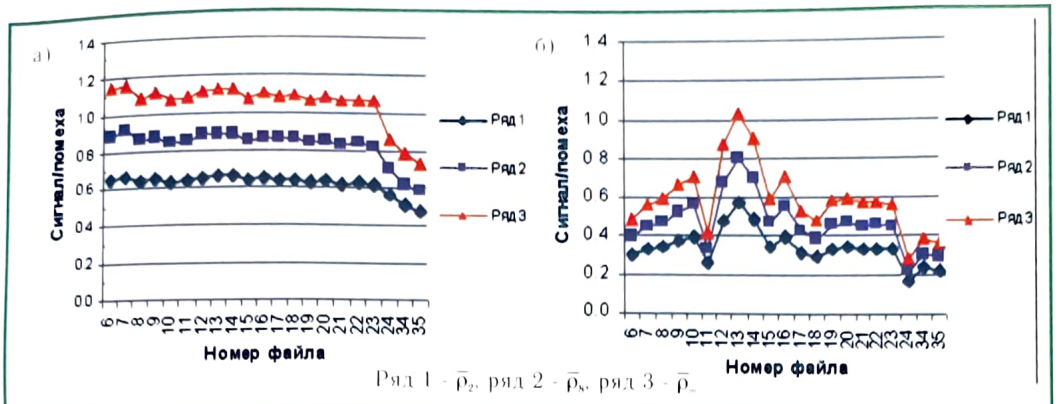
2. Длина свипа. Зависимость амплитуды от ее длины близка к пропорциональной. Так, увеличение длины свипа с 8с до 16с привело примерно к двукратному росту амплитуды.

3. Число накапливаний. При использовании режима корреляции до накапливания амплитуда сейсмограммы пропорциональна числу накапливаний (их увеличение с 2 до 8 приводит к росту амплитуды в 4 раза); при задании корреляции после накапливания амплитуда квадратично зависит от числа накапливаний (их увеличение с 2 до 8 приводит к росту амплитуды в 16 раз).

4. Нагрузка (усилие) на грунт. Изменение нагрузки от 40% до 70% привело к нелинейному росту амплитуды в 2,7 раза.

Все указанные выше факторы воздействуют на амплитуды практически синхронно, как в области полезных волн S, так и поверхностных волн R.

Специфическое действие на амплитуды сейсмограмм оказывает увеличение длины начального конуса свипа. Указанное увеличение в диапазоне от 250 мс до 1000 мс практически не влияет на амплитуду полезных волн в окне S и значимо - приблизительно в 1,8 раза, - ослабляет амплитуду поверхностных волн в окне R. Указанный эффект имеет простое объяснение и связан с тем, что увеличение длины конуса в начальной части свипа приводит к уменьшению доли низких частот, и, следовательно, подавлению (фильтрации) низкочастотной части сейсмической записи. Соответственно, подавление низких частот приводит к ослаблению поверхностных волн. Суждение о полезности такого рода ослабления за счет увеличения начального конуса свипа будет приведено в заключительной части работы.



Ряд 1 - $\bar{\rho}_2$, ряд 2 - $\bar{\rho}_k$, ряд 3 - $\bar{\rho}_-$

Рис. 5. Оценка отношения сигнал/помеха ρ по синфазности отражения с вершиной 1000 (мс). а) данные после обработки; б) необработанные данные.

Возникает следующие естественные вопросы. Как связаны (и связаны ли вообще) отмеченные выше особенности сейсмограмм опытных работ с их качеством? Какие условия возбуждения/приема колебаний следует признать более предпочтительными, а какие менее? Представленные выше оконные оценки сейсмограмм и основанный на них анализ не дают прямого ответа на эти основные вопросы. Для ответа на них необходимо оценить качество прослеживания полезных отражений на фоне разнообразных помех, что может быть выполнено с помощью предложенной методики расчета отношения сигнал/помеха, предполагающей корреляцию синфазности отражения.

Для более уверенной корреляции синфазностей полезных отражений были выполнены элементы сигнальной обработки сейсмограмм, после которой стала уверенно прослеживаться синфазность отражения с вершиной на времени около 1000 мс (рис.1,б). На основе указанной синфазности в окружающем ее 30 мс окне были рассчитаны оценки $\bar{\rho}_2$, $\bar{\rho}_k$ и $\bar{\rho}_-$ (см. формулы (1)-(2)). Результаты расчетов приведены ниже на рис.5,а. Полученные оценки $\bar{\rho}_2$, $\bar{\rho}_k$ и $\bar{\rho}_-$ демонстрируют примерное постоянство отношения сигнал/помеха в пределах всего ряда сейсмограмм за исключением трех последних с номерами 24, 34 и 35, для которых характерно значимое уменьшение отношения сигнал/помеха. Заметим, что сейсмограмма с номером 24 отвечает уменьшению нагрузки на грунт с 60% до 40%, а с номерами 34 и 35 - замене линейного группирования источников на группирование типа «квадрат» без переезда и с переездом соответственно. Отметим, что полученные количественные оценки полностью отвечают результатам визуального анализа сейсмограмм.

Проведенный анализ свидетельствует, что при вибросейсмических работах изменение таких параметров возбуждения колебаний, как длина свипа, ширина его частотной полосы, число накапливаний, величина начального конуса свипа, практически не повлияло на качество прослеживания отраженных волн на обработанных сейсмограммах. Факторами, которые значимо повлияли на их качество, являются способ группирования вибраторов и нагрузка на грунт. В проведенной серии экспериментов возбуждение колебаний с помощью групп вибраторов типа «квадрат», а также с уменьшенной до 40% нагрузкой на грунт привело к ухудшению качества сейсмограмм относительно линейного группирования и номинальной нагрузки на грунт 60-70%.

Помимо качества прослеживания отраженных волн на фоне помех существенное значение имеет частотный состав сигнальной составляющей. Очевидно, для последующей обработки желателен широкополосный частотный состав зарегистрированных сигналов отраженных волн. Оконные оценки частотных спектров сейсмических колебаний имеют своим существенным недостатком отсутствие избирательности, поскольку в окно анализа помимо полезных отраженных волн входят многочисленные помехи. Для исправления этого недостатка и получения более избирательных оценок можно рекомендовать формирование суммарного сигнала накапливанием трасс вдоль оценки теоретической синфазности отраженной волны. На рис.6 представлена подборка суммотрасс, каждая из которых получена накапливанием вдоль синфазности отражения t_0=1000 мс всех трасс для каждой из сейсмограмм ОПВ, входящих в серию опытных работ. Отметим, что визуальный анализ полученных суммотрасс и расчет их амплитудно-частотных спектров, или оценка преобладающих частот полезного сигнала свидетельствуют о мало значимом отличии их частотного состава и разрешенности записи.

Существенно иная картина наблюдается при оценке отношения сигнал/помеха по необработанным сейсмограммам со стационаризацией амплитуд t^2 (рис.5,б). При получении этих оценок применена оценка формы синфазности отражения, полученная после фильтрации, - как наиболее надежная. Анализ необработанных данных приводит к следующим результатам. Отношение сигнал/помеха на необработанных данных, оцененное по синфазности отражения с вершиной 1000 мс, наиболее сильно зависит от величины начального конуса свипа. При увеличении длины конуса с 250 мс до 1000 мс указанное отношение вырастает в 2 и более раза. Как уже было отмечено, причина данного явления в том, что при увеличении длины конуса происходит ослабление низкочастотных составляющих свипа, что приводит к фильтрации низкочастотной поверхностной волны. Сказанное подтверждается визуальным анализом необработанных сейсмограмм, на которых четко проявляется ослабление поверхностных волн при увеличении относительной длины конуса. Помимо этого наблюдается значимая зависимость отношения сигнал/помеха от величины верхней граничной частоты свипа и от длины свипа. Именно, повышение верхней граничной частоты, а также уменьшение длины свипа приводят, при прочих равных условиях, к увеличению оценки отношения сигнал/помеха по синфазности отражения - t_0=1000 мс. Причиной является опять-таки подавление поверхностной волны. Именно при неизменной длине свипа и величине начального конуса увеличение его верхней граничной частоты с неизбежностью приводит к более глубокому ослаблению низкочастотных составляющих (за счет начального конуса свипа) и, соответственно, к подавлению поверхностных волн. Тот же эффект проявляется при уменьшении длины



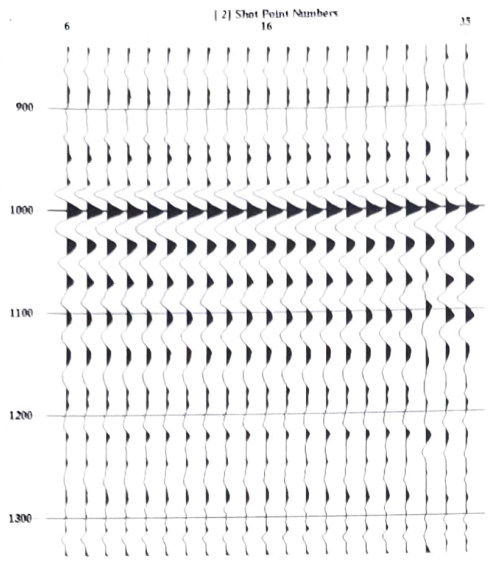


Рис. 6. Подборка суммотрасс, отвечающих накапливанию трасс каждой из сейсмограмм ОПВ вдоль синфазности отражения на времени 1000 мс.

свипа и неизменных граничных частотах и длине конуса. Сказанное объясняет и то, что для необработанных данных график отношения AS/AR обычно повторяет форму графиков отношения сигнал/помеха $\bar{\rho}_2$, $\bar{\rho}_s$ и $\bar{\rho}_\infty$, представленных на рис.5,б.

Выводы и рекомендации

Подводя итог проведенным исследованиям оценки качества сейсмограмм опытно-методических работ, следует выделить одну серьезную проблему. Центральный вопрос состоит в том, каким рядом сейсмограмм следует руководствоваться при оценке их качества, на котором и будет основан последующий выбор оптимальных условий возбуждения-приема колебаний. Следует ли пользоваться исходными необработанными сейсмограммами или сейсмограммами после частичной обработки, состоящей в фильтрации основной помехи интенсивных, низкочастотных поверхностных волн? Как было показано, результаты анализа обработанных и необработанных сейсмограмм при вибросейсмических наблюдениях могут привести к радикально отличающимся выводам. То же замечание касается и визуальной их оценки. Опуская отличия в абсолютном амплитудном уровне исходных сейсмограмм, основное их отличие состоит в интенсивности конуса поверхностных волн-помех относительно полезной части записи. Указанная относительная интенсивность поверхностных волн, выражаемая отношением AS/AR, в проведенной серии экспериментов практически зависит от одного единственного фактора - DT/T (%), - относительной величины начального конуса свипа. Данное отношение характеризует неравномерность частотного спектра свипа, за счет которой происходит подавление основной низкочастотной помехи - поверхностной волны. Можно утверждать, что аналогичный эффект достигается увеличением начальной частоты свипа с 10 Гц до 15 или, скажем, до 20 Гц. Следует ли такой способ подавления поверхностных волн на полевых сейсмограммах считать полезным или его целесообразнее отнести на этап стандартной сигнальной обработки? Более правильным представляется второе. Напомним, что сигнальная обработка сейсмограмм полосовым фильтром 10-20, 90-120 Гц практически полностью нивелирует их различия, т.е. при вибросейсмических работах качество сейсмических данных - с точки зрения результатов их последующей сигнальной обработки, - чрезвычайно слабо зависит от параметров свипа в разумных, достаточно широких, пределах. Сказанное позволяет сделать вывод о том, что с учетом конкретных условий проведения полевых работ и частотного диапазона основной помехи - поверхностной волны, - можно использовать некоторые стандартные параметры возбуждения колебаний, не приводящие к перегрузкам в работе вибраторов, их преждевременному износу и поломке. С этой точки зрения допустимо использовать достаточно большую величину начального конуса свипа 750-1000 мс, имеющего стандартную длину 10-12 с и частотную полосу от 8-10 до 90-100 Гц. Такой режим мягкого подавления низких частот представляется сравнительно безопасным с точки зрения перспектив последующей сигнальной обработки.

Следует отметить, что при взрывных работах для подавления поверхностных волн обычно используют увеличение глубины погружения заряда. В отличие от вибросейсмических работ такая мера не связана с искусственным ограничением частотного диапазона сейсмограмм. По этой причине при взрывных работах важным представляется анализ сейсмограммам без их частотной фильтрации в ходе предварительной обработки.

Поскольку современный граф обработки часто предполагает использование балансировки амплитуд и деконволюции с учетом поверхностных условий, чрезвычайно важным условием грамотного проведения полевых работ является отсутствие резких изменений параметров возбуждения колебаний, приводящих к резким изменениям амплитудно-частотных характеристик сейсмограмм. В частности, поскольку амплитуда сейсмограмм пропорциональна длине свипа и обратно пропорциональна его верхней граничной частоте, указанные параметры должны оставаться, как правило, неизменными. То же касается изменения таких важнейших параметров возбуждения как число накапливаний, величина нагрузки на грунт и коэффициент группирования, которые чрезвычайно сильно влияют на амплитуду сейсмограмм. С точки зрения перспектив последующей обработки с сохранением амплитуд резкие и бесконтрольные изменения указанных параметров возбуждения ничем не отличаются от бесконтрольного изменения коэффициента усиления на сейсмической станции. В отличие от последнего, изменения указанных параметров возбуждения, как правило, не могут быть автоматически учтены т.н. МР-фактором, что способно привести к динамическим искажениям окончательных результатов обработки.

Отметим, что в проведенной серии экспериментов, примененные параметры линейного группирования источников были далеки от оптимальных, что связано с чрезмерно большим расстоянием между соседними вибраторами в группе, составлявшим около 12 м. Несмотря на это, как обработанные, так и необработанные сейсмограммы демонстрируют заметное ухудшение своего качества при замене линейного группирования источников на группы типа «квадрат».

Главный вывод проведенных исследований состоит в том, что именно вопросам оптимизации группирования следует уделять основное внимание.

Литература

1. Yilmaz O. Seismic Data Processing. - Tulsa: SEG, 1987.
2. Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Д. Обработка сейсмических данных. М., «Мир», 1993.
3. Под ред. Гурвича И.И., Номоконова В.П. Справочник геофизика. М., «Недра», 1981.
4. У.Притчетт. Получение надежных данных сейсморазведки. М., «Мир», 2001 г.


ЗАО СОЕДИНИТЕЛЬ
РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ
СПЕЦИАЛЬНЫХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ И КАБЕЛЕЙ
РОССИЯ, 456320, Челябинская область, г. Миасс, ул. Ильмен-тау, 7;
тел.: (3513) 54-70-07, 54-67-33; факс: (3513) 53-02-13
E-mail: sdn@chel.surnet.ru; www.soedinitel.ru



Компания ГЕОСЕЙС предлагает геофизическим компаниям:

- изготовление и аренда источников возбуждения: электромагнитный источник ГЕОТОН, вибраторы;
- аренда сейсморазведочного оборудования: сейсмостанции SN 388, 408 UL;
- поддержка персоналом, супервайзерские услуги.

GEO SEIS ГЕОСЕЙС

тел: (495) 202-32-17 / 202-32-40
факс: (495) 202-32-27
e-mail: geoseis@col.ru / geoton@geoton.ru
htpp: www.geoton.ru