

ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

ЯНВАРЬ-МАРТ

01/2006

ЕЖЕКВАРТАЛЬНОЕ ОФИЦИАЛЬНОЕ ИЗДАНИЕ САРАТОВСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ ЕВРО-АЗИАТСКОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

ТЕМА НОМЕРА:

ЭЛЕКТРО- РАЗВЕДКА

ТАКЖЕ В НОМЕРЕ:

Выбор условий взрыва на сейсморазведочных работах ...
Конференции, встречи, деловые клубы ...



15 лет на рынке геофизического оборудования ИЗВЕСТНОЕ ИМЯ – ИЗВЕСТНЫЕ МАРКИ ООО «ОЙО-ГЕО ИМПУЛЬС ИНТЕРНЭШНЛ»

Производство и продажа полевого геофизического оборудования

НОВЫЙ СЕЙСМОПРИЕМНИК GS-30 СТ

с нелинейными
искажениями < 0.08
и допусками
параметров $\pm 2\%$

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



СЕРВИСНЫЕ РАБОТЫ ПО РЕМОНТУ И ОБСЛУЖИВАНИЮ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Тестеры и обрыво-
искатели

БУКСИРУЕМЫЕ КОСЫ

с самоориенти-
рующимися
сейсмоприемниками.



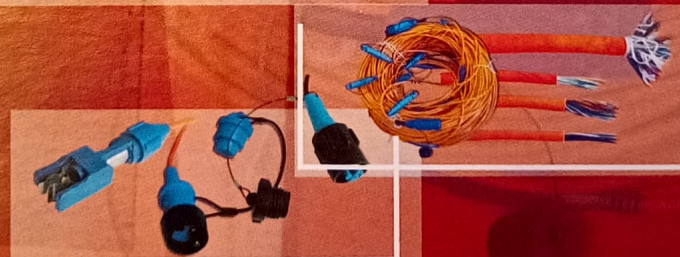
КАБЕЛЬНАЯ ПРОДУКЦИЯ

-для телеметрических
систем
сбора данных

-для линейных систем
с числом
жил от 2 до 254

РАЗЪЕМЫ ТИПА

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



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](http://geoimp.on.ufanet.ru)

■ Колонка редактора

Пятнадцатый готов!

Турлов П.А. 04

● Тема номера: *Электроразведка сегодня*

■ Теория

О взаимосвязи циркуляции напряженности электрического поля и электродвижущей силы индукции во временной области

Губатенко В.П., Пескова О.С. 05

■ Геофизические технологии

Зондирование становлением поля с фокусировкой электрического тока

Рыхлинский Н.И. 08

Измерительно-вычислительный комплекс для магнитотеллурического мониторинга геодинамических процессов (ИВК-МТМ)

Светов Б.С., Кукса Ю.И., Одинцов В.И., Амиантов А.С. 14

Новая аппаратура для радиоволновой геоинтроскопии горных пород в межскважинном пространстве "РВГИ-2005"

Истратов В.А., Остапчук С.И., Скрынник А.В., Перекалин С.О. 20

Применение электроразведочных методов в комплексе с сейсморазведкой в нефтегазовой геофизике

Соколова И.П. 30

■ Технологии обработки

Полевые и скважинные сейсмoeлектрические исследования

Светов Б.С., Агеев В.В. 27

Система интерпретации данных и основные направления применения нестационарных электромагнитных исследований на юге Сибирской платформы

Агафонов Ю.А., Поспеев А.В., Суров Л.В. 33

■ Приборы и системы

Телеметрическая электроразведочная станция «ПИКЕТ»

Агафонов Ю.А., Поспеев А.В., Шарлов М.В., Стефаненко С.М. 36

Аппаратурный комплекс импульсной электроразведки АИЭ-2

Бытенский Л.И., Пищик В.В., Тарасов А.В., Тарасов В.А. 41

Аппаратурный электроразведочный комплекс "ЦИКЛ-7"

Секачев М.Ю., Балашов Б.П., Саченко Г.В., Захаркин А.К., Вечкапов О.П.,
Тарло Н.Н., Могилатов В.С., Злобинский А.В. 44

■ Технологии обработки

Геолого-геофизические критерии выбора оптимальных условий взрыва на сейсморазведочных работах в Томской области

Закариев Ю.Ш., Рябошапка С.М., Бабушкин А.Е. 46



СОДЕРЖАНИЕ

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@akbsp.ru

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

Тираж отпечатан
в типографии ООО "Формат"
тел.: (845-2) 236-664
Тираж: 500 экз.
Подписано в печать 21.05.06
Дата выпуска 31.05.06
Зак. № 385

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.



Пятнадцатый готов!

Турлов П.А., СО ЕАГО, г. Саратов

КОЛОНКА РЕДАКТОРА

Совсем вроде бы недавно - всего лишь три с небольшим года назад, реализуя, как многим казалось, авантюрную идею, готовили мы первый номер нашего, а теперь уже и Вашего, дорогие читатели, журнала "Приборы и системы разведочной геофизики".

За эти годы журнал стал узнаваемым. И по форме. И по содержанию. Дизайн, шрифты, композиция номера, компоновка материала, характер цветности иллюстраций и обложки - все это создавало определенный читательский интерес, и, по словам специалистов, вызывало желание полистать журнал. Возник интерес к содержанию, или, как сейчас говорят, к контенту.

Ответственным за этот медленно, но постоянно нарастающий, судя по объемам годовой подписки, интерес, следует считать коллектив авторов публикаций. За прошедшие годы в журнале появилось 460 статей научно-технического содержания, написанных 239 авторами. Уже можно говорить о некоем сформировавшемся информационном портрете нашего издания.

Это прежде всего цветной иллюстрированный ежеквартальный журнал с пятидесятью двумя журнальными страницами формата А4, в котором помещаются примерно 17 статей. Средний размер статьи - 2,71 страницы. Спектр авторов: приборостроители - 27 %, геофизики-теоретики - 13 %, геофизики-производственники - 60 %, в т.ч. полевики - 32 %, обработчики - 28 %.

Проанализировать информационный портрет нашего читателя нам еще только предстоит, для чего редакция подготовит анкету-опросник.

Вывод из приведенной информации очевиден: у журнала, который сумел занять свою нишу в отраслевом информационном пространстве, сложился достаточно широкий авторский коллектив.

Важным фактором, который, по моему мнению, способствовал этому, стал выбор тематического принципа в качестве стержня для формирования номера. При таком подходе редакция получила возможность принимать от авторов самые свежие материалы квартальной давности и практически сразу их публиковать. Такой подход интересен для читателя еще и тем, что выбранная тема, как правило, актуальна и раскрывается большим кругом профессионалов широко и многогранно. Зачастую мнения субъектов дискуссии противоречивы, но это и необходимо для установлении истины.

Вот и очередной номер журнала не нарушил традицию. Темой номера была выбрана "Электроразведка сегодня и завтра" в связи с тем, что в последнее время геофизики все чаще стали обращаться к новым возможностям электромагнитных методов как к эффективному средству оценки вещественного состава пород в комплексе с сейсморазведкой при поиске углеводородов и других полезных ископаемых. Современные аппаратные средства электроразведки существенно увеличили и ее картировочные возможности.

В предлагаемой теме во многом благодаря усилиям научного редактора Светова Б.С. представлены статьи, раскрывающие все многообразие электроразведочных технологий, применяемых в прикладной геофизике.

Количество присланных нам материалов превысило объем журнала в два раза. Редакция решила тему не менять и в следующем (июньском) номере. Для удобства читателей мы рассылаем подписчикам оба выпуска сразу.

При таком раскладе сентябрьский (№3/2006) журнал будет иметь тему "Метрология в геофизике", а декабрьский, предположительно, - "Геофизика во внутренних точках среды". Желающим высказаться по этим актуальнейшим проблемам следует поторопиться - время летит быстро!

Успехов Вам!

Главный редактор

П.А. Турлов

П.А.Турлов

НАШИ ПАРТНЕРЫ



ООО "Специальные геофизические системы"



ЗАО «СОЕДИНИТЕЛЬ»



ЗАО НПЦ "Солитон-НТТ"



О взаимосвязи циркуляции напряженности электрического поля и электродвижущей силы индукции во временной области

Губатенко В.П., Пескова О.С., СГТУ, г. Саратов

Основу методов электроразведки составляют решения краевых задач уравнений Максвелла, с помощью которых проводится интерпретация полевых наблюдений. Поэтому предъявляются повышенные требования к разработке прецизионной аппаратуры для измерения электромагнитного поля. В методах становления поля для измерения циркуляции напряженности электрического поля применяют многожильный кабель, разложенный на поверхности земли. Каждый виток этой петли представляет собой медный провод, в котором наводится электродвижущая сила (ЭДС) индукции. При этом ЭДС индукции отождествляется с циркуляцией напряженности электрического поля по контуру петли, что с большой точностью справедливо на достаточно низких частотах (поздних стадиях становления поля), но благодаря скин-эффекту, неверно на высоких частотах (ранних временах неустановившегося процесса). Учет систематической ошибки, связанной с внедрением в среду антенны (измерительной линии), изменяющей электропроводность исходной среды, является, как известно, чрезвычайно сложной задачей. Однако, как показано в работе [1, 2], при некоторых упрощающих условиях эта задача может быть решена.

Пусть в некоторой немагнитной среде (магнитная проницаемость μ равна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м) с областью V , заполненной однородной средой с параметрами σ_0 , ϵ_0 , где σ_0 и ϵ_0 - электропроводность и диэлектрическая проницаемость, возбуждается с круговой частотой ω осесимметричное электромагнитное поле. Для измерения единственной отличной от нуля азимутальной компоненты E_ϕ^0 напряженности электрического поля внесем в область V проводящую круговую петлю, а точнее провод с электропроводностью σ , изготовленный в форме тора, образованного вращением круга радиуса a вокруг оси, лежащей в кругом плоскости, и центром, удаленным от оси вращения на расстоянии R . Таким образом, величина a характеризует толщину провода, а R - радиус круговой петли. Совместим ось вращения тора с осью симметрии исходного электромагнитного поля. Появление в области V круговой петли оставляет электромагнитное поле осесимметричным, но изменяет исходное распределение параметров среды, в результате чего в среде возбуждается азимутальная компонента E_ϕ^0 напряженности электрического поля, отличная от E_ϕ^0 .

Внесенная в однородную среду круговая петля вместе с подключенным к ней измерительным прибором играет роль измерительного контура. Можно, например, для измерения ЭДС индукции подключить вольтметр к петле последовательно. Такой способ основан на втором законе Кирхгофа, в соответствии с которым ЭДС индукции равна произведению силы наведенного тока, протекающего через вольтметр, на

внутреннее сопротивление вольтметра. Но сопротивление вольтметра значительно превышает сопротивление нагрузки (сопротивление петли). Поэтому для теоретического исследования ЭДС индукции при последовательном подключении вольтметра надо рассмотреть более сложную модель круговой петли - петлю с высокоомной вставкой. Для выбранной нами модели петли ЭДС индукции можно измерить опосредованно либо с помощью последовательного соединения петли с гальванометром, либо применяя параллельное подключение вольтметра к круговой петле. Гальванометр имеет низкое внутреннее сопротивление и поэтому его последовательное подключение к петле практически не изменяет силу наведенного в петле тока в отсутствие подключения. По измеренной гальванометром силе тока, равной $J^{ind} = \pi a^2 \sigma \bar{E}_\phi$, где $\bar{E}_\phi$ - среднее значение напряженности E_ϕ электрического поля по поперечному сечению провода, находится ЭДС индукции по формуле:

$$\mathcal{E}^{ind} = 2\pi R \bar{E}_\phi = \frac{2R}{a^2 \sigma} J^{ind}.$$

В случае параллельного подключения вольтметра к участку круговой петли длины Δl сила тока J^{ind} (средняя напряженность электрического поля $\bar{E}_\phi$), протекающего в проводе, почти не изменяется из-за большого внутреннего сопротивления вольтметра. Напряжение $\mathcal{E}_l$ определяется из соотношения $\mathcal{E}_l = \Delta l J^{ind} R^v$, где $\Delta l J^{ind}$ и R^v - соответственно сила тока, ответвляющегося на вольтметр, и внутреннее сопротивление вольтметра. Отсюда получаем, что

$$\mathcal{E}^{ind} = 2\pi R \mathcal{E}_l / \Delta l = 2\pi R R^v \frac{\Delta J^{ind}}{\Delta l}.$$

Из полученных соотношений следует, что для сравнения циркуляции напряженности электрического поля и ЭДС индукции надо найти взаимосвязь средних напряженностей $\bar{E}_\phi^0$ и $\bar{E}_\phi$ электрического поля, где $\bar{E}_\phi^0$ - среднее значение напряженности E_ϕ^0 электрического поля, вычисляемое по той же области, по которой определяется $\bar{E}_\phi$.

Предположим, что $a/R \ll 1$, $|k_0 a| \ll 1$, $|k_0/a| \ll 1$, где $k_0 = \sqrt{i\omega\mu_0(\sigma_0 - i\omega\epsilon_0)}$, $k = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma}$ - волновые числа среды в области V и провода соответственно. Эти условия означают, что толщина провода значительно меньше радиуса круговой петли, а среда в области V высокоомная, и ее электропроводность много меньше электропроводности провода. Поскольку в полевой электроразведке проводят наземные измерения и применяют медные провода, обладающие высокой электропроводностью, то сделанные нами предположения выполняются вплоть до очень высоких частот ω . Применяя метод интегральных уравнений с учетом сделанных допущений, в работе [1, 2] показано, что комплексные амплитуды средних напряженностей $\bar{E}_\phi^0$ и $\bar{E}_\phi$ электрического поля связаны соотношением:

ТЕОРИЯ

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА



$$\tilde{E}_\phi^0(\omega) = \left(1 + \frac{k^2 a^2}{2} \ln \frac{8R}{e^2 a}\right) \tilde{E}_\phi^{\text{ind}}(\omega), \quad (1)$$

где e - основание натурального логарифма. Учитывая малую толщину провода и условие $a/R \ll 1$, можно считать, что компонента E_ϕ^0 в области поперечного сечения тора однородна и, следовательно, мало отличается от своего среднего значения $\tilde{E}_\phi^0$ по этой области. Умножая обе части на $2\pi R$, получаем соотношение между циркуляцией напряженности электрического поля $\mathcal{E}^0(\omega)$ и ЭДС индукцией $\mathcal{E}^{\text{ind}}(\omega)$ в частотной области:

$$E^0(\omega) = \left(1 + \frac{k^2 a^2}{2} \ln \frac{8R}{e^2 a}\right) E^{\text{ind}}(\omega), \quad (2)$$

Равенства в формулах (1) и (2) следует рассматривать как приближенные, которые, тем не менее, обеспечивают необходимую точность в широкой полосе частот (вплоть до 1 ГГц). Заметим, что в данном приближении коэффициент пропорциональности между $\mathcal{E}^0(\omega)$ и $\mathcal{E}^{\text{ind}}(\omega)$ не зависит от волнового числа k_ϕ .

Круговая петля характеризуется двумя размерами: радиусом a поперечного сечения провода и радиусом R . Поэтому, если длина волны электромагнитного поля, убывающая с ростом ω , будет мала по сравнению с a или R , то нарушается однородное распределение электрического поля по сечению провода, что может привести к заметному отличию $\mathcal{E}^{\text{ind}}(\omega)$ от $\mathcal{E}^0(\omega)$. Соотношение (2) подтверждает возрастание отличия между $\mathcal{E}^{\text{ind}}(\omega)$ и $\mathcal{E}^0(\omega)$ при увеличении частоты ω и радиуса R круговой петли при фиксированном радиусе a .

Выполним в выражении (2) замену $-i\omega \rightarrow p$, где p - параметр преобразования Лапласа. Тогда для изображений $\mathcal{E}^0(p)$ и $\mathcal{E}^{\text{ind}}(p)$ по Лапласу соответствующих функций $\mathcal{E}^0(t)$ и $\mathcal{E}^{\text{ind}}(t)$ времени можно записать:

$$E^0(p) = \left(1 + p \frac{\mu_0 \sigma a^2}{2} \ln \frac{8R}{e^2 a}\right) E^{\text{ind}}(p). \quad (3)$$

Применяя теорему о дифференцировании оригинала и учитывая, что при включении в момент времени $t=0$ сторонних токов, возбуждающих осесимметричное поле, справедливы начальные условия $E^0(t)|_{t=0}=0$, $E^{\text{ind}}(t)|_{t=0}=0$, находим связь циркуляции напряженности электрического поля и ЭДС индукции во временной области:

$$\mathcal{E}^0(t) = \mathcal{E}^{\text{ind}}(t) + \frac{\mu_0 \sigma a^2}{2} \ln \frac{8R}{e^2 a} \frac{d}{dt} \mathcal{E}^{\text{ind}}(t). \quad (4)$$

Таким образом, для нахождения циркуляции напряженности электрического поля $\mathcal{E}^0(t)$ по известной ЭДС индукции $\mathcal{E}^{\text{ind}}(t)$ достаточно применить к последней оператор дифференцирования

$$1 + \frac{\mu_0 \sigma a^2}{2} \ln \frac{8R}{e^2 a} \frac{d}{dt}.$$

Из формулы (4) следует, что если циркуляция напряженности электрического поля $\mathcal{E}^0(t)$ претерпевает разрывы первого рода, что нередко встречается в решениях краевых задач уравнений Максвелла, то ЭДС индукции является непрерывной функцией времени.

Несколько сложнее решается обратная задача - восстановление ЭДС индукции по заданной циркуляции напряженности электрического поля. Для решения этой задачи

запишем соотношение (3) в виде:

$$\mathcal{E}^{\text{ind}}(p) = \left(1 + p \frac{\mu_0 \sigma a^2}{2} \ln \frac{8R}{e^2 a}\right)^{-1} \mathcal{E}^0(p).$$

Отсюда и по теореме о свертке получаем:

$$E^{\text{ind}}(t) = \int_0^t K(t-\tau) E^0(\tau) d\tau, \quad (5)$$

$$\text{где } K(t) = \frac{1}{\beta} e^{-\beta U(t)}; \quad \beta = \frac{\mu_0 \sigma a^2}{2} \ln \frac{8R}{e^2 a};$$

$U(t)$ - функция Хевисайда.

Приведем примеры, иллюстрирующие взаимосвязь циркуляции напряженности электрического поля и ЭДС индукции. Пусть в круговой цилиндрической системе координат ρ, ϕ, z , задано однородное пространство с параметрами $\sigma_0, \mu_0, \epsilon_0$. Предположим, что на оси OZ в плоскости $z=H$ находится магнитный диполь, момент которого направлен по оси OZ и скачком изменяется при $t=0$ от некоторого постоянного значения M до нуля. В силу осевой симметрии магнитный диполь возбуждает в однородном пространстве осесимметричное E - поле специального вида, т.е. электромагнитное поле, имеющее только 3 отличные от нуля и независимые от координаты ϕ компоненты: компоненту E_ϕ^0 напряженности электрического поля и компоненты H_ρ^0 и H_z^0 напряженности магнитного поля. В работе [3] показано, что азимутальная компонента E_ϕ^0 имеет вид:

$$E_\phi^0(T, \rho, x) = \gamma \rho e^{-T} \frac{I_2(x)}{x^2} U(T-F), \quad (6)$$

где $I_2(x)$ - модифицированная функция Бесселя первого рода второго порядка действительного

аргумента x ; $T = \frac{\sigma_0 t}{2\epsilon_0}$; $x = \sqrt{T^2 - F^2}$;

$$F = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\sigma_0}{2} \sqrt{\rho^2 + (z-H)^2}; \quad \gamma = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{5/2} \frac{M \sigma_0^4}{64\pi}.$$

Рассмотрим циркуляцию напряженности электрического поля $\mathcal{E}^0(t)$ по окружности радиуса R с центром на оси OZ , лежащей в плоскости $z=H$. В соответствии с формулой (6):

$$\mathcal{E}^0(t) = 2\pi R E_\phi^0 = \frac{M \mu_0^{5/2} \sigma_0^2 R^2}{8\sqrt{\epsilon_0}} U(t-t_0) e^{-\frac{\sigma_0 t}{2\epsilon_0}} \cdot \frac{I_2\left(\frac{\sigma_0}{2\epsilon_0} \sqrt{t^2 - t_0^2}\right)}{t^2 - t_0^2}, \quad (7)$$

где $t_0 = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} R$ - момент времени прихода электромагнитной волны из точки источника поля на окружность, по которой вычисляется $\mathcal{E}^0(t)$. Внесем теперь в пространство для измерения циркуляции напряженности электрического поля круговую петлю. ЭДС индукции в этой петле в соответствии с формулами (5) и (7) равна:

$$\mathcal{E}^{\text{ind}}(t) = \frac{M \mu_0^{5/2} \sigma_0^2 R^2}{8\beta \sqrt{\epsilon_0}} U(t-t_0) \int_{t_0}^t e^{-\frac{t-\tau}{\beta}} e^{-\frac{\sigma_0 \tau}{2\epsilon_0}} \cdot \frac{I_2\left(\frac{\sigma_0}{2\epsilon_0} \sqrt{\tau^2 - t_0^2}\right)}{\tau^2 - t_0^2} d\tau. \quad (8)$$

Большой практический интерес представляет другая модель среды, отличающаяся от предыдущей тем, что в области $z < 0$ расположен

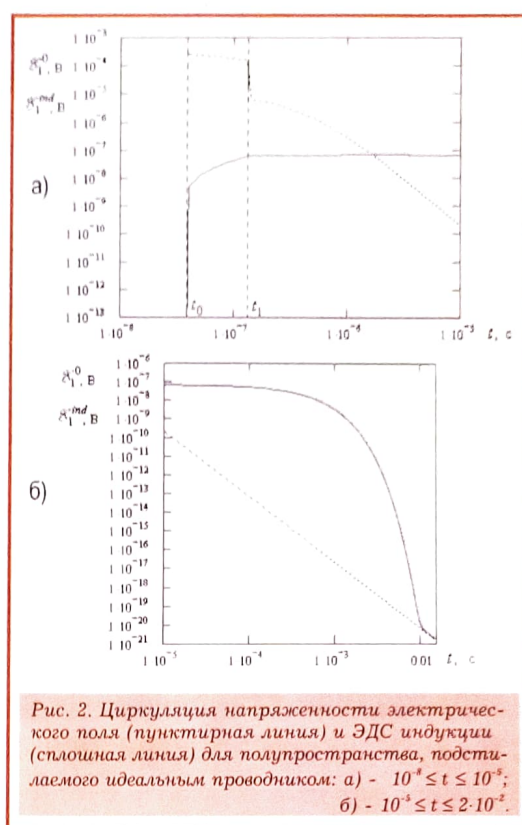
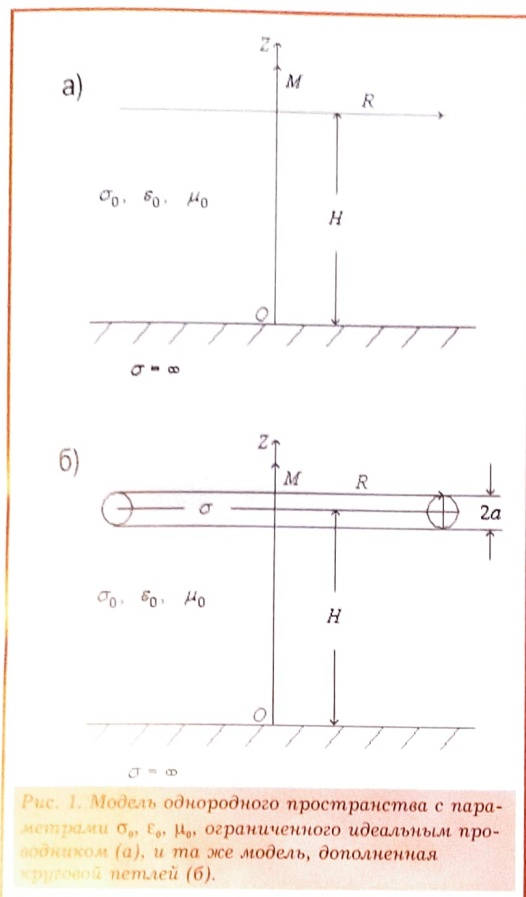


Рис. 2. Циркуляция напряженности электрического поля (пунктирная линия) и ЭДС индукции (сплошная линия) для полупространства, подстилаемого идеальным проводником: а) - $10^{-4} \leq t \leq 10^{-2}$; б) - $10^{-5} \leq t \leq 2 \cdot 10^{-2}$.

идеальный проводник (рис. 1а). Решение задачи о установившемся поле, возникающем при мгновенном выключении момента M магнитного диполя, получено в работе [3] методом зеркальных отображений. В соответствии с этим методом асимптотическая компонента напряженности электрического поля $E_{\varphi 1}^0(t)$ в области $z < 0$ равна:

$$E_{\varphi 1}^0(t) = E_{\varphi}^0(T, \rho, x_+) - E_{\varphi}^0(T, \rho, x_-), \quad (9)$$

где функция $E_{\varphi}^0(T, \rho, x)$ определяется выражением

$$(5), \quad x_{\pm} = \sqrt{T^2 - F_{\pm}^2}; \quad F_{\pm} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \frac{\sigma_0}{2} \sqrt{\rho^2 + (z \mp H)^2}}.$$

Также как и в предыдущем случае рассмотрим циркуляцию напряженности электрического поля $\mathcal{E}_1^0(t)$ по окружности радиуса R с центром на оси OZ , лежащей в плоскости $z=H$ (рис. 1б). Выражение для $\mathcal{E}_1^0(t)$ имеет вид:

$$\mathcal{E}_1^0(t) = \frac{M \mu_0^{5/2} \sigma_0^2 R^2}{8 \sqrt{\epsilon_0}} e^{\frac{\sigma_0 t}{2 \epsilon_0}} \left[U(t - t_0) \frac{I_2 \left(\frac{\sigma_0}{2 \epsilon_0} \sqrt{t^2 - t_0^2} \right)}{t^2 - t_0^2} - U(t - t_1) \frac{I_2 \left(\frac{\sigma_0}{2 \epsilon_0} \sqrt{t^2 - t_1^2} \right)}{t^2 - t_1^2} \right], \quad (10)$$

где $t_1 = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 (\rho^2 + 4H^2)}$ - время прихода отраженной от идеального проводника волны на окружность, по которой вычисляется $\mathcal{E}_1^0(t)$. Помещая теперь на этой окружности круговую петлю и применяя формулы (5) и (10), находим ЭДС индукции $\mathcal{E}_1^{ind}(t)$ в петле:

$$\mathcal{E}_1^{ind}(t) = \frac{M \mu_0^{5/2} \sigma_0^2 R^2}{8 \beta \sqrt{\epsilon_0}} \left[U(t - t_0) \int_{t_0}^t e^{\frac{t-\tau}{\beta}} e^{\frac{\sigma_0 \tau}{2 \epsilon_0}} \frac{I_2 \left(\frac{\sigma_0}{2 \epsilon_0} \sqrt{\tau^2 - t_0^2} \right)}{\tau^2 - t_0^2} d\tau - U(t - t_1) \int_{t_1}^t e^{\frac{t-\tau}{\beta}} e^{\frac{\sigma_0 \tau}{2 \epsilon_0}} \frac{I_2 \left(\frac{\sigma_0}{2 \epsilon_0} \sqrt{\tau^2 - t_1^2} \right)}{\tau^2 - t_1^2} d\tau \right], \quad (11)$$

Несмотря на довольно простой вид формул (8) и (11), численное интегрирование выражений в правых частях этих формул является непростой задачей. Поэтому для нахождения $\mathcal{E}_1^{ind}(t)$ по известной функции $\mathcal{E}_1^0(t)$ поставим следующую задачу Коши: найти численное решение $\mathcal{E}_1^{ind}(t)$ дифференциального уравнения (4), удовлетворяющее начальному условию $\mathcal{E}_1^{ind}(t)|_{t=0} = 0$. На рис. 2 представлены в билогарифмическом масштабе результаты решения этой задачи для полупространства, подстилаемого идеальным проводником, в случае:

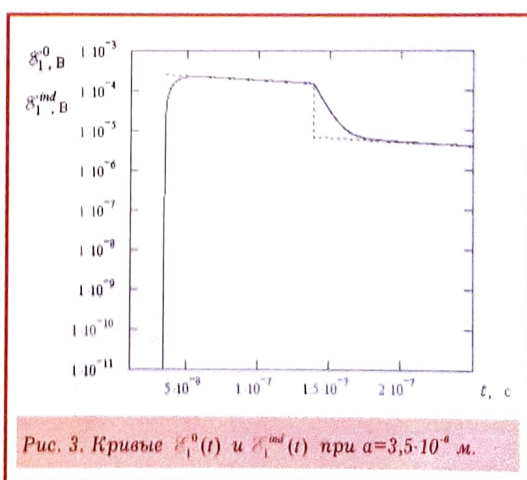


Рис. 3. Кривые $\mathcal{E}_1^0(t)$ и $\mathcal{E}_1^{ind}(t)$ при $a = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м.



$$\sigma_0 = 10^{-4} \text{ См/м}, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}, \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ Ф/м}$$

(ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума), медного провода ($\sigma = 5,61 \cdot 10^7 \text{ См/м}$), $M = 1 \text{ Ам}^2$, $H = 20 \text{ м}$, $R = 10 \text{ м}$, $a = 0,001 \text{ м}$, для ранних и поздних стадий становления поля. На рис. 2а показано, что циркуляция напряженности электрического поля претерпевает два скачка - в момент времени $t_0 = 3,33 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ прихода падающей волны и при $t_1 = 3,37 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ в момент времени прихода в пункт наблюдения отраженной от идеального проводника волны. В отличие от циркуляции напряженности электрического поля ЭДС индукции является непрерывной функцией времени и, хотя и быстро, но непрерывно возрастает от нуля (в момент времени t_0) до некоторого мало изменяющегося в широком диапазоне времени, значения. С некоторого момента времени ЭДС индукции начинает быстро убывать, а на поздних временах ($t > 10^{-2} \text{ с}$) она практически не отличается от циркуляции напряженности электрического поля. Если при тех же параметрах геоэлектрической модели

уменьшать толщину круговой петли (рис. 3), то кривые $\mathcal{E}_i(t)$ и $\mathcal{E}_i^{ind}(t)$ сближаются, а при $a < 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ отличия кривых несутельственны.

Полученные в данной работе результаты показывают, что различие между циркуляцией напряженности электрического поля и ЭДС индукции может быть существенным на ранних и промежуточных стадиях становления и им можно пренебречь на самых поздних стадиях неустановившегося процесса.

Литература

1. Пескова О.С., Губатенко В.П. Применение интегральных уравнений для математического моделирования измерения электрического поля // Современные методы теории краевых задач: Материалы чтения - XV, 3-9 мая 2004 г. - Воронеж, 2004. - С. 165-166.
2. Пескова О.С., Губатенко В.П. Математическое моделирование измерения плоского и осесимметричного электрического поля // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды всероссийской научной конференции, 26 - 28 мая 2004 г. - Самара, 2004. - С. 210-212. Часть 2.
3. Губатенко В.П., Осипов В.Г., Назаров А.А. Квазиволновые свойства сигнала становления электромагнитного поля // Известия РАН. Физика Земли, N3, 2000. С. 40-49.

Зондирование становлением поля с фокусировкой электрического тока

Рыхлинский Н.И., НП «Институт инновационных методов геофизики», г. Москва

Важная информация о геологическом объекте может быть получена путем электромагнитного зондирования становлением поля с использованием контролируемых искусственных источников поля с фокусировкой электрического тока в месте приема сигнала (ЗС-ФТ).

Возбуждаемое электромагнитное поле в земных породах реагирует не только на пространственное распределение электропроводности, но и, что особенно важно для нефтегазового поиска, на распределение вызванной поляризации (ВП). Чтобы получить информацию о наличии залежи углеводородов в изучаемом объекте и оконтурить ее, необходимо максимально ослабить искажающее влияние на результаты измерений всех боковых, относительно точки зондирования геологических объектов, в которые проникает электрическое поле источника тока. Для этого при зондировании нужно осуществить фокусировку тока в месте приема сигнала и при решении обратной задачи исключить плечевой эффект.

Понятие «исключение плечевого эффекта» появилось с изобретением в начале пятидесятых годов прошлого века методов электрического зондирования с фокусировкой тока и с решением для них обратной задачи. Методами с фокусировкой тока неоднородность (например, пройденный скважиной тонкий пласт) отображается в виде равнобедренной трапеции. Угол наклона ее боковой стороны не зависит от размера зондирующей установки, а зависит от длины фокусирующих элементов, которая по техническим причинам не может быть равна нулю. Амплитуда аномалии, измеренная установкой с фокусировкой тока, имеет одинаковое значение при профилировании над всей толщей неоднородности. Это значение не зависит от так называемого в каротаже влияния вмещающих пород (в электроразведке - бокового влияния), что согласуется с известным в физике принципом наименьшего действия.

В разработанной новой технологии электричес-

ких зондирований проблема исключения плечевого эффекта решается. В основу технологии положен ряд вариантов метода становления поля с использованием контролируемых искусственных источников электромагнитного поля с фокусировкой электрического тока в месте приема сигнала.

Метод предназначен для поисков и оконтуривания нефтегазовых залежей на основе определения свойственных каждому из элементов (горизонтов) толщи осадочных отложений горных пород следующих трех, необходимых для решения поставленной задачи, электрофизических параметров: удельной электропроводности σ , вызванной поляризации η и постоянной времени τ спада разности потенциалов ВП. Благодаря фокусировке тока, метод обладает высокой расчленяющей способностью по латерали, что необходимо для определения местоположения границ контура залежи.

В традиционной электроразведке с контролируемым искусственным источником тока получают лишь суммарные сведения о совокупности всех элементов строения исследуемой среды, в которые проникает ток, так как его распределение в пространстве не определяют.

Поэтому традиционная электроразведка, в том числе и ЗСБ, высоко успешна для инженерных изысканий, где используют малоразмерные установки, и вполне успешна для поисков контрастных по электрическому сопротивлению объектов относительно вмещающих пород, например, высокопроводящих рудных тел, или для решения таких интегральных задач, как определение местоположения фундамента, определение границ вечной мерзлоты и пр. Но она редко успешна для поисков и оконтуривания нефтегазовых залежей из-за их недостаточной контрастности по электрическим параметрам относительно вмещающих пород и плохого расчленения разреза по латерали.

Получаемый предложенным методом технический результат, который сводится к решению задачи

обнаружения и оконтуривания нефтегазовых залежей, заключается в обеспечении возможности разделения параметров σ и η , а также возможности определения τ - важного третьего, наряду с двумя первыми параметра.

Этот результат для данного варианта достигается тем, что по оси профиля зондирования и исследуемую среду поочередно, двумя дипольными электрическими источниками посылают ток в виде разнополярных прямоугольных импульсов с паузами после каждого из них при непрерывном поддержании равной нулю результирующей первой осевой разности потенциалов в месте приема сигнала. И в каждой паузе, на всем протяжении времени ее существования, в дискретных точках с постоянным интервалом времени измеряют последовательность мгновенных значений первых осевых и вторых осевых и ортогональных разностей электрических потенциалов.

Из значений измеренных разностей рассчитывают, по крайней мере, три множества независимых от силы тока дипольных источников нормированных электрических параметров (у каждого из которых наблюдается различное соотношение вызванная поляризация/электродинамика):

$$\frac{\Delta^2 U_x(t_i)_1 + \kappa(t_i) \cdot \Delta^2 U_x(t_i)_2}{\Delta U_x(t_i)_1}, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta^2 U_y(t_i)_1 + \kappa(t_i) \cdot \Delta^2 U_y(t_i)_2}{\Delta U_x(t_i)_1},$$

$$\frac{\Delta^2 U_x(t_i, \Delta t)_1 + \kappa(t_i) \cdot \Delta^2 U_x(t_i, \Delta t)_2}{\Delta U_x(t_i)_1}.$$

Здесь $\kappa(t_i)$ - коэффициент фокусировки, полученный из уравнения:

$$\Delta U_x(t_i)_1 + \kappa(t_i) \cdot \Delta U_x(t_i)_2 = 0, \quad (2)$$

вытекающего из условия равенства нулю результирующей осевой разности потенциалов электрического поля вдоль оси профиля в пределах зоны измерительных заземлений зондирующей установки в каждой точке измерения t_i на всем протяжении времени переходного процесса;

$$\Delta U_x(t_i)_1, \Delta U_x(t_i)_2, \Delta^2 U_x(t_i)_1, \Delta^2 U_x(t_i)_2, \Delta^2 U_y(t_i)_1, \Delta^2 U_y(t_i)_2,$$

- мгновенные значения первых осевых и вторых осевых и ортогональных разностей электрических потенциалов, измеренные в паузах тока на всем протяжении существования каждой из этих пауз от ее начала до конца через равные интервалы времени Δt при подаче токов, соответственно, в первый и второй дипольные электрические источники;

$$\Delta^2 U_x(t_i, \Delta t)_1, \Delta^2 U_x(t_i, \Delta t)_2$$

- разности между двумя ближайшими мгновенными значениями вторых осевых разностей электрических потенциалов, разделенными интервалом времени Δt .

Используя значения нормированных параметров (1) и дифференциальное уравнение для напряженности электрического поля дипольного источника в поляризующейся проводящей среде

$$\nabla^2 \dot{E}(\omega) = i\omega\mu \cdot \sigma(i\omega\eta\tau) \cdot \dot{E}(\omega), \quad (3)$$

где:

∇^2 - оператор Лапласа;

$\dot{E}(\omega)$ - напряженность электрического поля дипольного источника, выраженная в уравнении для случая гармонического изменения величины электрического поля по времени;

$\sigma(i\omega\eta\tau)$ - частотно-зависимая электропроводность элементов среды;

σ_0 - электропроводность элементов среды без учета влияния вызванной поляризации;

η - коэффициент их вызванной поляризации,

τ - постоянная времени спада разности потенциалов ВП,

- определяют три электрофизических параметра σ_0 , η , τ и путем решения обратной задачи строят временные разрезы по этим параметрам.

Для решения обратной задачи необходимо использовать решение прямой задачи. Существует решение прямой задачи [1] для неполяризуемой одномерно-слоистой среды с субгоризонтальными границами раздела на основе теплового уравнения для напряженности электрического поля в случае ее импульсного изменения во времени:

$$\nabla^2 E(t) = \mu\sigma_0 \frac{\partial E(t)}{\partial t}, \quad (4)$$

а в случае ее гармонического изменения во времени -

$$\nabla^2 \dot{E}(\omega) = i\omega\mu\sigma_0 \cdot \dot{E}(\omega). \quad (4a)$$

Это решение позволяет определять только электропроводность элементов среды без учета влияния ВП. Но поскольку электропроводность осадочных горных пород не постоянна, а зависит от ВП и от частоты возбуждения, в частности, по формуле K.S. Cole и R.N. Cole [12], то уравнение (4a) с учетом этой формулы приобретает уже три определяющих свойства поляризуемой среды параметра - σ_0 , η , и τ вместо одного σ_0 , и принимает вид (3). Замена независимой от частоты электропроводности σ_0 , которая присутствует в уравнении (4a), на частотно-зависимую $\sigma(\omega)$, присутствующую в уравнении (3), математически корректна и теоретически доказана [5].

Отметим, что в реальности геологическая среда - всегда трехмерно-неоднородна и геометрически разнообразна. Однако уравнения (3) и (4a), как упоминалось выше, аналитически решены только для одномерных осесимметричных сред.

Поэтому использование решения уравнения (3) в обратных задачах электроразведки для поисков и оконтуривания нефтегазовых залежей допустимо, когда при полевых измерениях осуществляется фокусировка электрического тока, принцип которой основан на поддержании равенства нулю осевой разности электрических потенциалов в точке зондирования. В этом случае при инверсии исключается плечевой эффект.

Действительно, в одномерной горизонтально-слоистой среде при равенстве расстояний между токовыми диполями и точкой N и равенстве токов в каждом из них (рис. 1a) и (рис. 1б)

$$\Delta U_x(I_{B_1}A_1) + \Delta U_x(I_{A_2}B_2) = 0, \quad (5)$$

где:

$\Delta U_x(I_{B_1}A_1)$ - разность потенциалов между электродами M_1M_2 в окрестности точки зондирования N (рис. 1в) от действия электрического тока $I_{B_1}A_1$ расположенного слева от этой точки диполя B_1A_1 при выключенном диполе A_2B_2 ;

$\Delta U_x(I_{A_2}B_2)$ - разность потенциалов между электродами M_1M_2 в окрестности точки зондирования N (зеркальное изображение рис. 1в) от действия электрического тока $I_{A_2}B_2$, расположенного справа от этой точки диполя A_2B_2 , при выключенном диполе B_1A_1 .

Из формулы (5) вытекает, что, по закону Ома, суммарная осевая составляющая плотности тока j_x в окрестности указанной точки N от поочередного поэлементного включения обоих токовых диполей B_1A_1 и A_2B_2 , согласно принципу суперпозиции, равна нулю.

Таким образом, в точке зондирования происходит фокусировка тока, приводящая к исключению там осевой составляющей плотности тока j_x .

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

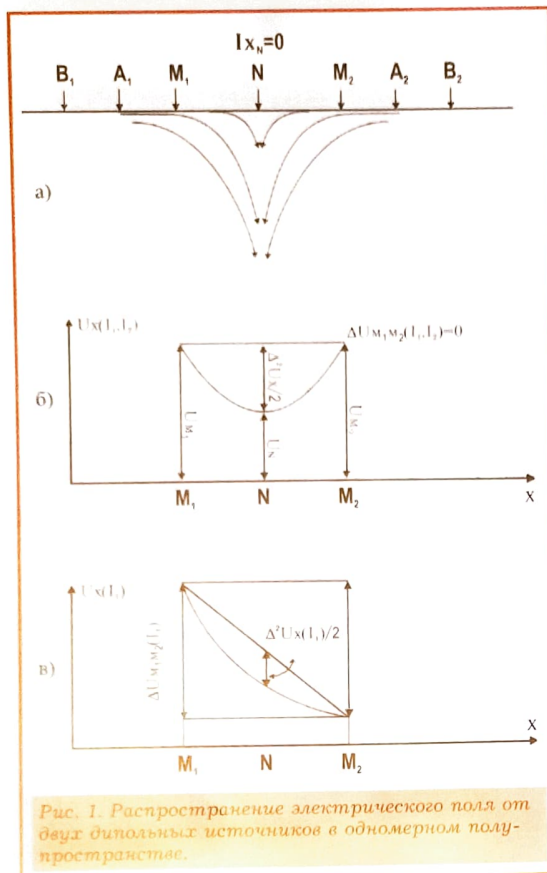


Рис. 1. Распространение электрического поля от двух дипольных источников в одномерном полупространстве.

Однако, в реальности геологическая среда всегда трехмерно-неоднородна и даже при равенстве токов $I_{B_1A_1}$ и $I_{A_2B_2}$ обоих токовых диполей и равенстве их расстояний до точки N условие (5) не выполняется. А именно, в трехмерно-неоднородных средах $\Delta U_x(I_{B_1A_1})$ и $\Delta U_x(I_{A_2B_2})$ по своим модулям отличаются в k раз.

Для выполнения условия фокусировки тока в трехмерно-неоднородной среде с целью исключения осевой составляющей плотности тока j_x в точке измерения выражение (5) должно принять вид [4], [8]:

$$\Delta U_x(I_{B_1A_1}) + k \cdot \Delta U_x(I_{A_2B_2}) = 0. \quad (6)$$

Исключение осевой составляющей плотности тока j_x в точке N в предложенном зондировании описывается соответствующими формулами измеряемых электрических параметров (1).

Формулы (1) независимо от расположения токовых диполей на профиле и величин токов $I_{B_1A_1}$ и $I_{A_2B_2}$ этих диполей в любой трехмерно-неоднородной среде в точке N на всем протяжении времени переходных процессов t , обеспечивают равенство нулю зависящей от времени t осевой составляющей плотности тока $j_x(t)$. Это происходит всегда независимо от того, меняется коэффициент фокусировки k в процессе времени переходных процессов t или нет.

Благодаря этому, как отмечалось выше, при инверсии исключается плечевой эффект, что позволяет, по сравнению с традиционным подходом, без применения фокусировки, более устойчиво решать обратную задачу в точке зондирования N для трехмерно-неоднородной среды, используя известное аналитическое решение для одномерно-слоистой среды с субгоризонтальными границами раздела.

Итак, независимо от модификации установки, основой метода является равенство нулю результирующей первой осевой разности потенциалов электрического поля на базе ее измерения в точке зондирования N на всем протяжении времени

переходного процесса. Что позволяет исключить влияние осевой компоненты плотности тока $j(t)$.

На рис. 2 с целью иллюстрации исключения влияния плечевого эффекта даны результаты моделирования становления поля с фокусировкой тока в трехмерно-неоднородной среде по программе SLDMEM3T [2].

Модель среды представляет собой неограниченно простирающийся вдоль координат x и y слой вмещающих пород с удельным сопротивлением $\rho=10$ Ом-м. По вертикальной координате z толщина этого слоя равна 1000 м. Сверху он ограничен воздухом ($\rho_\infty=\infty$), а снизу - фундаментом ($\rho_\infty=\infty$). В него погружены две неоднородности, обе с удельным сопротивлением 100 Ом-м.

Первая неоднородность - приповерхностная. Ее верхняя граница залегает на глубине 50 м от поверхности, а нижняя - на глубине 150 м. Размеры ее по горизонтали в направлениях координат x и y равны 500 м.

Нижняя неоднородность залегает по верхней границе на глубине 500 м, а по нижней - на глубине 800 м. Размеры ее по горизонтали в направлениях координат x и y равны 5000 м. Центры обеих неоднородностей находятся под точкой 0 км профиля зондирования x .

Геометрические размеры зондирующей установки $B_1A_1M_1NM_2A_2B_2$: длины токовых диполей AB равны 500 м, расстояния между токовыми заземлениями A и заземлением N равны 1250 м, расстояния между MN равны 250 м.

Результаты зондирования даны по двум параметрам: первый - $\Delta^2 U_x(t)/\Delta U_x(t)$ (голубые кривые) и второй - $P_x(t)$ - первый из трех нормированных параметров формулы (1) (розовые кривые) на двух временах становления поля $t_1=4$ мс и $t_2=32$ мс в паузе тока. Как видно из рисунка, оба параметра на обоих временах становления обладают высокой степенью расчленения разреза по латерали.

Параметр $\Delta^2 U_x(t)/\Delta U_x(t)$, хотя и регистрирует величины практически пропорциональные вертикальной компоненте плотности тока $j_z(t)$ за счет числителя $\Delta^2 U_x(t)$, согласно закону Стокса ($\text{div } j=0$), с учетом того, что $\Delta^2 U_x(t) \gg \Delta U_y(t)$ [3] (а.

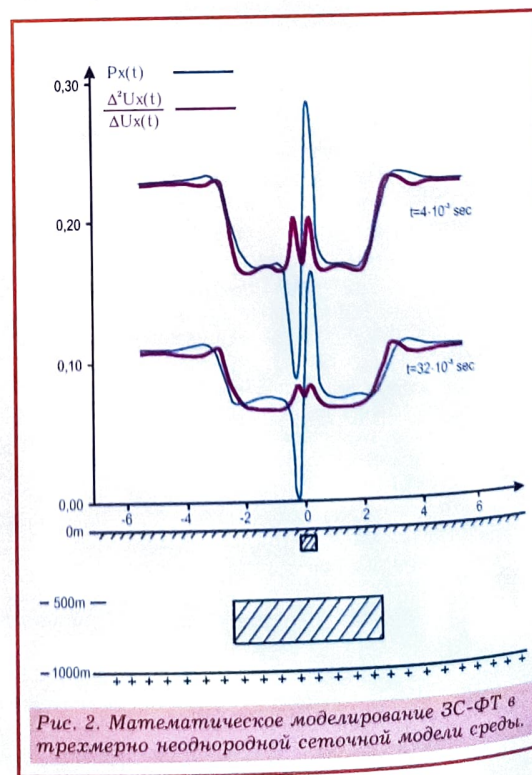


Рис. 2. Математическое моделирование ЗС-ФТ в трехмерно неоднородной сточной модели среды.

следовательно, и $j_z(t) \approx j_w(t)$), но из-за отсутствия фокусировки тока сильно подвержен искажающему влиянию приповерхностной локальной неоднородности на обоих временах становления. Амплитуда аномалий от этой неоднородности на обоих временах становления в несколько раз больше амплитуды аномалий от нижней неоднородности и не меняется с изменением времени становления.

Параметр $P_z(t)$, который построен на основе фокусировки тока, исключаяющей осевую компоненту плотности тока $j_z(t)$ в месте приема сигнала на всех временах становления, заметно подавляет влияние приповерхностной неоднородности.

Причем, с увеличением времени становления относительное влияние приповерхностной неоднородности на результаты моделирования уменьшается. Так, на времени становления $t=4$ мс максимальная амплитуда аномалии от приповерхностной неоднородности в 1,6 раза меньше амплитуды аномалии нижней неоднородности, а уже при времени становления $t=32$ мс максимальная амплитуда аномалии от приповерхностной неоднородности в 3 раза меньше амплитуды аномалии от нижней неоднородности.

По латерали нижняя неоднородность отображается в виде фигуры, близкой по форме к равнобедренной трапеции с шириной наклона ее боковых сторон значительно меньшей, чем размер зондирующей установки.

Благодаря решающей способности по латерали зондирующие методы электроразведки без фокусировки тока в месте приема сигнала не обладают способностью исключать аномалии от неоднородности при зондировании установками без фокусировки тока задолго до подхода к этой неоднородности точки приема сигнала. Причем, исключение аномалии продолжает наблюдаться и на неоднородности, как минимум, на протяжении ширины, равной размеру зондирующей установки [5]. По иногда используемому традиционному параметру становления поля $\Delta U(t)/\Delta U_{cp}$ [7] нижняя неоднородность в данной модели на результатах измерений вовсе не проявляется.

Покажем также возможность исключения плечевого эффекта на практическом примере полевых измерений на Братском газовом месторождении (Иркутская обл.) [6].

Месторождение приурочено к базальному горизонту нижнего кембрия. Этот горизонт состоит из терригенных отложений, среди которых залегает на глубине около 3400 м низкоомный от первых единиц Ом-м (в водоносной его части) до десятков Ом-м (в продуктивной части) песчанник, толщина которого равна около 15 м. Ниже его с глубины около 3400 м располагается кристаллический высокоомный фундамент.

На рис.3 приведен геоэлектрический разрез по удельному электрическому сопротивлению ρ , построенный на основе решения обратной задачи, через продолженный по Братскому водохранилищу профиль 5. По оси x даны расстояния вдоль профиля от 0 км до 16 км, по оси z - глубины в км, а сопротивление ρ дано в цветовой гамме.

На рисунке виден на пикете - 11 км вертикальный разлом в толще разреза и в фундаменте с глубины 1,4 км до глубины 3,8 км, который подтвержден результатами бурения.

Кроме этого, просматривается подтвержденная бурением в базальном песчаннике газовая залежь с повышенным электрическим сопротивлением с четкими границами ее контура по латерали на пикетах 6,4 км и 10 км.

Далее, когда электропроводность первого слоя достаточно высока, весьма ценным является

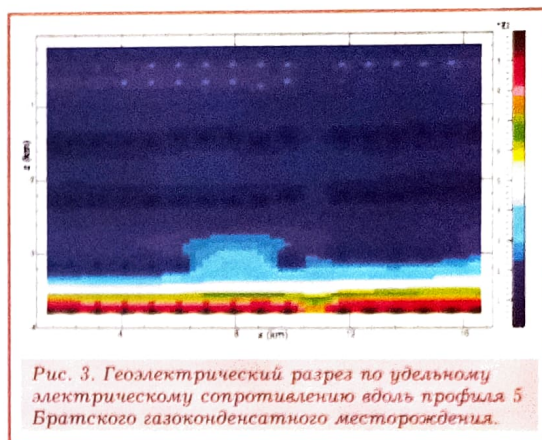


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по удельному электрическому сопротивлению вдоль профиля 5 Братского газоконденсатного месторождения.

измерение ортогональных разностей электрических потенциалов $\Delta^2 U_y(t_i)$ (второй нормированный электрический параметр в формуле (1)).

В этих разностях в первом изотропном слое в слоистой среде с субгоризонтальными границами раздела и в однородном полупространстве по данным [3] и по данным математического моделирования сигналы электродинамических переходных процессов отсутствуют, что технически существенно увеличивает возможности проводить поиски и разведку углеводородов, благодаря подавлению экранирующего влияния высоко-проводящего слоя на результаты измерений. Кроме этого, по данным математического моделирования установлено, что на результаты измерений вторым параметром формулы (1) так же мало сказывается влияние присутствующего в разрезе высокоомного слоя.

В подтверждение сказанного приведем примеры математического моделирования на рис.4 и рис.5.

На рис.4 даны результаты моделирования по параметру $\Delta^2 U_y(t)/\Delta U_x(t)$: 1 - кривая синего цвета в однородном неполяризуемом полупространстве с удельным электрическим сопротивлением 20 Ом-м; 2 - кривая зеленого цвета в однородном по удельному сопротивлению в 20 Ом-м полупространстве с введением в его верхнюю часть на глубину 100 м десятиметрового поляризуемого слоя с параметрами $\eta = 0,1$; $\tau = 1$ с и $\epsilon = 0,4$; 3 - кривая голубого цвета в однородном по сопротивлению в 20 Ом-м полупространстве с введением в его нижнюю часть на глубину 1100 м двухсотметрового поляризуемого слоя с аналогичными верхнему слою параметрами.

Рис.5 отличается от рис.4 лишь тем, что в модель полупространства дополнительно введен на глубину 500 м двадцатиметровый неполяризуемый слой с удельным сопротивлением 500 Ом-м.

Для сравнения с рис.4 на рис.6 даны результаты моделирования по параметру $\Delta^2 U_z(t)/\Delta U_x(t)$ для тех же моделей, что и на рис.4.

Геометрические параметры зондирующей установки ВАНМ, для всех моделей по рис.4-6 равны: ВА = 1000 м, АН = 1000 м и МВ = 250 м.

Итак, обратная задача обнаружения залежей углеводородов решается [9] согласно уравнению (3) в рамках одномерной горизонтально-слоистой модели. В конечном результате, решением обратной задачи получают модель среды наиболее близкую к реальной по геометрическому строению и по значениям параметров σ_0 , η и τ для каждого ее элемента и разделяют эти три параметра.

Метод реализован в виде комплекса питающей, измерительной и обрабатывающей аппаратуры.

Приведем схему электрических зондирований с использованием ЗС-ФТ и алгоритм сбора и

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

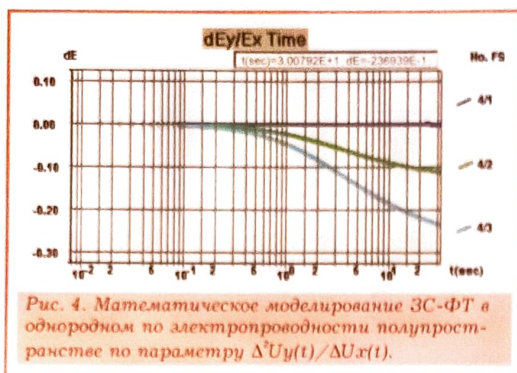


Рис. 4. Математическое моделирование ЗС-ФТ в однородном по электропроводности полупространстве по параметру $\Delta^2 U_y(t)/\Delta U_x(t)$.

первичной обработки информации. Параметры зондирования задаются оператором в зависимости от особенностей решаемой геолого-геофизической задачи по поиску углеводородов в той или иной нефтегазовой провинции. Сама инструментальная программа цифрового измерителя сигналов зондирования стандартна, защита в измерителе, сопряженном с приемником GPS, и допускает гибкую адаптацию к электроразведочному заданию.

Электромагнитное поле в геологической среде возбуждается токовым заземленным диполем AB (рис. 1), а полезный сигнал регистрируется с помощью измерительных электродов M_1, N, M_2 . Для реализации фокусировки тока в месте приема сигнала необходимо двухстороннее возбуждение электромагнитного поля в данной точке зондирования. Поэтому в приведенной схеме предусматривается два положения диполя AB относительно приемника для поочередной работы генераторного устройства.

Ток возбуждения электромагнитного поля в генераторном диполе представляет периодическую последовательность разнополярных прямоугольных импульсов с паузами после каждого из них, длительность которых должна быть больше длительности установления электрического поля в среде. Для типовых геоэлектрических разрезов в нефтегазовых провинциях диапазон используемых длительностей импульсов составляет 4с - 16с.

С целью увеличения точности измерения сигналов зондирования (кривой становления электрического поля в среде) используется метод накопления информации от всех импульсов. Количество требуемых импульсов накопления определяется в зависимости от того, насколько необходимо увеличить отношение сигнал/помеха при проведении конкретных полевых работ. Длительность сеанса накопления в одной физической точке определяется оператором с тем учетом, чтобы кривая становления электрического поля была определена с погрешностью не хуже 5 %. Критерием того, что получена достоверная информация, служит степень расхождения между двумя последовательными определениями искомой кривой в одной и той же точке на профиле. Это расхождение не должно превышать указанный допуск. Практически используется от 10 до 50 импульсов накопления.

Цифровой измеритель зондирующего сигнала делает цифровые 24-х разрядные отчеты с периодом опроса, равным 0,25 мс.

В программе первичной обработки сигналов зондирования могут быть реализованы классический вариант накопления сигнала с использованием среднеарифметической оценки параметров сигнала на каждом дискретном времени отсчета [10], а также накопление с использованием робастных оценок - винзоризованного среднего и выборочной медианы [11].

В результате первичной обработки данных улучшается точность измерения полезного сигнала

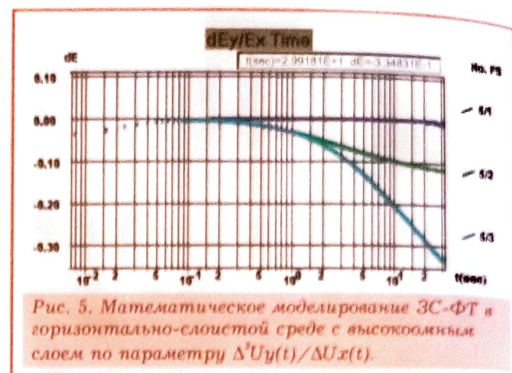


Рис. 5. Математическое моделирование ЗС-ФТ в горизонтально-слоистой среде с высокоомным слоем по параметру $\Delta^2 U_y(t)/\Delta U_x(t)$.

и происходит уменьшение объема исходной цифровой информации обратно пропорционально количеству выполненных импульсов накопления.

Полученный цифровой массив, отражающий измеренный с заданной точностью электромагнитный отклик среды на импульс тока возбуждения, служит исходной информацией для решения обратной задачи геоэлектрики с целью получения пространственного распределения электрофизических параметров исследуемой среды.

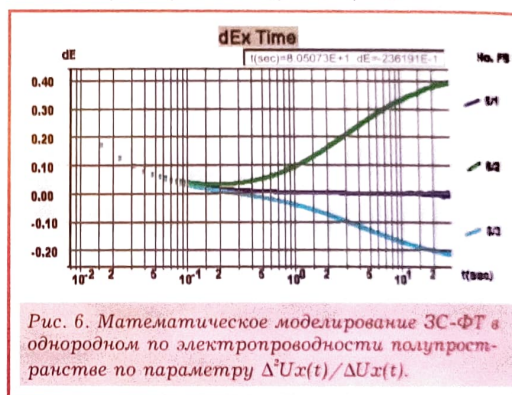


Рис. 6. Математическое моделирование ЗС-ФТ в однородном по электропроводности полупространстве по параметру $\Delta^2 U_x(t)/\Delta U_x(t)$.

Работа генераторно-приемного комплекса управляется персональным компьютером, способным работать в полевых условиях и обладающим необходимой оперативной и долговременной памятью для приема и первичной обработки сигналов зондирования.

Отфильтрованные данные материалов зондирования хранятся в долговременной памяти персонального компьютера и записываются на компакт-диск для передачи их в центр вторичной обработки данных.

Литература

1. Вальнян Л.Л. Основы электромагнитных зондирования. М. «Недра», 1965. с. 28-30.
2. Друскин В.Л., Книжнерман Л.А. Программа SLDMEM3T. Сайт ЦГЭ. www.cge.ru.
3. Жданов М.С. Электроразведка М. Недр. 1986. с. 250-261.
4. Кашик А.С., Рыхлинский Н.И. и др. Способ каротажа обсаженных скважин. Патент РФ № 2176802. Бюл. № 34. 2001.
5. Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М. Наука, 1978. с. 24-26 и с. 64-73.
6. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. и др. Современное состояние и перспективы применения дифференциально-нормированного метода электроразведки для поисков нефти и газа. Геология и геофизика. 2002 г. т. 43, №12 Новосибирск. «Наука», с. 1137-1143.
7. Моисеев В.С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск. «Наука». 2002. с. 57-71.
8. Рыхлинский Н.И. Способ дивергентного каротажа. А. с. СССР № 333514. Бюл. № 11. 1972.
9. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М. Наука, 1979. с. 37-43.
10. Харкевич А.А. Борьба с помехами, М., Наука 1965, с. 275.
11. Цыпкин Я.З., Поляк Б.Т. Огрубленный метод максимального правдоподобия. М., Динамика систем, 1977, Выпуск 12, с. 22-46.
12. Pelton, W.H., Ward S.H., Hallof, P.C., Sill, W.R., and Nelson, P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency J.P. Geophysics, 1978, Vol. 43, p. 588-603.



Санкт-Петербург 2006

“Науки о Земле - Найти и извлечь”

Место проведения конференции:
Выставочный комплекс «Ленэкспо»,
Большой проспект 103,
Васильевский остров,
199106 Санкт-Петербург

С 16 по 19 октября 2006 г. в г.Санкт-Петербурге состоится

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА “САНКТ-ПЕТЕРБУРГ-2006”

Эта конференция будет организована Европейской Ассоциацией Геоученых и Инженеров (EAGE), Евро-Азиатским Геофизическим Обществом (ЕАГО), Обществом Геофизиков-разведчиков (SEG) и Российским геологическим обществом (РосГео). (Последняя конференция, организованная этими обществами - “Геофизика XXI века. Прорыв в будущее” - состоялась в сентябре 2003г. В Москве и имела большой общественный резонанс в геолого-геофизическом мире).

Научная программа конференции в настоящий момент формируется на основании на основании заявок на устные и стендовые доклады, поступивших в оргкомитет не позднее 1 марта 2006 г. Тематика докладов имеет широкий спектр: перспективы развития минерально-сырьевой базы; комплексные геолого-геофизические исследования при региональных работах; разведка на нефть и газ и разработка коллекторов; поиски и разведка на твердые полезные ископаемые; инженерно-геологические и экологические исследования; разведка и добыча полезных ископаемых на российском шельфе, петрофизика и геомеханика; ГИС-технологии. Полный перечень тем научных сессий конференции можно найти на веб-сайте (www.eage.org). В программу также войдут несколько семинаров, круглых столов и ряд специализированных курсов. Выступления докладчиков планируются на английском и на русском языках (с синхронным переводом). В работе конференции предполагается участие ведущих специалистов и ученых России и стран СНГ, Европы, Америки, Канады, Украины и др.

В рамках конференции в выставочном комплексе “ЛЕНЭКСПО” состоится международная выставка, в которой примут участие ведущие геолого-геофизические компании мира. Российским компаниям предоставляется возможность резервирования выставочной площади. Прием заявок на участие в выставке продолжается до 1 июня 2006г. Оформить участие в выставке Вы можете обратившись в Региональный офис EAGE в Москве. Подробности на сайте: www.eage.ru

Любая Российская компания может стать спонсором этого международного форума, по вопросу оформления спонсорства просьба также обращаться в Региональный офис EAGE в Москве.

С нетерпением ждем Вас в Санкт-Петербурге!
Международный организационный комитет

КЛЮЧЕВЫЕ ДАТЫ

Последний срок для подачи тезисов	01 марта 2006 г.
Уведомление авторов о включении в программу	середина мая 2006 г.
Последний срок подачи заявок на участие в выставке	1 июня 2006 г.
Последний срок подачи заявок на оформление спонсорской поддержки	1 июня 2006 г.
Последний срок ранней регистрации	15 июля 2006 г.
Последний срок предварительной регистрации	15 сентября 2006 г.

Региональный офис EAGE в г. Москве

Контактное лицо: Девিশева Мария

119992, Россия, г. Москва, Ленинские горы, вл. 1, строение 75-77, офис 426, Научный Парк МГУ.

Телефон/факс: +7 095 9308452

E-mail: stpetersburg2006@geomodel.ru

Website: www.eage.ru

Измерительно-вычислительный комплекс для магнитотеллурического мониторинга геодинимических процессов (ИВК-МТМ)

Светов Б.С., Кукса Ю.И., Институт геоэлектроманнитных исследований РАН;
Одинцов В.И., Амиантов А.С., Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН,
г. Троицк, Московской обл.

В статье описан программно-аппаратный комплекс (ИВК-МТМ) для режимных наблюдений магнитотеллурического поля в инфранизкочастотном диапазоне, а также огибающей сейсмического поля в сейсмоактивных областях Земли. Дано описание аппаратных средств, программного обеспечения и особенностей эксплуатации комплекса. Приводится алгоритм адаптивной обработки данных ИВК-МТМ, программного обеспечения дает возможность проводить вычисления в глобальной сети Интернет с использованием технологии MATLAB Web Server, развиваемой при финансовой поддержке РФФИ в рамках испытаний в Кавказском регионе.

Назначение

ИВК-МТМ предназначен для долговременных (недели, месяцы, годы) режимных наблюдений естественного электромагнитного (магнитотеллурического) поля в инфранизкочастотном диапазоне, а также огибающей сейсмического поля в сейсмоактивных регионах Земли. В ИВК-МТМ программно реализована обработка данных в квазиреальном масштабе времени, суть которой сводится к ослаблению полей внешнего (ионосферного) происхождения для выделения внутренних (геодинамических) полей и, одновременно, к отслеживанию изменений передаточных функций магнитотеллурического (МТ) поля, отражающих изменения во времени геоэлектрического разреза в точке наблюдения [1].

Аппаратные средства и основные параметры

ИВК-МТМ состоит из измерительного блока, связанного соединительными кабелями с датчиками поля, и интерфейсного блока, подключенного к COM-порту компьютера (IBM PC). Интерфейсный блок и компьютер размещаются в аппаратном помещении, а на удалении от него (в целях ослабления помех) на расстояние до 100 метров устанавливается измерительный блок. К измерительному блоку подключаются трехкомпонентный блок кварцевых датчиков магнитного поля (рис.2), две электрические линии, заканчи-

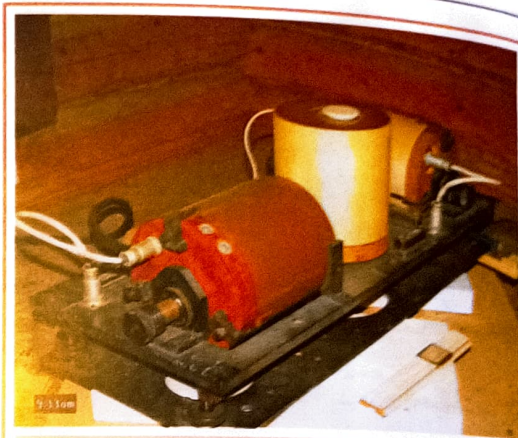


Рис. 2. Блок кварцевых датчиков.

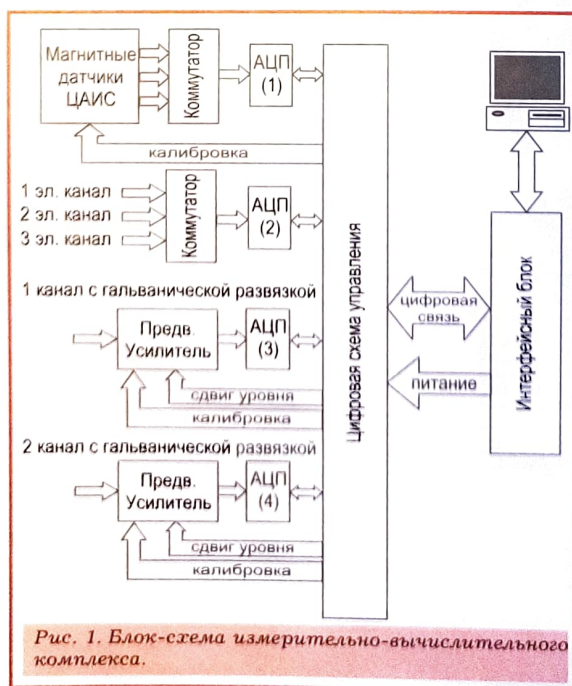


Рис. 1. Блок-схема измерительно-вычислительного комплекса.

вающиеся неполяризуемыми электродами (рис.3), одна дополнительная электрическая линия и сейсмодатчик. Связь между измерительным и интерфейсным блоками осуществляется по двум кабелям. По одному из них подается питание к измерительному блоку и, далее, к блоку датчиков магнитного поля, а по другому осуществляется цифровая связь между компьютером и измерительным блоком. Электрические линии подключаются к измерительному блоку через каналы с гальванической развязкой. Блок-схема ИВК-МТМ показана на рис.1. К дополнительным электрическим каналам подключены: еще одна электрическая линия через блок с гальванической развязкой, сейсмодатчик (через блок детектирования и выделения сейсмической огибающей) и датчик температуры блока датчиков магнитного поля. Динамический диапазон по всем каналам - 22 разряда. Периодичность измерений по каждому каналу - 2 измерения в секунду. Скорость ввода информации в компьютер - 80 Кбит/с (при длине кабеля связи - 100 м). Потребляемая мощность от сети переменного тока 220 В при подключенных датчиках магнитного поля - 15 Вт. Входное сопротивление 1 МОм (500 кОм для каналов с гальванической развязкой). Частота среза (по уровню -3 дБ) 1 Гц. Полоса измерения сейсмической огибающей 0,002 - 40 Гц. Частота среза после детектирования (-3дБ) - 1 Гц. Предусмотрена программная (на этапе запуска или отладки) калибровка магнитных и электрических каналов. Возможна программная компенсация постоянной составляющей по входу электрических каналов с гальванической развязкой.



Рис. 3. Неполаризующийся электрод.

Программное обеспечение и особенности эксплуатации

Разработанное для управления ИВК-МТМ обеспечивает оперативную обработку данных мониторинга, получаемых в процессе работы комплекса, повторную обработку ранее полученных данных с другими заданными параметрами, а также усреднение результатов обработки и вывод усредненных графиков за продолжительные интервалы времени (до 1 года). Все программное обеспечение состоит из двух частей – управляющие программы и программы адаптивной обработки данных электромагнитного мониторинга.

В состав пакета управляющих программ входит резидентная программа для ввода (по требованию от СОМ-порта персонального компьютера) и регистрации отсчетов данных ИВК-МТМ в ПК. Данные накапливаются в памяти и каждую минуту записываются на диск в файл блоками размером 121 запись по 15 байт. Параллельно с вводом данных ПК может использоваться для выполнения других задач, включая обработку получаемых данных в квазиреальном времени. В первую минуту каждого часа формируется новый файл, имя которого имеет следующую структуру:

YYMMDDHH, где YY-год, MM-месяц, DD-день, HH-час начала записи в файл.

Другие программы пакета предназначены для управления функциями измерительного блока ИВК-МТМ и проверки параметров его каналов. Управление осуществляется через СОМ-порт компьютера. Для калибровки АЦП служит инициализирующая программа. Программа сдвига позволяет компенсировать постоянную составляющую в каналах с гальванической развязкой в пределах ± 105 мВ. Этот диапазон разбит на 128 ступеней, т.е. одна ступень соответствует компенсации примерно 1,6 мВ.

Программа калибровки формирует сигналы для калибровки магнитных и электрических каналов в форме меандра с периодом 20 с (1 периода). В кольцах калибровки магнитных датчиков подается ток, задающий магнитное поле ± 100 нТл. В каналах с гальванической развязкой напряжение ± 17 мВ подается на резистор, включенный последовательно с измерительной электрической линией. В пакет также входит программа, позволяющая оценить шумы каналов при закороченном входе и отключенных датчиках. Эта программа рассчитывает среднеквадра-

тические отклонения в каналах по любому числу измерений (до 120, или одной минуты).

Алгоритм адаптивной обработки данных ИВК-МТМ

В основу пакета программ адаптивной обработки данных электромагнитного мониторинга в реальном масштабе времени положен метод так называемой «адаптивной фильтрации». Рассмотрим суть этого метода на примере вычисления передаточных функций (функций связи) между компонентами электромагнитного поля. Для этого представим связь вертикальной компоненты геомагнитного поля H_z с горизонтальными компонентами H_x и H_y в виде следующего соотношения:

$$H_z(t) = H_x(t) \cdot I_{zx}(t) + H_y(t) \cdot I_{zy}(t) + \Delta H_z(t), \quad (5)$$

где $I_{zx}(t)$ и $I_{zy}(t)$ – компоненты индукционного вектора или, в более общей трактовке, импульсные переходные характеристики соответствующих передаточных функций. Они отражают электрическое строение Земли в окрестности точки наблюдения. Вариации остаточного поля (ΔH_z) в значительной степени освобождены от зависимости от ионосферных токов, в них существенный вклад вносят поля внутреннего, геодинамического происхождения. Последние возникают в недрах Земли в результате разнообразных механоэлектрических преобразований и могут быть эффективно использованы для целей геодинамического мониторинга. Если в результате каких-либо геодинамических процессов не только генерируются электромагнитные поля, но и изменяется геоэлектрическое строение среды, то, соответственно, изменяются и передаточные функции $I_{zx}(t)$ и $I_{zy}(t)$. Анализ их изменений дает независимую по сравнению с остаточными полями информацию о процессах, протекающих внутри Земли.

Передаточные функции $I_{zx}(t)$ и $I_{zy}(t)$ могут быть найдены путем решения интегральных уравнений свертки на некотором интервале времени, на котором заданы значения временных рядов измерений компонент электромагнитного поля. Решение интегральных уравнений свертки может быть найдено хорошо известными методами [2, 3], однако, для целей непрерывных наблюдений наиболее подходящими представляются итерационные адаптивные методы [4]. В таких методах последовательно вычисляемые решения уравнений получаются при постоянно обновляющихся с течением времени данных временных рядов измерений. Если связи между рядами не изменяются, то передаточные функции $I_{zx}(t)$ и $I_{zy}(t)$ принимают после ряда итераций установившиеся значения, и в дальнейшем колеблются в их малой окрестности. Если стационарность связей между рядами нарушается, то адаптивный процесс отслеживает изменения передаточных функций по времени. Это, конечно, возможно лишь при более медленных их изменениях по сравнению с вариациями самих временных рядов. Наиболее простой и в то же время эффективный адаптивный метод решения систем алгебраических уравнений, к которым после дискретизации сводятся интегральные уравнения, – метод наименьших квадратов Уидроу-Хоффа [4]. Итерационный алгоритм этого метода чрезвычайно прост. Если, например, два ряда $y(t)$ и $x(t)$ связаны между собой линейной причинно-следственной связью, то выражение

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ



свертки, описывающее эту связь, можно представить в следующем интегральном виде:

$$y(t) = \int_0^t g(\tau) \cdot x(t-\tau) d\tau + \Delta y(t), \quad (1)$$

где $g(\tau)$ - некоторая передаточная функция (точнее - ее импульсная переходная характеристика), а $\Delta y(t)$ - невязка, характеризующая точность выполнения сверточной связи. Если среди наблюдаемых рядов можно выделить N независимых процессов, то любой другой ряд, порождаемый этими процессами, будет описываться векторным соотношением свертки:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N g_i(t) * x_i(t). \quad (2)$$

Обновление коэффициентов импульсных переходных характеристик при решении уравнений свертки адаптивными методами производится на каждом шаге вычислений в соответствии с итерационным алгоритмом Уидроу-Хоффа:

$$g_i(k+1, l) = g_i(k, l) + \mu \Delta y(k) x_i(k-l), \quad (3)$$

где индекс k указывает дискретизированное текущее время наблюдений, l обозначает время задержки импульсной переходной характеристики g_i , а μ - величину параметра сходимости. Значения $\Delta y(k)$ находятся путем вычитания из наблюдаемого значения временного ряда $y(k)$ его синтезированного значения $y^s(k)$:

$$y^s(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L g_i(k, l) \cdot x_i(k-l) \cdot \Delta t. \quad (4)$$

Последнее выражение представляет собой дискретизированную форму соотношения свертки (2) с определенными на k -ом времени значениями передаточных функций, здесь Δt - интервал дискретизации.

Блок-схема вычислительного алгоритма представлена на рис. 4.

На представленной схеме блоки «Адаптивный фильтр 1» и «Адаптивный фильтр 2» реализуют вычислительный процесс итерационного алгоритма метода наименьших квадратов Уидроу-Хоффа в соответствии с выражением (3). В качестве опорных сигналов на входе для примера взяты две горизонтальные компоненты геомагнитного поля (H_x , H_y), в качестве основного (рабочего) - вертикальная компонента магнитного поля H_z , либо горизонтальные компоненты электрического поля E_x или E_y . Разностный сигнал на выходе находится путем вычитания из наблюдаемого значения H_z (E_x или E_y) их синтезированных значений в соответствии с выражением (4).

Алгоритм адаптивной обработки данных первоначально был реализован в виде пакета программ на языке PASCAL для обработки

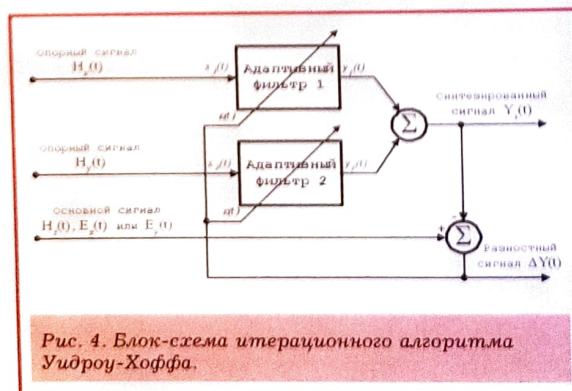


Рис. 4. Блок-схема итерационного алгоритма Уидроу-Хоффа.

данных в реальном масштабе времени. В дальнейшем была проведена полная ревизия прикладного программного обеспечения и разработана его обновленная версия на языке MATLAB. В настоящее время, при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта 03-07-90066 «Интерактивный WEB-ресурс для адаптивной обработки экспериментальных данных на основе инструментального средства MATLAB на основе Server», на сервере ИЗМИРАН организован сетевой доступ к вычислительным средствам MATLAB с использованием стандартного Web-браузера <http://matlab.izmiran.ru/>. Web Server дает возможность воспользоваться вычислительными возможностями MATLAB даже тем пользователям, на компьютерах которых MATLAB не установлен. Для этого достаточно иметь подключение к Интернет и стандартный Web-браузер.

Адаптивная обработка данных ИВК-МТМ в реальном масштабе времени, повторная их обработка и работа с архивами данных

Обработка данных в реальном масштабе времени работы ИВК-МТМ и их повторная обработка производится в трех частотных поддиапазонах.

Таблица 1. Параметры цифрового фильтра в поддиапазонах.

Поддиапазон (периоды)	Шаг дискретизации	Длина окна (дискрет/время)	Шаг окна (дискрет/время)	Интервал усреднения (дискрет/время)
1 (1 - 60 с)	0,5 с	360 / 3 мин	120 / 1 мин	30 / 15 с
2 (1 - 60 мин)	15 с	360 / 90 мин	60 / 15 мин	20 / 5 мин
3 (1 - 30 час)	15 мин	360 / 90 час	12 / 3 час	12 / 3 час

Разделение входных данных на частотные поддиапазоны (в периодах): $T=1-60$ с, $T=1-60$ мин и $T=1-30$ час производится скользящим цифровым фильтром, длина которого составляет 1 или 60 мин или 30 час, в зависимости от поддиапазона (количество дискретов выбирается в соответствии с таблицей 1). Задержка по времени на фильтрацию и адаптивную обработку составляет в 1-ом поддиапазоне - 2 минуты, во 2-ом - 2 часа и 3-ем поддиапазоне - 45 часов. В процессе фильтрации, при необходимости, осуществляется автоматическое редактирование исходных данных - выбросы и помехи техногенного происхождения в пределах заданной длительности и величины замещаются интерполированными значениями. Пороговые значения длительности и величины редактируемых выбросов задаются оператором в начале работы и могут изменяться по мере накопления опыта обработки экспериментальных данных. В качестве опорных сигналов при адаптивной фильтрации используются горизонтальные магнитные компоненты. Визуализация результатов обработки по всем обрабатываемым каналам производится в виде пяти последовательных графиков: 1) исходное поле; 2) остаточное поле; 3) спектрально-временной разрез остаточного поля; 4) и 5) - динамические разрезы в виде двух передаточных функций. Вывод результатов обработки производится автоматически реализациями длиной: 1 час - каждый целый час в 1-ом поддиапазоне, 1 сутки - каждые сутки во 2-ом поддиапазоне и 28, 29, 30 или 31 суток - каждый целый месяц в 3-ем поддиапазоне. При этом формируются и сохраняются файлы обработанных данных по всем компонентам, в том числе - файлы

передаточных функций, файл данных спектрально-временного анализа остаточного поля и файл значений исходного и остаточного полей, которые могут быть просмотрены с помощью программ графического вывода.

Примеры регистрации обработки

На рис. 5 - приведен пример обработки в первом поддиапазоне. Первый график отображает первичное наблюдаемое поле. По вертикальной оси графика отложена интенсивность магнитного поля (в пТл), а по горизонтальной - время в мин. Горизонтальная ось для всех графиков имеет одинаковую размерность. На втором графике показано остаточное поле, полученное в результате обработки (в том же масштабе, что и первичное поле). Как видно из графиков, первичное поле после обработки ослаблено почти в 2,5 раза в результате устранения эффектов ионосферно-магнитосферного влияния.

Третий график дает представление о спектрально-временных характеристиках остаточного поля. По вертикальной оси графика отложены в логарифмическом масштабе периоды гармонических составляющих в секундах, а цветом отражена интенсивность, шкала которой показана справа вверх. На четвертом и пятом графиках приведены динамические разрезы импульсных переходных характеристик компонент индукционного вектора магнитного поля. По вертикальной оси этих графиков в логарифмическом масштабе показана временная задержка импульсных переходных характеристик (время становления поля) в секундах, а в цвете - интенсивность, шкала которой изображена справа внизу.

На рис. 6 приведен пример обработки данных во втором поддиапазоне.

В этом случае на графиках результатов обработки во втором поддиапазоне в отличие от первого изменился масштаб по горизонтальным осям - время отложено не в минутах, а в часах. Кроме того, изменился масштаб по вертикальной оси графика результатов спектрально-временного анализа остаточного поля - периоды спектральных составляющих выражены в минутах, а не в секундах, как это было в первом поддиапазоне.

На рис. 7-8 даны примеры обработки для вертикальной магнитной компоненты поля в третьем поддиапазоне. Как видно из графиков, изменился масштаб по горизонтальным осям - время выражено в днях месяца (рис. 7) или в днях года (рис. 8). Изменился также масштаб по

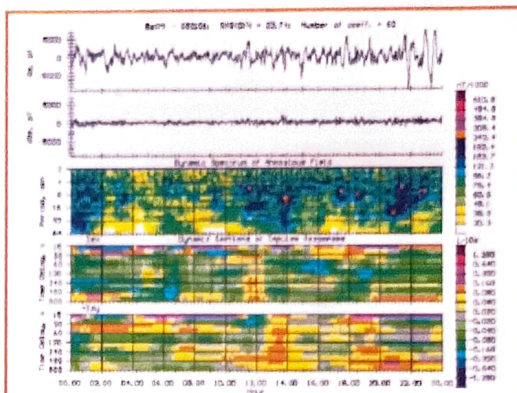


Рис. 6. Пример обработки вертикальной магнитной компоненты поля во втором поддиапазоне.

вертикальной оси графиков результатов спектрально-временного анализа - периоды гармонических составляющих представлены в часах. Масштаб по вертикальным осям разрезов передаточных функций выражен в минутах.

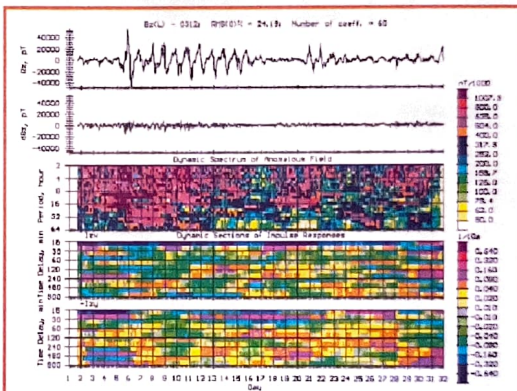


Рис. 7. Пример обработки вертикальной магнитной компоненты поля в третьем поддиапазоне.

Полевые испытания ИВК-МТМ в Кавказском регионе

ИВК-МТМ был установлен южнее г. Кисловодск на горе Шиджатмаз на высоте 2000 м над уровнем моря в районе астрономической станции с одноименным названием. Регистрация МТ поля осуществлялась с 16.10.99 по 07.11.99. Она изобилует фрагментарностью из-за

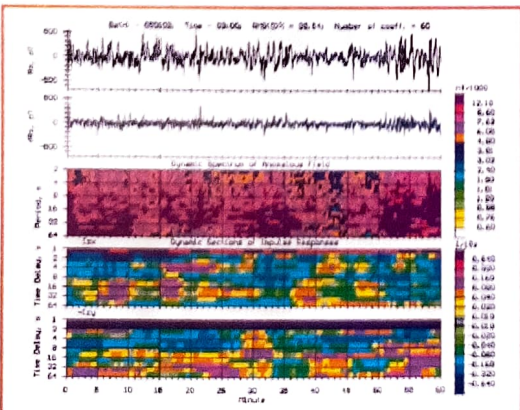


Рис. 5. Пример регистрации и обработки вертикальной магнитной компоненты поля в первом поддиапазоне.

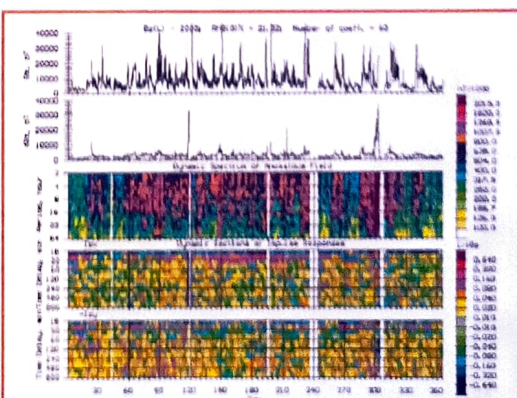


Рис. 8. Пример обработки вертикальной магнитной компоненты поля в третьем поддиапазоне.

Таблица 2. Геодинамические возмущения в районе наблюдений.

Дата события	Время события	Мagnitude	Характер события
03.11.99	17 ч. 56 мин	3,4	Землетрясение
04.11.99	17 ч. 56 мин	-	Промышленный взрыв

длительных выключений (до нескольких суток) электроэнергии, а также из-за поломки аппаратуры. Как оказалось, в районе регистрации создавались сильные электромагнитные помехи, вызванные включениями и выключениями силовых установок астрономической станции. Кроме того, были помехи от биологических объектов (крыс-землероек, засыпавших грунтом магнитометры и от передвижения скота по склонам горы, где были расположены датчики поля). За время регистрации МТ поля, примерно в 100 км от точки наблюдения, имели место механические возмущения геодинамического или техногенного происхождения (таблица 2).

Пример регистрации и обработки в среднечастотном диапазоне B_z , E_x , E_y показан на рис. 9 - 11. Стрелкой на нижнем графике отмечено время события.

Обработка данных в высокочастотном диапазоне проводилась в квазиреальном времени с задержкой в 1+2 минуты по отношению к времени регистрации МТ поля. Периодически, по мере накопления данных, осуществлялась обработка в среднечастотном и низкочастотном диапазонах. В целом, кавказские данные характеризуются сильными и частыми изменениями передаточных функций за сравнительно короткий

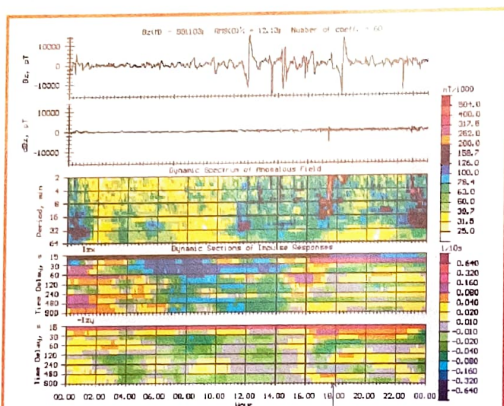


Рис. 9. Суточная реализация вертикальной магнитной компоненты за 03.11.99 г.

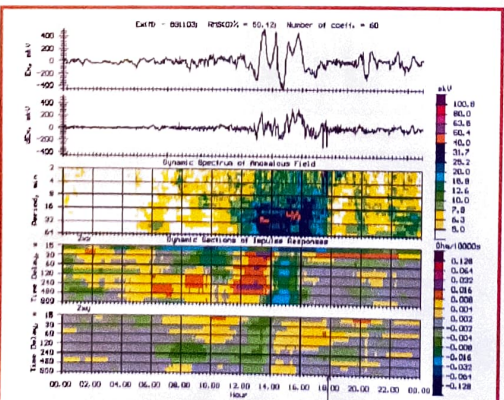


Рис. 10. Суточная реализация электрической компоненты E_x за 03.11.99 г.

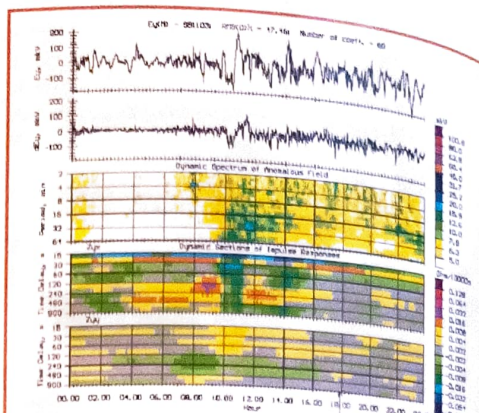


Рис. 11. Суточная реализация электрической компоненты E_y за 03.11.99 г.

промежутков времени, а также возрастанием остаточного поля в дневное время и его снижением к ночи. Это видно и на рисунках 9+11. На рис. 10-11 видны отчетливые изменения импеданса, предшествующие событию.

В низкочастотном диапазоне (рис. 12 - 14) можно проследить за изменением передаточных функций и их возможной связью с прошедшими событиями. Здесь также стрелкой помечены события на нижнем графике. В вертикальной магнитной компоненте (рис. 12) в период, предшествующий землетрясению 3 ноября, были изменения, вплоть до смены знака, в I_{zx} . В электрической компоненте E_x (рис. 13) в Z_{xx} видны существенные изменения на события от 3 ноября. В электрической компоненте E_y (рис. 14) видно резкое изменение со сменой знака перед событием 3 ноября. В то же время по Z_{yy} видны очень малые изменения за весь период наблюдений.

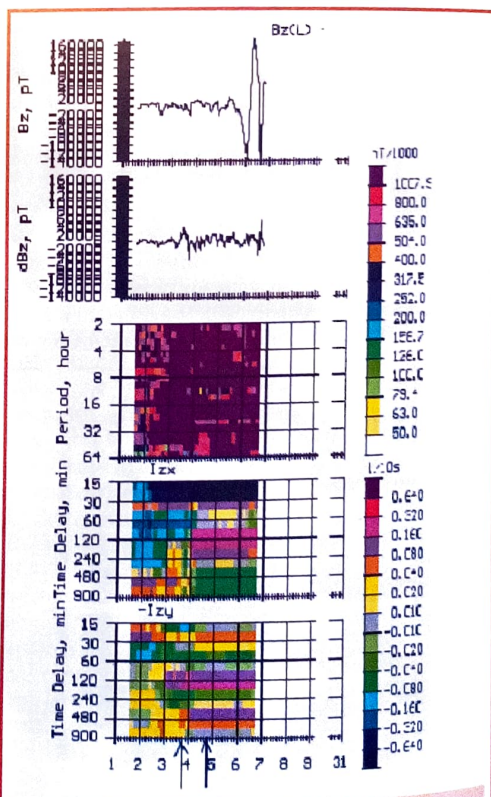


Рис. 12. Реализация вертикальной магнитной компоненты в низкочастотном диапазоне за ноябрь 1999 г.

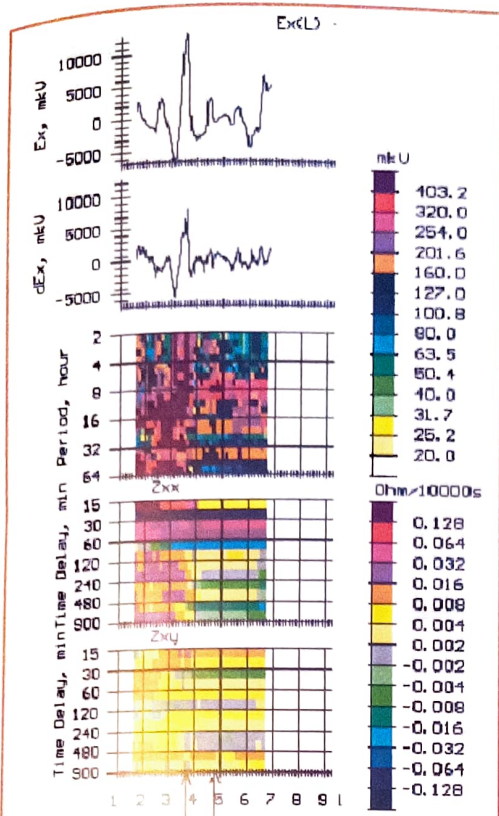


Рис. 13. Реализация электрической компоненты E_x в низкочастотном диапазоне за ноябрь 1999 г.

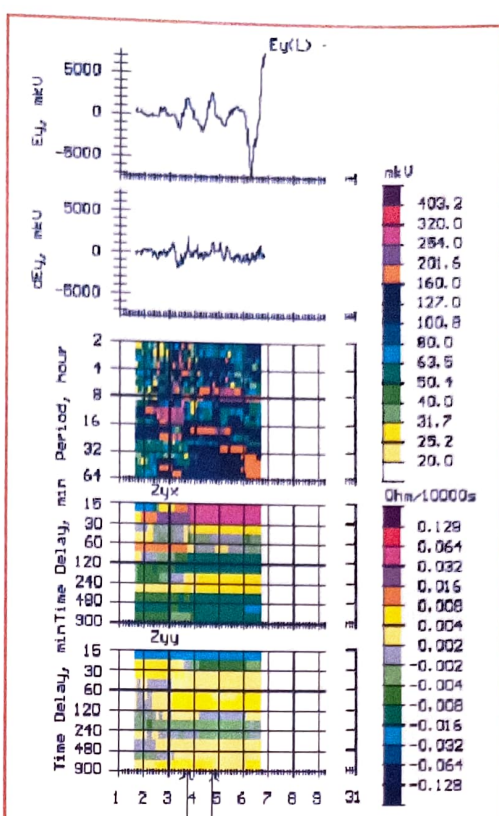


Рис. 14. Реализация электрической компоненты E_y в низкочастотном диапазоне за ноябрь 1999 г.

Заключение

Необходимо отметить, что в первоначальном варианте ИВК-МТМ, прошедшем испытания в Кавказском регионе, отсутствовал сейсмодатчик. После испытаний была проведена доработка комплекса, и сейсмодатчик был включен в состав ИВК-МТМ. С конца сентября 2002 г. и по настоящее время ИВК-МТМ проходит длительные (свыше трех лет) испытания по непрерывной регистрации и обработке магнитотеллурического поля на территории ИЗМИРАН (г. Троицк Московской обл.). Испытания показали высокую

надежность комплекса, отвечающую его функциональному назначению.

Литература

1. Светов Б.С., Каринский С.Д., Кукса Ю.И., Одинцов В.И., «Магнитотеллурический мониторинг геодинамических процессов», Физика Земли, 1997, №5, с. 36-46.
2. Тихонов Н. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1979, 285 с.
3. Светов Б. С., Шимелевич М. И. Определение линейных связей между компонентами магнитотеллурического поля - основные принципы. Физика Земли, 1982, №5, с. 59-67.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М., Радио и связь, 1989, 440 с.

ПОДПИШИСЬ

Персональная информация о подписчике/Почтовый адрес организации

ФАМИЛИЯ		ИМЯ		ОТЧЕСТВО	
ПОЛНОЕ НАИМЕНОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ					
ОТДЕЛ/ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ				ДОЛЖНОСТЬ	
ИНДЕКС	СТРАНА	ГОРОД	ОБЛАСТЬ/РАЙОН		
АДРЕС					
КОД ГОРОДА	ТЕЛЕФОН	ФАКС	E-MAIL		

Россия, 410019, г. Саратов, ул. Крайняя 129, СО "ЕАГО" - в редакцию "Приборы и системы разведочной физики"

Стоимость годовой подписки (с почтовой пересылкой и НДС - 10%)

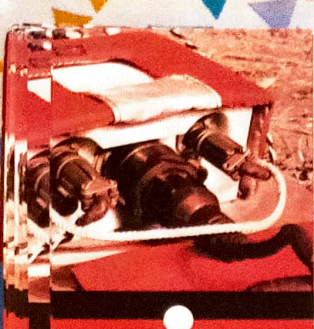
Наименование издания

1 Комплект (4 годовых номера)

Журнал "Приборы и системы разведочной геофизики"

1760 руб.

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ



Новая аппаратура для радиоволновой геоинтероскопии горных пород в межскважинном пространстве "РВГИ-2005"

Истратов В.А., Остапчук С.И., Скрынник А.В., Перекалин С.О., ООО «Радионда LTD», г. Москва

В рудной геофизике 60-80-х годов прошлого века был хорошо известна технология радиоволнового просвечивания, которая достаточно широко применялась при поисках и разведке месторождений твердых полезных ископаемых [9]. Физико-геологической основой радиоволнового метода является зависимость интенсивности поглощения энергии радиоволн горными породами, расположенными на трассе распространения волны, от электрических характеристик этих пород: удельного электрического сопротивления ρ и относительной диэлектрической проницаемости ϵ . Породы, обладающие более низкими значениями ρ и (или) ϵ , характеризуются более высоким поглощением радиоволн. Степень различия электрических свойств - электрическая контрастность пород, слагающих разрез, определяет возможности метода.

Ряд научных коллективов, в первую очередь ВИРГ и ЦНИГРИ, вели разработку теории и методики этой технологии и выпускали скважинную радиоволновую аппаратуру серий СРП (ВИТР), ФАРА (ВИРГ) и АРП, РВМ (ЦНИГРИ). Эта аппаратура позволяла весьма эффективно вести поиск в межскважинном пространстве хорошо проводящих рудных тел значительных размеров в относительно однородных породах высокого сопротивления. Существенному расширению возможностей технологии послужила разработанная в отделе геофизики ЦНИГРИ (Гуревич Г.Ф., Б.Ф. Борисов Б.Ф.) методика «дальнего радиопросвечивания в анизотропных средах (ДРВП)» [2, 4]. В обеспечение этой методики в ЦНИГРИ совместно с ТулНИИГП в начале 80-х годов была разработана широкодиапазонная скважинная аппаратура РВМ-6М (Борисов Б.Ф., Гуревич Г.Ф., Палевский А.В., Томилин В.К., Абрисимов В.А., Луконин В.И., Титов В.М., Астафьев Г.П.). Данная аппаратура позволила уже тогда проводить межскважинное радиопросвечивание на расстояния до 1500 метров, в том числе и в породах с электрическим сопротивлением в первые сотни Ом·м. В комплект РВМ-6М входил передатчик, приемник, наземный измеритель и набор антенн. Передатчик включал задающий окварцованный генератор, усилитель мощности и согласующий контур. Излучение производилось в режиме телеграфных посылок, что позволяло в периоды паузы измерять шумы и выделять сигнал на их фоне. Для исключения антенного эффекта кабеля передатчик имел автономное питание и опускался в скважину на капроновом фале, что исключало возможность какого-либо обмена информацией с передатчиком. В скважинной части приемника располагался усилитель высокой частоты, гетеродин и смеситель. Приемник также имел автономное питание и присоединялся к кабелю через систему разделительных трансформаторов (фильтр), что позволяло снизить антенный эффект в 20-40 раз. В наземном приборе располагался аттенуатор, подстраиваемый фильтр промежуточной частоты и амплитудный детектор. Приемник имел канал калибровки, позволявший в процессе измерений контролировать коэффициент усиления. Отсчет брался по стрелочному прибору. Для передачи и приема на высоких частотах использовались симметричные полуволновые антенны (длина плеча $l = \lambda/4$), но на

низких частотах длина антенн составляла 0,1 длины волны. Ток в передающей антенне никак не контролировался, и, чтобы избежать влияния его нестабильности на результаты измерений, его сущие элементы выбирались таким образом, чтобы даже в самых низкоомных породах уйти от цены его снижения. Тем не менее, технические характеристики аппаратуры позволяли получать достаточно высокие коэффициенты измерительных установок: на низких частотах 0,021-0,156 МГц (для излучающих антенн $l_n = 40$ м и приемных $l_n = 12$ м) - $E_0(L_n) = 5 \cdot 10^5$, на частотах 0,312 - 1,25 МГц с антеннами длиной $l_n = 12$ м, $l_n = 12$ м - до $4 \cdot 10^6$. В целом приведенные в таблице 1 технические характеристики аппаратуры РВМ-6М вполне удовлетворяли требованиям того времени: интервалы измерений в открытых стволах рудных скважин составляли 100 и более метров и позволяли размещать скважинные передатчики с электрическими антеннами длиной 80 м. Высокая чувствительность приемника позволяла выделять рудные аномалии на фоне геологических помех, тем паче, что аномалией тогда считались значения измеренного поля не менее, чем в два раза отличающиеся от нормального.

Однако в 90-е годы интерес к такого рода исследованиям был потерян, круг актуальных геологических задач, геоэлектрические и технологические условия измерений в скважинах существенно изменились. На первый план выходят инженерно-геологические и технологические задачи выявления незначительных по величине и слабоконтрастных неоднородностей (отличающихся по сопротивлению в 1,5-2 раза от вмещающих пород) в низкоомных (до 10 Ом·м) неоднородных горизонтально слоистых разрезах. Например, задачи по прослеживанию зон заводнения в коллекторах нефтяных месторождений или контроля закисления урановых месторождений в процессе подземного выщелачивания. При этом величина рабочего интервала в скважине, как правило, не превышает первых десятков метров. Измерения проводятся в стеклопластиковых (полиэтиленовых) обсадных колоннах, в сильно минерализованных, пресных или нефтенасыщенных буровых растворах. Кроме того, требуется получать информацию об изменении свойств среды не только в разрезе, но и по латерали, т.е. иметь возможность совместной 3D обработки данных измерений по большому числу сечений. Все это накладывает жесткие условия по контролю стабильности характеристик аппаратуры, и особенно, тока в излучающей антенне во время всех измерений.

Для эффективной реализации «технологии мониторинга» важным фактором является идентичность условий проведения первичных и последующих измерений. Только в этом случае наблюдаемые изменения физического параметра будут однозначно связаны с изменением характеристик изучаемого объекта. Поэтому аппаратура и методика измерений, способы обработки и интерпретации данных РВГИ должны обеспечивать не только контроль технических характеристик измерительных систем, но и количественный учет влияния ряда искажающих факторов

(сопротивление раствора, диаметр скважины, полиэтиленовые трубы, перфорация и т.д.).

Поэтому в развитие методики ДРВП в 1992 году в ООО «Радиоinda LTD» была начата разработка новой модификации радиопросвечивания и соответствующей аппаратуры, получившей название «радиоволновая геонитроскопия межскважинного пространства» (РВГИ) [1, 3, 7]. Опытный образец скважинной радиоволновой аппаратуры первого поколения РВГИ-2Н успешно прошел ведомственные испытания Минтопэнерго РФ и нефтяных скважинах ЗАО «ЛукойлПермь» в феврале 2000 г. [6]. Это была первая скважинная радиоволновая аппаратура, имеющая оптико-электрическую развязку скважинных приборов и каротажного кабеля, позволяющая вести непрерывную цифровую запись измеряемого сигнала. В последующие годы, по мере накопления экспериментального материала и непрерывной опытно-конструкторской проработки, аппаратура претерпела существенную модернизацию. Ее последние результаты реализованы в аппаратуре РВГИ-2005.

РВГИ – это технология максимально детального (2D и 3D) геоэлектрического картирования, «визуализация» внутреннего строения геологической среды в пространстве между скважинами. Непосредственное электромагнитное поле в диапазоне радиочастот, специальную технику измерений и обработки данных, методами томографического или волнового восстановления можно определять эффективное электрическое сопротивление «элементарной ячейки» исследуемой среды, его распределение в межскважинном пространстве и, на этой основе, выявлять и локализовывать в межскважинном пространстве геологические неоднородности относительно малой мощности, электрической контрастности и размеров.

Измерения проводятся по так называемой «верной» (томографической) схеме, когда в одну из скважин погружается излучающее устройство, а в другую – приемное (рис.1). При фиксированном положении излучателя, во второй скважине, где находится приемник, по точкам с заданным шагом производится измерения. Затем в первой скважине излучатель перемещается на шаг в следующий пункт, и измерения во 2-й скважине повторяются. Электромагнитное поле возбуждается генератором, нагруженным на осевую электрическую антенну. В приемном устройстве измеряется сигнал, пропорциональный амплитуде напряженности электрической компоненты, параллельной оси скважины [10]:

$$E = \frac{E_0}{R} \cdot e^{-k \cdot R} \cdot f(\theta), \quad (1)$$

где E – сигнал на входе приемника;

E_0 – аппаратный параметр (коэффициент измерительной установки);

$f(\theta)$ – функция взаимной ориентировки излучающей и приемной антенн;



Рис. 1. Схема радиопросвечивания.

R – расстояние между приемником и передатчиком;

$k'' = \sqrt{\pi \mu f / \rho}$ – коэффициент поглощения (при $\rho \ll 1$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота);

f – частота электромагнитного поля, μ – магнитная проницаемость, ρ – удельное электрическое сопротивление пород.

Из выражения (1) следует, что для расчета интерпретационных параметров (k'' , ρ) необходимо количественное определение коэффициента измерительной установки:

$$E_0 = \frac{J \cdot l_e \cdot l_r}{2} \cdot \mu \quad (2)$$

Значение коэффициента установки (E_0) определяется током в излучающей антенне (J) и эффективными высотами излучающей (l_e) и приемной (l_r) антенн. Эти величины, в свою очередь, зависят от конкретных геоэлектрических условий в точках излучения и приема. Параметр E_0 можно рассчитать, зная входящие в (2) величины, либо определить экспериментально, проводя измерения в волновой зоне при разных расстояниях между приемником и передатчиком в однородной среде. Оптимальным является измерение и запись тока в излучающей антенне на каждой стоянке передатчика.

Реализация технологии РВГИ и названные выше задачи выдвинули новые требования к аппаратуре:

- увеличение дальности просвечивания в породах низкого сопротивления;
- максимальное укорочение излучающих и приемных антенн при сохранении высоких значений коэффициента измерительной установки, а, следовательно, и дальности исследований;
- повышение чувствительности и помехозащищенности приемного канала;
- управление скважинным передатчиком, включая резонансную настройку излучающей антенны и цифровую запись тока и параметров настройки в точке излучения;
- исключение влияния антенного эффекта;
- разработка конструкций скважинных приборов и антенн, обеспечивающих безаварийную работу в нефтяных, газовых скважинах и скважинах ПВ.

Способы повышения дальности общеизвестны. Это снижение рабочей частоты, увеличение чувствительности приемника, увеличение мощности передатчика и его согласование с антенной.

Наиболее эффективное увеличение дальности происходит при снижении частоты исследований [4]. При этом, правда, несколько снижается разрешающая способность. Неосмотрительно снижая частоту, можно также выйти в область, где волновые представления не действуют. Однако практика показала, что в низкоомных разрезах снижение частоты оправдано. Как правило, при межскважинных исследованиях требуется частота не выше 1,25 МГц.

Вторым по эффективности фактором увеличения дальности является повышение чувствительности приемного тракта, что достигается сужением его полосы пропускания. При этом дальность растет пропорционально увеличению чувствительности.

Увеличение мощности излучателя менее эффективно. Так рост мощности в N раз приводит к росту сигнала только в $\sqrt{N}$ раз. Увеличение мощности связано с увеличением питания излучателя и, следовательно, увеличением его геометрических размеров. Другое дело –

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ



Таблица 1. Технические характеристики РВМ-6 и РВГИ-2005.

№	Характеристика	РВМ-6	РВГИ-2005
1	Рабочие частоты (МГц)	0,021; 0,061; 0,156; 0,312; 0,625; 1,25; 2,5; 9,0; 18; 31	0,061; 0,156; 0,312; 0,625; 1,25; 2,5
2	Чувствительность приемника по входу при соотношении сигнал/шум = 6дБ (мкВ)	0,5	0,1
3	Полоса пропускания измерительного тракта (Гц)	60	12
4	Мощность генератора на эквиваленте антенны - 200 пкФ, 100 Ом (Вт)	0,5 - 1	4 - 28
5	Динамический диапазон (дБ)	80	110 (130)
6	Коэффициент установки $E_0(L_n)$ (мкВм)	(на частоты 0,021 - 0,156) - $5 \cdot 10^3$ (на частоты 0,312 - 1,25) - $4 \cdot 10^4$	(на частоты 0,061 - 0,156) - $3 \cdot 10^3$ (на частоты 0,312 - 1,25) - $2 \cdot 10^4$
7	Количество жил каротажного кабеля	3	1
8	Диаметр скважинных приборов (мм)	38	38
9	Время автономной работы в скважине (час)	8	10

согласование передатчика с антенной. Здесь при использовании резонансных антенн можно добиться увеличения тока в антенне, а следовательно и сигнала в приемнике, на порядок.

Сопротивление электрической антенны с тонким слоем изолятора является комплексным и в данной среде зависит от соотношения размеров антенны l и длины волны λ в среде. При $l = \lambda/2$ сопротивление антенны минимально и является чисто активным (т.е. емкостное сопротивление такой антенны компенсируется ее индуктивным сопротивлением). В этом случае генератор отдает в нагрузку максимальный ток. Полуволновые антенны можно применять только на высоких частотах. На низких частотах длина полуволновой антенны в среде составляет сотни метров, и на практике используют короткие антенны, сопротивление которых носит ярко выраженный емкостный характер. Настройка в резонанс таких антенн осуществляется путем включения последовательно с антенной дополнительной индуктивности. Резонанс тока весьма острый, так что при смене условий, в которых находится резонансная антенна (диаметр скважины, ее наполнение - вода или воздух, сопротивление окружающих пород), настройка сбивается. При этом меняется ток в антенне. Особенно значительно может меняться ток в сухих скважинах. Исключить влияние изменения тока на результаты измерений можно при условии его измерения.

В соответствии с этими принципами и построена новая аппаратура РВГИ-2005. Блок схема аппаратуры представлена на рис. 2. Основное отличие аппаратуры заключается в новом элементе - оптоволоконной развязке, включающей между скважинным прибором (приемником или передатчиком) и каротажным кабелем. Применение оптоволоконных развязок, размещенных в диэлектрическом стеклопластиковом корпусе, позволило решить несколько задач:

- практически полностью исключить влияние антенного эффекта на результаты измерений;
- использовать для спуска приборов одножильный каротажный кабель (вместо 3-х) и, тем самым, применять облегченные каротажные подъемники;
- присоединять скважинные приборы к кабелю через жесткую конструкцию, исключив применение капронового фала, работа с которым в нефтяных, а ныне и рудных скважинах, невозможно.

Главное, использование оптической связи предопределило цифровую систему передачи сигнала и такое построение аппаратуры, при котором в скважинном приборе находится собранный на процессоре блок управления. Это позволило:

- принимать команды с поверхности;

- включать скважинный прибор;
- осуществлять выбор рабочей частоты;
- производить настройку скважинного прибора;
- принимать цифровые сигналы с аналоговых датчиков и передавать их на поверхность.

На поверхности связь бортового компьютера со скважинным прибором осуществляется с помощью ретранслятора, обеспечивающего согласование с каротажным кабелем и питание верхнего опто-электрического преобразователя.

Аппаратура РВГИ-2005 выпускается в двух вариантах: высокочастотном с частотами 0,312, 0,625; 1,25 и 2,5 МГц и низкочастотном с набором частот 0,061; 0,156; 0,312 и 0,625 МГц. В отличие от РВМ-6 переключение частот можно осуществлять без подъема скважинного прибора на поверхность.

Блок схема передатчика представлена на рис. 2а. Ядро схемы передатчика в сравнении с РВМ-6 не изменилось. Сохранились все стандартные блоки: задающий генератор, усилитель мощности, блок согласования с антенной, однако их конструкция претерпела изменение, причем не только в связи с заменой устаревшей элементной базы.

Задающий генератор выполнен на логических элементах со стабилизацией частоты на основе термостабильных кварцевых резонаторов. Все задающие генераторы работают непрерывно с момента включения напряжения питания скважинного прибора. Коммутация на выход необходимой частоты осуществляется при помощи логических ключей, управляемых процессором.

Усилитель мощности с трансформаторным выходом выполнен по двухтактной схеме на мощных транзисторах в ключевом режиме. Он включается по команде от блока управления в режиме радиоимпульса со временем излучения 2 секунды и паузой 15 секунд.

Основным элементом блока согласования с антенной является дроссель, включенный последовательно с антенной. Отличие состоит в том, что с целью компенсации емкостной составляющей входного импеданса антенны и настройки ее в резонанс, индуктивность дросселя можно плавным изменять в процессе измерений посредством управляющих команд с бортового компьютера. Контроль процесса настройки передатчика осуществляется измерением текущей индуктивности дросселя и тока на входе антенны, для чего прибор содержит соответствующие датчики.

Для излучения используется монополярная изолированная антенна, противовесом изолированной антенны служит металлический корпус передатчика. Опыт показал, что использование дипольной антенны сильно усложняет процесс настройки (настройка одного плеча приводит к расстройке другого), нетехнологично и не дает за-



ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

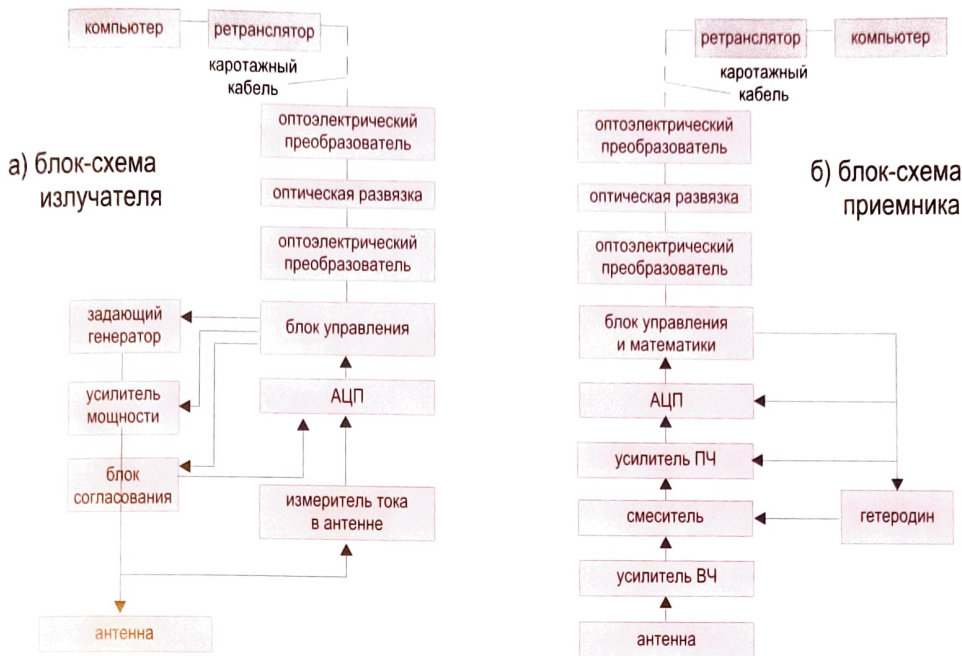


Рис. 2. Блок-схема аппаратуры РВГИ-2005.

метных преимуществ. Специальные исследования в баке с электролитом и полевые эксперименты в скважинах показали, что монополярная изолированная антенна обеспечивает требуемую диаграмму направленности излучателя.

Питание скважинного прибора производится от 16 аккумуляторов емкостью 3,5 А·ч. Заряда аккумуляторов вполне хватает на 10 часов работы.

Конструктивно передатчик собран в металлическом корпусе диаметром 38 мм, оптико-волоконная развязка находится в стеклопластиковом корпусе, длина которого 2250 мм.

Специально разработанные программы управления, измерения и записи данных позволяют оператору вести непрерывный визуальный контроль параметров излучения. На дисплее (рис.3) в окне регистрации данных в графическом режиме в реальном времени отображаются амплитуда тока на входе антенны в условных единицах, что облегчает процесс настройки. Справа в окне последовательно строится график изменения тока по скважине. Кроме того, имеется меню, с помощью которого осуществляются основные переключения, и информационное окно, где можно видеть напряжение питания излучателя, температуру в приборе и другие полезные сведения. При записи в компьютере сохраняется цифровая информация, где каждой глубине соответствует величина тока в антенне и настроечной индуктивности в условных единицах. Чтобы получить значения тока в (мА), а индуктивности в (мГ), в лабораторных условиях проводится эталонирование передатчика. На рис.4 приведены графики настройки скважинного излучателя на 2-х метровую антенну в водной скважине на частотах 0,625 и 0,312 МГц. Видно, что на более высокую частоту антенна настраивается при меньшем значении согласующей индуктивности. На частоте 0,312 МГц резонанс был получен при значении индуктивности $L_{\text{рез}} = 0,48$ мГн. Это соответствует емкости антенны приблизительно в 500 пкФ. Ширина полосы на уровне -3 дБ составила $\Delta L = 0,16$ мГн, и, соответственно, добротность $Q=3$. Отсюда легко определяется активное сопротивление антенны как отношение реактивного сопротивления на задан-

ной частоте к добротности. Например, на частоте 0,312 МГц оно составило около 300 Ом. Таким образом, выполняя настройку можно определять эффективные параметры антенны (емкость и сопротивление) в данных геоэлектрических условиях. Данная информация позволяет целенаправленно конструировать эффективные антенны для работы в конкретных условиях.

Блок-схема приемника представлена на рис. 2б. Скважинная часть приемника построена по гетеродинной схеме. Принятый антенной сигнал усиливается усилителем высокой частоты (УВЧ) и подается на смеситель, на который также поступает сигнал от гетеродина. Частота переключается блоком управления путем подачи питания на соответствующий гетеродин. Со смесителя отфильтрованный сигнал промежуточной частоты 40 кГц поступает на четырехдиапазонный усилитель (УПЧ), также контролируемый блоком управления, а с него на АЦП. Математика блока осуществляет цифровую фильтрацию сигнала на промежуточной частоте. При этом сигнал в интервале 0,3 секунды оцифровывается с частотой Найквиста и раскладывается в спектр. Сигнал находится как максимум спектра в полосе 300 Гц с центральной частотой 40 кГц. (Считается, что частота не может уйти более чем на ± 150 Гц.) При этом реализуется ширина полосы всего измери-

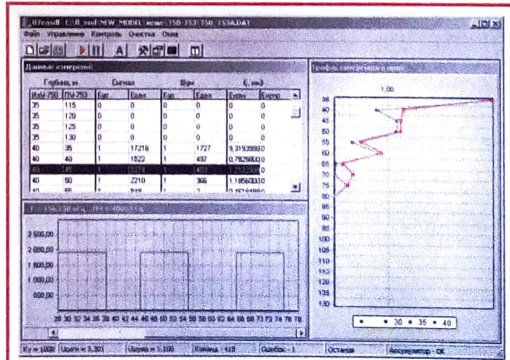
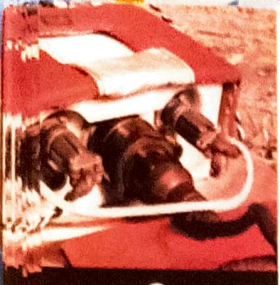


Рис. 3. Интерфейс программы записи.



ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

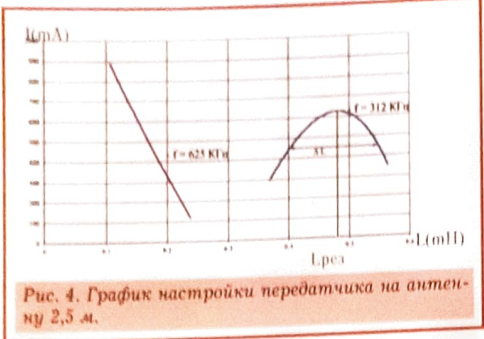


Рис. 4. График настройки передатчика на антенну 2,5 м.

тельного тракта в 12 Гц. По времени этот процесс занимает 600 мс. В течение одного интервала излучения передатчика приемник успевает трижды произвести измерения. По крайней мере, один из периодов измерения полностью попадает в интервал излучения и в этом случае будет зафиксирован максимальный сигнал, который и является истинным.

Процесс измерения контролируется визуально на компьютере в окне регистрации данных (рис. 3), где в реальном времени можно наблюдать измеренный сигнал, а во время паузы в излучении, - уровень и форму шумов. В аппаратуре реализовано два режима измерений: автоматический и ручной. В автоматическом режиме оператор, убедившись, что сигнал регистрируется на фоне шумов, останавливает запись, и максимальное значение автоматически регистрируется как сигнал, а минимальное - как шум. Значение поля в микровольтах вычисляются по формуле:

$$E(\text{мкВ}) = \sqrt{(A_{\text{сигнал}}^2 - A_{\text{шум}}^2) \cdot K},$$

где $A_{\text{сигнал}}$ - амплитуда сигнала в условных единицах;

$A_{\text{шум}}$ - амплитуда шума в условных единицах;

K - коэффициент перевода условных единиц в микроvolты, определяемый при эталонировании приемника.

В ручном режиме оператору самому предоставляется возможность самостоятельно выбрать, что именно он считает сигналом, а что шумом. При малых сигналах визуализация и ручной режим позволяют легко установить наличие сигнала по периодичности включения передатчика, т.к. на экране видны сразу несколько посылок включения, и исключить импульсную помеху. В файл записи заносится вся служебная информация (место, время, параметры установки), данные о координатах устья скважины и ее инклинометрия. Для внесения поправки за изменение тока файл записи по приемнику и файл записи по передатчику объединяются с помощью специальной опции.

Введение поправки предусматривает строгую линейность не только приемного канала, но и датчика измерения тока. Пример линейной зависимости сигнала на выходе приемной антенны, находящейся в одной скважине от величины тока в излучающей антенне, находящейся в другой скважине приведен на рис. 5. Внесение поправки за ток особенно необходимо при исследовании больших площадей, где присутствуют скважины, находящиеся в разных геоэлектрических условиях. Эффект от введения поправки за ток показан на рис. 6. Здесь даны графики изменения напряженности поля по глубине, полученные при синхронных измерениях (передатчик в одной скважине синхронно перемещается по глубинам с приемником в другой скважине). Синим цветом показано поле до введения поправки, красным - с введенной поправкой, а черным - график изменения тока. Видно, что введение поправки за ток сглаживает график и позволяет исключить из рассмотрения

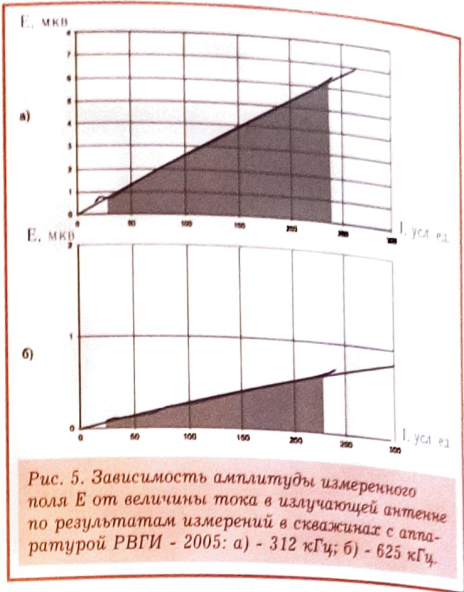


Рис. 5. Зависимость амплитуды измеренного поля E от величины тока в излучающей антенне по результатам измерений в скважинах с аппаратурой РВГИ - 2005: а) - 312 КГц; б) - 625 КГц.

аномалию в районе отметки 85 м.

Очевидно также, что возможность изменять величину тока в антенне в 10 и более раз расширяет динамический диапазон аппаратуры до 130 дБ (динамический диапазон приемника составляет 110 дБ).

Технические характеристики аппаратуры РВГИ - 2005, приведенные в таблице 1, наглядно показывают, что она обеспечивает значительное увеличение геотехнических параметров межскважинных радиоволновых измерений: эффективной дальности, чувствительности и разрешающей способности.

Новые возможности, предоставляемые аппаратурой РВГИ-2005, проиллюстрируем на нескольких примерах.

Как отмечалось выше, управляемый излучатель позволяет целенаправленно конструировать антенны, эффективные для работы в конкретных условиях. Например, повысить эффективность короткой антенны можно также путем изменения распределения тока вдоль нее. В обычной антенне из изолированного провода величина тока вдоль антенны достаточно резко уменьшается от места подключения к ее концу. Выравнить изменение тока вдоль антенны можно подключением к ее концу дополнительного элемента - объемной антенны, обладающей по отношению к среде емкостью большей, чем емкость провода антенны. Использование таких комбинированных антенн - известный технический прием, применяемый в радиотехнике. Ниже приводится пример работ, проведенных в Кереди, подтверждающий эффективность применения таких комбинированных антенн для радиоволнового просвечивания. В разрезе исследуемых скважин были представлены толщи, как пироксенитов низкого сопротивления, так и высокоомных перидотитов. В качестве линейных антенн использовались отрезки геофизи-

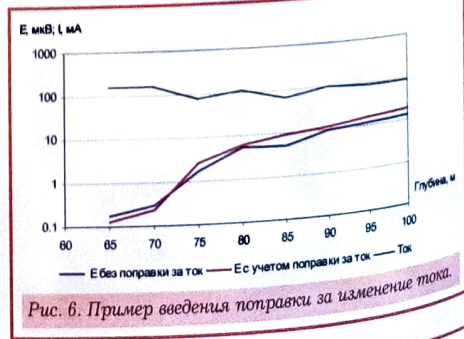


Рис. 6. Пример введения поправки за изменение тока.

ческого провода в специальном полихлорвиниловом шланге высокого давления длиной 5 и 10 м. В качестве объемной антенны нами используется цилиндр из фольги диаметром 25 мм, заключенный в стеклопластиковый корпус диаметром 42 мм и длиной 2 м. Методика исследования была следующая. Приемник располагался в одной из скважин на постоянной глубине, а передатчик размещался в другой скважине последовательно на глубине 100 и 120 м, что соответствует интервалам пироксенитов и перидотитов. Исследовались различные комбинации передающих антенн: 10-ти метровая линейная антенна сравнивалась по эффективности с 10-ти метровой антенной с подключенной на конце объемной антенной, а 4,5-ти метровая с 4,5 метровой антенной + объемная антенна на конце. С каждой антенной производилась настройка в резонанс на частоте 0,312 МГц и записывался резонансный ток и сигнал по приемнику. Результаты измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2. Эффективность различных антенн.					
Породы	Параметры	Антенны			
		10	10+2	4,5	4,5+2
Пироксениты	I(усл.ед)	222	233	22	32
	E (мкВ)	36	100	5	7
Перидотиты	I(усл.ед)	182	146	22	35
	E (мкВ)	296	506	63	87

Рассмотрим, например, результаты измерений с антеннами 10 и 10+2 в пироксенитах. Если считать, что ток не меняется по всей длине антенны, то отношение 10-ти метровой антенны на 12-ти метровой возрастет с учетом возрастания тока должен быть равен $12 \cdot 233 / 10 \cdot 222 = 1,3$ раза. Между тем, в расч. в $100 / 36 = 2,8$ раза. Это легко объяснить тем, что в 10-ти метровой антенне ток линейно падает к концу, а в комбинированной антенне остается постоянным. Тогда отношение сигналов должно равняться отношению площадей прямоугольника со сторонами равными величине тока и длине комбинированной антенны к площади треугольника со сторонами равными величине тока и длине линейной антенны, которое получается равным 2,5, что близко к реально полученному отношению сигналов. Таким образом, предположение о различном распределении тока в линейной и комбинированной антеннах верно. Аналогичные результаты получаются для антенн 10 и 10+2 в перидотитах и для антенн 4,5 и 4,5+2 в пироксенитах и перидотитах. В двух последних случаях, т.к. длины линейной и объемной антенн сопоставимы, нужно учитывать линейный спад тока вдоль объемной антенны. Также был проведен эксперимент по замене линейной 10-ти метровой антенны у приемника комбинированной 10+2 м. Результат получился аналогичным: сигнал возрос в 2,6 раза. Таким способом, почти не изменяя фактической длины антенн (10 м на 10 м + 2 м), у приемника и передатчика, можно добиться возрастания сигнала в 7 раз. Необходимо отметить, что если в формуле (2) выбирать значения тока и действующих длин антенн в соответствии с приведенными рассуждениями, результаты расчета параметра E_0 хорошо совпадают с результатами его практического определения.

Универсальность технологии РВГИ и аппаратуры можно показать на двух примерах ее промышленной реализации. Как отмечалось, при межскважинных исследованиях специальная обработка данных позволяет получать достоверные 3D распределения электрических свойств ($\rho_{\text{ж}}$ и $\epsilon_{\text{ж}}$) и по ним выявлять в межскважинном прост-

ранстве различные геологические неоднородности, изучать изменчивость их свойств в пространстве и во времени.

На рис.7 представлены фрагменты объемной геоэлектрической карты, полученной по данным РВГИ на частоте 156 кГц по сети скважин 400х400 м. Вмещающие мерзлые неизмененные карбонатные породы обладают сопротивлением более 2000 Ом-м, перекрыты 80-ти метровой толщей низкоомных терригенных отложений. В карбонатной толще областями пониженного сопротивления четко выделяется зона субвертикального разлома. Понижение сопротивления известняков в этих зонах связано с повышенной трещиноватостью, глинистостью и, возможно, засоленностью. Строение этих зон на глубине можно проследить по вертикальным разрезам. На разрезе также можно видеть, что изолиниями низких сопротивлений четко выделяется подошва перекрывающих терригенных отложений и «карманы» древней коры выветривания в кровле известняков вблизи разлома.

Возможности РВГИ в горизонтально слоистом разрезе, когда сопротивление песчано-глинистых отложений составляет 10-40 Ом-м, показаны на примере уранового месторождения, отрабатываемого способом подземного выщелачивания (рис.8). На горизонтальном сечении по глубине 118 м отчетливо проявлена определенная закономерность изменения эффективного сопротивления по латерали, которая повторяет контур зоны окисления. При этом наиболее высокими сопротивлениями отмечается западная область участка, где расположена, так называемая, мешковая часть залежи. На вертикальных сечениях областями высокого градиента изменения сопротивления четко прослеживается граница верхнего водоупора и низкоомная область вблизи скважины 27, локализирующая область зоны окисления. Сопостав-

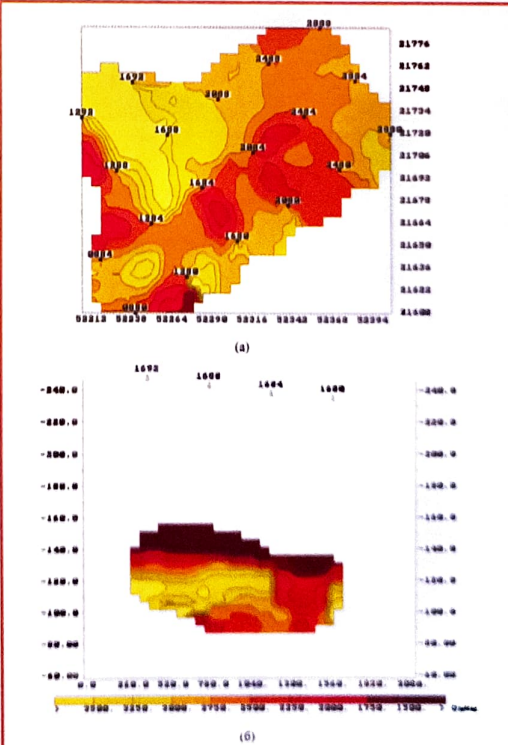


Рис. 7. Фрагмент 3D геоэлектрической карты по данным РВГИ на частоте 156 кГц. Участок Южный (Якутия). а) горизонтальное сечение по отметке 110 м. б) вертикальный разрез по линии скважин 1680 - 1692.

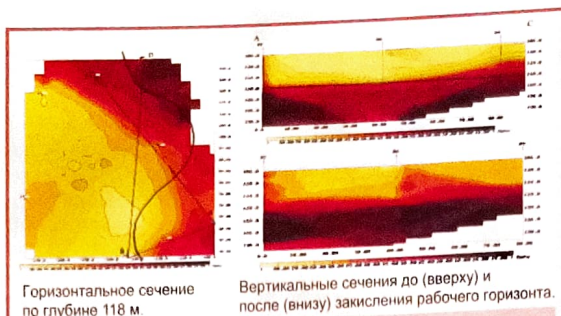


Рис. 8. Фрагменты 3D геоэлектрической карты по данным РВГИ на частоте 312 кГц. Урановое месторождение подземного выщелачивания.

для результаты просвечивания до и после подачи окислителя, можно увидеть, что процесс закисления залежи приводит к общему понижению сопротивления пород более чем в 1,5-2 раза, а изменения в строении областей низкого сопротивления характеризуют распространение процесса закисления в пространстве. Полученная на рабочей частоте 0,312 МГц геоэлектрическая карта свидетельствует, что чувствительность и разрешающая способность РВГИ обеспечивают на базе просвечивания до 50 м условия для проведения мониторинга процесса разработки залежи.

Эффективно применение РВГИ для пространственно-временного мониторинга в геохронологии и нефтяной геологии. Применительно к мерзлым породам распределение ρ_{ϕ} отражает развитие процесса оттаивания или промерзания массива, а распределение ϵ_{ϕ} позволяет детально локализо-

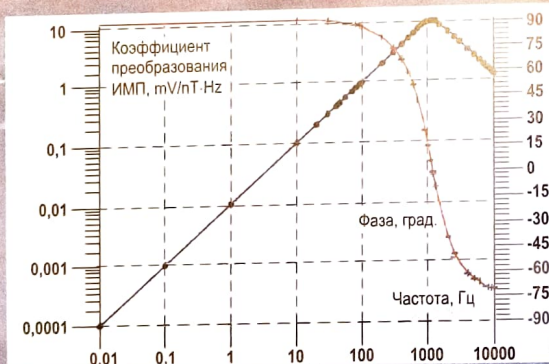
вать участки наибольшего водонасыщения (фильтрации), либо «окна» не промерзшего грунта [12]. В нефтяной геологии - это задача контроля за разработкой залежи [8].

Литература

1. Istratov, V.A., and A.D. Frolov. «Radio wave borehole measurements to determine in situ the electric property distribution in a massif». J. Geophys. Res. - Planets, Vol. 108, No E4, doi: 10.1029/2002 JE001880, April 2003.
2. Борисов Б.Ф., Гуревич Г.Ф., Чигирин И.И. «Радиопросвечивание в анизотропных средах при редкой сети бурения». М.: Труды ЦНИГРИ, вып. 161, 1981, с. 90-96.
3. Борисов Б.Ф., Истратов В.А., Лысов М.Г. Способ радиоволнового межскважинного просвечивания. Патент России №2084930 от 22.07.93.
4. Гуревич Г.Ф. «Применение радиоволнового просвечивания в низкотемпературных геологических разрезах». М.: Труды ЦНИГРИ, вып. 58, 1964, с. 23-38.
5. Истратов В.А., Лысов М.Г., Перекалин С.О., Остапчук С.И. «Перспективы использования радиочастот при инженерно-геологических изысканиях». «Разведка и охрана недр» №3, Москва, «Недра», 2001.
6. Истратов В.А., Лысов М.Г., Чибрикин И.В., Матяшов С.В., Шумилов А.В. «Радиоволновая геоинтроскопия межскважинного пространства РВГИ на месторождениях нефти». Спецвыпуск «Геофизика» 2000. ЕАГО.
7. Истратов В.А., Лысов М.Г., Чибрикин И.В. «Объемное геоэлектрическое картирование подземного пространства методом радиоволновой геоинтроскопии». «Подземное пространство мира» №3, Информационно-издательский центр «ТИМР», 1997.
8. Лях Е.В., Истратов В.А., Перекалин С.О. «Опыт высокочастотных электромагнитных исследований в скважинах со стеклопластиковой обсадкой (СПОТ) для мониторинга процесса разработки нефтяных месторождений». Каротажник, вып. 1(142) Тверь, 2006.
9. Руководство по радиоволновым методам. М.: Недра, 1977.
10. Светов Б.С. и др. Электромагнитные методы разведки в рудной геофизике. М.: Недра, 1966.
11. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Недра, 1961.
12. Фролов А.Д., В.А. Истратов, М.Г. Лысов, С.И. Остапчук. «Радиоволновая геоинтроскопия мерзлых массивов». Материалы второй конференции геохронологов России. Москва, МГУ, 2001.

Датчик индукционный магнитометрический ИМД-100

ООО Специальные геофизические системы



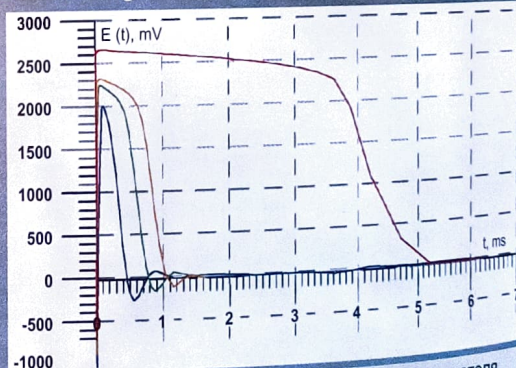
АЧХ и ФЧХ преобразователя ИМП-100

Назначение

Регистрация вертикальной и горизонтальных магнитных компонент dB/dt электромагнитного поля при решении задач наземной электроразведки

Область применения

- Метод частотного зондирования (FDEM)
- Метод зондирования становлением поля (TDEM)
- МТЗ с искусственным источником (CSMT)



Собственные переходные процессы преобразователя ИМП-100 для различных значений энергии возбуждения

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Коэффициент преобразования K_p , mV/nT·Hz, (эффективная площадь)	0.1507 (25 000 м²)	Напряжение питания, В	+12 ⁺² , -12 ⁻³
	0.314 (50 000 м²)	Потребляемый ток, мА, не более	7 (±12 В)
	0.628 (100 000 м²)	Температура окружающей среды	-40°C + 70°C
		Габариты (диаметр/длина), мм	64/900
		Масса датчика, кг, не более:	6

Светов Б. С., Агеев В. В., Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, г. Москва

Последние несколько лет в ЦГЭМИ ИФЗ РАН ведутся активные работы по развитию сейсмoeлектрического (СЭ) метода геофизики, основанного на эффекте второго рода - частичному преобразованию энергии упругого поля в горных породах в электромагнитное (ЭМ). Наиболее распространенным механизмом таких механо-электрических преобразований, присутствующим практически любой горной породе является обратный электроосмос. Под действием сейсмического поля в пористой водосодержащей горной породе возникает относительное движение жидкости и твердого скелета породы. Поскольку вода в породе всегда содержит ионы растворенных солей, то в силу избирательной ионной адсорбции на границе твердой и жидкой фаз жидкость и скелет породы оказываются противоположно заряженными, и их относительное движение приводит к возникновению стороннего электрического тока. Этот сторонний ток порождает ЭМ поле. Наблюдение и интерпретация этого явления может дать геофизику сведения о пористости и проницаемости горных пород, о типе и содержании в ней флюида, о его минерализации. Эти сведения особенно ценны в нефтепромысловой, гидрогеологической и экологической геофизике (в ее полевом и каротажном вариантах).

К настоящему времени, в основном, разработана математическая теория, достаточно адекватно описывающая СЭ эффект 2-го рода в пористой флюидосодержащей среде, и проводятся полевые экспериментальные СЭ исследования. Их целью является: 1) выяснение возможности практической регистрации ЭМ полей, возбуждаемых упругими колебаниями в геологической среде; 2) экспериментальное подтверждение выводов, следующих из разработанной теории СЭ эффекта 2-го рода; 3) разработка основных принципов методики полевых СЭ работ. Для проведения полевых СЭ исследований была сконструирована 24-канальная СЭ станция с одновременной регистрацией 12 сейсмических и 12 электрических каналов. Электрические каналы отличаются гальванической развязкой. Частота опроса каждого канала - 5000 Гц (один дискрет по времени равен 200 мкс). В аппаратуре используются 24-х разрядные АЦП. Предусмотрено поканальное программное задание коэффициентов усиления. Синхронизация записи с моментом удара осуществляется по радиоканалу на удаление не менее 200 м. Моментом удара является касание кувалды (один контакт) и земли или металлической подставки (второй контакт). Ввод данных в компьютер происходит после каждого удара через параллельный порт. От выбираемой длительности записи (от 0,5 до 4с) зависит время передачи данных в компьютер, которое может достигать 10 с. Регистрация следующих ударов невозможна до звукового сигнала, показывающего, что ввод данных в компьютер закончен. В измерителе предусмотрена

программно переключаемая фильтрация (по уровню -3дБ): ФНЧ-90, 180, 360, 720 Гц; ФВЧ - 5, 10, 20 Гц. - и программно отключаемые режекторные фильтры с подавлением не менее, чем на 50 дБ - 50, 100, 150, 200 Гц. Однако использование режекторной фильтрации промышленных частот искажает регистрируемый полезный сигнал, так как эти частоты очень близки к основным частотам полезного сигнала. Гораздо эффективнее оказалось регистрировать фоновую помеху в течении 1-2 с до удара, определять по этим данным амплитуду и фазу промышленной помехи и ее гармоник, и считая эту помеху стационарной хотя бы в течение следующих нескольких секунд вычитать из рабочей записи. При этом полезный сигнал не искажается, а промышленную помеху с гармониками удается подавить в 10-30 раз. Таким образом, алгоритм работы измерителя следующий. В буферной памяти измерителя все время содержатся обновляемые данные фонового поля по всем каналам. В момент прихода синхроимпульса происходит выборка фоновых данных заданной длительности непосредственно перед ударом и вместе с рабочей записью этот массив передается в компьютер. Дальнейшее подавление помех достигается накоплением необходимого количества ударов.

Детальные полевые СЭ исследования были начаты на геофизическом полигоне МГУ в Калужской области (пойма реки Угра).

На первом этапе экспериментальных работ были проведены специальные исследования, направленные на выбор параметров измерительной установки, технологии возбуждения упругих колебаний и СЭ измерений и на изучение помехоустойчивости измерительного тракта и влияния на результаты измерений колебаний электродов в сейсмическом поле. Результаты этих базовых экспериментов приведены в работе [1]. В дальнейшем прием сейсмических сигналов осуществлялся сейсмоприемниками GS-20DX с полосой пропускания до 250 Гц. Для регистрации электрических сигналов использовались заземленные линии МН длиной 1-2 м со свинцовыми электродами. Процесс измерения на каждой точке заключается в расстановке 12-канальной СЭ косы (сейсмоприемники расположены в центре приемных диполей МН) с шагом между каналами 2 - 5 м. Точка удара располагается на таком же расстоянии (2-5 м) от крайнего электрода. От одной точки возбуждения на 12 каналах регистрируется часть СЭ годографа. Если есть необходимость в величинах электрического сигнала позволяют увеличить длину годографа, то пункт возбуждения переносится на длину косы и производится второй цикл ударов и их накопления. В Калужской области максимальные разности установки, при которой еще можно было получить качественные измерения электрического поля, составляли 80 м. При этом измеряемое электрическое поле

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

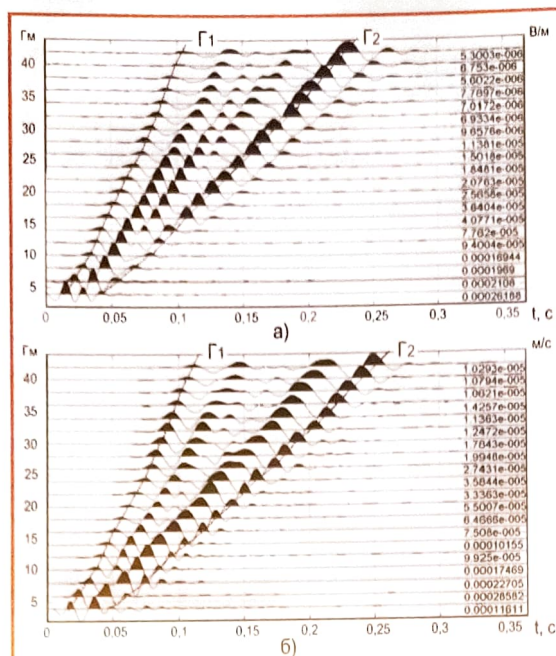


Рис. 1. Сейсмограммы и электрограммы, зарегистрированные в одной из точек экспериментального профиля.

менялось от 200 мВ/м на первых метрах установки до единиц мкВ/м на удалении 40-50 м. На рис. 1 приведен пример зарегистрированных в одной из точек профиля сейсмограммы вертикальной составляющей упругого поля (а) и электрограммы, ориентированной по профилю горизонтальной составляющей электрического поля (б). По горизонтальной оси графиков отложено время t в секундах, отсчитываемое от момента удара. Отдельные трассы сигналов индексированы расстоянием до пункта удара в метрах. Приведены результаты измерений на разносах от 4 до 42 м. В правой части всех графиков выписаны максимальные значения сейсмических или электрических сигналов (соответственно в м/с или в В/м), определяющие вертикальные масштабы на каждой из сигнальных трасс. На этом пикете, на расстоянии 44 м, максимальный сигнал по электрическому полю составлял 5.3 мкВ/м. Из рисунка следует вывод о сложном характере сейсмического (а значит и электрического) поля, свойственном сложно построенной приповерхностной толще геологических разрезов. На малых временах регистрируются рефрагированные волны (ось синфазности G_1), возникновение которых связано с постепенным увеличением с глубиной скорости сейсмических волн в такого рода разрезах, а на больших - интенсивные низкочастотные поверхностные волны (ось синфазности G_2). Промежуточные времена заполнены интерферирующими между собой волнами различного типа. Скорости распространения выделяемых сейсмических волн (V) низкие, у поверхностных волн их величина не превышает 200-300 м/с, а у рефрагированных волн она возрастает с увеличением разноса от 400-500 м/с (на разносах $r \approx 3-4$ м) до 800-1000 м/с (на разносах $r \approx 30-40$ м). Электрические «волны» (точнее - сигналы) достаточно хорошо коррелируются с сейсмическими волнами, что свидетельствует об их вмороженности в упругое поле и, как правило, их

опережают, причем это опережение значительно превышает эффект, связанный с конечной длиной приемных электрических линий. На больших временах корреляция становится затруднительной из-за неодинаковой интерференции упругих и электрических волн и более низкого отношения сигнал/помеха.

Аналогичные эксперименты были поставлены и в других регионах, отличающихся по геологии - Кольском полуострове, в Татарии, в Саратовской области. В этих местах интенсивность электрического поля была в несколько раз меньше. Поэтому максимально достижимыми разносами были 10-20 м при накоплении 20-40 ударов и последующей изощренной обработки сигналов для подавления промышленных помех.

Основным интерпретационным параметром является СЭ передаточная функция $W=E/V$ (В·с/м²), представляющая собой отношение регистрируемых в одной и той же точке напряженности электрического поля и скорости механического смещения, которую можно получать на каждом разносе для разных типов вмороженных волн.

Следующим важным этапом СЭ исследований стали измерения, выполненные над различными геологическими неоднородностями с целью выявления зависимостей СЭ полей от различных геологических, петрофизических и других факторов. Один из таких примеров приведен в нашей работе [1]. В результате обработки измеренных данных было изучено поведение СЭ передаточной функции $W=E/V$ (В·с/м²) по профилю. Передаточная функция закономерно изменяется по профилю в соответствии с геологическими и геофизическими данными. В частности, на разрезе, полученном по данным ЗСБ, уверенно выделяется слой глин на глубине 20 м, являющийся водоупором. Этот слой прерывается врезом палеодолины. Затем глинистый слой появляется снова. Удельное сопротивление верхней части разреза возрастает справа налево от 50 до 500 Ом·м. Этот рост объясняет увеличение передаточной СЭ функции вплоть до края палеодолины. Далее происходит ее резкое падение, хотя удельное сопротивление продолжает возрастать. Это связано с тем, что в месте размыта глинистого водоупора резко меняются гидрогеологические условия. Фактор уменьшения влажности становится определяющим и более значимым для сейсмoeлектрики по сравнению с фактором роста удельного сопротивления. Все это говорит о том, что СЭ измерения несут независимую содержательную информацию.

Было также установлено закономерное существенное ослабление СЭ эффекта по мере приближения к реке. Так, по одному из профилей приближение к пойме реки Угра СЭ уменьшает W в 30 раз по сравнению с фоновыми значениями. Если рассматривать зависимость СЭ эффекта от удельной поверхности порового пространства, а не от общей пористости, то в случае хорошо промытых прибрежных песков их пористость будет велика, а удельная поверхность порового пространства, которая обуславливает СЭ эффект, мала, что согласуется с полевыми данными. Можно отметить еще одну локальную аномальную область, которая характерна тем, что выделяется только на разносах 24 м и более, а на малых разносах никак не проявляется.

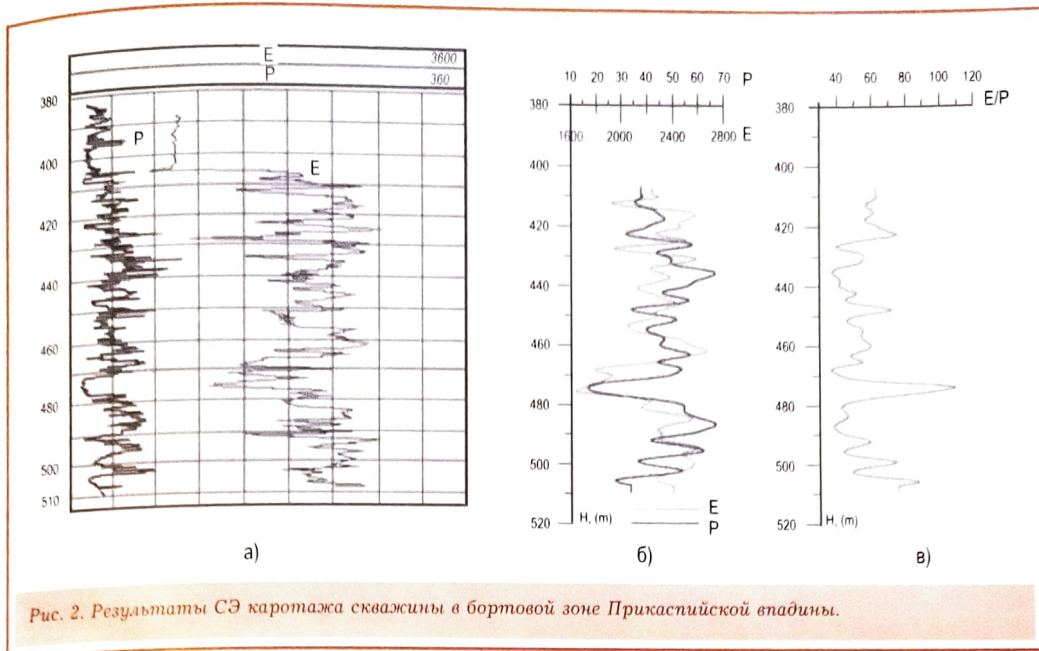


Рис. 2. Результаты СЭ каротажа скважины в бортовой зоне Прикаспийской впадины.

Пространственно к этому месту приурочен край слоя глины на глубине порядка 20 м, образованный врезом палеодолины. Такая привязка к аномалообразующему объекту на глубине 20 м позволяет надеяться на то, что глубинность СЭ исследований достаточно большая и не определяется только поверхностным слоем.

Другой экспериментальный участок характеризовался двумя заметными неоднородностями, с которыми можно было коррелировать наблюдаемые СЭ эффекты. Одна представляла из себя песчано-гидратную линзу в первых 3-4 м разреза в моренных суглинках, вторая более глубокая неоднородность - врез в известняки на глубине 15-25 м, заполненный песчано-глинистыми моренными отложениями. Результатом эксперимента явились следующие закономерности: 1) такие характеристики сейсмического поля, как скорость прямой продольной волны и интенсивность первых наиболее значимых волн определяются поверхностной неоднородностью; 2) электрическое поле и СЭ передаточная функция практически не меняются при пересечении поверхностной песчаной линзы и закономерно возрастают в 4-5 раз вдоль профиля при погружении кровли известняков с 15 м до 25 м. В этом эксперименте важным является возможность качественно оценить глубинность наземных СЭ исследований. То, что маломощная поверхностная неоднородность не явилась определяющей для сейсмoeлектрики, а наблюдается уверенная связь с глубиной до известняков, подтверждает ранее сделанный вывод: глубинность реализованного варианта СЭ исследований составляет, по крайней мере, первые десятки метров. Наблюдаемый рост СЭ передаточной функции может быть, как и на первом участке, обусловлен увеличением поверхности порового пространства при переходе от песков к суглинкам.

Особые надежды на эффективность применения СЭ метода можно ожидать от скважинных исследований. На рис. 2 представлены результаты СЭ каротажа скважины [2], расположенной в бортовой зоне Прикаспийской впадины. Измерения проводились на фиксированной частоте 9,5 кГц, длина зонда 0,5 м. Возбуждение

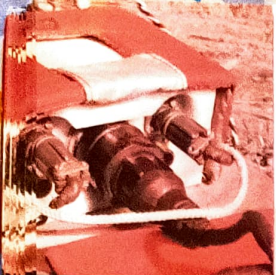
упругого поля осуществлялось магнитострикционным излучателем. На рис. 2а показаны непосредственно зарегистрированные кривые давления и напряженности электрического поля. Сигнал по электрическому полю составляет сотни мкВ и многократно превышает уровень помех. В обсаженном металлической колонной интервале скважины (до глубины 410 м) он резко уменьшается. В открытом интервале акустическое Р и электрическое Е поля - дифференцированы и, в основном, коррелируются между собой. На рис. 2б изображены те же графики, усредненные низкочастотным фильтром шириной 5 м. Видно, что на отдельных интервалах корреляция акустического и электрического сигналов нарушается, что свидетельствует о том, что они дают независимую информацию. На рис. 2в приведены графики сейсмoeлектрической передаточной функции (отношение Е к Р), значения которой, как следует из теории и лабораторных экспериментов, пропорциональны пористости горных пород. Графики Е, Р и Е/Р, в целом, отражают особенности геологического разреза, известные по кернам и данным других каротажных методов. В частности, повышенные значения передаточной функции в интервале глубин 470-480 м приурочены к интервалам наиболее трещиноватых и кавернозных известняков. Этот интервал совпадает с областью пониженных значений кажущихся сопротивлений, полученных по данным электрического каротажа. Достоверность полученных результатов подтверждена многократными повторными измерениями.

Эти работы подтвердили, в основном, разработанную теорию СЭ явлений и перспективы применения сейсмoeлектрики при решении инженерных, гидрогеологических и рудных задач.

Литература

1. Светов Б. С., Агеев В. В., Александров П. Н. и др. Некоторые результаты экспериментальных полевых сейсмoeлектрических исследований // Геофизика, 2001, №6.
2. Б. С. Светов, В. В. Агеев, О. А. Агеева и др. Сейсмoeлектрические методы разведки и каротажа // Геофизика, 2004, №1.

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ



Применение электроразведочных методов в комплексе с сейсморазведкой в нефтегазовой геофизике

Соколова И.П., ФГУП «НВ НИИГГ», г. Саратов

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Исторически сложилось так, что ведущее место в геологоразведочном процессе при решении различного рода задач нефтяной и газовой геофизики принадлежит сейсморазведке. И это справедливо, поскольку здесь ни один из существующих на сегодняшний день геофизических методов не может сравниться с ней по информативности и достоверности полученных материалов. Однако, практика геофизических работ, особенно в районах со сложным геологическим строением, показывает, что интерпретация волнового поля, как правило, многовариантна и допускает существование большого количества равноценных по достоверности моделей строения изучаемых территорий. Применение сейсморазведки, в основном, направлено на выявление структурных форм, определяющих наличие замкнутой ловушки углеводородов (УВ). Однако значительная часть поисковых и разведочных скважин не вскрывает залежей УВ из-за недостатка достоверных сведений о возможной нефтегазоносности выявленных структур и сведений о контурах уже выявленных залежей. Особенно низка эффективность геологоразведочных работ при поисках залежей углеводородов в ловушках неантиклинального типа. Это объясняется не только низкой точностью выявления соответствующих структурных форм по сравнению с антиклинальными структурами, но и отсутствием надежных критериев продуктивности самих ловушек. В связи с этим одна из актуальных проблем развития геофизических методов - создание комплексных технологий, обеспечивающих выявление ловушек разных типов и прогноз наличия в них углеводородов. Снизить степень неоднозначности полученных результатов можно только за счет привлечения материалов других геофизических методов, одним из которых является электроразведка.

В силу физических особенностей взаимодействия электромагнитного поля с геологической средой данные электроразведки позволяют оценить распределение петрофизических параметров отложений, слагающих изучаемый разрез, как по глубине, так и по латерали, что существенно повышает информативность геофизических данных. Интерпретация электроразведочных материалов желательно проводить в комплексе с данными других геофизических методов, и, прежде всего, сейсморазведки, что позволяет существенно снизить степень неоднозначности геофизических прогнозов. Причем комплексирование должно осуществляться не только на этапе сопоставления полученных материалов, а на всем протяжении работ. Обязательным условием эффективного комплексирования является отработка полевых сейсмических и электроразведочных профилей по единой сети, что позволяет в дальнейшем осуществить совместную интерпретацию данных уже на начальном этапе решения обратной задачи каждого метода.

В настоящее время существует большое количество методик электроразведки, ориентированных на решение различных геологических задач и отличающихся идеологическими подходами к интерпретации регистрируемых параметров

(кажущегося электрического сопротивления, вызванной поляризации и т.д.), которые могут быть использованы на различных этапах геологоразведочного процесса. На региональном этапе, как правило, применяются электроразведочные методы МТЗ и ЗСБ, дающие представление о распределении физических неоднородностей и наличии опорных геофизических границ на глубинах до нескольких километров. На поисково-разведочной стадии применяются электроразведочные методики ЗСБ, ЗС-МП, ВП, ВРЭ-ВП, ДНМЭ и др., обеспечивающие детальное изучение геологического разреза. Здесь появляется возможность не только выделить в разрезе участки возможного скопления углеводородов, но и дать им более точную глубинную (стратиграфическую привязку), спрогнозировать тип предполагаемой ловушки и определить контур залежи УВ.

Решение геологических задач, связанных с прогнозом нефтегазоносности, обеспечивается теми изменениями физических свойств среды в области залежи углеводородов (УВ), которые проявляются в геоэлектрических параметрах разреза. Залежь УВ можно рассматривать как локальный аномальный объект по сопротивлению и поляризуемости, расположенный внутри горизонтально-слоистого разреза. Наиболее характерными электроразведочными признаками присутствия углеводородов являются повышение сопротивления коллектора в зоне углеводородонасыщения, высокая проводимость в приконтактных участках, интенсивные аномалии вызванной поляризации и кальцитизации над залежью. Необходимо отметить, что аномалии вызванной поляризации и сопротивления могут быть связаны не только с нефтегазоносностью, но и с другими физико-геологическими причинами. Ранжирование электроразведочных аномалий выполняется на основе построения согласованной физико-геологической модели изучаемого разреза с использованием всего комплекса геолого-геофизической информации, имеющейся на данной территории.

В ФГУП «НВ НИИГГ» под руководством д.т.н. Смилевца Н.П. разработана и доведена до промышленного использования технология построения согласованной физико-геологической модели среды для прогноза ее нефтегазоперспективности на основе комплекса данных сейсмо- и электроразведки [1,2]. Технология позволяет совместить распределение любых геоэлектрических параметров с временным или глубинно-динамическим сейсмическим разрезами, изучить распределение сейсмогеологических и геоэлектрических неоднородностей по латерали и глубине, и выделить потенциально продуктивные объекты с определением типа предполагаемых ловушек углеводородов.

Совместное рассмотрение материалов двух независимых геофизических методов (сейсмо- и электроразведки) позволяет выделить в разрезе и стратифицировать (с учетом скважинных данных) единые сейсмогеоэлектрические комплексы, различающиеся по своим физическим характеристикам, определить рельеф кровли опорных сейсмо-геоэлектрических комплексов (кристал-

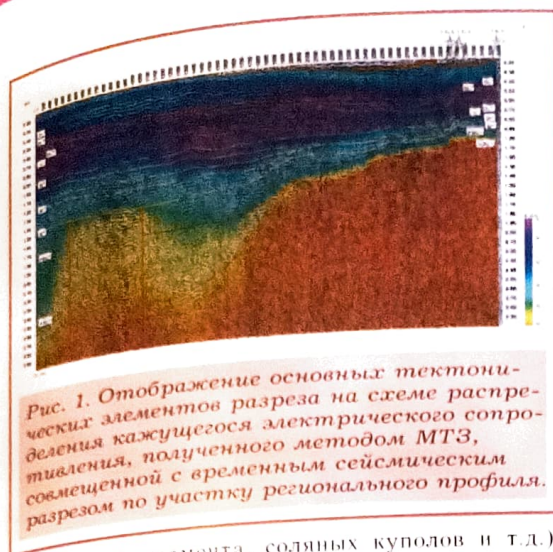


Рис. 1. Отображение основных тектонических элементов разреза на схеме распределения кажущегося электрического сопротивления, полученного методом МТЗ, совмещенной с временным сейсмическим разрезом по участку региональный профиль.

литического фундамента, соляных куполов и т.д.), проследить изменение толщин отдельных комплексов, составляющие основу согласованной модели, выделить зоны предполагаемых тектонических нарушений (рис.1). В рамках согласованной сейсмогеоэлектрической модели для заданного стратиграфического интервала выполняется расчет значений физических параметров (прогнозных значений интервальных скоростей и продольного электрического сопротивления), на основе которого осуществляется прогноз литологического состава изучаемого комплекса пород и характера их флюидонасыщения.

Используемая в данной технологии авторская методика прогноза нефтегазоносности основана на различной чувствительности скорости и сопротивления к петрофизическим свойствам отложений и характеру их флюидонасыщения [3,4]. Необходимо отметить, что электроразведка является единственным геофизическим методом, в регистрируемом параметре которого (продольном электрическом сопротивлении) эффект от залежи УВ, обладающей бесконечно высоким сопротивлением, на порядок, а то и более, превосходит аномальные эффекты в других геофизических полях. Если интервальная скорость, в основном, реагирует на изменение петрофизических свойств отложений, то удельное электрическое сопротивление в значительной степени зависит от характеристик флюида, заполняющего поровое пространство породы. При отсутствии в разрезе залежи углеводородов графики интервальных скоростей и продольного сопротивления для определенного стратиграфического интервала разреза ведут себя «синфазно», реагируя, в основном, на литофациальную изменчивость отложений (рис.2а). В продуктивных интервалах разреза отмечается инверсия графиков продольного сопротивления и прогнозных значений интервальных скоростей: уменьшение значений интервальных скоростей, обусловленное разуплотнением пород (улучшением их коллекторских свойств), и увеличение значений кажущегося продольного сопротивления, связанного с присутствием в разрезе флюида (нефти или газа, рис.2б). Это обстоятельство положено в основу способа, позволяющего учесть и в дальнейшем вычлечь из наблюдаемых значений продольного сопротивления его «литологическую» составляющую (связанную прямо пропорционально со скоростью) и изучать ту его часть, которая характеризует характер флюидонасыщения и названа авторами комплексным сейсмоэлектроразведочным параметром (КП). Положительные значения КП, превышающие фоновые в 2-5 раз,

считаются аномальными и свидетельствуют о возможном присутствии в разрезе углеводородов. Совместное рассмотрение сейсмического разреза и схем распределения КП позволяет выделить участки, перспективные для обнаружения залежей УВ с прогнозом типа предполагаемой ловушки.

Многолетний опыт применения методики прогнозирования нефтегазоносности доказал ее высокую эффективность на различных стадиях изучения территорий. Проведенные исследования на месторождениях в различных нефтегазоносных провинциях показали повсеместное соответствие аномально высоких значений КП продуктивным интервалам разреза, вскрытым скважинами, и позволили заметить новые перспективные для обнаружения залежей УВ объекты как структурного, так и неструктурного типа (ловушки, связанные с зонами выклинивания, литофациальных замещений, рифогенными постройками и др., рис.3). При наличии кондиционной сети электроразведочных наблюдений существует возможность изучения пространственного положения залежи в любом стратиграфическом интервале разреза, что способствует оптимизации мест заложения поисково-разведочных скважин. Данная методика успешно используется при разбуривании по степени перспективности подготовленных под бурение сейсморазведочных структур, выявлении в разрезе и прогнозе нефтегазоносности ловушек неантиклинального типа, определении контуров распространения залежей углеводородов на уже открытых месторождениях. Выполненные по данной методике в различных нефтегазоносных регионах России и Ближнего Зарубежья прогнозные оценки имеют высокий коэффициент подтверждаемости последующим бурением. Хорошие результаты дает использование дополнительной информации о распределении кажущейся поляризуемости, регистрируемой электроразведочным методом ВП

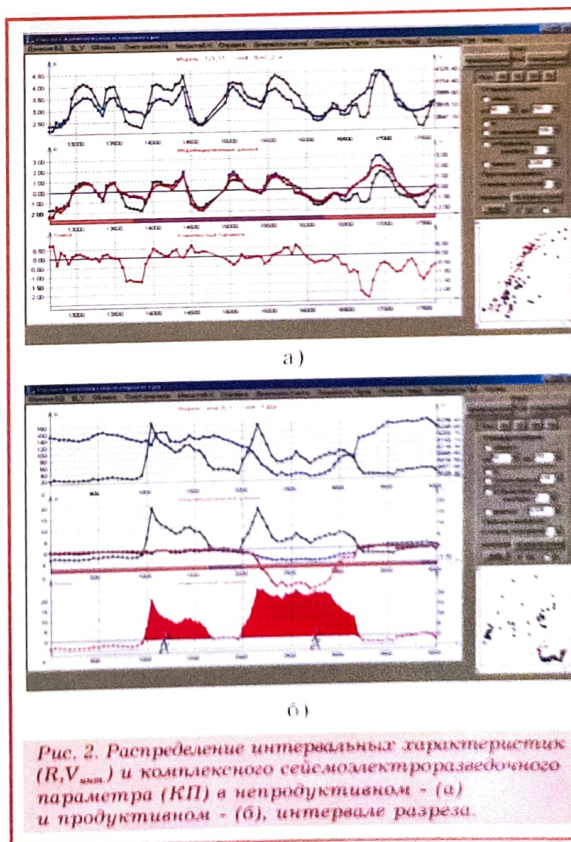


Рис. 2. Распределение интервальных характеристик ($R, V_{\text{инт}}$) и комплексного сейсмоэлектроразведочного параметра (КП) в непродуктивном - (а) и продуктивном - (б), интервале разреза.

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

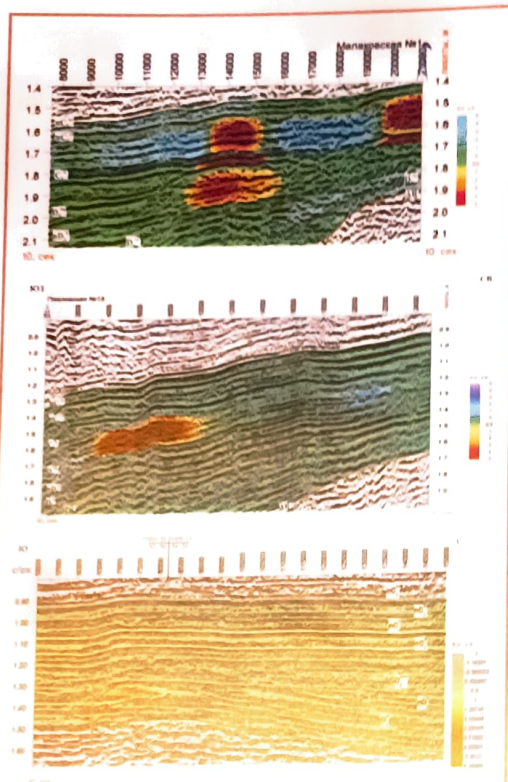
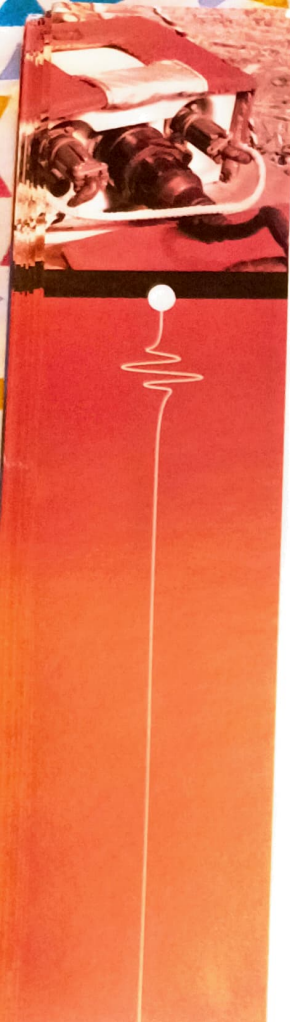


Рис. 3. Выделение перспективных объектов различного типа на основе комплекса сейсмо-электроразведочных данных.

в различных модификациях, аномальные значения которой также являются косвенным показателем наличия углеводородов.

Повышение точности и достоверности выполненных по электроразведочным данным прогнозов может быть достигнуто путем комплексирования с результатами динамической интерпретации материалов сейсморазведки 2D и 3D, содержащих в себе информацию о пространственном положении, геометрии, литолого-фациальном составе и фильтрационно-емкостных свойствах пластов-коллекторов. Такой подход к комплексированию разнородной геофизической информации, имеющей различную природу и разрешающую способность, позволяет локализовать объекты, оценить перспективы их нефтегазоносности и, как уже было отмечено выше, оптимизировать местоположение разведочных и эксплуатационных скважин.

Литература

1. Смилевцев Н.П. Новый подход к комплексной интерпретации геофизических данных. Геофизика, №6, 1997г.
2. Патент на изобретение №2155977 Способ геофизической разведки. Авторы: Смилевцев Н.П., Соколова И.П., зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации, г.Москва, 10.09.2000.
3. Патент на изобретение №2154847 Способ геофизической разведки при поисках нефтегазовых месторождений. Авторы: Смилевцев Н.П., Соколова И.П., зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации, Москва, 20.08.2000.
4. Смилевцев Н.П., Соколова И.П., Фефер О.М., Кузнецов А.А. Поиск нефтегазоносности на основе комплексной интерпретации данных сейсмо-, электро- и гравитразведки // ИВ НИИГГ, г.Саратов, 1992г. Деп. в ВИЗМС № 1033-МГ92.



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



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

Система интерпретации данных и основные направления применения нестационарных электромагнитных исследований на юге Сибирской платформы

Агафонов Ю.А., Поспеев А.В., Суров Л.В., ФГУНПП «Иркутскгеофизика», г. Иркутск

В настоящее время большое внимание уделяется повышению разрешающей способности нестационарных электромагнитных зондирований. Создание новой многоканальной регистрирующей аппаратуры и оригинальных способов обработки сигналов дало возможность повысить пространственно-временную плотность наблюдений. Стала возможной эффективная организация густой сети наблюдений на профилях и площадях. Увеличилась временная плотность сигналов за счет регистрации с арифметическим шагом дискретизации. Одновременно с этим сложились благоприятные условия для развития алгоритмов интерпретации результатов зондирований.

Процесс интерпретации данных ЗСБ проходит в два этапа. На первом этапе осуществляется качественный анализ данных (Imaging) - просмотр кривых в разных трансформациях, построение разрезов кажущихся сопротивлений и проводимостей. Как правило, проведение экспрессной качественной интерпретации играет важную роль в процессе обработки результатов и может отразиться на правильности их геологического истолкования. Качественный анализ данных не требует трудоемких вычислений, может выполняться непосредственно в полевых условиях. Второй этап обработки результатов работ подразумевает проведение количественной интерпретации, т.е. решение обратной задачи путем итерационного моделирования (Inversion). Как показывает опыт, затраты времени на этом этапе гораздо больше, чем при качественной интерпретации и поэтому подбор геоэлектрической модели обычно проводится в камеральных условиях.



Рис. 1. Схема блока интерпретации в программном комплексе станции «Пикет».

При разработке интерпретационного модуля в программном комплексе телеметрической электроразведочной станции «Пикет» (см. стр. 36) была поставлена задача - создание специализированной системы обработки и интерпретации, которая сочетает в себе мощные современные математические алгоритмы, средства визуализации и доступный унифицированный интерфейс пользователя. Было принято решение классифицировать решаемые задачи и разделить блок на две программы. Место этих программ в комплексе отображено на рис. 1.

Программа PROFILE

Программа качественной интерпретации и

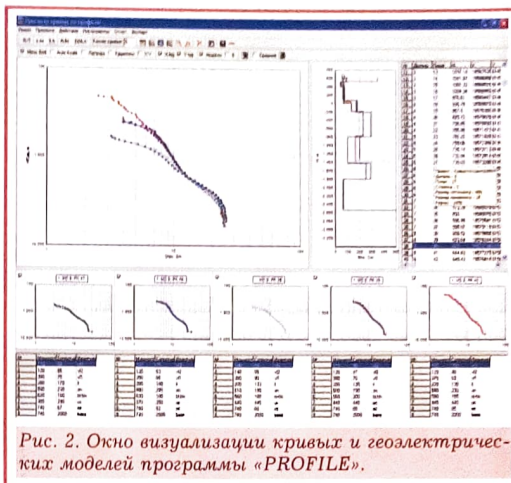


Рис. 2. Окно визуализации кривых и геоэлектрических моделей программы «PROFILE».

визуализации «PROFILE» позволяет проводить экспрессную качественную интерпретацию результатов, решает следующие задачи:

- просмотр геоэлектрических моделей и трансформаций сигнала в профильном представлении (рис. 2);
- экспрессная визуализация диаграмм, разрезов и карт (рис. 3);
- расчет дифференциальной и аномальной проводимостей;
- построение гистограмм распределения проводимости;
- подготовка файлов для визуализации в специализированных программах.

Схема расчета дифференциальных трансформаций может быть представлена в следующем виде: ЭДС с частым арифметическим шагом дискретизации по времени $\rightarrow$ расчет трансформанты кажущейся проводимости $S_t(H_t) \rightarrow$ дифференцирование проводимости, расчет дифференциальной электропроводности ΔS с различным шагом по глубине:

$$\Delta S_i = \frac{(S_{i+1} - S_{i-1})}{(H_{i+1} - H_{i-1})}$$

Методика построения дифференциальных разрезов кажущейся электропроводности применяется в программном комплексе станции «ПИКЕТ» наряду с классическими геоэлектрическими разрезами, построенными по результатам инверсии.

Изучение аномальной части поля в трансформации $S_t(H_t)$ также представляет большой интерес при изучении геоэлектрического строения осадочного чехла. На основе кривых в трансформации $S_t(H_t)$ возможно эффективное применение методики аномальных остатков сигналов, когда из практических кривых $S_t(H_t)$ с частым арифметическим шагом вычитается теоретическая кривая, которая соответствует некоторой референтной модели среды: $S_A = S_H - S_0$, где S_A - аномальный остаток сигнала, S_H - практическая кривая в трансформации $S_t(H_t)$, S_0 - фоно-

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

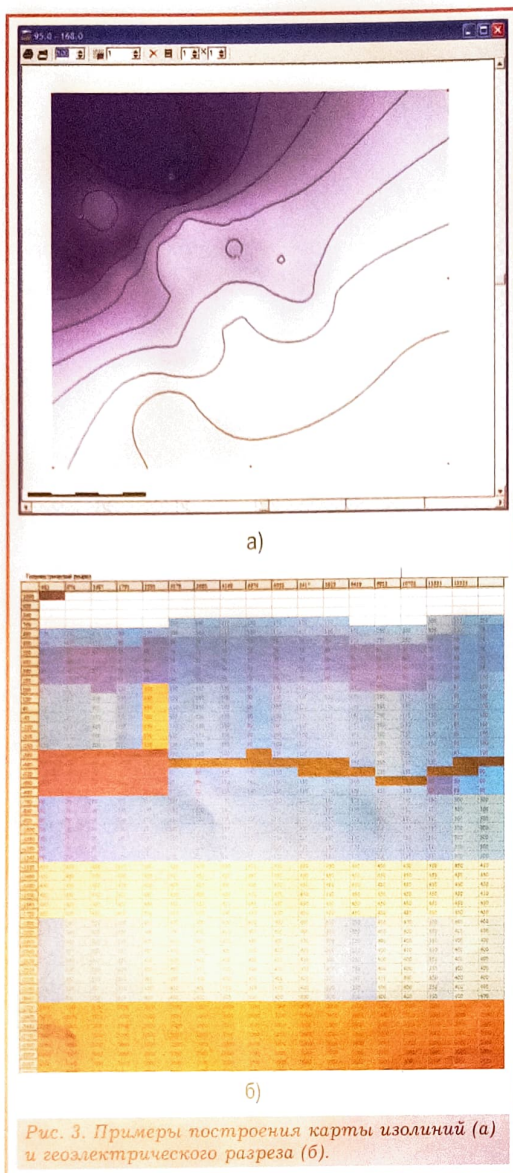


Рис. 3. Примеры построения карты изолиний (а) и геоэлектрического разреза (б).

вая кривая $S_d(H_r)$. При расчете кривые интерполируются на единую временную сетку глубин с арифметическим шагом. В качестве фоновой кривой может быть использована также и практическая кривая, зарегистрированная на ранее изученном участке. Выявление аномалий повышенной или пониженной проводимости по отношению к фоновой позволяет выделять электрические горизонты и неоднородности. Анализ аномальных остатков сигналов позволяет сделать выводы об изменении или неизменности геоэлектрической ситуации в пределах профиля или площади. Для более четкой детализации геоэлектрической среды и определения положения осей проводимости в разрезе может быть применено дифференцирование аномальных остатков S_A по глубине, расчет ΔS_A :

$$\Delta S_A = \frac{(S_{A(i+1)} - S_{A(i-1)}))}{(H_{i+1} - H_{i-1})}.$$

Информативность сигнала в представлении ΔS_A дополняет результаты расчетов $S_d(H_r)$, ΔS и S_A . В некоторых ситуациях позволяет выделять слабоконтрастные горизонты с повышенной или пониженной проводимостью.

Программа MODEL

Программа MODEL предоставляет возмож-

ности для решения задач по двум направлениям: 1 - количественная интерпретации результатов нестационарных электромагнитных зондирований, 2 - математическое моделирование электромагнитных откликов. Программа реализована на основе алгоритмов расчета прямых и обратных задач разработанных в Институте геофизики СО РАН (Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Могилатов В.С.). Среди особенностей можно выделить использование высокоточных математических алгоритмов и эффективную систему представления данных в площадном и профильном представлении (карт и разрезов), геоэлектрических моделей и кривых зондирований в различных трансформациях (рис.4).



Рис. 4. Интерфейс программы количественной интерпретации «MODEL».

Одномерные прямые задачи для установок «петля-петля», «петля-линия» и «линия-петля» составляют основу модуля для расчета сигналов от заданных геоэлектрических моделей при интерпретации и моделировании. Для установки «петля-петля» реализована автоматическая одномерная обратная задача, которая позволяет производить подбор геоэлектрических параметров, как для единичного зондирования, так и для группы приемных петель, зарегистрированных при одном положении источника.

Количественная интерпретация данных ЗСБ проводится, как правило, в рамках одномерной инверсии с закреплением глубин целевых горизонтов разреза по данным сейсморазведки и бурения. Это обеспечивает минимизацию влияния принципа эквивалентности и позволяет оценивать геоэлектрические параметры с погрешностью не более 2 - 3%.

Возможности процедуры расчета сигналов для установки «петля-петля» позволяют одновременно рассчитывать первые производные по параметрам одномерной модели: проводимостям и глубинам залегания границ слоев. Данный алгоритм является основой для построения информационной матрицы, расчета доверительных интервалов, исследования модельной эквивалентности и решения обратной задачи.

Реализовано интерактивное представление геоэлектрических моделей по линии профиля в виде цветных геоэлектрических разрезов и их динамическое обновление при изменении сопротивления или мощности слоев. В данном окне осуществляется выбор одного или группы пикетов для редактирования, просмотра сигнала и интерпретации.

Площадное представление установок зондирования осуществляется при помощи географической информационной системы. Программа

предоставляет возможность создания модельных сетей наблюдений для массового расчета теоретических сигналов. При этом возможно создать виртуальную профильную или площадную расстановку с любыми параметрами (размер, тип приемника и источника - линия или петля, взаимное расположение).

Реализован расчет сигналов для моделей сложнопостроенных сред с учетом 3D неоднородностей для установки «петля-петля» (вычислительный модуль Cupol, Антонов Е.Ю., Эпов М.И.). Геологические объекты представляются в виде формализованных 3D моделей: купол, конус, усеченный купол, пластина, симметрично выклинивающаяся вставка, пластина или выклинивающийся пласт. Данный набор объемных геометрических объектов позволяет качественно описать реальные геологические образования. Система работы с массивами модельных сигналов позволяет эффективно производить массовые расчеты и сохранять результаты для большого числа приемников и источников поля.

Разработана программа расчета нестационарной ЭДС для установок «петля-петля» и «петля-линия» в горизонтально-слоистой среде с учетом поляризационных свойств разреза. Комплексное сопротивление среды описывается моделью Cole-Cole (σ , η , t , c).

Создана система задания и записи в базу данных стратиграфических идентификаторов слоев геоэлектрических моделей для корректного анализа и визуализации результатов интерпретации в профильном и площадном представлении. Порядковый номер слоя не является опорным признаком и может меняться на разных пунктах наблюдения, поэтому применение уникальных идентификаторов слоев позволяет существенно оптимизировать процесс интерпретации и визуализации.

Результаты работ методом ЗСБ при изучении геоэлектрического строения юга Сибирской платформы.

Предприятие «Иркутскгеофизика» имеет весьма значительный опыт решения различных геологических задач методами электромагнитных зондирований. Геоэлектрическое строение осадочного чехла юга Сибирской платформы характеризуется как весьма благоприятное для изучения методами нестационарных зондирований. Высокое электрическое сопротивление плотных вмещающих пород осадочного чехла значительно отличается от сопротивления горизонтов-коллекторов. Насыщение коллекторов высокоминерализованными флюидами обуславливает четкую корреляцию электрических свойств горизонтов и их емкостных параметров, а также позволяет оценивать тип флюида.

В настоящее время можно выделить три базовых направления электроразведочных работ методом ЗСБ на юге Сибирской платформы:

1. Методика профильных зондирований. Основная задача - изучение строения осадочного чехла на этапе регионального прогнозирования зон коллекторов, разведка участков перспективных на углеводородное сырье (рис. 5). Анализ характера распределения аномальных зон повышенной или пониженной электропроводности в осадочном чехле позволяет выделять горизонты с улучшенными коллекторскими свойствами. Статистическая обработка результатов интерпретации при исследованиях месторождений дает возможность вероятностного прогноза

параметров пластов-коллекторов. По сравнению с электроразведочными станциями предыдущих поколений, телеметрическая аппаратура, оснащенная GPS-приемниками в комплексе с эффективными программными средствами, реализованными на базе географических информационных систем, позволяет вести профильные работы с частым шагом наблюдения, не снижая производительности. К существенным достоинствам метода в данной модификации добавляется относительно низкая стоимость работ и экспрессность получения качественных результатов.

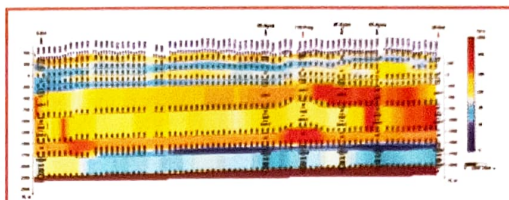


Рис. 5. Фрагмент геоэлектрического разреза на Присяно-Ленском опорном профиле.

2. Площадные системы наблюдения. Применение площадных зондирований весьма актуально при изучении объектов со значительной изменчивостью свойств по латерали, оконтуривании локальных неоднородностей, поисках зон структурных нарушений, картировании границ выклинивания коллекторов. В геоэлектрическом строении осадочного чехла юга Сибирской платформы локальные ограниченные по простиранию горизонты распространены повсеместно. Часто с такими объектами связаны коллекторы в галогенно-карбонатных отложениях с аномально высокими пластовыми давлениями (АВПД). В данной ситуации качественный результат зондирований не может быть получен без организации площадных наблюдений с различным расположением источников и приемников поля. Примером успешного решения геологических задач при

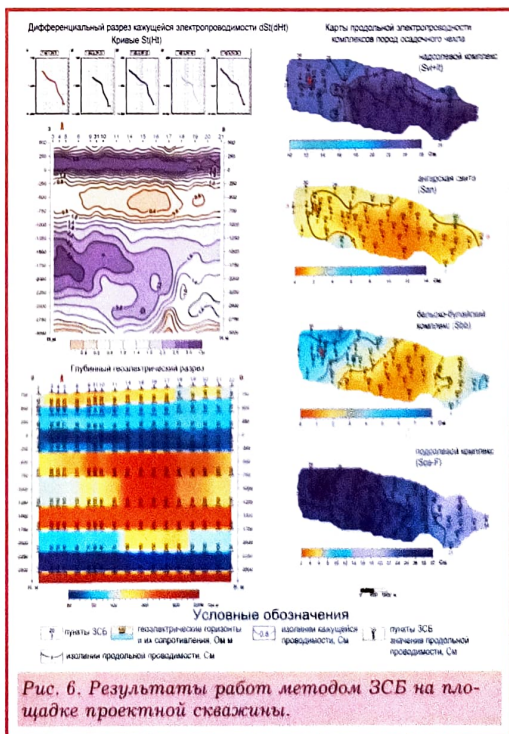


Рис. 6. Результаты работ методом ЗСБ на площадке проектной скважины.

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ



использовании площадной технологии являются работы на Ковыктинском газоконденсатном месторождении и прилегающих территориях.

Прогнозирование условий проходки глубоких скважин - как на этапе проектирования, так и в процессе бурения стало возможным с внедрением новой технологии электромагнитных зондирований с телеметрическими регистрирующими системами. Специфика данной задачи осложняется наличием мощного источника помех - электрогенераторы и силовые установки, используемые в процессе бурения. Ситуации со значительным усложнением технологии бурения, увеличением затрат имеют место в случае наличия в разрезе горизонтов с АВПД, а также зон интенсивного поглощения бурового раствора. Результаты работ методом ЗСБ позволяют выделять интервалы разреза в которых могут быть встречены коллекторы, оценивать их насыщение и прогнозировать возможные осложнения.

По результатам работ с повышенной пространственной плотностью на площадках проектных скважин глубокого бурения строятся детальные геоэлектрические разрезы и послойные карты проводимости (рис. 6).

3. Мониторинговые наблюдения по сети с

повышенной пространственной плотностью наблюдений. Пример решения новых геоэкологических задач - мониторинговое изучение осадочного чехла в районе крупных промышленных комбинатов, где происходит интенсивное техногенное взаимодействие в системе окружающая среда - горизонты-коллекторы (источники сырья) - производство - резервуары для утилизации отходов. Реализованные алгоритмы подавления помех позволяют получать качественный материал в районах, изучение которых методами электроразведки ранее было крайне затруднено или невозможно. Повышенная пространственно-временная плотность наблюдения, которая достигается при использовании телеметрических систем регистрации, обеспечивает увеличение объемов регистрируемых данных, позволяет существенно улучшить отношение сигнал-помеха и повысить точность оценки геоэлектрических параметров. При этом не снижается производительность работ и их технологичность. Получаемые по результатам ЗСБ карты и разрезы позволяют представить объемную геоэлектрическую модель, следить за эволюцией коллекторов во времени и изменением их флюидонасыщения.

Телеметрическая электроразведочная станция «ПИКЕТ»

Агафонов Ю.А., Поспеев А.В., Шарлов М.В., ФГУНПП «Иркутскгеофизика», г. Иркутск;
Стефаненко С.М., НПП «СибГеоСистемы», г. Новосибирск

Введение

Нестационарные электромагнитные зондирования показали свою высокую эффективность и заняли достойное место в комплексе работ по изучению строения осадочного чехла наряду с сейсморазведкой и другими методами структурной геофизики. Особое значение электроразведка имеет в сложных геологических условиях, где невозможно получение однозначных геологических результатов с применением сейсмических методов. Практика проведения исследований в Восточной Сибири за последние 2-3 десятилетия наглядно демонстрирует массу примеров успешного решения непростых задач при использовании комплекса методов наземной геофизики.

Возможности аппаратуры нового поколения позволяют с высокой производительностью и качеством решать традиционные задачи по изучению геоэлектрического строения осадочного чехла и кристаллического фундамента, выделению зон коллекторов на этапах региональных и поисковых исследований. Кроме того, появилась возможность решения геологических, геоэкологических и инженерных задач в условиях высокого уровня промышленных электромагнитных помех, которые присутствуют в промышленных районах.

Развитие электромагнитных методов с использованием контролируемых источников поля определяется совершенствованием, как средств регистрации, так и способов обработки данных.

В данной статье рассматривается одно из перспективных направлений развития метода зондирования становлением поля, основой которого является создание высокоэффективного

помехозащищенного инструмента предоставляющего широкие возможности для организации профильных и площадных систем наблюдений со сложными зондирующими установками.

Принцип работы телеметрической регистрирующей системы «ПИКЕТ»

Телеметрическая регистрирующая система «ПИКЕТ» (рис. 1.) является основой для создания сетей наблюдения с повышенной пространственно-временной плотностью. Применительно к особенностям регистрации электромагнитных сигналов решена задача интеграции специфического измерительного тракта на основе АЦП со значительной глубиной аналого-цифрового преобразования и эффективных средств работы с цифровыми данными.

Основные особенности телеметрической системы «ПИКЕТ»:

- одновременная регистрация сигналов становления электромагнитного поля от

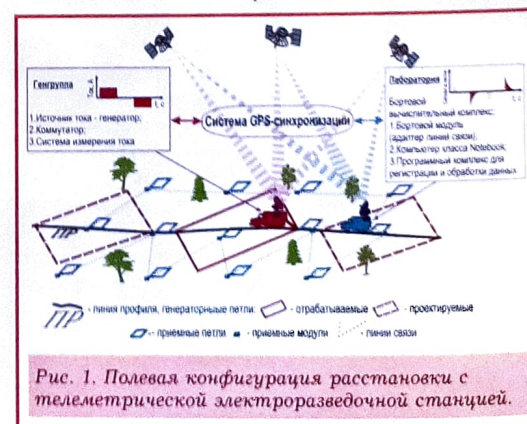


Рис. 1. Полевая конфигурация расстановки с телеметрической электроразведочной станцией.

нескольких приемников поля (возможно использование приемников любых типов - петля, линия и др.) пространственно отдаленных друг от друга;

- расположение усилительных трактов и аналого-цифрового преобразователя непосредственно у приемного датчика (приемной петли или линии), что позволяет избавиться от использования проводных кондукторов для передачи аналоговых сигналов на вход измерителя, повысить качество записываемого материала и помехозащищенность аппаратуры;

- запись и сохранение в цифровом виде всех реализаций сигнала с арифметическим шагом дискретизации для последующей математической обработки;

- наличие встроенных в измерители приемников GPS, позволяющих получать координатную информацию с высокой точностью и учитывать реальную геометрию установок;

- высокоточная система синхронизации источника тока и измерительной системы на основе GPS (под синхронизацией понимается получение бортовым модулем станции электронного сигнала, свидетельствующего об отключении тока в генераторной петле и дающего команду начала регистрации);

- небольшие габариты и вес полевых модулей, обеспечивающие мобильность станции, позволяющие располагать приемные петли в стороне от дорог и организовывать наблюдения в полосе шириной до 5 км относительно профиля наблюдений в условиях пересеченного рельефа и плохой проходимости с высокой производительностью;

- возможность подключать 10 и более измерителей, расстояние между которыми может достигать 1 км и, соответственно, возможность эффективно выполнять сложные площадные и профильные наблюдения с повышенной пространственно-временной плотностью;

- развитый программный комплекс, обеспечивающий получение, обработку и представление данных на всех этапах работы.

Комплекс предназначен для функционирования в операционных системах семейства Windows, входящие в него программы обладают информативным и удобным для пользования унифицированным графическим интерфейсом.

Техническое описание телеметрической электроразведочной станции «Пикет»

Электроразведочная станция «Пикет» предназначена для регистрации сигналов становления электромагнитного поля при проведении работ методом зондирования становлением поля либо другими методами электромагнитных зондирований. Полевые измерения проводятся в зонах с различными климатическими условиями, при температурах от -45 до 60°C.

Основные компоненты телеметрической измерительной системы: бортовой модуль, в составе персонального компьютера и адаптера линий связи; полевые модули (измерители); устройство синхронизации и управления коммутатором. Повышенная мобильность станции обеспечивается автономными регистраторами - полевыми модулями, которые связаны цифровыми двухпроводными линиями связи. Схема подключения станции приведена на рис. 2.

Бортовой вычислительный комплекс (БК), выполненный на базе персонального компьютера класса Notebook предназначен для управления работой станции, оперативного контроля, сбора,

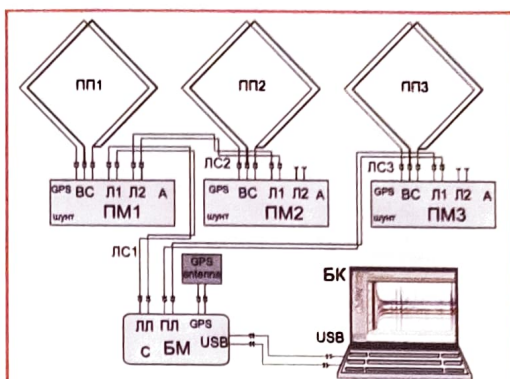


Рис. 2. Схема подключения телеметрической электроразведочной станции «Пикет».

Условные обозначения:

ПП1 - ПП3 - приемные петли;
ЛС1 - ЛС4 - цифровые линии связи (витая пара);
ПМ1 - ПМ3 - полевые модули;
BC - вход сигнала, L1, L2 - вход линий связи,
GPS - встроенные приемники и антенны системы GPS,
шунт - разъем для подключения шунтирующего сопротивления, А - аккумулятор;
БМ - бортовой модуль (адаптер линий связи);
ЛЛ - вход левой линии связи, ПЛ - вход правой линии связи,
С - система синхронизации на основе GPS,
USB - интерфейс; БК - бортовой компьютер.

и обработки принимаемой пространственной и геофизической информации.

Адаптер линии связи предназначен для согласования шины USB с линиями связи, организации передачи команд и сбора данных от полевых измерителей и синхронизации измерений с коммутатором тока. Сбор данных происходит одновременно с двух линий связи, что позволяет организовывать произвольное подключение полевых модулей.



Рис. 3. Полевой измеритель телеметрической станции «ПИКЕТ».

Полевые модули (рис.3) располагаются непосредственно у приемных петель (ПП) и посредством линий связи соединяются последовательно в цепочку. Основу регистрирующего тракта составляет двадцатичетырехразрядный дельта-сигма АЦП фирмы "Crystal Semiconductor Corporation". Предусмотрено два независимых входа для регистрации сигналов от разных секций приемной петли или от разных приемников. В случае возникновения паразитного колебательного процесса в приемной петле («звон петли») возможно подключение шунтирующего сопротивления на разъем «шунт».

Технические характеристики измерителей:

- шаг дискретизации сигнала по времени арифметический - 31, 250, 500 мкс,

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



1, 2, 4, 8, 16 мс;

- количество коммутируемых каналов на входе - 2;
- вход сигнала - дифференциальный (симметричный);
- максимальный входной сигнал (U_{max}) - не менее 5,5 В;
- коэффициент усиления предварительного усилителя (K_y) - 1, 4, 16, 64, 256, 512, 2048, 8096, 32768;
- количество разрядов аналого-цифрового преобразователя равно 23 плюс знак;
- максимальное количество отсчетов при регистрации входного сигнала - 14000.

Программа «Регистрация ЗСБ»

Полнота использования возможностей, предоставляемых аппаратурой, напрямую зависит от качества применяемого программного обеспечения. Неотъемлемой частью телеметрической станции «Пикет» является программа «Регистрация ЗСБ» (рис. 4). Можно перечислить следующие основные функции программы: управление работой драйвера станции, задание параметров регистрации сигналов, визуализация получаемых пространственных и геофизических данных, экспрессная обработка, осреднение, расчет трансформант сигналов, сохранение информации.

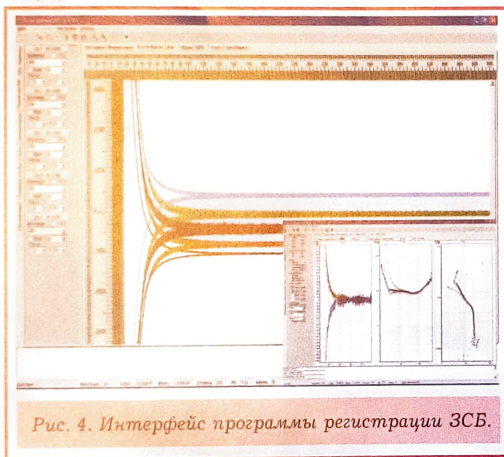


Рис. 4. Интерфейс программы регистрации ЗСБ.

К основным настройкам регистрирующей системы относятся общие параметры регистрации, такие как шаг дискретизации сигнала, количество регистрируемых импульсов, число отсчетов в каждом импульсе и др. Для каждого канала существует возможность задать собственные параметры - усиление, коммутацию шунтирующего сопротивления, выбрать одну из двух секций приемных петель (датчиков поля). Также настраиваются параметры тестирования (определяется набор тестов), опрос GPS приемников, параметры визуализации.

Программа «Регистрация ЗСБ» обладает мощными возможностями визуализации получаемых данных. На соответствующих вкладках визуализируется в реальном времени регистрируемый сигнал единичных импульсов по всем каналам, все накопленные реализации по всем каналам, спектр сигналов. Кроме этого, отображается информация, получаемая от встроенных в модули GPS-приемников, а также с помощью оригинального ГИС-компонента, визуализируется карта участка работ с запроектированной и реальной сетью наблюдения.

В телеметрической станции «Пикет» реализованы оригинальные экспрессные способы проверки работы, как регистраторов, так и самих приемников поля. Концепция работы системы тестирования позволяет проводить необходимые мероприятия непосредственно в любых полевых условиях и не требует привлечения дополнительного оборудования. Процесс измерения тестируемых параметров и регистрация тестовых записей оптимизирована для получения максимально информативных данных достаточных для оценки корректности работы регистраторов. Основа системы тестирования - генераторы тестовых сигналов, встроенные в полевые модули станции. Основные способы: тестирование напряжения питания модулей; измерение реальных коэффициентов усиления; измерение сопротивления приемной петли (линии); сбор шумов и оценка их уровня при выключенном источнике тока; регистрация тестовых сигналов заданной частоты и амплитуды, подаваемых в приемную петлю с встроенного генератора. Технология автоматического тестирования станции реализована в программе регистрации. Окно состояния тестируемых параметров приведено на рис. 5.

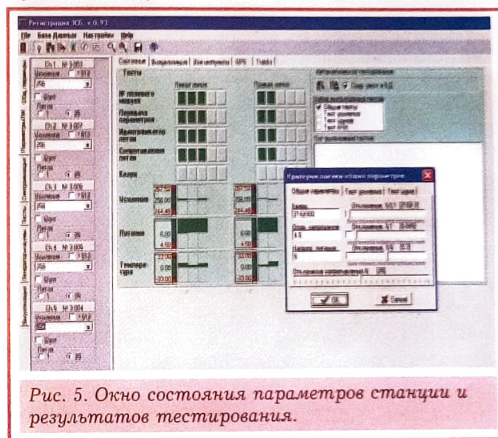
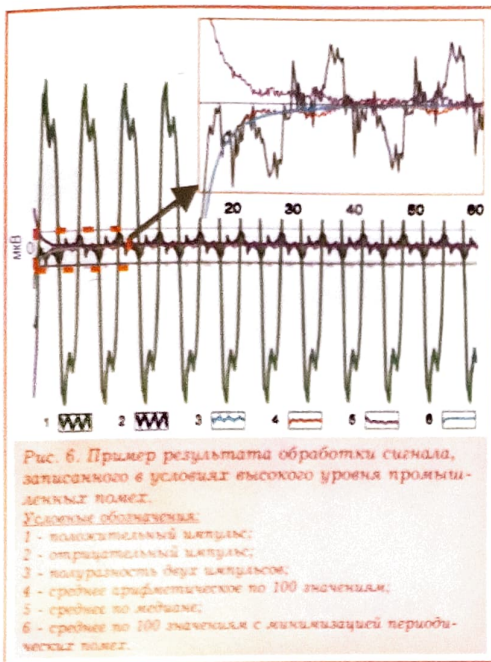


Рис. 5. Окно состояния параметров станции и результатов тестирования.

Для контроля состояния приемников поля разработана система установки микросхем-идентификаторов (ПЗУ) в разъемы, через которые приемные петли подключаются к полевым модулям. После изготовления петли и ее проверки производится измерение сопротивления секций и запись в ПЗУ нормального значения сопротивления. Кроме того, в память сохраняются уникальный номер петли, данные о количестве витков каждой секции, дата изготовления и ремонта, а также дополнительный комментарий. При подключении петель к модулям производится считывание параметров петли из микросхем-идентификатора. Номер петли и количество витков сохраняется в базе данных. Таким образом, четко контролируются данные о том, на каких приемных пикетах использовалась та или иная петля.

Программа предварительной обработки сигналов «ТЕМ-Processing»

Система цифровой регистрации с арифметическим шагом дискретизации и сохранение всех реализаций сигналов предопределяет использование эффективных средств осреднения накопленных массивов данных и подготовки итоговых кривых зондирования. Запись по «открытому каналу», без применения аналоговой фильтрации и суммирования накоплений позволяет получать максимально «чистые»



сравнение сигналов - цифровые осциллограммы во всех пунктах наблюдений. Предварительная обработка сигналов ЗСБ объединяет в себя процедуры для подготовки финальных кривых, включая анализ всех накоплений с помехами, просмотр сигналов, осреднение сигналов, подавление помех различной природы, интерпретацию временных сетки с геометрическим и арифметическим шагом, расчет коэффициентов дисперсии функций.

Для работы при значительном уровне помех электромагнитных помех в процессе обработки TEM-Processing разработан специальный алгоритм. Он основан на автоматическом подборе амплитуд, фаз и частоты помехи и ее удалении из сигнала. Алгоритм для каждого из зарегистрированных импульсов поля становления. Примеры, иллюстрирующие эффективность работы алгоритма приведены на рис. 6. Как показывает опыт, достигается подавление амплитуды периодических помех более чем в 1000 раз.

В случае импульсных помех наилучший результат достигается с применением робастного алгоритма основанного на использовании М-оценок Хьюбера. Практическое применение алгоритмов робастных оценок показало, что для осложненных сигналов становления поля, характеризующихся наличием нормально распределенных данных, робастные оценки обладают наименьшей видимой дисперсией. В зависимости от количества и амплитуды выбросов робастные оценки характеризуются дисперсией на 30% - 40% меньшей дисперсии медианных оценок. Для данных, не осложненных «тяжелыми хвостами», робастные средние значения приближаются к среднеарифметическим. Практическое использование робастных оценок при импульсных помехах фактически двукратно повышает эффективное количество накоплений.

Как показал опыт цифровой математической обработки данных, визуально весьма сложно оценивать эффективность работы того или иного обрабатывающего алгоритма. Для сравнения разных способов обработки сигналов был разработан программный модуль. Оценка

соотношения сигнал/помеха производится каждый раз при обработке записей с целью выбора оптимального алгоритма осреднения и подавления помех. В специализированный блок программы TEM-Processing в качестве исходных данных поступают массивы, полученные при разных способах обработки и осреднения наблюдаемых сигналов. Критерием сигнала является его средняя величина в заданном временном интервале, помеха оценивается по величине стандартного отклонения. Отношение сигнал/помеха рассчитывается как отношение среднего и дисперсии сигнала.

Заключение

Разработка телеметрической электро-разведочной станции «ПИКЕТ» и программного комплекса позволила повысить информативность, качество данных и производительность работ методом ЗСБ. Применяемые алгоритмы подавления периодических и импульсных помех позволили значительно улучшить отношение сигнал/помеха, обеспечили возможность проведения работ в промышленных районах, электроразведочные исследования в которых с аппаратурой предыдущих поколений были крайне затруднены.

Литература

1. Агафонов Ю.А., Поспеев А.В. Программно-измерительный комплекс для работ методом ЗСБ // Геофизический вестник. 2001. №10, с. 8-11.
2. Агафонов Ю.А., Кондратьев В.А., Ольховик Е.А., Пашевин А.М., Поспеев А.В. Результаты применения новых технологий электромагнитных зондирований на юге Сибирской платформы // Разведка и охрана недр. 2004. №8-9, с. 26-28.





Геотех-06

Саратов,
5-6 сентября 2006 г.

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

*Снова собирает своих постоянных участников
и всех заинтересованных в тематике
конференции специалистов научных,
разведочных, промысловых и производственных
геофизических организаций России и ближнего
зарубежья для знакомства с последними
достижениями и обмена опытом.*

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.

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

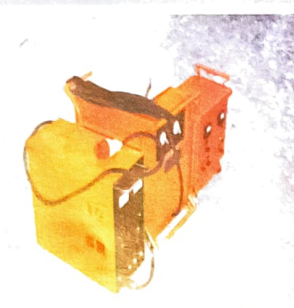
Получатель - Саратовское региональное отделение
межрегиональной общественной организации «Евро-
Азиатское геофизическое общество»,
ИНН 6452051820, КПП 645201001,
Р/с 40703810856070101637,
в Саратовском ОСБ №8622 г. Саратов,
БИК 046311649, к.сч. 30101810500000000649
Назначение платежа: «Целевой сбор на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

Организаторы конференции ждут старых
друзей и приглашают новых участников.

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

ОРГКОМИТЕТ

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



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

- геологические исследования
- поиск и разведка углеводородов
- поиск и разведка месторождений
- поиск и разведка источников 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. 10
E-mail: tgm@online.nsk.ru
тел. (383) 292-42-77

Аппаратурный комплекс импульсной электроразведки АИЭ-2

Бытенский Л. И., Пищик В. В., Тарасов А. В., Тарасов В. А.,
ЗАО Научно-производственный центр "Солитон-НТТ", г. Санкт-Петербург

Методы импульсной электроразведки, к которым относится метод переходных процессов МПП (называемый также методом зондирования ста новлением поля - ЗС) и импульсный вариант метода вызванной поляризации ВП, - одни из наиболее эффективных методов поисково-разведочной геофизики [1, 2]. Они находят широкое применение при поисках рудных и нефтегазовых месторождений, а также при гидрогеологических и инженерно-геологических изысканиях.

Отличаясь спецификой изучаемых физических явлений и методических приемов, оба метода основаны на импульсном возбуждении первичного поля. Это обуславливает сходство общих принципов построения измерительных и генераторных устройств МПП и ВП и позволяет объединить их в единый аппаратный комплекс импульсной электроразведки. Целесообразность разработки такого комплекса подтверждается также опытом совместного применения МПП и ВП при решении различных геологических задач.

Аппаратурный комплекс импульсной электроразведки АИЭ-2 был разработан в НПП "Солитон-НТТ". В его состав входят устройства возбуждения, приема и регистрации электромагнитных и поляризационных переходных процессов, программное обеспечение измерений и обработки сигналов в реальном времени, а также программное обеспечение предварительной обработки, графического представления и интерпретации данных.

Аппаратурный комплекс АИЭ-2 включает (рис.1):

- 1) измеритель МПП-ВП (1);
- 2) генератор МПП-1000 (2);
- 3) генератор ВП-1000 (3);
- 4) генератор ВП-60 (4);
- 5) ПК для обработки и интерпретации данных;
- 6) дополнительное оборудование;
- 7) Шкаф электроразведочный измеритель МПП-ВП предназначен для измерения ЭДС переходных процессов. Приемниками сигнала являются датчики индукционного датчик при измерениях МПП и соединенная линия с неполяризующимися электродами в методе ВП. Измеритель содержит микропроцессор МПП и сигнальный процессор фирмы Analog Devices, которые обеспечивают помехоустойчивое аналого-цифровое преобразование выходного напряжения и предварительную обработ-

ку сигнала в реальном времени. Управление работой измерителя осуществляется с помощью миникомпьютера или переносного компьютера типа Note Book. Код программ для сигнального процессора загружается из управляющего компьютера, в него же передаются полученные данные, сохраняемые в виде файлов. Программа управления измерениями позволяет выбрать оптимальные параметры измерений, графически отобразить результаты измерений на экране компьютера для оценки их качества и сохранить их в виде файлов в энергонезависимой памяти управляющего компьютера. Основные технические характеристики измерителя приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры измерителя МПП-ВП.

Наименование параметра	Номинальное значение
Максимальное измеряемое напряжение, В	±10
Собственные шумы в полосе 1 Гц, не более, нВ	100
Диапазон времен измерений:	• в режиме МПП • в режиме ВП
	5мкс - 10 с 1мс - 64 с
Относительная приведенная погрешность измерений, %, не более	1
Компенсация ЕП, В	±2,5
Синхронизация с генераторами:	• в режиме МПП • в режиме ВП
	проводная проводная или автономная (по перепадам входного напряжения)
Время непрерывной работы, ч, не менее	8
Масса (без управляющего компьютера), кг	4,0

Генераторы обеспечивают возбуждение последовательности прямоугольных разнополярных импульсов тока в нагрузку. Генератор МПП-1000 используется при работах методом переходных процессов и нагружается на незаземленную петлю со стороны от 20 до 1000 м. Генераторы ВП-1000 и ВП-60 нагружаются на заземленную линию и предназначены для работ методами ВП и сопротивлений. Отличительной особенностью генераторов ВП является стабилизация амплитуды выходного тока в широком диапазоне сопротивлений нагрузки. Все три генератора имеют микропроцессорное управление и снабжены жидкокристаллическими индикаторами для отображения текущего режима работы. Их основные технические характеристики приведены в таблице 2.

Программно-математическое обеспечение комплекса АИЭ-2 включает программы обработки и интерпретации данных МПП и ВП.

Программы МПП

В ходе первичной обработки данных МПП с помощью программы "TEMBIN" выполняется сортировка измерений, осреднение повторных измерений, оценка погрешности наблюдения переходного процесса. Затем программа из отдельных двоичных файлов создает единый текстовый файл данных по профилю или площади.

Для улучшения качества данных предназначена программа "SMTEM", которая выполняет устойчивую фильтрацию сигнала и удаляет высокочастотные помехи и одиночные высокоамплитудные выбросы.

Программа "TEMIMAGE" предназначена для

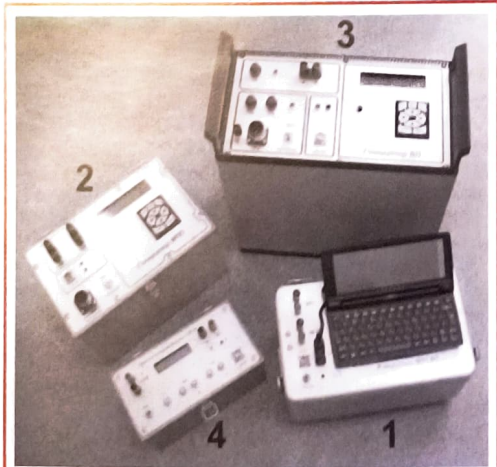


Рис. 1. Аппаратурный комплекс АИЭ-2.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

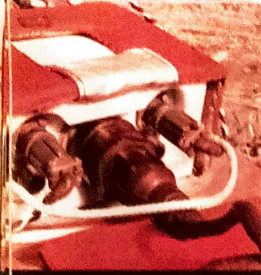


Таблица 2. Параметры генераторов.

Наименование параметра генератора	Генератор МПП -1000	Генератор ВП -1000	Генератор ВП - 60
Максимальная выходная мощность	1 кВт	1 кВт	60 Вт
Амплитуда выходного тока	0,2 - 10 А	0,01 - 2 А	10 - 200 мА
Выходное напряжение	12 - 100 В	50 - 600 В	0 - 300 В
Форма выходного тока	Разнополярные прямоугольные импульсы со скважностью, задаваемой измерителем	Разнополярные прямоугольные импульсы со скважностью 2	Разнополярные прямоугольные импульсы со скважностью 2
Длительность импульсов выходного тока	задается измерителем	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 с	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 с
Диапазон сопротивлений нагрузки, в котором обеспечивается стабилизация тока	-	50 Ом - 60 кОм	0 Ом - 30 кОм
Длительность выключения тока	10 мкс на петле 100 × 100 м	менее 1 мс на линии АВ 1 км	менее 1 мс на линии АВ 1 км
Питание	12-100 В (внешние аккумуляторы)	220 В, 50 Гц (бензоагрегат)	12 В (внешний аккумулятор)
Масса	5 кг	10 кг	2,5 кг

изображения, анализа и интерпретации данных МПП. Программа позволяет обрабатывать данные, полученные с различными измерительными установками: однопетлевая, совмещенные петли, фиксированная прямоугольная петля с компонентным индукционным датчиком.

В программе реализованы четыре группы алгоритмов моделирования и решения обратной задачи:

- трансформации переходного процесса в кажущиеся геоэлектрические параметры одномерной среды, позволяющие провести быструю полуквантитативную интерпретацию полей наблюдений [3, 4];
- алгоритмы решения обратной задачи в рамках горизонтально-слоистой модели среды, которые разделены на алгоритмы формальной инверсии (томографическая постановка без учета априорных данных) и полной инверсии с учетом поляризационных свойств слоев и априорных представлений о разрезе [5];
- быстрые приближенные алгоритмы решения обратной задачи, учитывающие двухмерное распределение электропроводности на фоне горизонтально-слоистой модели - при 2D инверсии используется быстрое приближенное решение прямой задачи, основанное на квазианалитической аппроксимации решения объемных интегральных уравнений [6];
- алгоритмы моделирования переходного процесса трехмерных локальных проводников в непроводящей среде (рудная задача), - для 3D моделирования используется приближенный подход, основанный на аппроксимации поля в ранней стадии переходного процесса полем магнитных диполей, распределенных на поверхности проводника [7].

Широкий набор методов решения прямой и обратной задачи сочетается с удобным графическим интерфейсом для отображения наблюдаемых и модельных данных в виде геоэлектрических разрезов, карт изолиний и карт графиков.

Для ввода и вывода данных в программе используется удобный текстовый формат, что облегчает обмен данными с другими программами.

Программы ВП

Программа первичной обработки данных "IPBIN" позволяет сформировать журнал, произвести сортировку наблюдений, разбраковку и осреднение повторных наблюдений, рассчитать значения кажущегося сопротивления ρ_a и поляризуемости на разных временных задержках $\eta(t)$. На выходе программа формирует единый текстовый

файл данных из двоичных файлов с результатами отдельных измерений.

Программа "IPVISION" предназначена для построения, анализа и интерпретации данных профильных и площадных съемок ВП.

Построение данных выполняется в виде многоканальных графиков профилирования, пространственно-временных разрезов, псевдоразрезов, карт изолиний и карт графиков.

Для анализа временных характеристик ВП программа трансформирует наблюдаемый спад ВП в дифференциальную поляризуемость, которая определяется как производная переходной характеристики ВП по логарифму времени [2]. Вычисляется также ряд дополнительных параметров:

- стационарная поляризуемость η_0 (поляризуемость, измеренная непосредственно после выключения бесконечно долгого токового импульса);

$$\bullet \text{заряжаемость } m = \frac{1}{T} \int_0^T \eta(t) dt,$$

где T - длительность паузы;

$$\bullet \text{металл-фактор } MF = \frac{m}{\log \rho_k}.$$

Кроме того, наблюдаемый спад ВП может быть аппроксимирован с помощью известной эмпирической модели Cole-Cole, описывающей частотную дисперсию удельного электрического сопротивления [8]. Модель определяется тремя параметрами, которые связаны со структурными особенностями породы и рудной минерализации. Для оценки параметров модели Cole-Cole во временной области решается оптимизационная задача методом Маркварда [9]. При этом расчет спада поляризуемости от серии импульсов для модели Cole-Cole выполняется с помощью численного косинус-преобразования из частотной области. Процедура преобразования основана на методе цифровой фильтрации [10].

Для получения геоэлектрического разреза предусмотрено подключение модуля решения прямой задачи в рамках двумерно неоднородной геоэлектрической модели. Двухмерная модель строится из полигональных элементов с постоянными значениями сопротивления, поляризуемости и параметров модели Cole-Cole.

Интерпретация данных ВЭЗ-ВП выполняется с помощью программы "ZONDIPID", которая позволяет оценить параметры геоэлектрического разреза в рамках горизонтально-слоистой модели.

Комплекс АНЭ-2 успешно используется в различных геологических предприятиях и научных центрах России для решения самых разнообразных геологических задач: при поиске медно-никелевых, медно-колчеданных, золоторудных и редкометалльных месторождений, кимберлитовых трубок и месторождений подземных вод, а также при геоэкологических исследованиях. В качестве примера, приведем результаты применения комплекса АНЭ-2 на золоторудном месторождении в Оренбургской области и при поисках подземных вод на острове Сахалин.

Работы МПП и ВП на золоторудном месторождении были проведены совместно с геофизиками предприятия "Оренбург-георесурс" (ныне ОАО «Компания восток»). Залежи жильково-вкрапленных золото-сульфидных руд и золотосодержащие коры выветривания связаны с грабенем, заполненным углеродсодержащими отложениями. Основные поисковые критерии месторождения: низкое удельное электрическое сопротивление глинистых отложений коры выветривания и рудоносных углеродисто-глинистых сланцев с сульфидной минерализацией (единицы и доли Ом-м) и повышенная поляризуемость пород с сульфидной вкрапленностью. Комплекс геофизических методов включал МПП в однопетлевом варианте с петлей размером 100х100 м и ВП с установками срединного градиента и многообразного симметричного профилирования.

В верхней части разреза на глубине до 25-30 м по всему профилю зафиксирован слой хорошо проводящих отложений с низкой поляризуемостью, которые соответствуют глинистой коре выветривания (рис. 2). Ниже по разрезу в центральной части профиля отмечена зона пород с сопротивлением менее 30-40 Ом-м, связанная с углеродисто-терридной толщей. В ее пределах выделены два хорошо проводящих объекта на глубинах соответственно около 70 и 150 м (1 и 2), первый из которых связан с не разведанной зоной жильково-вкрапленных сульфидной минерализации, а второй - с более глубоким залегающим рудным телом впервые выявленным по данным МПП. Локальные аномалии повышенной поляризуемости до 8-9 % приурочены преимущественно к верхним частям рудных тел и связанных с ними аномалий повышенной проводимости. Одна из аномалий совпадает с небольшим приповерхностным рудным телом (3).

Поисковые работы на воду на Сахалине прово-

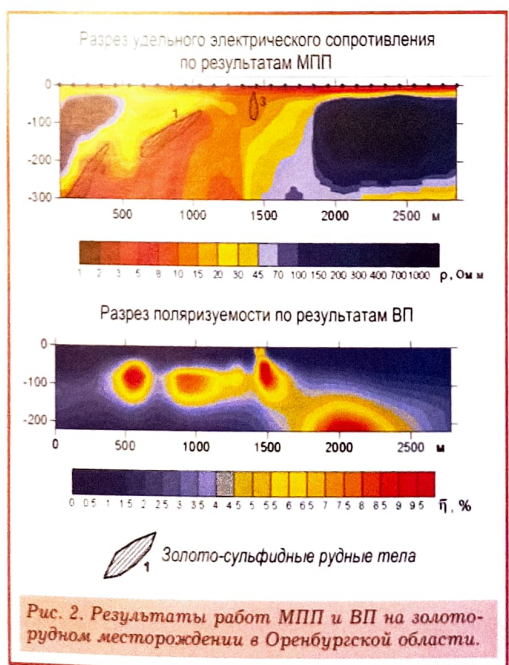


Рис. 2. Результаты работ МПП и ВП на золоторудном месторождении в Оренбургской области.

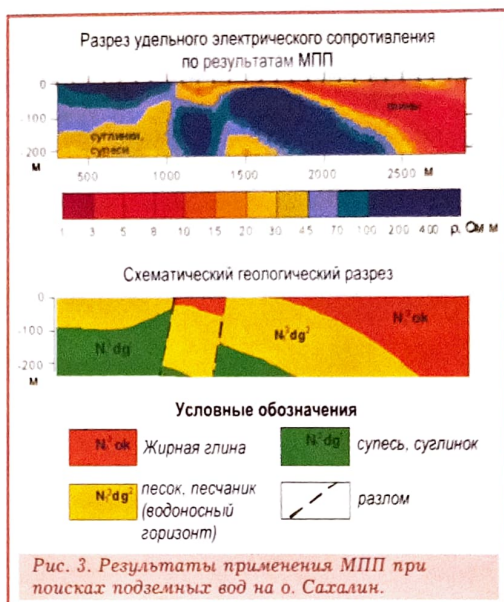


Рис. 3. Результаты применения МПП при поисках подземных вод на о. Сахалин.

длись совместно с геофизическим предприятием "Электра". Геологический разрез участка работ (рис. 3) представлен песчано-глинистыми отложениями неогена. В строении участка сочетаются элементы горизонтально-слоистого, пологого и тектонически дислоцированного залегания пород. Стратиграфически выше залегают жирные глины, которые подстилаются песками и песчано-глинистыми отложениями. Наибольший интерес при поисках воды представляют пески с более высокими фильтрационными свойствами. С помощью электроразведки необходимо было решить следующие задачи: уточнить геологическое строение участка на глубинах до 200 м и выделить наиболее водообильные зоны, сложенные песками.

На участке были выполнены зондирования МПП с установкой совмещенных петель размером 50х50 м. Результаты зондирований отражают достаточно сложное геоэлектрическое строение участка (рис. 3). Породы сильно неоднородны по удельному электрическому сопротивлению, что отражает их литологическую изменчивость: сопротивление жирных глин - единицы Ом-м, песков и песчаников - сотни Ом-м, супесей и суглинков - десятки Ом-м. Наибольший интерес представляют участки выдержанных по простиранию песков и песчаников повышенной мощности, где и было рекомендовано задать поисковые гидрогеологические скважины.

Литература

1. Каменецкий Ф.М. Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов. М.: ГЕОС, 1997. 162 с.
2. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л., Недра, 1980. 392 с.
3. Каменецкий Ф.М., Новиков П.В., Тимофеев В.М. Использование дифференциальных трансформаций для качественной интерпретации данных метода переходных процессов. Физика Земли. 1993. № 7. С. 91-96.
4. Москвитин Л.Ф. Одномерная инверсия становления магнитного поля с нормировкой по интегральной S - проводимости. Геофизика. 2000. № 2. С. 45-47.
5. Могилов В.С. Импульсная электроразведка: Учеб. Пособие/Новосиб. Гос. Ун-т. Новосибирск, 2002. 208с.
6. Zhdanov M.S., Dmitriev V.I., Fang, S. and Hursan G., Quasi-analytical approximations and series in electromagnetic modeling. Geophysics. 2000. vol. 65, no. 6, p. 17461757.
7. Liu E.H., Lamotagne Y. Geophysical application of new surface integral equation method for EM modeling. Geophysics. 1998. vol. 63, no. 2, p. 411-423.
8. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorption in dielectrics. I. Alternating current characteristics // Journal of Chemical Physics, 1941, V.9. №4, p. 341-351.
9. Marquardt D.W. 1963, An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // J. Soc. Ind. Appl. Math., vol 11, p. 431-441.
10. Guptasarma D., 1982, Computation of the time-domain response of polarizable ground // Geophys., 47, 1574-1576.

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



Аппаратурный электроразведочный комплекс "ЦИКЛ-7"

Секачев М.Ю., Балашов Б.П., Саченко Г.В., Вечкапов О.П., ООО "НТФ "ЭЛЬТА-ГЕО", г. Новосибирск;
Захаркин А.К., Тарло Н.Н., ФГУП СНИИГГиМС, г. Новосибирск;
Могилатов В.С., Злобинский А.В., Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск

1. Аппаратура ЦИКЛ-7 предназначена для проведения электроразведочных работ методами переходных процессов. Семейство электроразведочной аппаратуры «ЦИКЛ» хорошо известно в России и за ее пределами.

Цикл-2, выпускавшийся совместно организациями: СНИИГГиМС и СибОКБ, (1975 - 1990 гг. - 100 комплектов) позволял проводить электроразведочные работы методами ЗСБ и МПП. Высокое качество измерений достигалось хорошо проработанным измерительным трактом и аппаратной цифровой фильтрацией сигнала на поздних временах.

Цикл-4, вобрав в себя лучшие отработанные элементы технологий измерений, имел более качественные характеристики не только благодаря более современной элементной базе, но также, получив более оптимальную технологию измерения - интегрирование входного сигнала на расширяющихся интервалах. Цикл-4 выпускался совместно СНИИГГиМС и СибОКБ (1990 - 1992 гг. - 10 комплектов).

В 1992 г. была выпущена первая малогабаритная аппаратура семейства Цикл - «Цикл-Микро». В этой аппаратуре коренным образом была изменена концепция построения аппаратуры с точки зрения электроники. Малые габариты были получены благодаря переходу к построению измерителя на базе однокристального микроконтроллера. Цикл-Микро выпускался СНИИГГиМС (1990 - 1996 гг. - 25 комплектов).

Дальнейшее уменьшение размеров (до одной платы), расширение возможностей, улучшение качества измерения и помехозащищенности, было реализовано в аппаратуре «Цикл-5», предназначенной для методов МПП, ЗСБ и ВП. Эта аппаратура уже не могла работать без компьютера, но благодаря тому, что все результаты измерений передавались в компьютер, кроме расширенных возможностей по обработке измеряемого сигнала, появилась возможность более точно диагностировать работоспособность аппаратуры и параметры работы измерительного канала в процессе измерений.

Одним из заметных для того времени достижений можно считать реализацию возможности регистрации сигнала со времени 0,4 мкс. Хотя реальные полевые данные, получаемые на петлях малых размеров, не позволяли продвинуться на

времена менее 3 - 5 мкс, наличие возможности регистрации более ранних времен оказывалось весьма полезным при исследовании собственных процессов элементов тракта «возбуждение измерение».

Расширенный временной диапазон регистрации, неплохие показатели скорости выключения тока в реальных петлях, разработанный ряд коммутаторов тока различной мощности - все эти составляющие позволяли считать Цикл-5 аппаратурой широкого спектра применения с возможностью исследования геологического разреза от единиц метров до километров.

Цикл-5 выпускался СНИИГГиМС (1997 - 2004 гг. - 30 комплектов).

Аппаратура «Цикл-6» - следующий этап развития в расширении возможностей и улучшение качества измерений. Кроме отработанного измерительного тракта на основе интегрирования сигнала аппаратура получила второй измерительный канал - для измерений ЗСБ и ВП - на базе 24-разрядного дельта-сигма АЦП.

Измерительный канал с интегрированием адаптирован к измерению спадающих сигналов МПП и ЗСБ, для измерения же сигналов ВП, значительных по уровню на большом протяжении времени, в Цикл-5 применялась технология искусственного ослабления входного сигнала. Введение канала с 24-разрядным АЦП позволило повысить точность измерения сигналов ВП. Также измерения с равномерным шагом в дальнейшем легко обрабатываются с помощью цифровых фильтров, в частности, фильтра подавления промышленных помех 50 Гц.

Практическая работа с двумя вариантами измерительного канала расширяет возможность маневра в методике измерения. Опыт работ не позволил отдать безусловное предпочтение более современному дельта-сигма АЦП. Измерительный канал с интегрированием сигнала обладает рядом привлекательных свойств, и в дальнейших разработках он также будет использоваться.

2. В базовый комплект аппаратуры Цикл-7 входят:

- измеритель;
- генератор тока (коммутатор);
- компьютер;
- приемный датчик;
- генераторная петля;

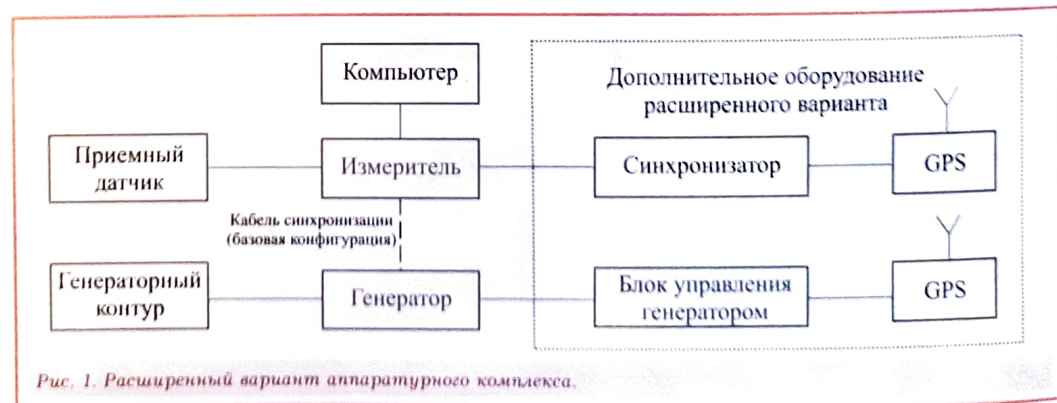


Рис. 1. Расширенный вариант аппаратного комплекса.

-аккумуляторы питания измерительной части и системы возбуждения.

В такой конфигурации измеритель связан с генератором коротким кабелем синхронизации (0,5м), по которому передаются сигналы управления генератором и значение тока в генераторной петле. Эта конфигурация, наиболее распространенная, применяется с генераторными петлями от 20х20 м. до 500х500 м. при исследовании глубин до 500-800 м. Задачи, решаемые этой конфигурацией, связаны с поиском рудных объектов, геокартированием, гидрогеологией, инженерной геологией.

Расширенный вариант аппаратного комплекса без источников питания (рис. 1) включает в себя дополнительно блок управления генератором и комплект для синхронизации от спутников GPS. Этот комплект позволяет работать с любыми заранее предусмотренными соотношениями ток-пауза и менять в ходе работы временные диаграммы без необходимости фазирования измерителя с генератором. Подобный вариант используется, как правило, при проведении электроразведочных работ методами ЗСБ и ВП, при проведении площадных съемок, когда измеритель и генератор разнесены на значительное расстояние. В этом варианте отсутствует возможность измерять значение тока в генераторном контуре и используется генератор со стабилизацией тока.

3. Структурная схема измерителя представлена на рис. 2.

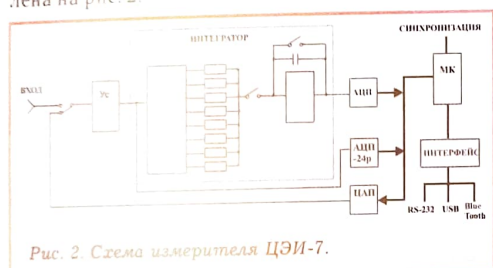


Рис. 2. Схема измерителя ЦЭИ-7.

Измеритель перед каждым циклом измерений выполняет тестовые калибровочные измерения, позволяющие, во-первых, определить работоспособность измерителя, во-вторых, компенсировать температурные и временные изменения статических характеристик измерительного тракта. Каждый цикл измерений начинается с предварительного измерения, в котором определяются параметры входного сигнала. По предварительно измеренному входному сигналу управляющая программа выбирает оптимальные параметры измерения:

- коэффициент усиления буферного усилителя;
- выходной сигнал ЦАП для компенсации

входного смещения;

- оптимальные коэффициенты передачи интегратора для всех интервалов интегрирования.

Тестовые и рабочие измерения выполняются по одинаковым алгоритмам: входной сигнал через буферный усилитель поступает на вход интегратора. Результат интегрирования на определенном временном интервале кодируется АЦП и считывается микроконтроллером. Коэффициент передачи интегратора на каждом i -м интервале интегрирования определяется предварительно в тестовом цикле. Результат интегрирования относится к середине интервала интегрирования. Шкала времен измерения для этого измерительного тракта является псевдо-логарифмической и определяется последовательностью интервалов интегрирования. Базовая длительность интервала интегрирования не превышает 1/8 времени измерения (20 точек на декаду). Пользователь может выбрать другую плотность шкалы - от 4 до 80 точек на декаду.

Второй вариант измерительного тракта, на основе дельта-сигма АЦП, имеет равномерный шаг шкалы времен измерения (от 25 мкс до 20 мс). Сигнал с выхода буферного усилителя поступает на вход АЦП и далее результат кодирования считывается микроконтроллером.

Дальнейшие преобразования сигнала производятся в компьютере, в который микроконтроллер передает данные по одному из интерфейсов. Пользователь в зависимости от имеющегося компьютера выбирает один из 3-х интерфейсов - RS232, USB или беспроводный Blue Tooth, который наиболее подходит в случае использования наладочного компьютера. Управляющая программа измерителя работает в среде Windows, включая Windows XP.

Кроме имеющихся в варианте Цикл-6 способов обработки измеренного сигнала добавлены дополнительные возможности по фильтрации сигнала, измеренного с равномерным шагом, а также по усреднению нескольких измеренных кривых с разными временными диапазонами. Появилась возможность текущей визуализации реализаций измеренного сигнала с выводом кривой текущего среднего, полученного по выбранному алгоритму усреднения.

4. В комплексе Цикл-7 разработана линейка генераторов тока, ориентированных на разный диапазон глубин исследования. Их характеристики приведены в таблице 1.

5. Аппаратура комплектуется дополнительным оборудованием и программными средствами, что позволяет считать ее электроразведочной системой или, используя известную терминологию, «аппаратно-методическим комплексом»:

Таблица 1. Характеристики генераторов тока.

Тип, Характеристика	Напряжение, В	Ток, А	Вес, кг
1. ГТЭ-1 - малогабаритный генератор мощностью 1 кВт для рудных, геокартировочных, гидрогеологических задач с глубиной исследования до 500-800 м. Синхронизация по кабелю.	80	20	3
2. ГТЭ-4 - малогабаритный генератор мощностью 4 кВт для рудных и нефтяных задач с глубиной исследования до 1000м. Синхронизация по кабелю и от спутникового синхронизатора. Может комплектоваться стабилизатором тока для площадных работ.	200	40	6
3. ГТЭ-45 - генератор мощностью 45 кВт для нефтепоисковых работ методами ЗСБ и ВП. Синхронизация по кабелю и от спутникового синхронизатора. Может комплектоваться стабилизатором.	500	100	40

Таблица 2. Характеристики датчиков типа ПДИ

	ПДИ-20	ПДИ-50	ПДИ-100	ПДИ-500
Эффективный момент, кг	400	2500	10000	250000
Полоса пропускания, кГц	200	50	10	1
Габаритные размеры, мм	0,8×0,8	0,9×0,9	0,9×0,9	4×4 (монтаж)

5.1. ПДИ - компактный приемный индукционный датчик, представляющий собой многовитковую приемную рамку небольших размеров со встроеным малошумящим предусилителем. Выпускается линейка таких датчиков, характеристика которых приведена в таблице 2.

5.2. Устройство тестирования аппаратуры IDEM-TEST, позволяющее оперативно в полевых или лабораторных условиях комплексно проверить работоспособность аппаратуры (коммутатора и измерителя) и оценить качество настройки измерительного канала. Принцип тестирования основан на зондировании модели среды в виде эквивалента S-плоскости, как это делается при физическом моделировании на металлических моделях. Оценка качества измерения на тестовых моделях опирается на теоретические расчеты для этих моделей.

5.3. В аппаратный комплекс входит программа ПРОБА, предназначенная для

предварительной обработки полевых данных, их редакции (отсечение «ненужных» точек, сглаживание, робастное осреднение повторных измерений, «сшивка» разных режимов измерений, преобразование шкалы времен и т.д.). Кроме того, на основе трансформант возможен предварительный геофизический анализ результатов измерений, подготовка к интерпретации в системе ПОДБОР.

5.4. ПОДБОР - программный комплекс, предназначенный для интерпретации данных методов МПП-ЗСБ в рамках одномерной модели среды, когда результат зондирования на каждом пикете трактуется с позиции горизонтально-слоистой модели среды. В основе метода инверсии лежит строгая прямая задача ЗСБ. Автоматизированные алгоритмы определения параметров модели среды дают минимальное расхождение между полевой и теоретической кривыми зондирования. Программа обеспечена профильной и площадной рисовкой результатов интерпретации.

6. Аппаратура последних моделей ЦИКЛ-5 и ЦИКЛ-6 выпущена в количестве 35 комплектов разной конфигурации и успешно эксплуатируется в разных странах и на разных континентах: Россия, Казахстан, Армения, Украина, Израиль, ЮАР, Южная Корея, Перу.

Геолого-геофизические критерии выбора оптимальных условий взрыва на сейсморазведочных работах в Томской области

Закариев Ю.Ш., Рябошапка С.М., ЗАО НПП «ГеоСейсКонтроль», г. Москва;
Бабушкин А.Е., ФГУП «СНИИГГиМС», г. Новосибирск

Постоянно возрастающие требования заказчиков к качеству полевой сейсмической информации остро ставят перед подрядчиком проблему взрыва в оптимальных условиях, которая осложнена необходимостью предварительной зарядки скважин. Опытные работы на площади исследований, изучение волнового поля, ВЧР несомненно приводят к повышению качества первичной информации, но не решают полностью проблему оптимального выбора условий взрыва - наблюдения нередко бракуются заказчиком и вновь отрабатываются подрядчиком. Значительный объем таких повторов возникает из-за отсутствия информации о геологическом строении приповерхностной части ВЧР, что приводит не только к осложнению, удорожанию, сдерживанию производительности сейсморазведочных работ, но порой и к срыву сроков выполнения геологического задания полевого сезона.

Специалистами ЗАО НПП «ГеоСейсКонтроль» проанализирована накопленная в течение 2001-2004 гг. информация по выбору оптимальных условий в сейсмопартиях на территории Томской области (с привлечением геологических материалов о строении неоген-четвертичных отложений ВЧР) с целью поиска корреляционных связей между геофизическими и ландшафтно-геоморфологическими критериями.

1. Геологическое строение ВЧР запада Томской области.

Совместная интерпретация данных государственной геологической съемки масштаба 1:200000, гидрогеологических, инженерно-изыскательских работ: бурения колонковых, ручных

скважин и сведения из отчетов супервайзеров о породах взрывных скважин, позволили построить геологические разрезы и карту масштаба 1:50000 и получить достоверную информацию о строении и литологическом



Рис. 1. Карта расположения площадей.

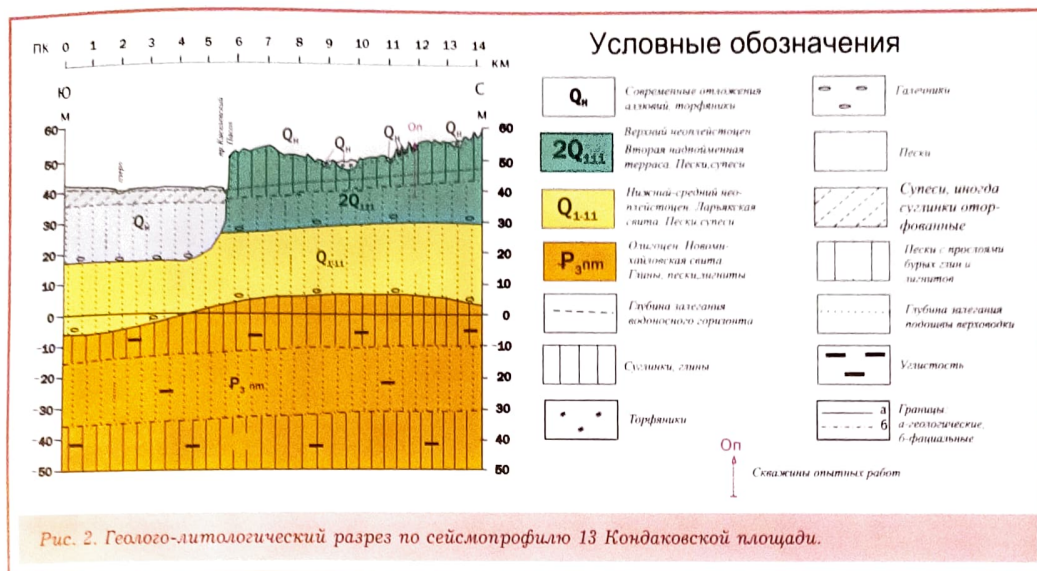


Рис. 2. Геолого-литологический разрез по сейсмпрофилю 13 Кондаковской площади.

составе приповерхностных (неоген-четвертичных) отложений ВЧР. К анализу привлечены материалы по опытным и производственным работам 21-ой сейсмопартии, проводивших исследования в западной части Томской области (в основном западнее р. Оби, рис. 1).

Построены карта и 11 геологических разрезов палеоген-четвертичных отложений по 8 площадям: Кондаковской - ПР13, Аленкинской - ПР 6, 20, Кульганской - ПР 81, Поньжевой - ПР 4, 7, 10 и карта, Южно-Соболиной - ПР 17, Западно-Останинской - ПР 5, Тальянской - ПР 16, Парбикской - ПР 11.

По особенностям геологического строения ВЧР рассматриваемую территорию можно условно разделить (с севера на юг) на четыре зоны: первая - северо-восточнее р. Оби, Кондаковская площадь (рис. 2); вторая - севернее широты р. Васюган в междуречье рек Оби и Васюгана, Аленкинская (рис. 3) и Кульганская площади; третья - все площади (кроме Парбикской) южнее широты р. Васюган (рис. 5, 6 - типичные разрезы); четвертая - расположена на юго-востоке, Парбикская площадь (рис. 7).

Учитывая, что упругие свойства пород (условия взрыва) зависят от литологического состава, плотности, обводненности, возраста, глубины залегания пород, ниже следует описание указанных особенностей по западной части Томской области.

В региональном плане по геоморфологическим признакам в пределах исследуемой территории выделяется 6 уровней отложений, различающиеся возрастом, составом, зоной аэрации (выветривания, с которой практически совпадает ЗМС), физико-механическими свойствами слагающих их пород.

1. Смирновский уровень, наиболее древний (породы эоплейстоцена - нижнего неоплейстоцена), с абс.отм. 95-140 м распространен, в основном, южнее широтного течения р. Васюган, занимает 55% исследуемой территории и имеет эрозийную сеть с глубиной расчленения долинами до 60 м. Основная часть разреза (мощность от 10-15 до 40 м) сложена глинистыми (от слабо до сильно обводненных) породами - пачки 2,3. Они подстилаются песками водоносного горизонта (пачка 1) с объемным весом (практически плотность) $1,40 \text{ г/см}^3$, мощность не более 10-15 м (рис. 5,6). Глинистая толща условно подразделяется на две пачки. Нижняя - пачка 2 сложена плотными, пластичными голубыми, синими, темными глинами с объемным весом до $2,00 \text{ г/см}^3$ и более, которые являются оптимальными для условий взрыва. Верхняя - пачка 3 сложена пористыми желтыми глинами с объемным весом $1,6-1,7 \text{ г/см}^3$, залегает в зоне аэрации. Поверхность отложений смирновского уровня, в основном, покрыта лесными массивами, участками интенсивно заозерена и заболочена, мощность

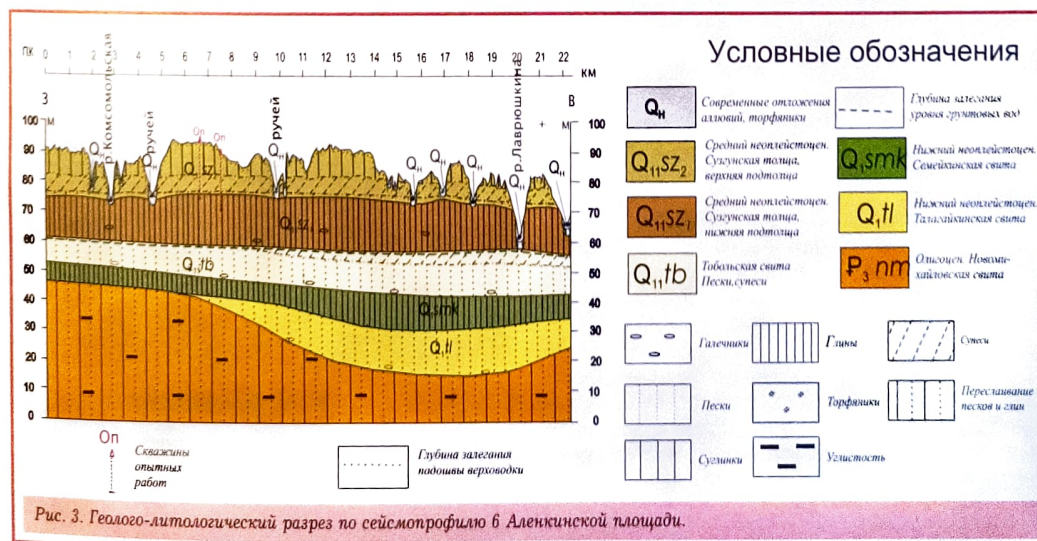


Рис. 3. Геолого-литологический разрез по сейсмпрофилю 6 Аленкинской площади.

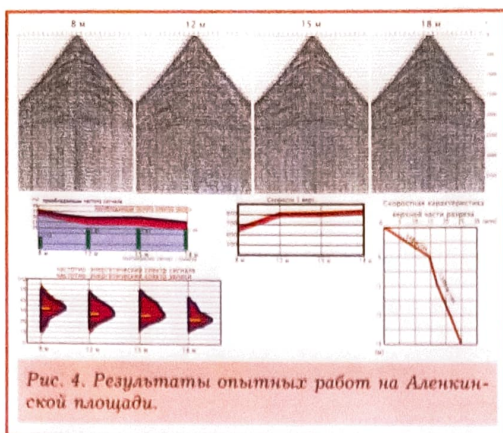


Рис. 4. Результаты опытных работ на Аленкинской площади.

торфяников до 6-10 м. Глубина аэрации от 2-5 до 25 м, в среднем - 12 м.

2. Сузгунский уровень (средний неоплейстоцен) с абс.отм. 55-94 м распространен севернее широтного течения р. Васюган (рис. 3), слагают водораздельные пространства, южнее он врезан в смирновский уровень, прослеживаясь в виде узких участков по современным речным долинам. Он занимает около 30% исследуемой территории (Аленкинская и Куль-Еганская площади), поверхность которой выровнена, уплощена с глубиной эрозивной сети (в долинах) до 30-40 м.

Сузгунская толща имеет общую мощность до 35 м и по литологическому составу разделяется на две подтолщи. Верхняя (мощность до 17 м) сложена сверху плотными суглинками с объемным весом 1,7 г/см³, подстилаемыми в нижней части супесями меньшей плотности и прослоями песка мощностью до 6-7 м (породы влажные). Нижняя (мощность до 20 м) представлена глинистыми алевролитами, в составе которых появляются отдельные блоки и горизонты тяжелых суглинков с гравием, галькой и валунами с объемным весом до 2,37 г/см³. Подстилается толща песками водоносного горизонта среднего или нижнего неоплейстоцена. Граница аэрации распылчатая и находится в среднем на глубине 10 м.

3. Третья надпойменная терраса (мощность до 25 м, верхний неоплейстоцен) имеет абс.отм. от 75 до 95 м и по характеру залегания близка к сузгунскому уровню. Она занимает незначительную площадь (1-2%) в долине р. Васюган, заходя в северо-восточную часть Поньжевой площади (рис. 6). Состав террасы песчано-глинистый (пески до 85%), поверхность ее интенсивно заболочена, мощность торфяников до 5-6 м.

4. Вторая надпойменная терраса (мощность до 25 м, верхний неоплейстоцен) с абс.отм. 52-60 м развита по р. Оби и ее притоков на площади около 6% и выделяется на Кондаковской и Куль-Еганской площадях (рис. 2,3). Терраса сложена в верхней части суглинками (до 10-15 м), в нижней части песками.

5. Первая надпойменная терраса (голоцен-верхний неоплейстоцен, мощность до 25 м) с абс.отм. 42-52 м развита в восточной части Куллеганской площади, сложена супесями, песками, интенсивно заболочена, мощность торфа до 5 м.

6. Современные пойменные отложения (голоцен) развиты в пределах всех речных систем (рис.2), сложены песками и супесями, мощность до 25 м, занимают площадь около 6%, участками поверхность пойм интенсивно заозерена и заболочена.

На рассматриваемой территории объемный

вес обводненных песков колеблется в пределах 1,29-1,48 г/см³, а суглинков и глин - в пределах 1,60-2,37 г/см³.

II. Анализ геофизических и ландшафтно-геоморфологических критериев, используемых при выборе оптимальных условий взрыва.

Анализ геологических разрезов проведен с целью корреляции их ландшафтно-геоморфологических особенностей и параметров сейсмической записи.

1. В северной части исследуемой территории, на которой в приповерхностной части ВЧР распространены породы сузгунского уровня (рис.3), по результатам опытных работ оптимальным интервалом приняты глубины скважин от 12 до 18 м. Опытными работами отмечена особенность: частота максимума спектра полезных волн на глубине 8-12 м выше (рис. 4), чем на больших глубинах, но помеха интенсивнее и отношение сигнал/помеха ниже на меньших глубинах. Это явление можно объяснить особенностью геологического строения сузгунской толщи (рис. 3): нижняя часть глинистой подтолщи имеет объемный вес (2,37 г/см³) выше, чем отделенная от нее прослойкой обводненного песка верхняя подтолща, которая в свою очередь, вверху имеет плотные суглинки. Такое строение приводит к образованию резких сейсмических границ и появлению волны-спутника, которая ослабляет полезный сигнал на высоких частотах при погружении заряда на глубину более 3 м под резкую границу.

2. Южнее широты р.Васюган в пределах распространения пород смирновского уровня (рис.1) на основании опытных работ оптимальным интервалом приняты глубины 12-21 м, глубина взрывных скважин зависит от ландшафтно-геоморфологических условий: на залеженных территориях глубины 12-15 м, в переходных зонах от леса к болотным участкам (рям) - 15-18 м, а на территориях открытых болот, озер, распространения сухих песков большой мощности глубины скважин достигали 18-21 м.

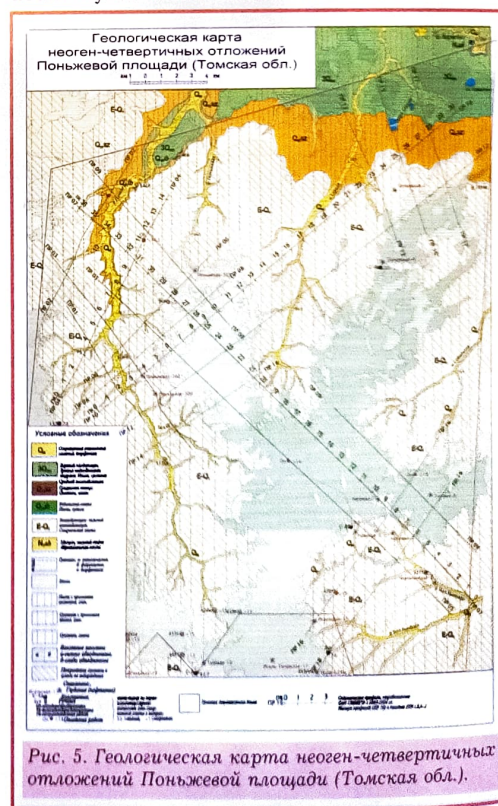


Рис. 5. Геологическая карта неоген-четвертичных отложений Поньжевой площади (Томская обл.).

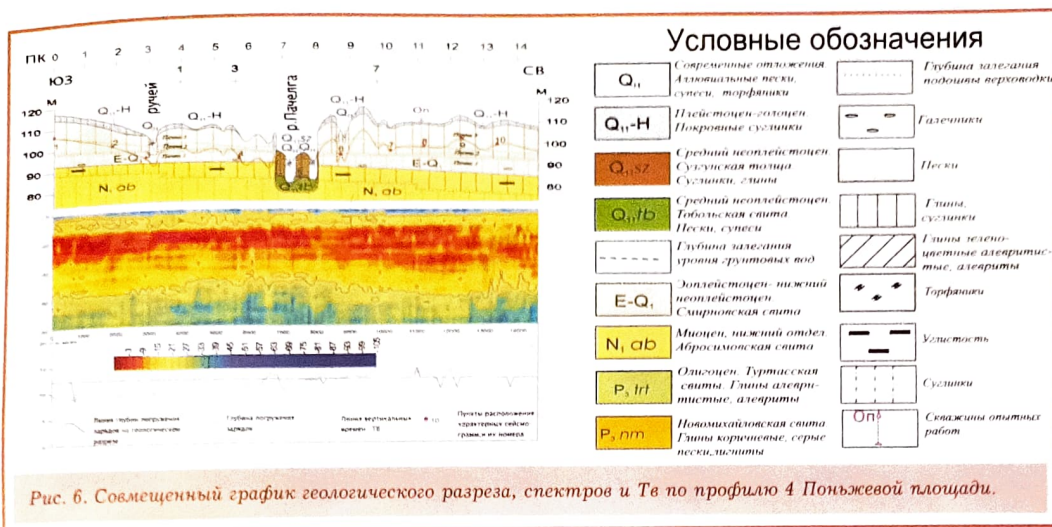


Рис. 6. Совмещенный график геологического разреза, спектров и T_g по профилю 4 Поньжевой площади.

2.1. На территории Поньжевой, Тальянской и Айсазской площадей (Картинка 3) увеличение глубины погружения заряда в глинистых породах смирновского уровня (описаны в разделе 1), как и на других участках южнее широтного течения р. Васюган (Картинка 9), способствует нормальному возрастанию энергии волн, расширению их спектра, улучшению отношения сигнал/помеха на сейсмической записи. Оптимальный интервал глубин скважин начинается: на лесных участках от 12 до 15 м, на участках перехода от леса к болотам и на болотах - от 15 до 18 м.

2.2. На Парбигской площади, поверхность которой имеет абсцисс, в пределах 110 - 145 м, геологическое строение отложений смирновской толщи несколько отличается от представленных выше площадей (рис. 3, 4). Смирновская достигает мощность 25-40 м и условно разбивается на три пачки А, Б и В.

Пачка А (соответствие пачки 1) мощностью 3-8 м сложена буровато-серыми различной зернистости песками (с прослойками песчаных глин и суглинков) водоносного горизонта, объемный вес которых составляет $1,45 \text{ г/см}^3$.

Пачка Б (соответствие пачки 2) мощностью 5-15 м сложена плотными, пластичными глинами и суглинками (плотность может доходить до комковатого состояния), объемный вес которых достигает $1,85 \text{ г/см}^3$.

Пачка В (соответствие пачки 3) сложена иловатыми суглинками (от легких до тяжелых) с объемным весом не выше $1,74 \text{ г/см}^3$, мощность которой колеблется от 10 до 20 м. Она условно разделяется на две толщи: нижняя - более плотная, а верхняя - менее плотная, находящаяся в зоне аэрации, глубина которой достигает 13 м и более.

На основании опытных работ даже в условиях

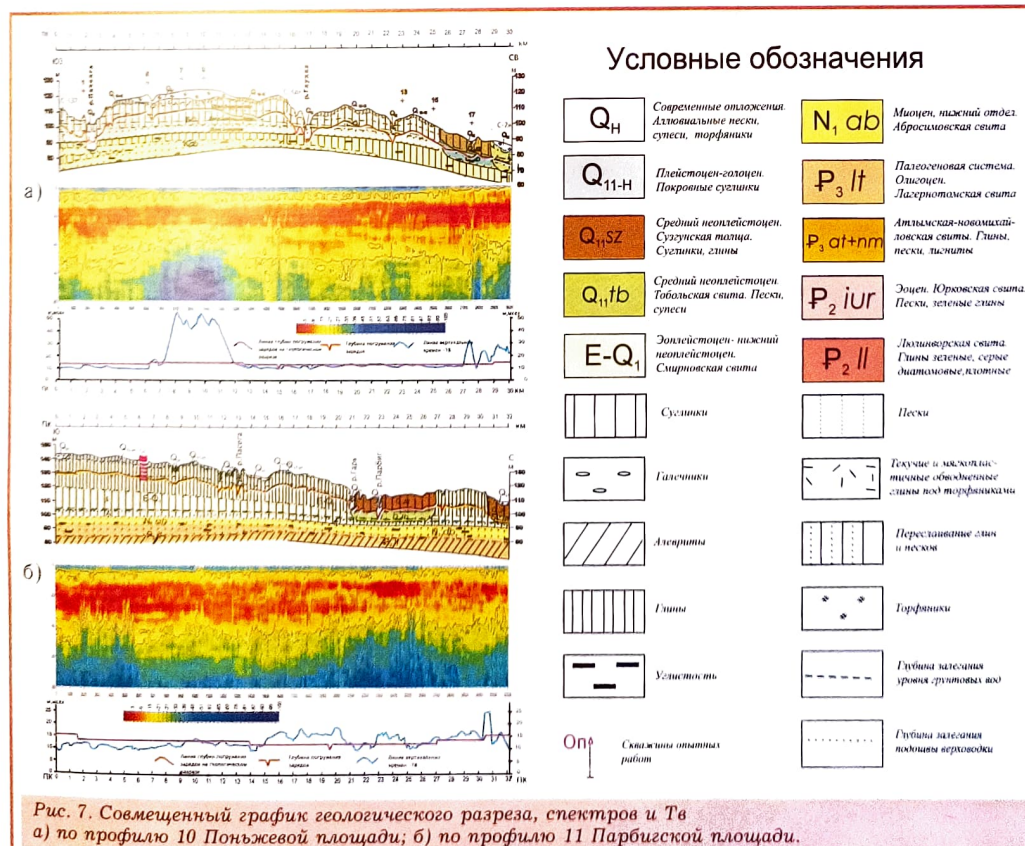


Рис. 7. Совмещенный график геологического разреза, спектров и T_g а) по профилю 10 Поньжевой площади; б) по профилю 11 Парбигской площади.



деса глубина скважин должна быть не менее 13,5 м, а на переходных и болотистых участках глубины - от 16 до 21 м (Картинка 10), но бурение на таких глубинах осложнено из-за плотных глин и суглинков.

3. С целью поиска корреляционных связей между геофизическими и ландшафтно-геоморфологическими критериями (признаками) по профилям 4, 7, 10 Поньжевой и профилю 11 Парбикской площадей (ПР 7 не рассматривается из-за ограничений объема статьи) проведены вычисления частотных спектров сейсмограмм (Картинка 11). Затем спектры были совмещены на едином графике с геологическим разрезом, с данными вертикального времени (Тв - синяя линия) и значений глубин взрывов (Н - красная линия).

На представленных графиках спектры рассчитаны по суммотрассам в окне 500-1500 мс сумм ОПВ с введенными статическими и кинематическими поправками.

3.1. Для характеристики качества по ПР 4 (Картинка 13) приведены характерные сейсмограммы в 10 точках профиля.

На участках ПВ 00-2500 и 9700-12200 наблюдается расширение спектров до 60 Гц (уровня сигнала 0-21 дБ), высокий уровень энергии сосредоточен на частотах 15-40 Гц, качество сейсмограмм хорошее, наблюдения отработаны из глин, суглинков смирновского уровня.

На участке ПВ 2500-9500 высокий максимум энергии сосредоточен в пределах 15-30 Гц, качество сейсмограмм оценено как хорошее, но спектр сужается до 45 Гц, наблюдения отработаны из обводненных пород смирновских и сузгунских отложений.

На участке ПВ 12500-14600 спектр до 50 Гц, на сейсмограммах максимум невысокой энергии - на 30-35 Гц, наблюдения отработаны из неоптимальных условий пачки 3 смирновских отложений - в зоне аэрации пород, т.е. ЗМС.

3.2. На участках профиля 10 - ПВ 00-5000 и 12000-27500 спектр расширяется до 50-55 Гц, высокая энергия на частотах 15-40 Гц, наблюдения отработаны в оптимальных условиях пород пачек 2,3 смирновского уровня (Картинка 14).

На участках ПВ 5000-12000 и 29000-32000, на болоте, спектр сужается до 35 Гц, максимум высокой энергии - на частотах 15-35 Гц, наблюдения отработаны в условиях недостаточных глубин мягко пластичных пород пачки 3 смирновского (на границе зоны аэрации) и обводненных песков тобольской свиты и третьей надпойменной террасы.

3.3. На участках профиля 11 Парбикской площади (Рис. 45) - ПВ 1600-5500, 20700-27000, 30500-32200 спектр сужается до 35-40 Гц, максимум энергии находится на частотах 13-35 Гц, наблюдения отработаны на границе зоны аэрации или из обводненных песков тобольской свиты.

На участках ПВ 00-1500, 5500-19500, 27000-30500 спектр расширяется до 40-50 Гц, повышенная энергия распределена на частотах 13-45 Гц, наблюдения отработаны в нижней части пачки В, вне зоны аэрации.

Выводы

1. Сейсморазведочные организации, имеющие большой опыт работ на территории Томской области, в основном, умело используют ландшафтные и литологические критерии (особенности, признаки) для определения оптимальной глубины скважин - изменения рельефа, литологию и плотность пород,

распространение лесов, болот (присутствие растительности на болоте), переходных зон между лесом и болотом. Но, учитывая свои технико-экономические возможности, они используют минимальную глубину оптимального интервала и применяют повышенный заряд (0,5 кг и более), из-за чего получают первичную информацию невысокого качества.

2. Отсутствие у подрядчика данных о геологическом строении приповерхностной части ВЧР ограничивает определение оптимальной глубины во время предварительной зарядки и получение сейсмических наблюдений с расширенным частотным спектром.

3. В условиях обводненных пород, особенно в мягкопластичных и текучих средах, происходит сужение частотного спектра и смещение максимума высокой энергии полезных сейсмических волн в сторону низких частот.

4. В водоносных горизонтах более высокочастотный спектр образуется в плотных мелкозернистых песках.

5. На участках распространения озер и открытых болот текучие и мягкопластичные породы могут достигать 15-ти метровой глубины.

Рекомендации

1. На исследуемой территории Томской области (при сложившемся подходе к определению оптимальной глубины в сейсморазведочных организациях) необходимо увеличить глубину погружения зарядов не менее, чем на три метра, что приведет к заметному повышению качества полевого материала, снижению риска получения некачественной информации и затрат на переработку наблюдений.

2. В условиях озер и болот в отложениях смирновской толщи необходимо на оптимальной глубине использовать величину заряда в два раза меньше (по отношению к смежным участкам). Это приведет к расширению частотного спектра, снижению уровня поверхностных волн и расширению (выравниванию) спектров по профилю.

3. При альтернативе выбора условий взрыва в водоносном горизонте и в глинах, необходимо погружать заряд в глину, даже если придется бурить скважину на несколько метров глубже.

4. Необходимо следить за погружением заряда в скважину на глубину в пределах 3 м под подошву водоносного горизонта (или пльвуна).

5. На аномальных протяженных участках сужения спектров сейсмической записи, которое явно происходит из-за условий возбуждения, камеральные подразделения должны применять до суммирования необходимые процедуры обработки для приведения частотных спектров в нормальный вид по профилю (по площади).

6. Предприятия, проводящие сейсмические исследования в Томской области, должны обеспечивать свои полевые подразделения информацией о геологическом строении неоген-четвертичных отложений приповерхностной части ВЧР.

Для этой цели необходимо:

- приобрести ее в научно-исследовательских и производственных организациях, проводивших геологические инженерно-изыскательские работы;

- освоить дистанционный электрокаротаж скважин (точечные зондирования по профилю) для изучения геологического разреза приповерхностной части ВЧР до проведения буровзрывных работ.



ЗАО СОЕДИНИТЕЛЬ

**РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ
СПЕЦИАЛЬНЫХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ И КАБЕЛЕЙ**

РОССИЯ, 456320, Челябинская область, г. Миасс, ул. Коммунальщиц, 7;

тел.: (3513) 54-70-07, 54-67-33; факс: (3513) 54-67-33

E-mail: sdn@chel.surnet.ru; www.sdn.ru

Отдаем лучших людей и оборудование в аренду (возм. варианты)

(495) 202-32-17, 202-32-27



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.

ГЕОСЕЙС

тел: (495) 202-32-17 / 202-32-40

факс: (495) 202-32-27

e-mail: geoseis@col.ru / geoton@geoton.ru

http: • www.geoton.ru