

## Новая аппаратура для радиоволновой геоинтроскопии 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  $\rho$  и относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Породы, обладающие более низкими значениями  $\rho$  и (или)  $\epsilon$ , 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., Абросимов В.А., Луконин В.И., Титов В.М., Астафьев Г.П.). Данная аппаратура позволила уже тогда проводить межскважинное радиопросвечивание на расстоянии 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 аттенюатор, 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, согласующие элементы выбирались таким образом, чтобы даже в самых низкоомных породах уйти от возможного резонанса, т.е. стабилизировать ток ценой 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 «технологий 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 «Радионда LTD» была начата разработка новой модификации радиопросвечивания и соответствующей аппаратуры, получившей название «радиоволновая геоинтроскопия межскважинного пространства» (РВГИ) [1, 3, 7]. Опытный образец скважинной радиоволновой аппаратуры первого поколения РВГИ-2Н успешно прошел ведомственные испытания Минтопэнерго РФ в 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 детально (2D и 3D) геоэлектрического картирования, «визуализация» внутреннего строения геологической среды в пространстве между скважинами. Используя 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 «всерной» (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 производятся 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;

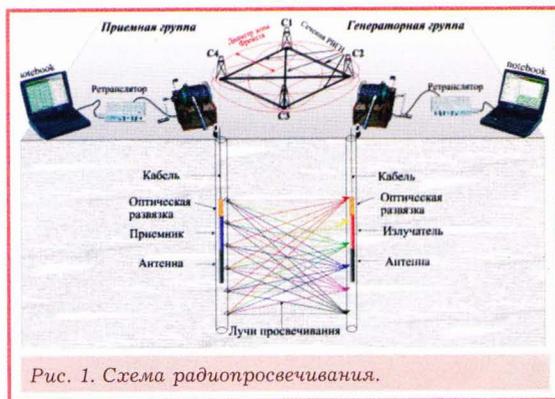


Рис. 1. Схема радиопросвечивания.

$R$  - расстояние между приемником и передатчиком;

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

$j$  - частота электромагнитного поля,  $\mu$  - магнитная проницаемость,  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление пород.

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

$$E_0 = \frac{J \cdot l_t \cdot l_r}{2} \cdot f \mu. \quad (2)$$

Значение коэффициента установки ( $E_0$ ) определяется током в излучающей антенне ( $J$ ) и эффективными высотами излучающей ( $l_t$ ) 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 требуются частоты 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	Кoeffициент установки $E_0(L_n)$ (мкВм)	(на частоты 0,021 - 0,156) - $5 \cdot 10^9$ (на частоты 0,312 - 1,25) - $4 \cdot 10^6$	(на частоты 0,061 - 0,156) - $3 \cdot 10^6$ (на частоты 0,312 - 1,25) - $2 \cdot 10^6$
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  $\lambda$  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, включаемой 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, невозможна.

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 оптико-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 сравнение 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 радиопульса 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 плавно 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

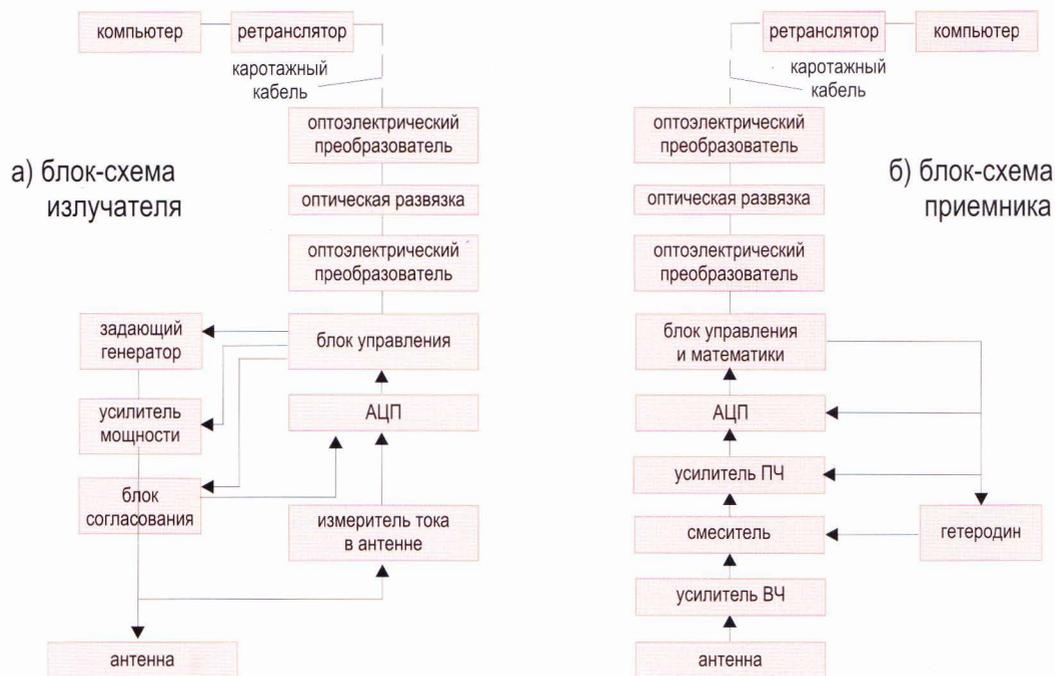


Рис. 2. Блок-схема аппаратуры РВГИ-2005.

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, оптоволоконная развязка находится в стеклопластиковом корпусе, длина которого 2250 мм.

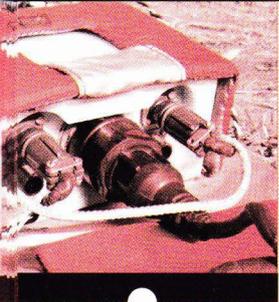
Специально разработанные программы управления, измерения и записи данных позволяют оператору вести непрерывный визуальный контроль параметров излучения. На дисплее (рис.3) в окне регистрации данных в графическом режиме в реальном времени отображаются амплитуда тока на входе антенны в условных единицах, 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  $L_{рез} = 0,48$  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  $\pm 150$  Гц.) При этом реализуется ширина полосы всего измери-



Рис. 3. Интерфейс программы записи.



# ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

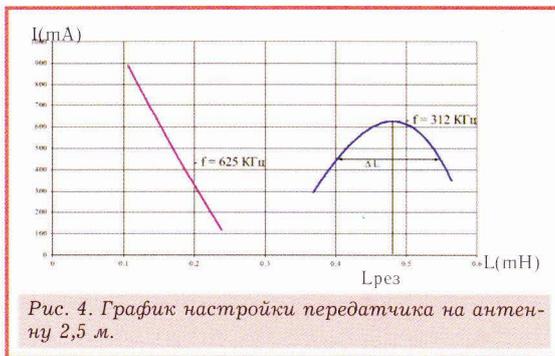


Рис. 4. График настройки передатчика на антенну 2,5 м.

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 скважин 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

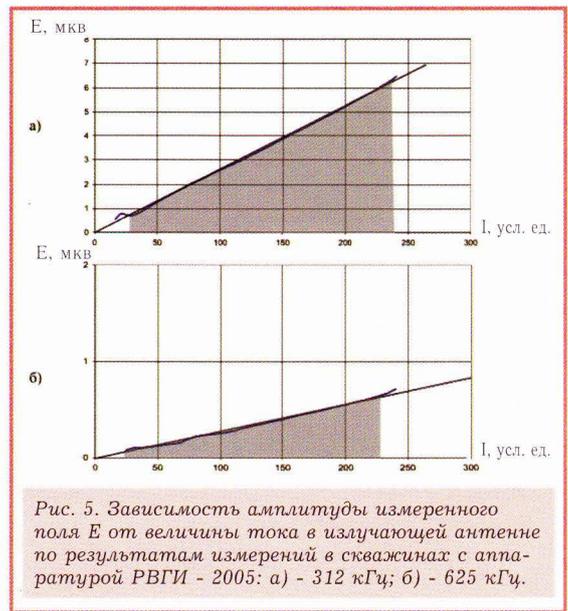


Рис. 5. Зависимость амплитуды измеренного поля  $E$  от величины тока в излучающей антенне по результатам измерений в скважинах с аппаратурой РВГИ - 2005: а) - 312 кГц; б) - 625 кГц.

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 Карелии, 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-

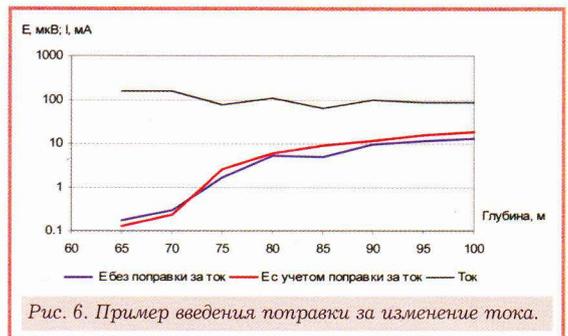


Рис. 6. Пример введения поправки за изменение тока.

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 исследований 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 при замене 10-ти метровой антенны на 12-ти метровую сигнал с учетом возрастания тока должен был возрасти в  $12 \cdot 233 / 10 \cdot 222 = 1,3$  раза. Между тем он возрос в  $100 / 36 = 2,8$  раза. Это легко объясняется, если принять что в 10-ти метровой антенне ток линейно спадает к концу, а в комбинированной приблизительно постоянен. 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 ( $\rho_{\text{эф}}$  и  $\epsilon_{\text{эф}}$ ) 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 400x400 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 горизонтальном слоистом разрезе, когда сопротивление песчано-глинистых отложений составляет 10-40 Ом·м, показаны на примере уранового месторождения, обрабатываемого 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-

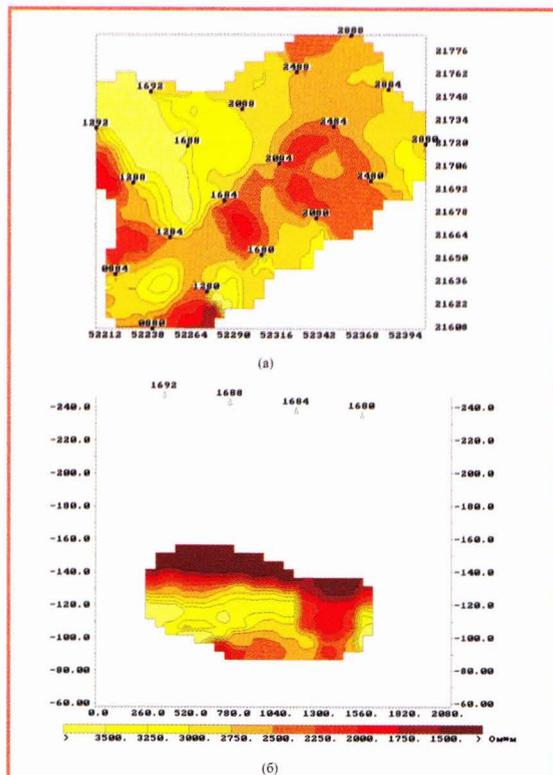
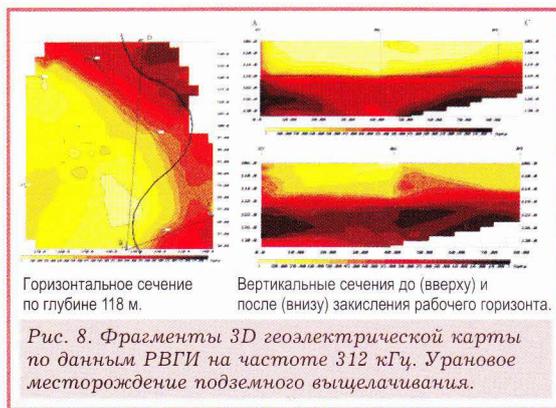


Рис. 7. Фрагмент 3D геоэлектрической карты по данным РВГИ на частоте 156 кГц. Участок Южный (Якутия). а) горизонтальное сечение по отметке 110 м. б) вертикальный разрез по линии скважин 1680 - 1692.

# ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ



Для результаты просвечивания до и после подачи окислителя, можно увидеть, что процесс закисления залежи приводит к общему снижению 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 геокриологии и нефтяной геологии. Применительно к мерзлым породам распределение  $\rho_{\text{эф}}$  отражает развитие процесса оттаивания или промерзания массива, а распределение  $\epsilon_{\text{эф}}$  позволяет детально локализо-

вать участки наибольшего водонасыщения (фильтрации), либо «окна» не промороженного 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: 10.1029/2002JE001880, April 2003.
2. Борисов Б.Ф., Гуревич Г.Ф., Чигирина 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 низкоомных 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 геокриологов России. Москва, МГУ. 2001.