

УДК 550.370:621.039

## НИЗКОЧАСТОТНАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗОВОГО ПАРАМЕТРА ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Мариненко В.А., Максимов Е.М., Шевченко В.П.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

Представлена новая электроразведочная аппаратура, параметры которой позволяют использовать ее для отслеживания малых вариаций электрического сопротивления и вызванной поляризации. Аппаратура создана для проведения мониторинга глубинных геофизических процессов, в частности, для ее применения на объектах атомной отрасли и в местах проведения подземных ядерных взрывов. Возможно применение аппаратуры в разведочной геофизике.

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ характеристик и возможностей существующих геофизических аппаратурных средств, а также опыт эксплуатации аппаратуры, ранее разработанной в Институте геофизических исследований (ИГИ), показали, что модели, которые в основном созданы для поиска и разведки полезных ископаемых, не всегда удовлетворяют требованиям к проведению регулярного мониторинга геофизических полей. Для такого мониторинга, спецификой которого является необходимость отслеживать малые изменения геофизических величин, требуется не только существенно повысить точность и разрешающую способность аппаратуры, но и увеличить количество измеряемых параметров, а также обеспечить одновременность их измерения в нескольких точках. Следует отметить, что в рудной электроразведке в последнее время также возросли требования к точности аппаратуры [1].

В течение 2010–2017 гг. в ИГИ осуществлена разработка ряда приборов, параметры которых позволяют использовать их для проведения геофизического мониторинга, в частности, на объектах атомной энергетики и в местах проведения подземных ядерных взрывов [2–4]. В этот перечень входят: электроразведочный генератор ГЭР-5кВт-25А-1000В; электроразведочный генератор ГЭР-65W-500В; макет экспериментального образца электроразведочного генератора ГЭР-3кВт-1000В; одноканальный приемник ВПФ-210М и макет экспериментального образца восьмиканального приемника ВПФ-8МА. Ниже приведены характеристики приборов ГЭР-3 и ВПФ-8МА, макеты которых разработаны и изготовлены в рамках гранта МОН РК 1757/ГФ4 [3].

### ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНОЙ АППАРАТУРЫ

#### Макет экспериментального образца генератора ГЭР-3

Макет экспериментального образца генератора ГЭР-3 (рисунок 1) предназначен для генерирования переменного и импульсного высокостабильного тока

прямоугольной формы в широком диапазоне нагрузок и может быть использован в различных электроразведочных методах: сопротивления, вызванной поляризации, частотного зондирования, заряда и т.д. Схемные решения в новом генераторе обеспечили долговременную стабильность амплитуды выходного тока и значение дифференциального фазового параметра (ДФП) для этого тока не более 0,02 градуса до частоты 9,76 Гц.

Область применения генератора – мониторинг геоэкологической обстановки на объектах повышенной опасности, а также поиск и разведка полезных ископаемых.

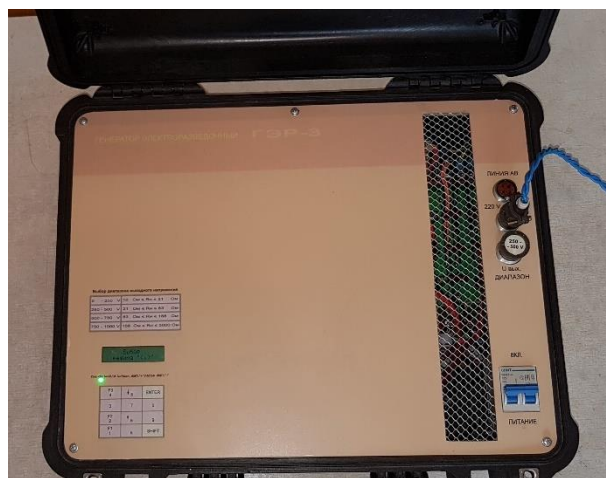


Рисунок 1. Макет экспериментального образца генератора ГЭР-3

#### Основные технические параметры:

|                                                        |                      |
|--------------------------------------------------------|----------------------|
| Диапазон выходных токов, А .....                       | от 0,1 до 16         |
| Максимальная выходная мощность, Вт .....               | 3000                 |
| Диапазон выходных напряжений, В .....                  | от 5 до 1000         |
| Основная погрешность установки выходного тока, % ..... | ≤ 0,5                |
| Дискретность задания выходного тока, мА .....          | 1                    |
| Нестабильность выходного тока, % .....                 | ≤ 0,05               |
| Диапазон рабочих частот, Гц .....                      | 0,0025–625           |
| Нестабильность частоты выходного тока, PPM .....       | ≤ 2·10 <sup>-6</sup> |
| Масса генератора, кг .....                             | 18,2                 |

### Макет экспериментального образца восьмиканального приемника ВПФ-8МА

Макет экспериментального образца восьмиканального приемника ВПФ-8МА (рисунок 2) предназначен для работ методами вызванной поляризации (ВП), сопротивлений, заряда, наблюдения вариаций сопротивления и ВП в автоматическом режиме. Приемник обеспечивает частотный (фазы на четырех парах гармоник) и импульсный (до 20 стробов) режимы ВП, возможность определения «знака» сигнала при работе методом заряд-градиент, большой динамический диапазон входного сигнала (31-разрядный АЦП), высокую помехоустойчивость (аналоговые и цифровые фильтры, статистическая обработка сигнала, вывод результатов накопления после каждого периода сигнала), вывод параметров и изображения сигналов на графический дисплей, возможность регистрации непрерывных сигналов, возможность запуска и регистрации параметров через заданное время в автоматическом режиме по программе, запуск от внешнего устройства. Уровень собственных шумов канала – не более 10 нВ. Предусмотрен контроль сопротивления приемных линий с минимальной поляризацией электродов. Обеспечена компенсация постоянной составляющей, практически не увеличивающая шумы входных каскадов.



Рисунок 2. Макет экспериментального образца восьмиканального приемника ВПФ-8МА

#### Основные технические параметры:

|                                               |                   |
|-----------------------------------------------|-------------------|
| Основной диапазон рабочих частот, Гц          | 0,019–9,76        |
| Диапазон измеряемых напряжений, мВ            | 0,0002 до 5000    |
| Входное сопротивление, МОм                    | 10                |
| Погрешность измерения напряжения, %           | 0,2               |
| Погрешность измерения фазовых параметров, °   | 0,02              |
| Подавление помех 50 Гц на низких частотах, дБ | 100               |
| Объем встроенной памяти, Гбайт                | 16                |
| Потребляемая мощность, Вт                     | 2,7               |
| Масса приемника с батареей питания, кг        | 3,6               |
| Диапазон измеряемого фазового параметра, °    | не менее $\pm 27$ |

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРОБОВАНИЯ МАКЕТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

Как показал опыт мониторинга изменений электрических параметров (сопротивления и вызванной поляризации) геологической среды на ряде важных объектов, в том числе объектах атомной энергетики, вариации этих параметров составляют, как правило, небольшую величину (единицы, а иногда доли процента) от значения этих параметров [3].

Изучение вариации электрических параметров продолжено с использованием макетов экспериментальных образцов генератора ГЭР-3 и приемника ВПФ-8МА на геофизическом полигоне «Каскелен» (Алматинская обл.) в условиях песчано-глинистого геологического разреза. На этом полигоне обустроена стационарная установка дипольного электрического зондирования (ДЭЗ), обеспечивающая в режиме постоянного мониторинга зондирование геологического разреза на глубинах 10–45 м.

При измерениях малых вариаций определяющую роль играет стабильность измерительной системы приемник – генератор. Следует учитывать, что используемая питающая линия является комплексной нагрузкой с изменяющимися параметрами. Так, измерения на экспериментальном полигоне «Каскелен» показали, что за ~3,5 месячный период наблюдений (с 03.01.19 г. по 30.04.19 г.) сопротивление питающей линии изменилось с 123 Ом до 52 Ом. На рисунке 3 приведена запись тока, напряжения и фазового параметра выходного напряжения генератора за период времени с 26.02.19 г. по 1.03.19 г., при работе на стационарную питающую линию ДЭЗ экспериментального геофизического полигона «Каскелен».

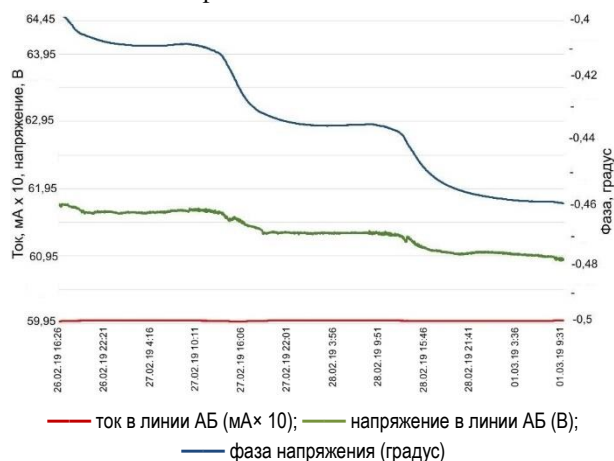


Рисунок 3. Изменения тока, напряжения и фазового параметра выходного напряжения генератора

Напряжение в питающей линии АБ изменилось с 64,4 В до 61,7 В, что при токе 0,6 А соответствует изменению сопротивления линии с 107,3 до 102,8 Ом (нестабильность тока не превысила 0,01 %). Фазовый параметр, измеренный между первой и третьей гармоническими составляющими напряжения, за время наблюдений изменился от  $-0,46^\circ$  до  $-0,48^\circ$ , а фазовый параметр тока не превысил  $0,004^\circ$ .

На рисунке 4 приведен график опытной оценки долговременной нестабильности параметров системы. Измерения выполнены при заданном токе генератора 4 А частотой 9,76 Гц и при использовании для контроля тока образцового сопротивления ( $R_0$ ) 0,1 Ом. Генератор работал на заземленную питающую линию АВ, сопротивление которой за время измерений изменилось с 56 Ом до 62 Ом. Приведенные графики амплитуды первой гармоники напряжения на сопротивлении  $R_0$ , измеренных в 1, 2 и 6 каналах приемника показывают погрешность менее 0,1 %, что в два раза меньше, чем заданная по Техническому заданию (ТЗ) для приемника, и в пять раз менее, заданной по ТЗ для генератора. Максимальное отклонение от заданного значения выходного тока для пары приемник-генератор в каждом из каналов не превысило 0,015 % за 5 часов работы (при исключении 20 минут времени выхода на режим). Установлено, что одновременные скачки сигнала до 1 мкВ вызваны изменениями питающего генератора сетевого напряжения на 5–10 %.

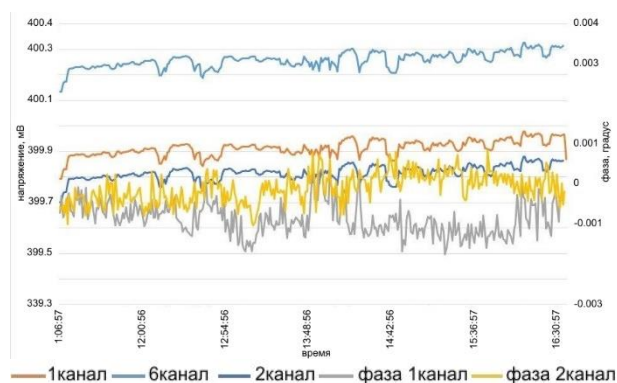


Рисунок 4. Результаты наблюдения сигнала в питающей линии

На рисунке 4 также показаны графики фазовых параметров для первого и второго каналов. Отклонение фазы составило не более  $0,002^\circ$  при допустимой по ТЗ погрешности  $0,02^\circ$ .

Возможность проведения измерений с высокой точностью в районах с высоким уровнем промышленных помех оценивалась на территории экспериментального полигона «Каскелен» по наблюдениям с осевой установкой диполь-диполь. Длина питающего (АВ) и каждого из 8 приемных (МН) диполей составляла 10 м, минимальное расстояние между центрами питающего и приемного диполей  $L$  – 20 м, максимальное расстояние – 90 м. Выходной ток генератора – 700 мА, частота следования разнополярных импульсов – 1,22 Гц. На рисунке 5 приведены примеры графиков относительных значений напряжений  $\Delta U/U_{\text{среднее}}$  первого, третьего, пятого и восьмого каналов, зарегистрированных в течение 75 час, с интервалом 1 мин. Среднее значение сигнала в первом канале 16 мВ, в восьмом канале – 1000 мВ, амплитуда помехи в дневные часы достигает 800 мВ. График

восьмого канала, характеризующий сопротивление приповерхностного слоя, имеет выраженный сезонный тренд, на фоне которого заметны суточные вариации. На графике пятого канала заметны полусуточные вариации. Одновременно с измерениями амплитуды измерены фазовые параметры вызванной поляризации, результаты фазовых измерений по первому и восьмому каналам также приведены на рисунке 5.

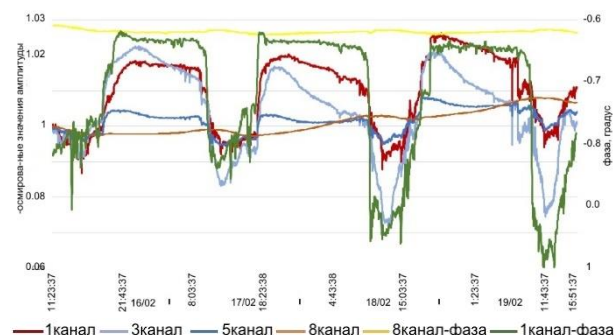


Рисунок 5. Относительные изменения напряжений и фазового параметра первого (90), третьего (60), пятого (50) и восьмого (20) каналов (в скобках – расстояние между центрами питающего и приемного диполей в м)

Полученные результаты показали возможность измерения вариаций электрического сопротивления амплитудой менее одного процента от величины электрического сопротивления в районах с высоким уровнем промышленных помех. При этом, погрешность измерения напряжения должна быть менее 0,2 % и стабильность пары генератор – приемник – лучше 0,1 %.

Возможность одновременного наблюдения нескольких различных параметров (процессов) важна не только с экономической точки зрения, при проведении мониторинга важно установить взаимную связь процессов (или отсутствие такой связи). Приемник ВПФ-8МА доработан с целью обеспечения возможности одновременного измерения спектральных характеристик сигналов, возбуждаемых генератором и сигналов от других датчиков (движения, температуры, давления). На рисунке 6 приведены записи вариаций напряжений на приемных диполях  $\Delta U$  и параметров движения сигнала, возбуждаемого током генератора, а также сигналов от других датчиков (движения, температуры, давления) за период времени 68 часов. Для регистрации параметров движения использован акселерометр, изготовленный на основе микроэлектромеханических систем (МЕМС) микросхемы LIS2L02. Наблюдения выполнялись при токе в питающей линии 800 мА.

На графиках вариаций амплитуды первой гармоники  $\Delta U_{20}$  м и  $\Delta U_{40}$  м, пропорциональных вариациям сопротивлений на глубинах 10 и 20 м, видны суточные, заметны полусуточные вариации и возрастание помех в дневные часы. Сигналы с диполей удаленных на 20 м и на 40 м имеют практически одинаковую форму.

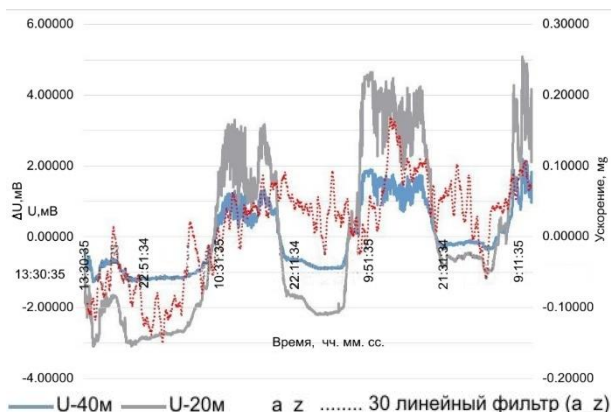


Рисунок 6. Вариации переменной  $\Delta U$  составляющих сигнала и ускорения по вертикальной компоненте  $\Delta a_z$

На рисунке 6 показаны вариации выходного сигнала акселерометра, измеряющего вертикальную

компоненту. Сигнал с выхода акселерометра сильно зашумлен, но можно заметить связь этого сигнала с вариациями напряжений. Таким образом, показана возможность примененного измерительного устройства для одновременной регистрации сигналов электротометрии и датчиков, измеряющих другие параметры, например, параметры движения.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что разработана новая электротометрическая аппаратура, параметры которой позволяют использовать ее для отслеживания малых вариаций электрического сопротивления и вызванной поляризации. Аппаратура может быть использована для выполнения мониторинга глубинных геофизических процессов, в частности, на объектах атомной отрасли, в местах проведения подземных ядерных взрывов, при выявлении зон фильтрации, при решении других различных экологических задач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зорин Н. И., Мариненко В. А. Спектральные измерения ВП горных пород в естественном залегании с использованием высокочастотной аппаратуры / Н.И. Зорин, В.А. Мариненко // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов: издательство ЕАГО, 2017. – № 2. – С. 50–57.
2. Развитие технических средств геофизического мониторинга для объектов атомной энергетики: отчет о НИР (заключительный) / Институт геофизических исследований (РГП ИГИ); рук. В.А. Мариненко. – Курчатов, 2014 г. – № ГР 0112РК00757. – Инв. № 0215РК00246.
3. Разработка геоэлектротометрической системы, работающей методами сопротивлений и вызванной поляризации для мониторинга геоэкологической обстановки на объектах повышенной опасности, а также для поиска и разведки полезных ископаемых: отчет о НИР (заключительный) / Институт геофизических исследований (РГП ИГИ); рук. В.А. Мариненко. – Курчатов, 2017 г. – 69 с. – № ГР 0115РК01939. – Инв. № 0217РК01376.
4. Разработка технологий мониторинга безопасности объектов атомной отрасли на основе изучения техногенных изменений геологической среды в местах их размещения (промежуточный) / Институт геофизических исследований (РГП ИГИ); рук. В.Н. Шайторов. – Курчатов, 2017 г. – 81 с. – № ГР 0119РК01157. – Инв. № 0218РК00270.
5. Патент 32685KZ, МКИ G01V 3/08 (2006/01) Устройство для нелинейной обработки геоэлектротометрических сигналов / В.А. Мариненко [и др.] //Официальный бюл. «Промышленная собственность». – Национальный институт интеллектуальной собственности (НИИС), МЮ, опубл. 26.02.2018, Бюл. № 8. – 4 с.

#### КЕДЕРГІ МЕН ӨНДІРІЛГЕН ҮЙЕКТЕЛДІН ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫҚ-ФАЗАЛЫҚ ПАРАМЕТРІ ШАҒЫН ӨЗГЕРІЛУЛЕРІН БАҚЫЛАУ ҮШІН ТӨМЕНЖІЛІКТІ ЭЛЕКТРБАРЛАУ АППАРАТУРАСЫ

В.А. Мариненко, Е.М. Максимов, В.П. Шевченко

*Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Оның техникалық параметрлері электр кедергісі мен өндірілген үйектелудің шағын вариацияларын байқау үшін пайдалануға мүмкіншілік беретін жаңа электрбарлау аппаратурасы көрсетілген. Бұл мүмкіншіліктер тереңгі геофизикалық процесстердің, атап айтқанда атом саласы объектілері мен жерасты ядролық жарылыстар жүргізілген жерлерінде, мониторингін жүргізуіне мүмкіндік береді. Аппаратураны барлау геофизикасында қолдануға болады.

#### LOW-FREQUENCY ELECTRICAL SURVEY EQUIPMENT FOR OBSERVATION OF RESISTIVITY'S SMALL CHANGES AND DIFFERENTIAL-PHASAL PARAMETER OF INDUCED POLARIZATION

V.A. Marinenko, E.M. Maksimov, V.P. Shevchenko

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper presents a new electrical survey equipment, technical parameters of which allow to use it to trace small variations of electrical resistivity and induced polarization. These capabilities allow to monitor deep geophysical processes, particularly at the atomic branch facilities as well as in places of underground nuclear explosions' implementation. The application of the equipment is possible in reconnaissance geophysics as well.