

УДК [004.942:519.677]:550.837: 621.317.328

## ПРОГРАММА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РЕГИСТРАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНОГО КОМПЛЕКСА С ШУМОПОДОБНЫМИ СИГНАЛАМИ

*В.В. Бобровский, П.В. Ильичев*

Предлагается программа для обработки данных модельных, лабораторных и полевых экспериментов, экспериментального электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами. Рассмотрены инструментарий и возможности программы. Приведена методика и результаты обработки данных полевого эксперимента по получению кривой становления поля и вычислению кажущегося удельного электрического сопротивления земной коры в зависимости от времени его становления.

*Ключевые слова:* шумоподобные сигналы; геоэлектроразведка; корреляционная обработка сигналов; кажущееся электрическое сопротивление.

## ШУУЛДАГАН СИГНАЛДАРЫ БАР ЭЛЕКТР ЧАЛГЫНДООЧУ КОМПЛЕКСТИН КАТТОО ЖАНА МОДЕЛДӨӨ МААЛЫМАТТАРЫН ИШТЕП ЧЫГУУ ПРОГРАММАСЫ

*В.В. Бобровский, П.В. Ильичев*

Бул макалада шуулдаган сигналдары бар эксперименталдык электр чалгындоочу комплекстин моделдик, лабораториялык жана талаа эксперименттеринин маалыматтарын иштеп чыгуу үчүн программа сунушталат. Программанын каражаттары жана мүмкүнчүлүктөрү каралган. Калыптануу мезгилине жараша жер кыртышынын салыштырмалуу электр каршылыгын эсептөө боюнча талаа экспериментинин маалыматтарын иштеп чыгуунун методикасы жана жыйынтыктары көрсөтүлдү.

*Түйүндүү сөздөр:* шуулдаган сигналдар; геоэлектрдик чалгындоо; сигналдарды корреляциялык иштеп чыгуу; электр каршылыгы.

## PROGRAM OF PROCESSING DATA OF REGISTRATION AND MODELING OF ELECTRIC EXPLORATION COMPLEX WITH PSEUDONOISE SIGNALS

*V.V. Bobrovsky, P.V. Ilichev*

A program is proposed for processing data from model, laboratory and field experiments, an experimental electrical exploration complex with pseudonoise signals. The tools and features of the program are considered. The methodology and results of processing data from a field experiment to obtain a field formation curve and calculate the apparent electrical resistivity of the earth's crust depending on the time of its formation are presented.

*Keywords:* pseudonoise signals; geoelectric exploration; correlation signal processing; apparent electrical resistance.

**Введение.** Научная станция РАН в г. Бишкеке продолжает работы по разработке современного электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами (ЭРК ШПС). В основе работы ЭРК ШПС лежит известный в геоэлектроразведке метод электромагнитного зонди-

рования земной коры с искусственным (контролируемым) источником – метод становления поля в ближней зоне (ЗСБ). Уникальная особенность метода ЗСБ заключается в том, что разность между источником (индукционной зондирующей рамкой) и точкой наблюдения (датчиком

сигнала) может быть значительно меньше исследуемой глубины [1]. Метод ЗСБ позволяет увеличить детальность проводимых исследований – выявлять и изучать поведение меньших по размерам неоднородностей в земной коре. Отличительной особенностью разрабатываемого комплекса является использование для зондирования земной коры специальных шумоподобных сигналов (ШПС). За счет применения корреляционной обработки регистрируемых приемным индукционным датчиком сигналов (ИДС) с зондирующими шумоподобными сигналами, обеспечивается значительное улучшение соотношения сигнал-шум на выходе измерительной системы с ШПС по сравнению с типовым (стандартным) методом ЗСБ, в котором применяются детерминированные зондирующие последовательности импульсов. Для обработки данных, полученных с помощью ЭРК ШПС в лабораторных и полевых экспериментах, а также для обеспечения математического моделирования измерительной системы на персональном компьютере была разработана специальная программа BBS\_ViewerM\_NR [2].

**Основные задачи.** При обработке данных полевого эксперимента главной задачей программы является получение кривой становления поля и вычисление кажущегося сопротивления земной коры в зависимости от времени его становления. Для сравнения результатов зондирования земной коры с помощью шумоподобных сигналов с типовым электроразведочным способом зондирования земной коры (зондирование становлением поля в ближней зоне) с помощью периодических импульсных сигналов с регулярной структурой в ЭРК ШПС предусмотрен режим зондирования, обеспечиваемый как дополнительными аппаратными средствами (активная приемная индукционная рамка), так и необходимым для этого алгоритмами обработки. При зондировании шумоподобными М-последовательностями кривая становления поля находится путем вычисления взаимной корреляционной функции (ВКФ) между сигналом, принимаемым индукционным датчиком, и сигналом одиночной зондирующей последовательности (идеальная биполярная М-последовательность прямоугольных импульсов). При зондировании детерминированными биполярными последовательностями токовых

импульсов прямоугольной формы, вычисление кривой становления поля сводится к синхронному накоплению сигнала, принимаемого активной индукционной рамкой в паузах между зондирующими импульсами.

Для обеспечения хорошего качества измерительных данных, получаемых при помощи ЭРК ШПС, необходимо гарантировать высокую точность измерения контролируемых параметров и характеристик исследуемого объекта. Поэтому в условиях полевых или лабораторных экспериментов, осуществляется контроль работоспособности и производится измерение наиболее важных характеристик и параметров измерительного комплекса. Основные технические характеристики и параметры измерительного канала определяются через его переходную характеристику. Для получения переходной характеристики измерительного канала, перед каждым измерительным сеансом проводятся сеансы градуировки измерительного канала. Обработка зарегистрированных сигналов градуировки выполняется в несколько этапов. На первом этапе выполняется процедура синхронного весового накопления с целью получения переходной характеристики измерительного канала. Второй этап заключается в выполнении процедуры численного дифференцирования переходной характеристики для получения импульсной переходной характеристики измерительного тракта. На заключительном этапе применяется преобразование Фурье, в результате которого строится амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики измерительного тракта, включая измерительный датчик.

Основной задачей математического моделирования является изучение особенностей применения шумоподобных зондирующих сигналов (ШПС) в системах активной электроразведки земной коры в сравнении с типовыми системами, использующими для зондирования детерминированные биполярные последовательности токовых импульсов с постоянной длительностью. В программе реализованы математические модели электроразведочных систем с шумоподобными и детерминированными последовательностями зондирующих импульсов. Модельный эксперимент позволяет получить сравнительные данные для электроразведочных систем с детерминированными и шумоподобными

сигналами и оценить количественно выигрыш в соотношении сигнал-помеха, получаемый при использовании ШПС и оптимально выбрать параметры системы с ШПС [3].

**Структура и инструментарий программы.** Основным элементом программы является внутренняя структура данных, называемая в дальнейшем “сигналом”. Данные представляют собой одномерный массив конечной длины с набором последовательных значений, получаемых в результате дискретизации непрерывного во времени сигнала. В качестве сигналов могут выступать как сигналы, полученные в процессе регистрации данных с выхода измерительного канала ЭРК ШПС, так и сигналы, генерируемые программным методом. Результат преобразования первичного сигнала, полученный в процессе применения к нему какого-либо алгоритма обработки, также будет являться сигналом. Каждому сигналу ставится в соответствие информационная структура, содержащая сведения, необходимые для его отображения в графической или табличной форме.

Обработка сигналов выполняется при помощи набора алгоритмов обработки, называемых “инструменты”. Под инструментом понимается алгоритм обработки данных, в котором входом является сигнал с дополнительным набором входных параметров, необходимых для работы алгоритма, а выходом может являться обработанный сигнал либо набор параметров, вычисленных при помощи алгоритма обработки. Все инструменты объединены в структуру (рисунк 1), каждый из элементов (модулей) которой содержит набор инструментов, отвечающих за решение определенного класса задач.

**Инструменты обработки данных ЗСБ** предназначены для получения кривой становления поля и вычисления кажущегося удельного электрического сопротивления земной коры при проведении полевых экспериментов с ЭРК ШПС в режимах работы с шумоподобными и детерминированными последовательностями зондирующих импульсов.

**Инструменты математического моделирования** предназначены для исследования особенностей применения корреляционной обработки шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре. Подробнее алгоритмы математических моделей и результаты исследова-

ний, полученные с применением инструментов данной группы, описаны в работах [3–5].

**Инструменты первичной обработки и анализа сигналов** предназначены для оперативного просмотра, первичной обработки и анализа зарегистрированных сигналов. Ниже перечислены некоторые из них:

- интегрирующий и дифференцирующий фильтры с дискретно заданной импульсной переходной характеристикой;
- медианный фильтр Дирихле;
- фильтр Тьюки;
- вычисление и построение графиков амплитудного и фазового спектра выбранного сигнала;
- вычисление математического ожидания и среднеквадратичного отклонения выбранного сигнала;
- удаление из сигнала низкочастотных нестационарных процессов (трендов), описываемых полиномами заданного порядка;
- удаление из сигнала постоянной составляющей (центрирование);
- сумма двух сигналов;
- простейшие математические и арифметические операции с сигналами (интегрирование, дифференцирование, инверсия, умножение на коэффициент и т. п.).

**Методика и результат обработки данных полевого эксперимента.** Сигнал, регистрируемый на приемной стороне измерительного канала ЭРК ШПС), в режиме работы с шумоподобными зондирующими последовательностями, пропорционален магнитному потоку, пронизывающему витки измерительной катушки индукционного датчика сигналов. Перед дальнейшей обработкой необходимо выполнить операцию центрирования зарегистрированного сигнала. Данная операция устраняет постоянное смещение сигнала, возникающее в измерительном канале аппаратуры. Далее выполняется процедура вычисления взаимно-корреляционной функции (ВКФ) между зарегистрированным сигналом и сигналом одиночной зондирующей М-последовательности с последующим синхронным накоплением периодически повторяющихся сигналов ВКФ. В качестве одиночной зондирующей М-последовательности используется идеальная М-последовательность единичной амплитуды. Алгоритм генерации основан

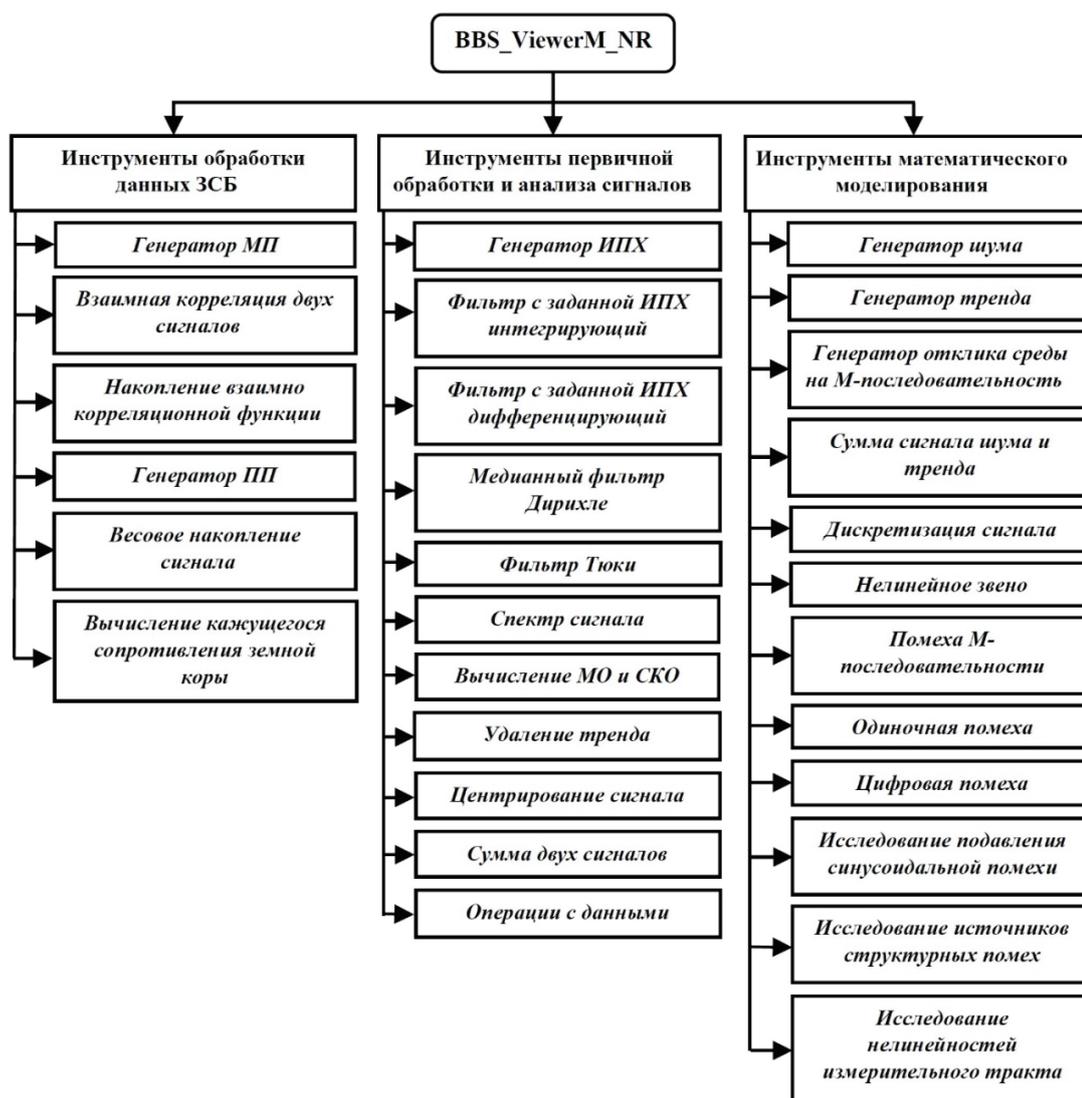


Рисунок 1 – Структура программы BBS\_ViewerM\_NR: МП – М-последовательность, ИП – периодическая последовательность, ИПХ – импульсная переходная характеристика, МО – математическое ожидание, СКО – среднеквадратичное отклонение

на программной реализации известной схемы генератора М-последовательностей подробно описанный в [6]. В результате корреляционной обработки получается накопленная взаимная корреляционная функция, значения которой в определенном интервале времен пропорциональны значениям э.д.с.  $U_q(t)$  индуцированной в измерительной катушке датчика. В получаемом после корреляционной обработки сигнале становления поля, помимо э.д.с.  $U_q(t)$ , участвует форма зондирующих импульсов и переходная характеристика

измерительного канала. В дальнейшем для получения  $U_q(t)$  планируется учитывать переходную характеристику измерительного канала и форму импульсов тока в зондирующей последовательности. На рисунке 2 приведены характерные фрагменты (участки) графика становления поля, полученного на экспериментальной точке “Панорама” на территории Бишкекского геодинимического полигона (БГП).

Вычисление графика зависимости кажущегося сопротивления от времени становления

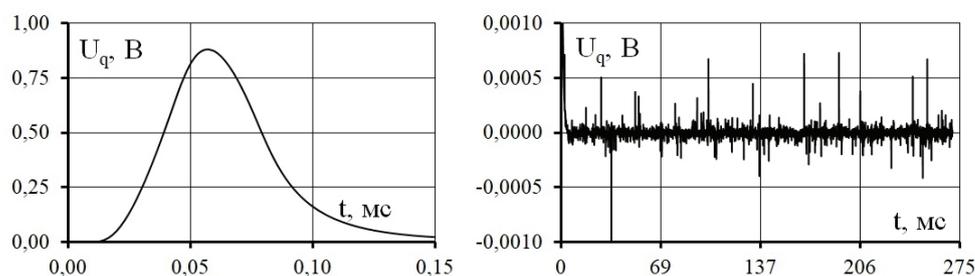


Рисунок 2 – Характерные фрагменты (участки) графика становления поля

поля заключается в пересчете полученных на различных временах задержки значений приведенной э.д.с. в значения кажущегося сопротивления  $\rho_r(t)$ . Пересчет производится по формуле:

$$\rho_r(t) = \frac{\mu_0}{\pi \cdot t} \cdot \left( \frac{Q \cdot q \cdot \mu_0 \cdot I}{20 \cdot t \cdot U_q(t)} \right)^{\frac{2}{3}},$$

где  $Q$  и  $q$  – эффективные площади зондирующей и приемной рамок в  $m^2$ ;  $t$  – время становления поля в секундах;  $U_q(t)$  – индуцируемая в приемной рамке э.д.с. в вольтах;  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума. Графики кажущегося сопротивления строятся в билогарифмическом масштабе. По оси абсцисс принято откладывать параметр  $\sqrt{2 \cdot \pi \cdot t}$ . На рисунке 3 приведен график зависимости кажущегося удельного сопротивления от времени становления поля, построенный по записи становления поля, полученной на экспериментальной точке “Панорама” на территории БГП.

Шумы, видимые на графике кажущегося удельного сопротивления, приведенного на рисунке 3, есть ни что иное как “структурные помехи”, особенно проявляющиеся на больших временах [4]. Поэтому, одной из важнейших задач дальнейших исследований является поиск способов их устранения без искажения самого сигнала становления поля. Для исключения влияния помеховой составляющей сигнала становления поля при сравнительной оценке кривых кажущегося сопротивления была выполнена их аппроксимация полиномом 41 порядка. В качестве критерия оценки точности аппроксимации использовался коэффициент детерминации R2 (приведен на графике). Порядок полинома подбирался по максимальному значению коэффициента детерминации.

**Заключение.** Разработанная программа позволяет выполнять обработку данных модельных, лабораторных и полевых экспериментов экспериментального электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами.

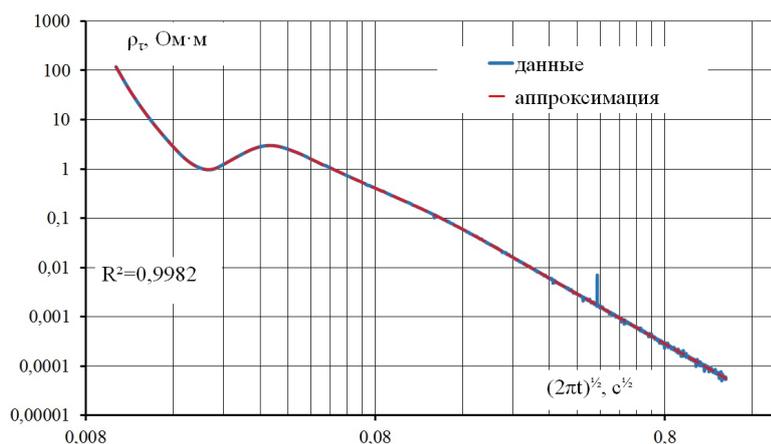


Рисунок 3 – График зависимости кажущегося удельного сопротивления от времени становления поля и результат его аппроксимации полиномом 41 порядка

Дальнейшее развитие программы обработки направлено на получение одномерного, вертикального электрического разреза земной коры в точке измерения.

**Литература**

1. *Алексанова Е.Д.* Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Е.Д. Алексанова, А.А. Бобачев, и др.; под ред. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. М., 2005. С. 240.
2. *Бобровский В.В.* Программа обработки данных регистрации и моделирования электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами / В.В. Бобровский, П.В. Ильичёв // Свид. РФ о госуд. регистр. программы для ЭВМ № 2018614566. Дата регистрации 10.04.2018 г.
3. *Бобровский В.В.* Математическое моделирование предполагаемых источников (причин) “структурных помех” в геoeлектроразведочной аппаратуре с шумоподобными зондирующими сигналами / В.В. Бобровский, П.В. Ильичев // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: матер. докл. VII Межд. симп., г. Бишкек, 19–24 июня 2017 г. Бишкек: НС РАН, 2018. С. 360–370.
4. *Ильичев П.В.* Применение шумоподобных сигналов в системах активной геoeлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента) / П.В. Ильичев, В.В. Бобровский // Сейсмические приборы. М., 2014. Т. 50. № 2. С. 5–19.
5. *Ильичев П.В.* Вариации уровня нелинейных искажений электрических сигналов в земной коре как контролируемый параметр геофизического мониторинга / П.В. Ильичев, В.В. Бобровский // Вестник КРСУ. 2018. Т. 18. № 12. С. 108–112.
6. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. М.: Радио и связь, 1985. С. 49–65.