

[DOI:10.26104/NNTIK.2023.51.93.004](https://doi.org/10.26104/NNTIK.2023.51.93.004)

Бобровский В.В., Александров П.Н., Ильичев П.В.

**ЫЗЫ-ЧУУ СЫМАЛ СИГНАЛДАРЫ БАР КЕҢ ТИЛКЕЛҮҮ
ӨЛЧӨӨ КОМПЛЕКСИ МЕНЕН ЖЕР КЫРТЫШЫН ЗОНДОО
ТЕХНОЛОГИЯСЫН ИШТЕТҮҮ БОЮНЧА КОМПЛЕКСТҮҮ
ТАЛАА ЭКСПЕРИМЕНТИНИН ЖЫЙЫНТЫКТАРЫ**

Бобровский В.В., Александров П.Н., Ильичев П.В.

**РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
ПО ОТРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ
С ШИРОКОПОЛОСНЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ
С ШУМОПОДОБНЫМИ СИГНАЛАМИ**

V. Bobrovsky, P. Aleksandrov, P. Pichev

**THE RESULTS OF A COMPREHENSIVE FIELD EXPERIMENT
TO TEST THE TECHNOLOGY OF SOUNDING THE EARTH'S CRUST
WITH A BROADBAND MEASURING COMPLEX WITH
PSEUDONOISE SIGNALS**

УДК: 550.380.83/621.317.328

Бишкек шаарындагы Россия Илимдер академиясынын Илимий станциясында ызы-чуу сымал сигналдары бар жаңы электр чалгындоо өлчөөчү комплекси иштелип чыкты жана даярдалды. Комплекс Түндүк Тянь-Шандын литосферасында жакынкы зонада талаа болуу ыкмасы менен заманбап геодинамикалык процесстерди электромагниттик изилдөөгө арналган. Ызы-чуу сыяктуу сигналдарды колдонуу, андан кийин аларды корреляциялык жол менен иштетүү, салттуу электр чалгындоо тутумдарына салыштырмалуу сигнал/тоскоолдук катышында олуттуу пайда алып келет. Өлчөө комплекси менен комплекстүү талаа экспериментинин жыйынтыктары келтирилген. Эксперименттин максаты – жер кыртышын зонддоо технологиясын иштеп чыгуу жана алынган маалыматтарды иштеп чыгуу. Өзгөчө көңүл техникалык мүнөздө-мөлөрдүн жана өлчөө комплексинин параметрлеринин түрүктүлүгүн баалоого бурулат. Изилдөө маалыматтарын иштетүүдө алынган талаа болуу ийри сызыгын өлчөө катасын баалоонун биринчи натыйжалары.

Негизги сөздөр: электр чалгындоо, электромагниттик мониторинг, жер кыртышы, сигналдар, корреляциялык иштетүү, структуралык тоскоолдуктар, ыкма, өлчөө комплекси.

В Научной станции Российской академии наук в городе Бишкек разработан и изготовлен новый электроразведочный измерительный комплекс с шумоподобными сигналами. Комплекс предназначен для электромагнитных исследований современных геодинамических процессов в литосфере северного Тянь-Шаня методом становления поля в ближней зоне. Применение шумоподобных сигналов с последующей их корреляционной обработкой позволяют получить значительный выигрыш в выходном соотношении сигнал/помеха по сравнению с традиционными электроразведочными системами. Представлены результаты комплексного полевого эксперимента с измерительным комплексом. Цель эксперимента – обработка технологии зондирования земной коры и обработки получаемых данных. Особое внимание уделено оценке стабильности технических характеристик и параметров измерительного комплекса. Приведены первые результаты оценки погрешности измерения кривой становления поля, получаемой при обработке данных зондирования.

Ключевые слова: электроразведка, электромагнитный мониторинг, земная кора, сигналы, корреляционная обработка, структурные помехи, метод, измерительный комплекс.

A new electrical survey measuring complex with pseudonoise signals has been developed and manufactured at the Scientific Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek. The complex is designed for electromagnetic studies of modern geodynamic processes in the lithosphere of the northern Tien Shan by the method of field formation in the near zone. The use of pseudonoise signals with their subsequent correlation processing makes it possible to obtain a significant gain in the output signal-to-noise ratio compared to traditional electrical exploration systems. The results of a complex field experiment with a measuring complex are presented. The purpose of the experiment is to develop the technology of sounding the Earth's crust and processing the received data. Special attention is paid to the assessment of the stability of the technical characteristics and parameters of the measuring complex. The first results of the estimation of the measurement error of the field formation curve obtained during the processing of sensing data are presented.

Key words: electrical exploration, electromagnetic monitoring, earth's crust, signals, correlation processing, structural interference, method, measuring complex.

Введение. Одним из основных инструментов при изучении современных геодинамических процессов, происходящих в литосфере Тянь-Шаня, являются активные электроразведочные методы с контролируемым источником, обеспечивающие высокую точность измерения контролируемых электромагнитных параметров геосреды. В настоящее время в Научной станции РАН в г. Бишкеке (НС РАН) ведутся работы по отработке технологии земной коры с ранее разработанным экспериментальным образцом аппаратурно-программного электроразведочного измерительного комплекса (ЭРК ШПС) [1] в основу построения которого положен метод становления поля в ближней зоне (ЗСБ). Локальность метода ЗСБ позволяет увели-

чить детальность проводимых исследований. В отличие от традиционных способов зондирования становлением поля в ЭРК ШПС используются шумоподобные зондирующие сигналы (ШПС), обладающие «информационной избыточностью». Корреляционная обработка таких регистрируемых сигналов на фоне значительных шумов и помех различного происхождения, обеспечивает многократное (100-10000 раз) повышение соотношения сигнал-шум [2]. Тем самым расширяется диапазон исследуемых глубин земной коры при значительном снижении энергопотребления зондирующих генераторных установок. Идея использования ШПС в активной электроразведке возникла в 80 годах XX века. Но несмотря на это работ, посвященных практической реализации данной идеи не так много. Среди работ можно отметить первую попытку создания электроразведочной аппаратуры с использованием ШПС, выполненную канадскими специалистами [3] не получившую дальнейшего развития. Успешной попыткой создания электроразведочной аппаратуры с применением ШПС можно считать создание А.Б. Великиным с коллегами экспериментального образца программно-аппаратурного комплекса СТЕМ-1, предназначенного для поиска и обнаружения в земной коре полезных ископаемых, в частности углеводородного сырья [4]. Также большой интерес представляет работа Б.С. Светова с коллегами, посвященная теории применения ШПС в зондированиях становлением поля [5]. Основным назначением аппаратуры разработанной в ИС РАН является исследование вариаций кажущегося удельного сопротивления земной коры в диапазоне глубин от 100 м до 10 км. Для получения надежной информации об особенностях глубинного геоэлектрического разреза необходима высокая точность измерения полезных сигналов на фоне помех естественной и искусственной природы. Это обстоятельство накладывает повышенные требования к стабильности и чувствительности измерительной аппаратуры используемых при проведении глубинных исследований.

Постановка эксперимента. Для отработки технологии зондирования земной коры и дальнейшей обработки зарегистрированных данных на экспериментальном образце ЭРК ШПС [1] был проведен комплексный полевой эксперимент. Эксперимент прово-

дился в точке, находящейся в непосредственной близости от территории ИС РАН (точка «МГД»), характеризующейся достаточно высоким уровнем промышленных помех, что позволило численно оценить возможности измерительного комплекса ЭРК ШПС по регистрации и обработке сигналов становления поля в широком динамическом диапазоне не в лучших с точки зрения помех условиях (малое соотношение сигнал/помехи+шум на входе измерительного комплекса).

Основными целями и задачами проведенного эксперимента были: Отработка в полевых условиях технологии проведения зондирования земной коры с помощью измерительного комплекса ЭРК ШПС. Проверка и отработка разработанных алгоритмов обработки данных.

1. Оценка стабильности технических характеристик и параметров измерительного комплекса и погрешности измерения кривой становления поля, получаемой при обработке данных зондирования.

На точке «МГД» в полевых условиях с интервалом в один час было проведено 11 измерительных сеансов, каждый из которых включал в себя: 1) градуировку измерительного канала; 2) зондирование земной коры шумоподобными сигналами с синхронной регистрацией зондирующего воздействия и отклика земной коры на такое воздействие; 3) регистрацию шумов и помех, принимаемых измерительным каналом при отсутствии зондирующего воздействия.

Регистрация и обработка помех и шумов. Регистрация помех и шумов производилась в течение двух минут в конце каждого измерительного сеанса. Цель таких измерений - оценка помеховой обстановки во время проведения экспериментов, получение численных оценок характеристик и параметров помех и шумов, и степени их подавления при обработке данных зондирования.

При обработке полученных данных выполнялся визуальный просмотр зарегистрированных помех и шумов, анализировалась их форма и особенности (рис. 1 а). Далее вычислялся амплитудно-частотный спектр зарегистрированных помех и шумов (рис. 1 б) и плотность вероятности распределения их амплитуд (рис. 1 в).

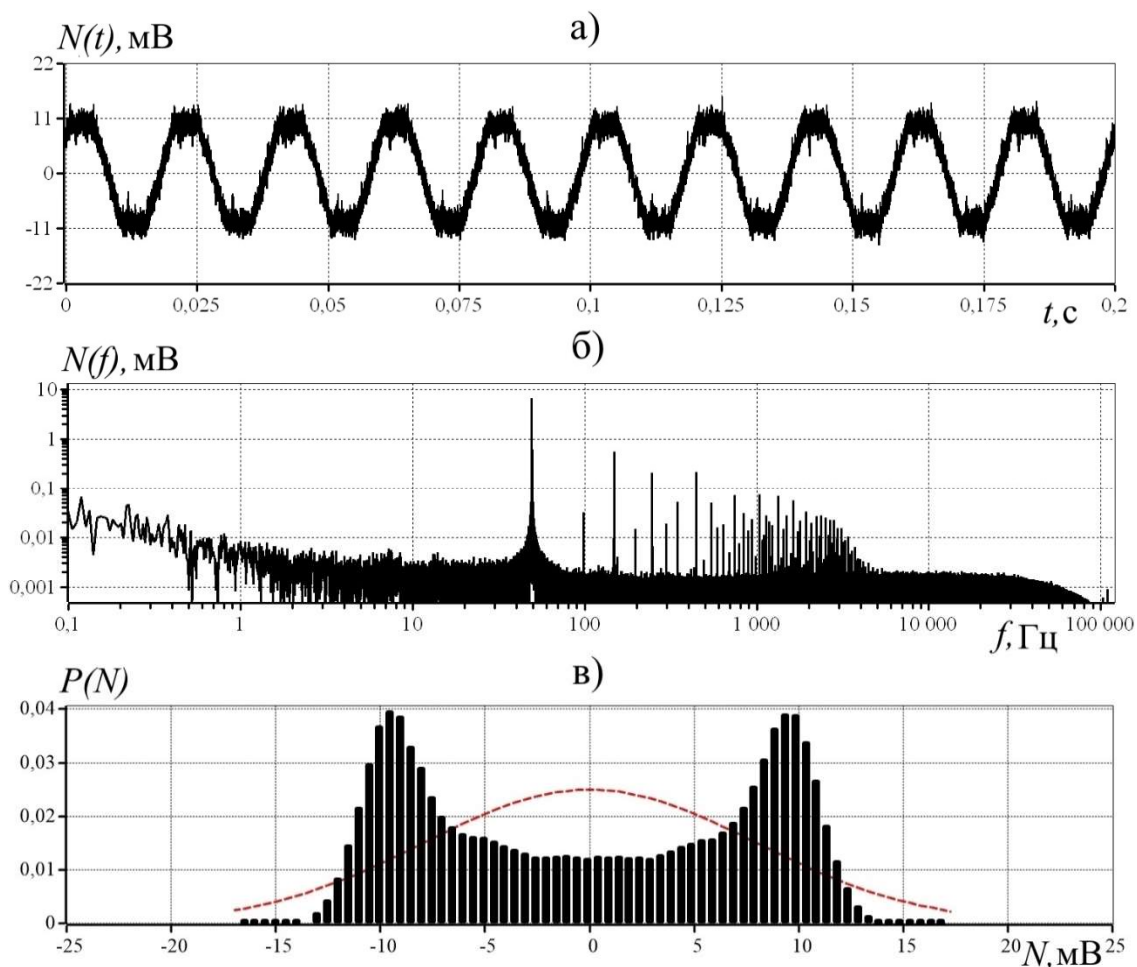


Рис. 1. Первичные данные регистрации шума (фрагмент) - а), его частотный спектр - б) и плотность вероятности распределения амплитуд помех и шумов - в) в измерительном сеансе.

Основной вклад в зарегистрированные помехи и шумы вносят помехи, создаваемые промышленной силовой сетью частотой 50 Гц, о чем свидетельствует фрагмент записи помех и шумов $N(t)$, приведенный на рисунке 1. Подавление таких помех выполняется в два этапа. На первом этапе подавление выполняется за счет корреляционной обработки регистрируемых сигналов. На втором этапе подавление выполняется за счет применения алгоритма синхронного накопления повторяющихся кривых становления поля, полученных на этапе корреляционной обработки [6]. При этом для достижения хорошего подавления гармонических помех возникает необходимость в более точной настройке частоты дискретизации сигналов, исходя из задаваемой длительности одиночной зондирующей М-последовательности согласно формуле:

$$f_D = \frac{f_{ГТИ}}{K_D} = \frac{nN_{МПmin}}{L_{МП}},$$

где f_D – частота дискретизации сигналов; $f_{ГТИ}$ – частота генератора тактовых импульсов; K_D – коэффициент деления $f_{ГТИ}$; $L_{МП}$ – длительность одиночной зонди-

рующей М-последовательности; $N_{МП}$ – разрядность М-последовательности, n_{min} – минимальная длительность импульсов в М-последовательности в периодах дискретизации.

В проведенном эксперименте средний уровень подавления таких помех составил 80 дБ. Больших значений подавления можно добиться за счет применения в аппаратуре прецизионного тактового генератора с частотой 16383500 Гц.

Оценка стабильности измерительного канала ЭРК ШПС. Для оценки стабильности измерительного канала, в течении 10 минут в начале каждого измерительного сеанса, выполнялась регистрация сигналов градуировки. Регистрация и обработка сигналов градуировки проводилась с целью оценки стабильности импульсной переходной характеристики измерительного канала ЭРК ШПС (от сеанса к сеансу) при проведении зондирований земной коры и вычисления постоянной времени интегрирования для приемного индукционного датчика сигналов.

Импульсная переходная характеристика измерительного канала получается в результате цифровой

обработки зарегистрированных измерительным комплексом сигналов градуировки, получаемых на выходе измерительного канала. Обработка сигналов включает в себя: 1) вычисление накопленной корреляционной функции (НКФ) между зарегистрированным сигналом градуировки и одиночной идеальной шумоподобной М-последовательностью, моделирующей зондирующий сигнал; 2) удаление структурных помех на полученной кривой НКФ [7-8].

Анализ полученных данных показал, что примерно через 4 часа после установки индукционного датчика сигналов и всего измерительного комплекса на местности в рабочее положение импульсная переходная характеристика измерительного канала, в качестве которой выступает НКФ, становится более стабильной и незначительно изменяется от сеанса к сеансу. Следовательно, для обеспечения высокой стабильности характеристик измерительного канала ЭРК ШПС, и соответственно качества получаемых с его помощью данных зондирования, необходима временная выдержка измерительной аппаратуры (порядка 4

часов) после ее установки на точке измерения.

Для получения численных оценок погрешности измерения и стабильности получаемых кривых НКФ были вычислены и построены графики мат. ожидания для всех измерительных сеансов, а также графики среднеквадратичных отклонений от соответствующих средних кривых. Результаты эксперимента показали, что относительная погрешность измерения НКФ на больших временах становления поля ($0,1 \div 2,0$ сек) не превышает 0,6%.

Оценка погрешности измерения кривой становления поля. На экспериментальной точке «МГД», с интервалом в 1 час проведено 11 измерительных сеансов по зондированию земной коры. Полученные экспериментальные данные обрабатывались с помощью специального программного обеспечения, разработанного для ЭРК ШПС [9]. Главным и основным результатом проведенных работ, является оценка качества (достоверности) и погрешности измерения кривых зондирования на различных временах становления поля (рис. 2).

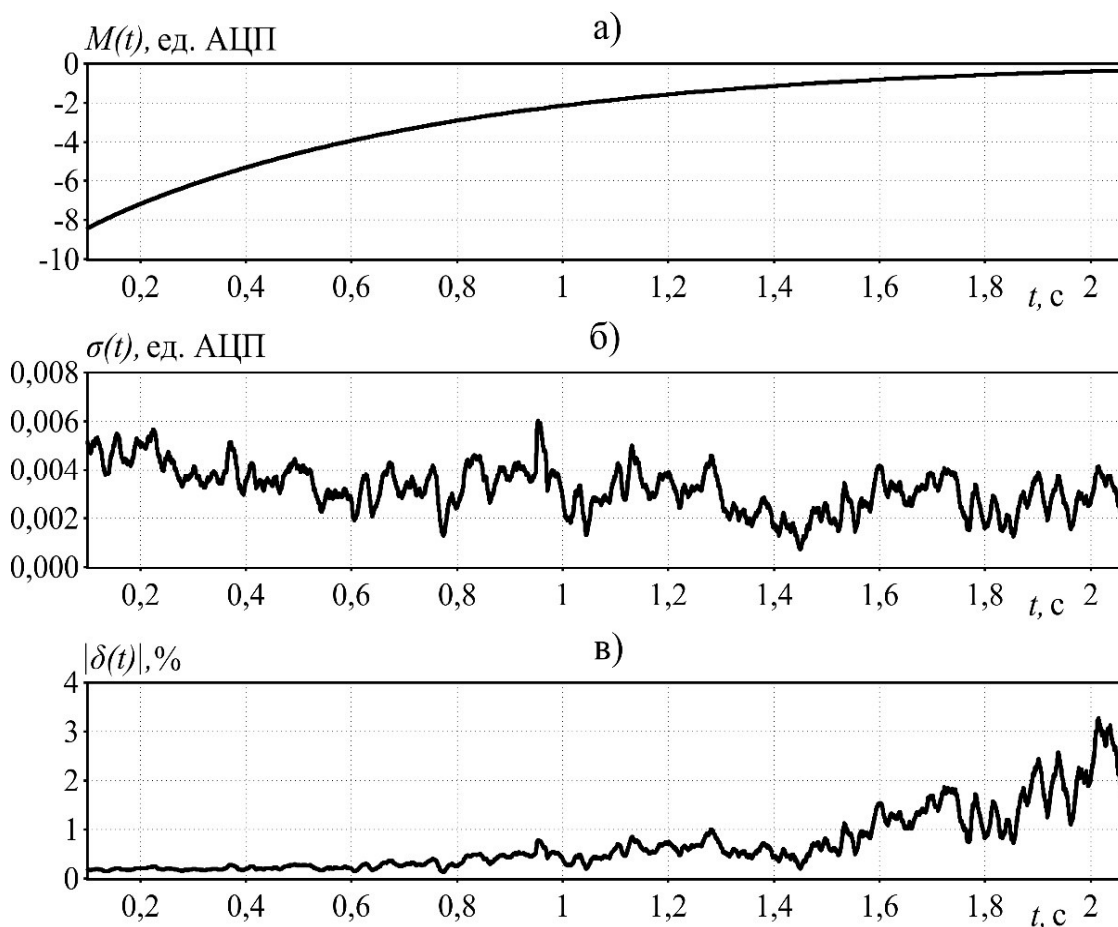


Рис. 2. Результат обработки данных зондирования земной коры: а) – среднестатистическая кривая становления поля (мат. ожидание), б) – среднеквадратичное отклонение, в) - модуль относительной погрешности измерения ($|\delta(t)| = |(3 \cdot \sigma / M)| \cdot 100\%$).

На интервале времен становления от 1,5 до 2,0 секунд (рис. 2) наблюдается ускоренное увеличение погрешности измерения $\delta(t)$, максимальный уровень которой в конце интервала достигает величины $\delta \approx 3\%$. На интервале времен от 0,1 до 1,5 секунд погрешность измерения медленно растет от 0,15% до 1%. В первом приближении можно считать, что с помощью измерительного комплекса ЭРК ШПС с вероятностью 0,9 будут обеспечены контроль и измерение вариаций сигналов становления поля величиной, определяемой погрешностью измерения δ . Таким образом, в конце всего интервала времен становления поля (2 с) минимальный уровень уверенно контролируемых вариаций составит 3%, на 1,5 секунде – 1,0%, а уже на 0,5 секундах – 0,2%.

Заключение. С учетом ранее полученной величины удельного электрического сопротивления однородного слоя $\rho=204$ Ом-м эквивалентного среднестатистическому электрическому разрезу земной коры территории Бишкекского геодинамического полигона [1], можно говорить о хорошей возможности контроля вариаций этого сопротивления на глубинах до 9000 м. Конечно, это достаточно грубая оценка и для разных точек на поверхности Земли в зависимости от вертикального электрического разреза земной коры в этих точках могут быть получены другие величины погрешностей и глубин зондирования.

Для статистического подтверждения достоверности полученных результатов планируется в дальнейшем провести с помощью разработанного измерительного комплекса ЭРК ШПС серию экспериментов по зондированию земной коры в различных точках на ее поверхности.

Работа проводилась в рамках выполнения Государственного задания по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах» (FMUG-2022-0007) Шифр научной темы: FMUG-2022-0007. Номер государственного учета: 122101000008-9.

Литература:

1. Бобровский В.В., Ильичев П.В., Лашин О.А. Широкополосный измерительный комплекс с шумоподобными сигналами для электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах // Сейсмические приборы. - 2021. - Т. 57. - № 1. - С.29-48.
2. Ильичев П.В., Бобровский В.В. Применение шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента) // Сейсмические приборы. 2014. - Т. 50. - №2. - С. 5-19.
3. Duncan P.M., Bailey R.C., Edwards R.N., Garland G.D., Ywang A. The development and applications of a wide band electromagnetic sounding system using pseudo-noise source // Geophysics. 1980. V. 45, N 8. P.1276-1296
4. Великин А.Б., Великин А.А. Новый корреляционный метод импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами СТЕМ для электромагнитного зондирования недр при поисках углеводородного сырья // Вопросы естествознания. - 2016. - № 1. - С.100-103.
5. Светов Б.С., Алексеев Д.А., Агеев В.В., Каринский С.Д., Яковлев А.Г. Применение шумоподобных сигналов в зондированиях становлением поля // Геофизика. - 2012. - №1. - С. 52-60.
6. Bobrovsky V., Ilyichev P. Peculiarity of the use of pseudonoise signals in electrical prospecting equipment. // Geodynamics and Geoecology 2021 // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science929 (2021) 012020IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/929/1/012020>
7. Бобровский В.В., Ильичев П.В. Математическое моделирование предполагаемых источников (причин) «структурных помех» в геоэлектроразведочной аппаратуре с шумоподобными зондирующими сигналами//Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы докл. VII Межд. Симпозиума, г. Бишкек, 19-24 июня 2017 г. - Бишкек: НС РАН, 2018. - С. 360-370.
8. Бобровский В.В., Особенности корреляционной обработки шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре. // Геофизические исследования. 2022. - Т. 23. - №2. - С. 39-54.
9. Бобровский В.В., Ильичёв П.В. Программа обработки данных регистрации и моделирования электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами // Вестник КРСУ. Бишкек: 2019. Т. 19, № 12. С. 77-83.