



УДК 550.380.83 / 621.317.328

## Применение шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента)

© 2014 г. П.В. Ильичёв, В.В. Бобровский

*Научная станция Российской академии наук, г. Бишкек, Кыргызская Республика*

На математических моделях и экспериментально в реальных полевых условиях с помощью специального измерительного комплекса исследовались особенности применения шумоподобных сигналов (ШПС) в системах активной геоэлектроразведки. Благодаря использованию корреляционной обработки специальных ШПС получен значительный выигрыш в выходном соотношении сигнал/шум (около 100 раз) в измерительной системе с ШПС по сравнению с традиционными электроразведочными системами. Это обеспечило высокую точность регистрации сигналов становления поля, особенно в области больших времен, вследствие чего становится возможным измерение электрических параметров земной коры в более широком диапазоне глубин при пониженной мощности зондирующей установки.

**Ключевые слова:** шумоподобные сигналы, геоэлектроразведка, корреляционная обработка сигналов, синхронное накопление сигналов.

PACS 93.85.Jk

### Введение

Идея применения шумоподобных сигналов (ШПС) в геофизических исследованиях земной коры, в частности методами активной электроразведки, возникла несколько десятилетий назад, но ее реализация наталкивалась на технические и технологические сложности, связанные с формированием и обработкой таких сигналов. Так, в 1980 г. в журнале "Geophysics" было опубликовано сообщение канадских специалистов о применении ШПС при электромагнитном зондировании земной коры [Duncan et al., 1980]. Использовался 20-километровый зондирующий электрический диполь и разнесенные от него на значительные расстояния приемные пункты с датчиками магнитного поля (магнитометры). На приемной стороне рассчитывалась взаимная корреляционная функция (ВКФ) между регистрируемым сигналом и копией зондирующего с последующим вычислением частотного спектра ВКФ, по которому находилась одномерная зависимость кажущегося сопротивления горных пород от глубины. На основе анализа этой зависимости судили о строении геоэлектрического разреза.

Среди отечественных публикаций, связанных с применением ШПС в геоэлектроразведке, следует отметить патент на изобретение [Великин, 2009]. В изобретении предлагаются способы и устройства для осуществления электроразведочных работ методом переходных процессов (зондирование становлением поля в ближней (ЗСБ) и дальней (ЗСД) зоне) с применением ШПС. В качестве прототипа рассматривалась работа канадских специалистов [Duncan et al., 1980]. По мнению автора изобретения [Великин, 2009], прототип имеет ряд недостатков, основной из которых заключается в том, что для предлагаемого канадскими специалистами способа характерна низкая точность измерений при зондировании геоэлектрического разреза в ближней зоне. Это связано с тем, что

измерения производятся на фоне первичного поля, поэтому помехи, вызываемые генератором импульсов тока, вносят ошибки, которые снижают чувствительность метода. Для устранения этого недостатка было предложено подвергать зондирующие биполярные М-последовательности токовых импульсов дополнительной импульсной модуляции, а измерения проводить как во время действия модулирующих импульсов, так и в паузах между ними. При таком способе зондирования появляются дополнительные модуляционные искажения регистрируемых на приемной стороне сигналов. Автор изобретения [Великин, 2009] предлагает устранить их влияние, применяя модуляцию зондирующих сигналов импульсами со случайным законом распределения периода их повторения и соответствующую цифровую обработку сигналов, регистрируемых на приемной стороне.

Обзор методов борьбы с помехами при электромагнитных зондированиях земной коры можно найти в работе [Сидорин, Осташевский, 1996]. Эти же авторы выполнили ряд исследований, направленных на исключение накопления при зондировании когерентных помех. Для этого были использованы разные виды модуляции зондирующих сигналов, в частности широтно-импульсная и фазовая модуляция [Осташевский, Сидорин, 1990]. При этом отмечалось, что закон модуляции можно менять, так предлагалось использовать псевдослучайные последовательности, например последовательности Уолша.

В работе [Гарьянов и др., 1999] описано разработанное авторами устройство для управления работой мощной генераторной установкой “МУЗА-ПМ” [Осташевский и др., 1997], обеспечившее возможность генерации в питающем электрическом диполе мощных импульсов тока со случайным распределением их длительности. Был проведен успешный эксперимент по синхронному приему этих импульсов на расстоянии 16 км от питающего диполя.

По мнению авторов настоящей работы, любая дополнительная модуляция сигналов расширяет их спектр и добавляет массу проблем при их цифровой обработке. Эффекты, связанные с модуляционными искажениями сигналов при цифровой обработке, приводят к усложнению схем формирования таких сигналов, алгоритмов их обработки, а все меры (ухищрения) по устранению нежелательных последствий модуляции не обеспечивают, как правило, полного устранения возникающих при этом проблем.

Следует также отметить одну из последних работ Б.С. Светова с коллегами [Светов и др., 2011], также посвященную применению ШПС в геоэлектрике. Авторам этой публикации удалось разработать эффективный алгоритм обработки ШПС без использования корреляционной фильтрации сигналов, при этом был получен теоретический выигрыш в повышении соотношения сигнал/помеха на приемной стороне электроразведочной системы примерно в пять раз по сравнению с традиционными методами зондирования детерминированными последовательностями импульсов с фиксированными длительностью и периодом повторения. Такой выигрыш значительно уступает значениям, ожидаемым при использовании корреляционной обработки ШПС (100 и более раз).

В настоящей работе предпринята очередная попытка повышения эффективности использования ШПС в геоэлектроразведочной аппаратуре, и авторы надеются воплотить предлагаемую идею в конкретную физическую реализацию – современный аппаратно-программный электроразведочный измерительный комплекс для проведения электромагнитных зондирований земной коры.

### Предпосылки применения ШПС в активной геоэлектроразведке

В основе применения ШПС в геоэлектроразведочных системах могут быть положены выражения, справедливые для линейных систем:

$$Y(t) = X(t) \otimes g(t) \quad (1)$$

$$R_{XY}(t) = R_{XX}(t) \otimes g(t), \quad (2)$$

где  $R_{XX}(t)$  – автокорреляционная функция входного ШПС  $X(t)$ ;  $g(t)$  – импульсная переходная характеристика (ИПХ) исследуемого объекта (земной коры);  $R_{XY}(t)$  – взаимная корреляционная функция между входным (зондирующим)  $X(t)$  и принимаемым  $Y(t)$  сигналами;  $\otimes$  – операция интегральной свертки двух сигналов.

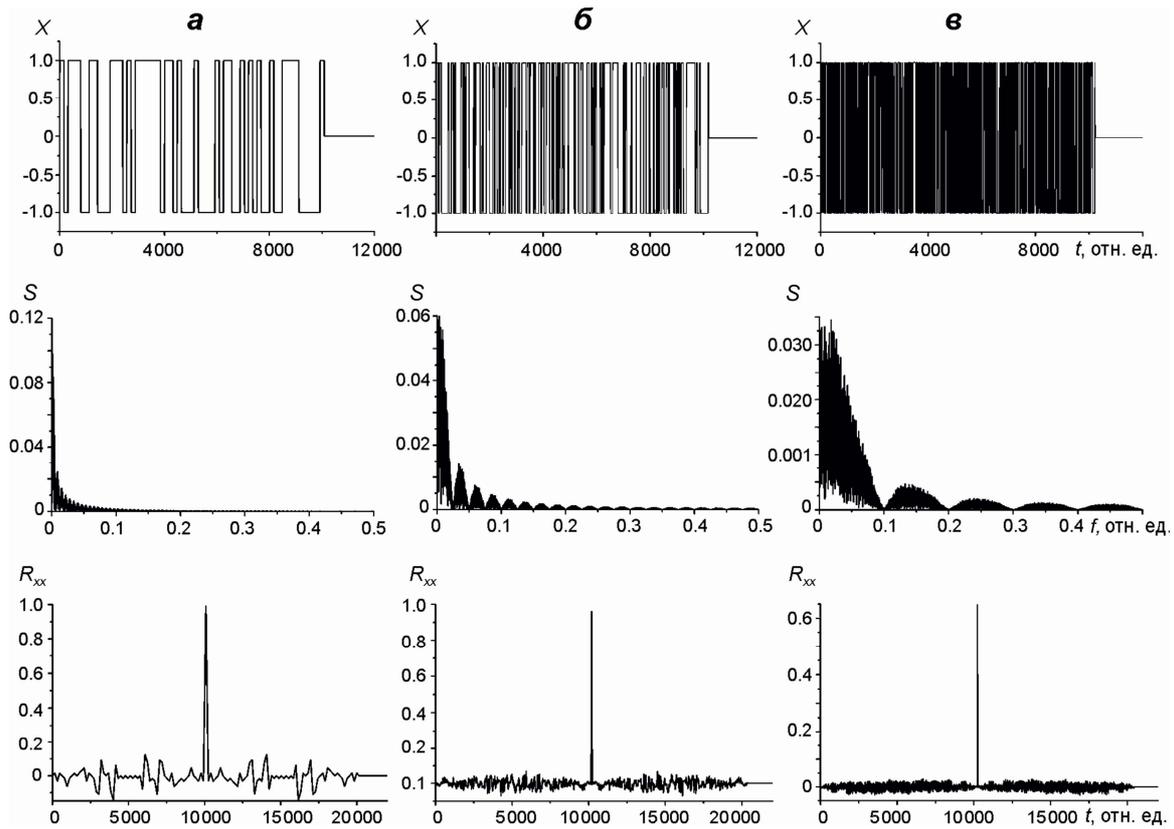
Во всех существующих активных геоэлектроразведочных системах предполагается, что исследуемая среда (земная кора) является линейной, т.е. ее электрические свойства не зависят от параметров зондирующих сигналов. В случае применения ШПС условие линейности не нарушается, а даже улучшается, так как уровни зондирующих шумоподобных сигналов предполагаются значительно меньшими, чем при традиционных методах электроразведки.

При правильном выборе шумоподобных сигналов  $X(t)$  можно добиться того, что  $R_{XX}(t)$  будет приближаться к  $\delta(t)$  – дельта функции Дирака. В этом случае согласно (2) можно рассчитывать, что ВКФ –  $R_{XY}(t)$  на выходе корреляционного приемника будет приближаться к искомой ИПХ земной коры. Таким образом, применение корреляционного приемника и выражения (2) при соответствующем выборе вида ШПС позволяет путем прямого вычисления ВКФ между выходом  $Y(t)$  и входом  $X(t)$  исследуемого объекта (земной коры) получать его ИПХ, не прибегая к операции дифференцирования переходной характеристики (ПХ), обычно получаемой в типовых методах электромагнитных зондирований Земли. Понятно также, что ИПХ обладает большей чувствительностью к локальным неоднородностям в земной коре и изменениям ее электрических параметров по сравнению с ПХ, что является особенно важным в задачах электромагнитного мониторинга.

В качестве ШПС в цифровых системах широкое применение нашли дискретные псевдослучайные последовательности. Наибольшее распространение получили так называемые М-последовательности (псевдослучайные последовательности максимальной длины), представляющие собой последовательности сигналов (импульсов) прямоугольной (или иной) формы, амплитуда (или другие параметры) которых могут принимать конечное число значений (2, 3, ...,  $p$  – простые числа). Наиболее просто физически реализуются бинарные М-последовательности ( $p = 2$ , амплитуда импульсов плюс 1 и минус 1).

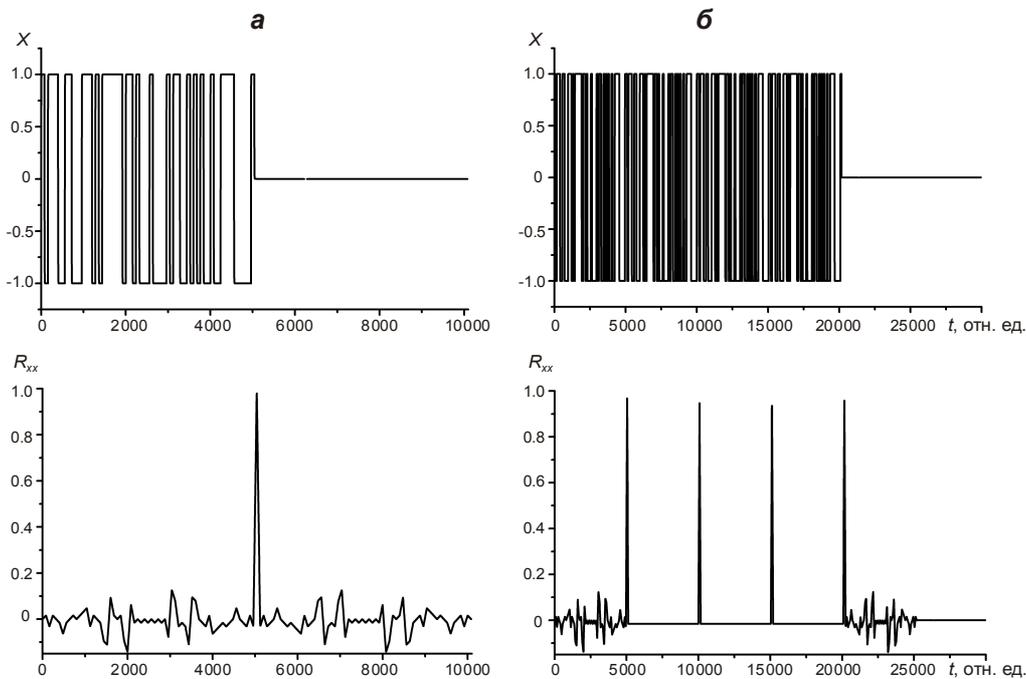
Генераторы М-последовательностей достаточно просто реализуются с помощью цифровых схем и устройств, например М-последовательность длиной в  $N$  бит можно сформировать с помощью  $n$ -разрядного сдвигового регистра с обратными связями через многовходовый логический элемент “исключающее или” [Ильичев, 2012].

На рис. 1 представлены графики бинарных М-последовательностей  $X(t)$  различной длины ( $N = 2^n - 1 = 63, 255, 1023$ ) и примерно одинаковой длительности (10080, 10200, 10230 относительных единиц по времени), их частотные спектры  $S(f)$  и автокорреляционные функции  $R_{XX}(t)$ . Чем больше длина М-последовательности, тем шире ее частотный спектр и тем в большей степени ее АКФ похожа на  $\delta$ -функцию Дирака. Необходимо отметить, что АКФ одиночной М-последовательности помимо основного (главного) лепестка имеет побочные боковые выбросы. Эти выбросы ограничивают применение корреляционной обработки одиночных М-последовательностей в геоэлектроразведке не смотря на то, что с увеличением длины М-последовательности уровень боковых флуктуаций ее АКФ снижается (см. рис. 1). В работе [Светов и др., 2011] это убедительно показано. Поэтому применение ШПС в электроразведочной аппаратуре авторы данной работы связывают с известным замечательным свойством периодически повторяющихся без пауз бинарных М-последовательностей, заключающемся в отсутствии боковых флуктуаций их АКФ [Варакин, 1985].



**Рис. 1.** Пример бинарных М-последовательностей  $X(t)$  различной длины:  $N=63$  (а),  $N=255$  (б),  $N=1023$  (в); их частотные спектры  $S(f)$  и автокорреляционные функции  $R_{xx}(t)$

На рис. 2 показан пример изменения формы АКФ бинарной М-последовательности при ее периодическом повторении. Согласно рис. 2 при повторении М-последовательности



**Рис. 2.** Изменение формы АКФ шумоподобных сигналов при периодическом их повторении: а – одиночная М-последовательность  $X(t)$  и ее автокорреляционная функция  $R_{xx}(t)$ , б – периодически повторяемая М-последовательность  $X(t)$  (четыре периода) и ее корреляционная функция  $R_{xx}(t)$  с одиночной М-последовательностью

ее АКФ, начиная со второго периода, не имеет боковых флуктуаций, при этом между главными лепестками АКФ наблюдается небольшое постоянное отрицательное смещение, уровень которого в  $N$  раз меньше уровня главного лепестка, где  $N$  – длина  $M$ -последовательности. В конце последнего периода повторения снова появляются боковые флуктуации АКФ. Очевидно, что и в ВКФ, вычисляемой между принимаемым и зондирующим сигналами электроразведочной системы, будут отсутствовать боковые флуктуации. Это свойство  $M$ -последовательностей позволяет, осуществляя корреляционную обработку ШПС, получать оценку ИПХ среды. При этом после корреляционной обработки возможно дальнейшее накопление периодических сигналов ВКФ, исключая сигналы от первой и последней  $M$ -последовательностей, что обеспечивает дополнительное улучшение соотношения сигнал/шум. Фактически к достоинствам обычного накопления детерминированных сигналов добавляются существенные преимущества, получаемые за счет применения корреляционной обработки ШПС.

### Математическое моделирование системы с ШПС

В 2011 г. на Научной станции РАН было проведено математическое моделирование электроразведочной системы с применением ШПС в сравнении с типовой системой, в которой для зондирования применяются биполярные последовательности с постоянной длительностью импульсов [Ильичев, 2012]. При моделировании решались две основные задачи: 1) исследовалась близость ВКФ к ИПХ среды при корреляционной обработке ШПС; 2) проводилась оценка выигрыша в подавлении шумов, получаемого при корреляционной обработке сигналов в системе с ШПС по сравнению с типовой системой с детерминированными сигналами и синхронным накоплением их.

На простых моделях ИПХ среды в виде однородного проводящего полупространства и инерционного интегрирующего звена первого порядка показано, что ВКФ, вычисляемая между принимаемыми и зондирующими шумоподобными сигналами, по форме практически полностью повторяет ИПХ среды. Исключение составляют две узкие зоны в начале и конце временного интервала, на котором определяются эти функции. Ширина этих зон определяется минимальной длительностью импульсов в зондирующей  $M$ -последовательности. Наличие зон с большой погрешностью приближения ВКФ к ИПХ объясняется отличием АКФ периодически повторяемой бинарной  $M$ -последовательности от идеальной  $\delta$ -функции Дирака. Уменьшение длительности минимального импульса в  $M$ -последовательности приближает ВКФ к ИПХ среды, но при этом уменьшается анализируемый интервал времен становления поля. Для получения хорошего приближения ВКФ к ИПХ среды в широком интервале времен необходимо дополнительно увеличивать длину самой  $M$ -последовательности.

При оценке выигрыша в подавлении шумов в системе с корреляционной обработкой ШПС по сравнению с типовой системой с детерминированными сигналами на вход моделей системы с ШПС и с детерминированными сигналами одновременно подавался один и тот же нормальный шум с заданным среднеквадратичным значением при отсутствии зондирующих сигналов. Далее осуществлялась обработка сигнала (шума), получаемого на приемной стороне, ориентированная на выделение полезных сигналов на фоне шумов. Для обеспечения одинаковой энергии зондирующих сигналов в обеих моделях независимо от длины задаваемой  $M$ -последовательности обеспечивалось примерное постоянство длительности одиночной  $M$ -последовательности и биполярных импульсов в детерминированной последовательности за счет изменения длительности минимального импульса в  $M$ -последовательности.

В результате обработки вычислялись среднеквадратичные уровни шумов на выходах двух моделей, коэффициенты подавления шумов и выигрыш в подавлении, получаемый в модели с корреляционной обработкой ШПС по сравнению с типовой. Результаты моделирования и обработки сигналов представлены в табл. 1.

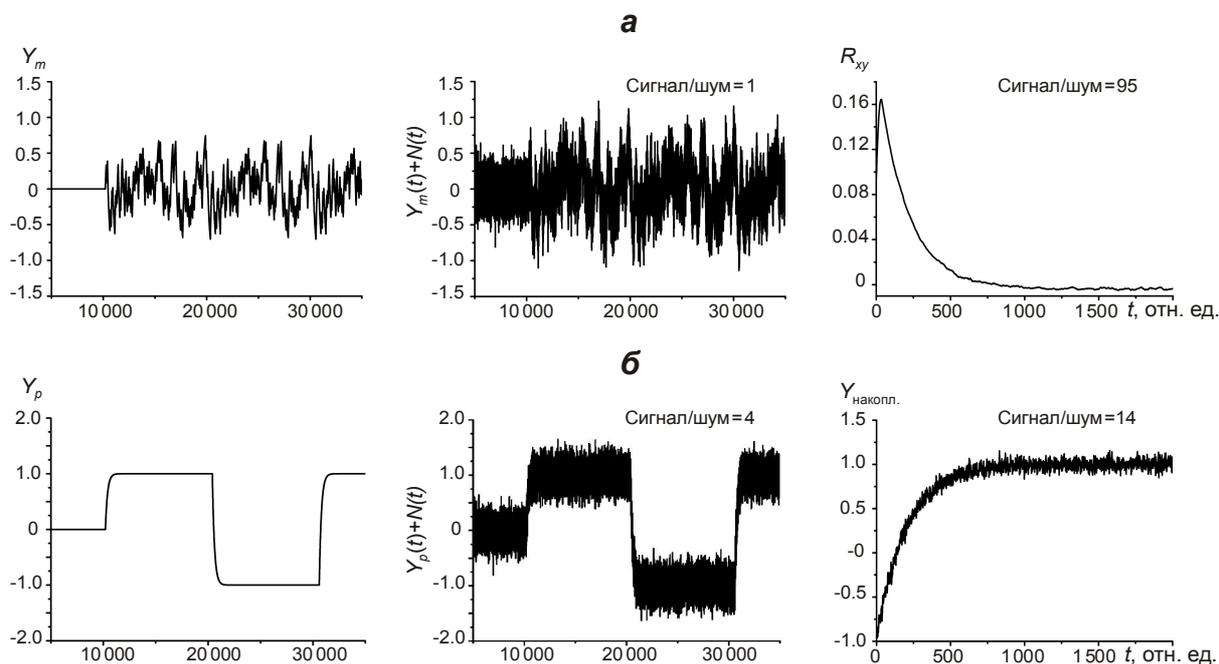
**Таблица 1.** Сравнение подавления шумов при корреляционной обработке ШПС и при типовом накоплении детерминированных сигналов, по данным математического моделирования

Параметр	Число периодов накопления (повторов М-последовательностей)																				
	4				16				32				64				128				
	63	255	1023	63	255	1023	63	255	1023	63	255	1023	63	255	1023	63	255	1023	63	255	1023
$N$	160	40	10	160	40	10	160	40	10	160	40	10	160	40	10	160	40	10	160	40	10
$T_0$	10080	10200	10230	10080	10200	10230	10080	10200	10230	10080	10200	10230	10080	10200	10230	10080	10200	10230	10080	10200	10230
$l_M$	0.5576	0.55661	0.55831	0.55734	0.55984	0.56056	0.55778	0.55886	0.55724	0.56021	0.55999	0.55856	0.55933	0.55951	0.55949	0.55933	0.55951	0.55949	0.55933	0.55951	0.55949
$\sigma_1$	0.0101	0.00944	0.00803	0.01000	0.00947	0.00812	0.00991	0.00946	0.00805	0.00946	0.00805	0.00946	0.00805	0.00946	0.00805	0.00946	0.00805	0.00946	0.00805	0.00946	0.00805
$\sigma_{к-н}$	0.0098	0.00938	0.00784	0.00281	0.00279	0.00230	0.00187	0.00173	0.00154	0.00114	0.00115	0.00103	0.00086	0.00087	0.00071	0.00086	0.00087	0.00071	0.00086	0.00087	0.00071
$\sigma_n$	0.3135	0.31104	0.31044	0.15578	0.15710	0.15573	0.11098	0.11008	0.11001	0.07715	0.07905	0.07739	0.05635	0.05553	0.05545	0.05635	0.05553	0.05545	0.05635	0.05553	0.05545
$\sigma_1/\sigma_n$	1.778	1.789	1.798	3.578	3.564	3.599	5.026	5.077	5.065	7.261	7.084	7.217	9.926	10.076	10.090	9.926	10.076	10.090	9.926	10.076	10.090
$\sigma_1/\sigma_k$	55.413	58.987	69.528	55.738	59.105	69.036	56.282	59.098	69.227	55.688	58.829	69.196	56.330	59.165	69.107	56.330	59.165	69.107	56.330	59.165	69.107
$\sigma_1/\sigma_{к-н}$	56.962	59.323	71.196	198.194	200.417	243.714	297.569	322.625	355.624	491.817	486.057	540.140	651.784	640.886	791.168	651.784	640.886	791.168	651.784	640.886	791.168
$\sigma_n/\sigma_{к-н}$	32.0	33.2	39.6	55.4	56.2	67.7	59.2	63.5	71.6	67.7	68.6	74.8	65.7	63.6	78.4	65.7	63.6	78.4	65.7	63.6	78.4

*Примечание:*  $N$  – длина М-последовательности в тактах (число кодовых комбинаций в М-последовательности);  $T_0$  – длительность минимального импульса (одного такта) в М-последовательности в относительных единицах (дискретах времени);  $l_M$  – длительность М-последовательности и биполярных импульсов детерминированной последовательности в дискретах времени;  $\sigma_1$  – среднеквадратичный шум на входе измерительного канала приемной аппаратуры;  $\sigma_k$  – среднеквадратичный шум на выходе корреляционного фильтра (вычисление ВКФ для ансамбля М-последовательностей);  $\sigma_{к-н}$  – среднеквадратичный шум после корреляционного фильтра и последующего накопления ВКФ;  $\sigma_n$  – среднеквадратичный шум на выходе типового канала обработки (синхронное накопление биполярных импульсов);  $K_{пт} = \sigma_1/\sigma_n$  – коэффициент подавления шума в типовом канале обработки (синхронное накопление биполярных импульсов);  $\sigma_1/\sigma_k$  – коэффициент подавления шума корреляционным фильтром;  $K_{пк} = \sigma_1/\sigma_{к-н}$  – коэффициент подавления шума в корреляционном канале обработки;  $PG = \sigma_n/\sigma_{к-н}$  – выигрыш в подавлении шума в корреляционном канале обработки по сравнению со стандартным.

По данным табл. 1 видно, что при равенстве энергий зондирующих сигналов возможно достижение значительного выигрыша (десятки и более раз) в подавлении шума, получаемого на выходе системы с ШПС по сравнению с типовыми системами даже при незначительных длинах  $M$ -последовательностей.

На рис. 3 показан модельный пример выделения сигнала на фоне шума на выходе системы с корреляционной обработкой ШПС в сравнении с системой с детерминированными сигналами, демонстрирующий значительный выигрыш (почти в 100 раз) в улучшении соотношения сигнал/шум на выходе системы с ШПС при длине зондирующей  $M$ -последовательности в 255 тактов. Для получения такого же улучшения соотношения сигнал/помеха в системе с детерминированными сигналами требуется увеличение длительности зондирующей последовательности импульсов примерно в 800 раз, что свидетельствует об ожидаемой высокой эффективности применения ШПС в электроразведочных системах.



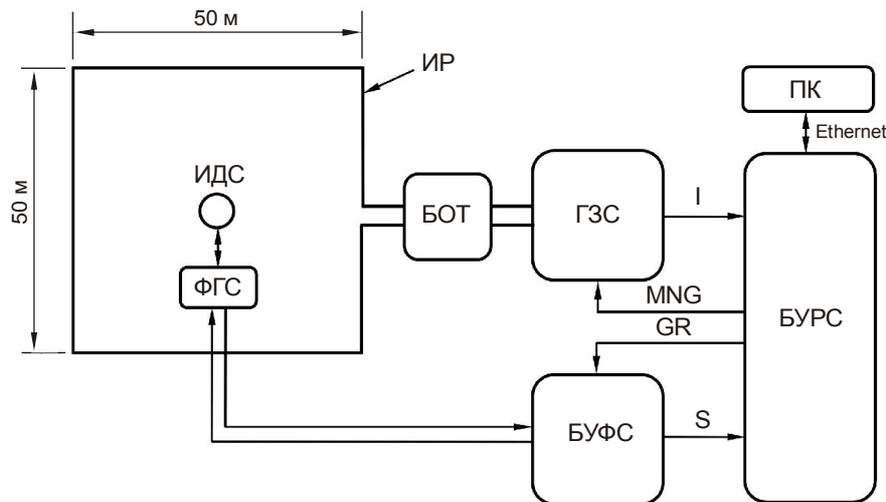
**Рис. 3.** Пример выделения полезного сигнала на фоне шума в системах с корреляционной обработкой ШПС (а) и с накоплением детерминированных сигналов (б) (длина  $M$ -последовательности – 255, число повторов – 16, длительность такта – 40, постоянная времени модели среды – 200)

$Y_m(t)$ ,  $Y_p(t)$  – выходные сигналы модели среды (начальные фрагменты) при зондировании периодически повторяющимися шумоподобными сигналами в виде биполярной импульсной  $M$ -последовательности и детерминированной биполярной последовательности импульсов фиксированной длительности соответственно;  $Y_m(t) + N(t)$ ,  $Y_p(t) + N(t)$  – выходные сигналы модели исследуемой среды, осложненные аддитивным нормальным шумом;  $R_{xy}(t)$  – результат корреляционной обработки сигналов в канале с ШПС;  $Y_{\text{накопл.}}(t)$  – результат синхронного накопления в канале с детерминированными сигналами

### Полевой эксперимент по применению ШПС в геоэлектроразведочной аппаратуре

Для дальнейшего исследования особенностей применения ШПС в геоэлектроразведочной аппаратуре в Научной станции РАН (г. Бишкек) при непосредственном участии авторов данной публикации был разработан и изготовлен специальный исследовательский электроразведочный измерительный комплекс с шумоподобными сигналами

(ЭРК ШПС). На рис. 4 показана структурно-функциональная схема комплекса и его внешний вид.



**Рис. 4.** Структурно-функциональная схема и внешний вид электроразведочного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами

ИР – индукционная зондирующая рамка (7), ИДС – индукционный датчик сигналов (4); БУРС – блок управления и регистрации сигналов (1); БУФС – блок усиления и фильтрации сигналов (2); ГЗС – генератор зондирующих сигналов (5); БОТ – блок ограничения тока (6); ФГС – формирователь градуировочных сигналов (3); ПК – персональный полевой компьютер (Notebook, 8)

Измерительный комплекс состоит из зондирующей индукционной рамки (ИР), генератора зондирующих сигналов (ГЗС), блока ограничения тока (БОТ), индукционного датчика сигналов (ИДС), формирователя градуировочных сигналов (ФГС), блока усиления и фильтрации сигналов (БУФС), блока управления и регистрации сигналов (БУРС) и персонального (полевого) компьютера (ПК). Зондирующие импульсы тока, вырабатываемые в ГЗС, через блок ограничения тока, выполненный в виде переключаемого набора безиндуктивных резисторов, подаются в индукционную одновитковую квадратную рамку, размещаемую горизонтально на поверхности Земли. В геометрическом центре рамки устанавливается индукционный датчик, преобразующий вертикальную компоненту переменного магнитного поля в электрический сигнал. Сигнал с выхода

индукционного датчика подается на вход БУФС, где усиливается и фильтруется от помех и наводок различного происхождения (естественных и искусственных). Частично отфильтрованный от помех и усиленный полезный сигнал  $S$  поступает в БУРС, где с помощью аналого-цифрового преобразователя осуществляется его преобразование в цифровую форму с заданной частотой дискретизации. Цифровые отсчеты регистрируемого сигнала сохраняются и накапливаются в устройстве памяти БУРС. БУРС осуществляет управление режимами работы измерительного комплекса: режим градуировки измерительного канала, режим зондирования детерминированными периодическими последовательностями токовых импульсов и режим зондирования шумоподобными сигналами. Кроме того в БУРС формируются управляющие сигналы (MNG), обеспечивающие работу ГЗС. В режиме градуировки измерительного канала с помощью формирователя градуировочных сигналов осуществляется преобразование управляющего сигнала GR, формируемого в БУРС, в калиброванные импульсы тока, подаваемые в градуировочную катушку ИДС. В режимах зондирования помимо сигнала от ИДС осуществляется синхронная регистрация и накопление сигнала "Т" от датчика тока, входящего в состав ГЗС и контролирующего форму импульсов тока в зондирующей индукционной рамке. Персональный (полевой) компьютер, входящий в состав измерительного комплекса, обеспечивает математическую обработку зарегистрированных сигналов и технологическую настройку (программирование) БУРС. В табл. 2 приведены основные технические параметры экспериментального измерительного комплекса.

**Таблица 2.** Технические параметры ЭРК ШПС

№ п/п	Параметр	Ед. измерения	Значение	Примечание
1	Амплитуда импульсов тока в зондирующей индукционной рамке	А	0.3–7.0	Зависит от $R_{\text{БОТ}}$ и $U_{\text{АБ}}$
2	Напряжение аккумуляторных батарей ( $U_{\text{АБ}}$ ) блока силового питания.	В	12–200	Определяется амплитудой зондирующих импульсов
3	Минимальная длительность фронта импульсов тока в зондирующей индукционной рамке	мкс	10	При $R_{\text{БОТ}} = 120 \text{ Ом}$ , $L_p = 0.4 \text{ мГн}$
4	Коэффициент преобразования индукционного датчика сигналов	мВ/нТл	0.1	
5	Постоянная интегрирования индукционного датчика сигналов, не менее	с	0.3	
6	Полоса пропускания приемного измерительного канала по уровню минус 3 дБ	Гц	0.6–8000	ИДС + БУФС
7	Уровень собственных шумов приемного измерительного канала (среднее квадратичное значение), не более	мкВ	0.4	
8	Частота дискретизации регистрируемых сигналов	кГц	51–54	Зависит от режима работы
9	Динамический диапазон регистрируемых сигналов, не менее	дБ	96	

Осенью 2013 г. были проведены первые полевые эксперименты с ЭРК ШПС. Комплекс был развернут в одной из точек на территории Бишкекского геодинамического полигона. Проводилась регистрация и обработка помех и сигналов становления поля, получаемых в двух режимах зондирования: шумоподобными сигналами и детерминированными с постоянными длительностью и периодом повторения.

Для оценки эффективности подавления помех и шумов при корреляционной обработке ШПС по сравнению с типовыми способами обработки детерминированных сигналов аналогично тому, как это было выполнено при математическом моделировании, была проведена серия полевых записей шумов и помех в условиях отсутствия зондирующих сигналов. Далее проводилась обработка зарегистрированных помех, рассчитанная на выделение полезных сигналов на фоне шумов в двух режимах: режим корреляционной обработки с последующим синхронным накоплением во временном окне, соответствующем периоду повторения ВКФ (режим ШПС), и в режиме весового синхронного накопления периодических последовательностей детерминированных сигналов в паузах между зондирующими импульсами, как в типовых электроразведочных системах (режим ПП).

Так как в типовых электроразведочных системах накопление принимаемых сигналов осуществляется, как правило, в паузах между зондирующими импульсами, то длительность регистрации таких сигналов устанавливалась в два раза больше с целью получения примерно одинаковых условий с режимом ШПС по количеству накапливаемых периодов повторения сигналов и их энергетике. Результаты обработки данных полевой регистрации приведены в табл. 3.

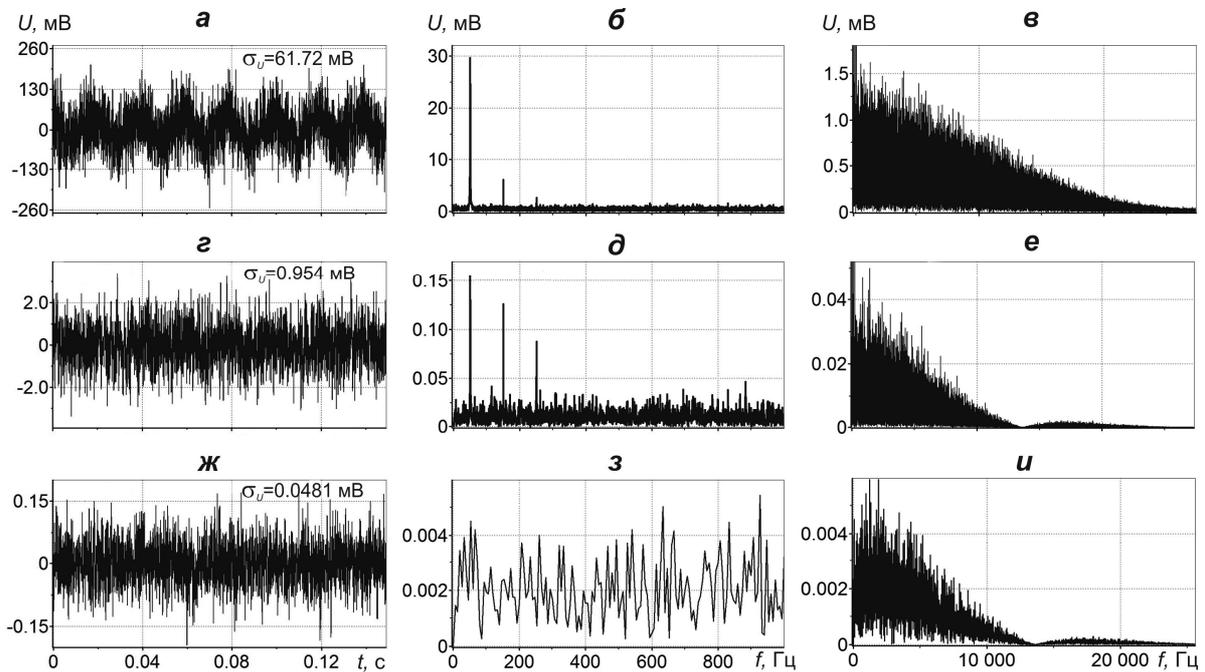
**Таблица 3.** Подавление помех при корреляционной обработке ШПС и при накоплении детерминированных сигналов

Параметр	Режимы измерения и обработки сигналов					
	ШПС, корр. обработка + накопление			ПП, накопление		
	$M=11$ $T_M=0.15$ с $N=398$	$M=12$ $T_M=0.31$ с $N=190$	$M=13$ $T_M=0.63$ с $N=92$	$T_{\Pi}=0.16$ с $N=372$	$T_{\Pi}=0.32$ с $N=184$	$T_{\Pi}=0.64$ с $N=92$
$\sigma_{in}$ , мВ	61.72	62.56	61.84	62.53	63.05	61.95
$\sigma_{ВКФ}$ , мВ	0.954	0.674	0.505	–	–	–
$\sigma_{out}$ , мВ	0.0481	0.048	0.0489	3.051	4.162	5.884
$\sigma_{in}/\sigma_{ВКФ}$	65	93	122	–	–	–
$K = \sigma_{in}/\sigma_{out}$	1284	1302	1264	21	15	11
$PG = K_{ШПС} / K_{ПП}$	63	86	120	–	–	–

*Примечание:*  $M$  – длина (разрядность) шумоподобной  $M$ -последовательности;  $T_M$  – длительность одиночной  $M$ -последовательности;  $T_{\Pi}$  – длительность паузы (импульса) в детерминированной периодической последовательности импульсов;  $N$  – число накапливаемых  $M$ -последовательностей (пауз в периодической последовательности импульсов);  $\sigma_{in}$  – среднеквадратичный уровень зарегистрированных помех;  $\sigma_{ВКФ}$  – среднеквадратичный уровень помех после корреляционной обработки без накопления;  $\sigma_{out}$  – выходной среднеквадратичный уровень помех;  $K$  – коэффициент подавления помех;  $PG$  – выигрыш в подавлении помех в режиме ШПС по сравнению с ПП

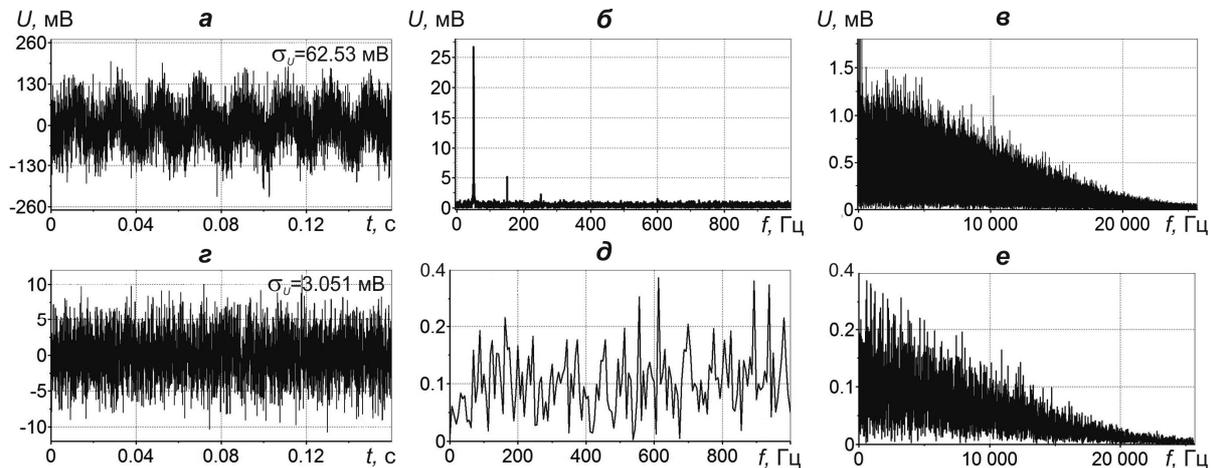
Из табл. 3 видно, что при корреляционной обработке и последующем синхронном накоплении сигналов в режиме ШПС достигается значительное (более чем в 1200 раз), подавление непрерывных помех. Обработка накоплением, применяемая при зондировании периодическими последовательностями импульсов с постоянной длительностью (режим ПП) при условии равенства энергий зондирующих последовательностей сигналов, обеспечивает значительно меньшее подавление помех (10–20 раз). При этом выигрыш в подавлении помех в режиме ШПС по сравнению с режимом ПП растет с увеличением длины (разрядности) используемой шумоподобной  $M$ -последовательности.

На рис. 5 и рис. 6 показаны характерные примеры подавления зарегистрированных в полевых условиях помех и шумов после их обработки в двух режимах (ШПС – рис. 5 и ПП – рис. 6).



**Рис. 5.** Подавление помех и шумов в режиме ШПС ( $M = 11, N = 398, T_M = 0.15$  с)

*а* – фрагмент записи помех (первичные данные); *б, в* – спектр первичных зарегистрированных помех; *г* – помехи после корреляционной обработки; *д, е* – спектр помех после корреляционной обработки; *ж* – помехи после корреляционной обработки и накопления; *з, и* – спектр помех после корреляционной обработки и накопления



**Рис. 6.** Подавление помех и шумов в режиме ПП ( $T_{\Pi} = 0.16$  с,  $N = 372$ )

*а* – фрагмент записи помех (первичные данные); *б, в* – спектр первичных зарегистрированных помех; *г* – помехи после весового синхронного накопления; *д, е* – спектр помех после весового синхронного накопления

Согласно рис. 5, *а-в* и рис. 6, *а-в* полевые помехи и шумы представляют собой аддитивную смесь тональных помех с широкополосным шумом. В амплитудном спектре зарегистрированных помех наблюдаются характерные пики на частотах 50, 150 и 250 Гц (рис. 5, *б* и 6, *б*), соответствующие нечетным гармоникам промышленной сило-

вой сети. Спадающий характер спектра шумовой (широкополосной) составляющей зарегистрированных помех (рис. 5, в и 6, в) определяется особенностями спектральной плотности теллурических помех, собственных шумов измерительного канала и его частотной характеристикой.

В результате корреляционной обработки наблюдается значительное, примерно в 65 раз, подавление как тональных составляющих, так и широкополосной шумовой помехи (рис. 6, з). Наряду с уменьшением общего уровня помех меняется их спектральный состав. Уровень высокочастотных составляющих становится значительно меньше (рис. 5, е).

Дальнейшее накопление сигналов после корреляционной обработки (398 периодов ВКФ) еще в большей степени способствует подавлению помех (рис. 5, ж, з, и). Для обеспечения наилучшего подавления оставшихся после корреляционной обработки тональных помех в процессе дальнейшего синхронного накопления длительность одиной бинарной М-последовательности, применяемой для корреляционной обработки сигналов, выбирается кратной нечетному числу полупериодов этой помехи. В результате суммарное подавление помех при корреляционной обработке с последующим накоплением согласно рис. 5 составило примерно 1280 раз (62 дБ).

В режиме ПП подавление как тональных, так и широкополосных непрерывных помех осуществляется за счет применения алгоритма весового синхронного накопления сигналов. При этом величина подавления для широкополосных помех и шумов зависит от числа накапливаемых временных периодов. Для наилучшего подавления тональной помехи и всех ее гармоник длительность временного окна накопления выбирается кратной целому числу периодов тональной помехи. Согласно графикам рис. 6, б, д спектральные составляющие тональных помех при накоплении практически исчезают, а уровень широкополосных помех снижается, но значительно меньше, чем при корреляционной обработке сигналов. При этом форма спектра широкополосных непрерывных помех не меняется. Общее подавление помех и шумов в режиме ПП согласно рис. 6 составило примерно 20 раз (26 дБ).

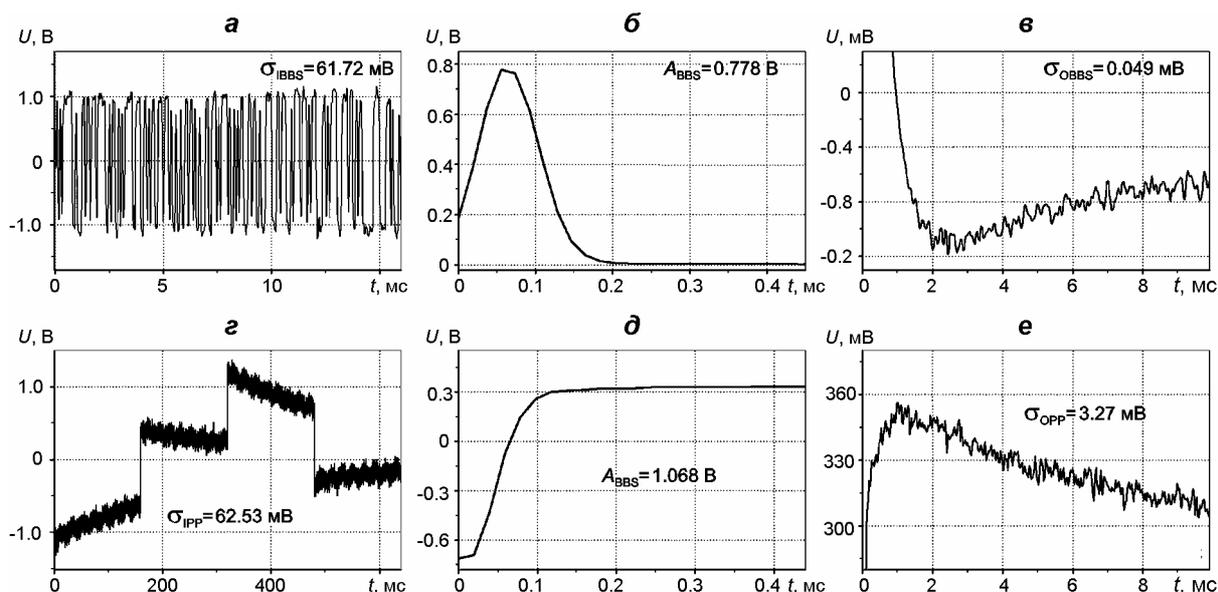
Таким образом, выигрыш в подавлении помех в режиме ШПС по сравнению с режимом ПП составил 64 раза (36 дБ).

В процессе полевых работ была проведена серия сравнительных экспериментов по регистрации сигналов становления поля в двух режимах зондирования (ШПС и ПП) при разных амплитудах зондирующих токовых импульсов. Зарегистрированные в режиме ШПС сигналы подвергались корреляционной обработке с последующим накоплением полученных периодически повторяемых ВКФ, а в режиме зондирования детерминированными последовательностями импульсов с постоянными параметрами обрабатывались с помощью алгоритма весового синхронного накопления. Проведен сравнительный качественный и количественный анализ полученных данных.

На рис. 7 показан пример выделения полезных сигналов становления поля на фоне помех на выходе системы с корреляционной обработкой ШПС в сравнении с системой с детерминированными сигналами.

По данным регистрации с помощью специально разработанной программы обработки сигналов вычислялись амплитуды сигналов в двух режимах зондирования  $A_{BBS}$ ,  $A_{PP}$ , а также среднеквадратичные уровни входных  $\sigma_{BBS}$ ,  $\sigma_{PP}$  и выходных (после обработки)  $\sigma_{OBBS}$ ,  $\sigma_{OPP}$  помех. Согласно рис. 7 входное соотношение сигнал–помеха определится как  $A_{PP}/\sigma_{PP} \approx 17$  для режима зондирования ПП и  $A_{BBS}/\sigma_{BBS} \approx 13$  для режима ШПС, а выходные  $A_{PP}/\sigma_{OPP} \approx 326$  и  $A_{BBS}/\sigma_{OBBS} \approx 15813$  соответственно.

Таким образом, при зондировании шумоподобными сигналами улучшение соотношения сигнал/помеха после обработки составило 1216 раз, а при эквивалентном



**Рис. 7.** Пример выделения полезного сигнала на фоне помех и шумов в полевом эксперименте с ЭРК ШПС (амплитуда зондирующих импульсов тока 0.6 А)

*а* – фрагмент принятого сигнала при зондировании шумоподобной М-последовательностью импульсов ( $M = 11$ ,  $N = 398$ ,  $T_M = 0.15$  с); *б*, *в* – характерные фрагменты (участки) сигнала после корреляционной обработки и последующего накопления в режиме ШПС; *г* – фрагмент (один период) принятого сигнала при зондировании периодической последовательностью импульсов с паузой ( $T_{II} = 0.16$  с,  $N = 372$ ); *д*, *е* – характерные фрагменты (участки) сигнала после синхронного весового накопления в режиме ПП

по энергии зондировании периодической последовательностью двуполярных прямоугольных импульсов с постоянной длительностью и паузами между ними – всего лишь 19 раз.

Следует также отметить, что при корреляционной обработке ШПС вычисляемая ВКФ по форме совпадает с ИПХ измерительной системы, которая складывается из ИПХ зондирующей установки, ИПХ исследуемой среды (земной коры) и ИПХ измерительного канала. На графиках рис. 7, *б*, *д* и рис. 7, *в*, *е* хорошо видно, что максимум (минимум) ВКФ (рис. 7, *б*, *в*) достигается при максимальной скорости изменения переходной функции (ПФ), получаемой в режиме ПП (рис. 7, *д*, *е*), а переход функции ВКФ через нулевое значение происходит при максимальном значении ПФ (рис. 7, *в*, *е*), т.е. получаемая в процессе корреляционной обработки ВКФ пропорциональна скорости изменения ПФ, получаемой в режиме ПП. Таким образом, подтверждаются результаты, полученные при математическом моделировании системы с ШПС.

### Обсуждение полученных результатов и выводы

Математическое моделирование и экспериментальные исследования, проведенные в Научной станции РАН, выявили ряд важных особенностей и преимуществ использования шумоподобных сигналов в геоэлектроразведочной аппаратуре. В частности, для эффективного применения ШПС в геоэлектроразведке требуется правильный выбор типа ШПС. Не все виды шумоподобных сигналов для этого подходят. Основным критерий при выборе ШПС – это максимальная близость автокорреляционной функции ШПС к идеальной  $\delta$ -функции Дирака, что обеспечивает прямое получение импульсной переходной характеристики исследуемой среды (земной коры) путем вычисления взаимной корреляционной функции между зарегистрированным сигналом отклика и зон-

дирующим сигналом. Этим условиям удовлетворяет, пожалуй, единственный вид шумоподобных сигналов в виде непрерывных периодически повторяемых импульсных последовательностей максимальной длины, так называемых бинарных М-последовательностей. Отличительной особенностью таких сигналов является отсутствие боковых выбросов в их АКФ, воспринимаемых как шум.

Применение ШПС позволяет получить значительный выигрыш (100 и более раз) в выходном соотношении сигнал/шум по сравнению с традиционными электроразведочными системами за счет использования корреляционной обработки сигналов. При этом указанный выигрыш растет с увеличением длины используемой М-последовательности зондирующих импульсов.

Высокий уровень подавления помех и шумов в измерительной системе с ШПС обеспечивает регистрацию очень слабых сигналов, наблюдаемых на больших временах становления поля, благодаря чему становится возможным измерение электрических параметров земной коры в более широком диапазоне глубин при пониженной мощности зондирующей установки.

Таким образом, полученные в Научной станции РАН первые положительные результаты по применению ШПС в активной геоэлектроразведке дают основание полагать, что в ближайшей перспективе возможно создание современного измерительного комплекса, обладающего по сравнению с существующими геоэлектроразведочными измерительными системами более широким диапазоном исследуемых глубин земной коры, пониженными энергозатратами (мощностью зондирующей электроимпульсной установки) при сохранении высокой точности, помехоустойчивости и надежности системы.

### Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность и благодарность доктору технических наук Борису Сергеевичу Светову за оказанное содействие, теоретические консультации и предложения по решению вопросов, возникающих при разработке темы, кандидату технических наук Вадиму Николаевичу Ключкину за технические консультации и помощь, оказанные при разработке аппаратной части измерительного комплекса ЭРК ШПС, руководству НС РАН в лице директора доктора физико-математических наук Анатолия Кузьмича Рыбина и первого заместителя директора НС РАН Геннадия Григорьевича Щелочкова за неустанную организационную и финансовую поддержку проводимой разработки, научному руководителю работы кандидату физико-математических Виталию Дмитриевичу Брагину за научные консультации по разрабатываемой тематике, сотрудникам лаборатории перспективных аппаратных разработок НС РАН Олегу Александровичу Лашину, Дмитрию Сергеевичу Мясникову, Евгении Александровне Плисовицкой за активное участие в работе и практический вклад в разработку темы.

Работа проводилась в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., пункт 80, тема: “Разработка аппаратно-программных средств и основ технологий электромагнитного мониторинга геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах и оценки их опасностей”, регистрационный номер 0120.0713073.

### Литература

- Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.  
*Великин А.Б.* Способ электроразведки и устройство для его осуществления: Патент РФ на изобретение № 2354999 от 10.05.2009 г.

- Гарьянов А.В., Сидорин А.Я., Черный И.Г. Аппаратурно-методические разработки для прецизионного геоэлектрического мониторинга // Сейсмические приборы. 1999. Вып. 31. С.14–28.
- Ильичев П.В. Технологические аспекты применения шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки, математическое моделирование // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы 5-го Международного симпозиума, г. Бишкек, 19–24 июня 2011 г. / Отв. ред. М.Г. Леонов, Н.В. Шаров. Т. 2. Бишкек: ИС РАН, 2012. С.165–178.
- Осташевский М.Г., Сидорин А.Я. Аппаратура для динамической геоэлектрики. М.: ИФЗ АН СССР, 1990. 206 с.
- Осташевский М.Г., Полтанов А.Е., Сидорин А.Я. Генераторная техника для исследований по прогнозу землетрясений методом электромагнитных зондирований с накоплением сигналов // Сейсмические приборы. 1997. Вып. 27. С.15–20.
- Светов Б.С., Алексеев Д.А., Яковлев А.Г. Шумоподобные сигналы (ШПС) в активной геоэлектрике // Материалы Пятой всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011 / Гл. ред. А.К. Сараев. Кн. 2. СПб.: СПбГУ, 2011. С.107–110.
- Сидорин А.Я., Осташевский М.Г. Методика прецизионного электрического зондирования для поиска предвестников землетрясений // Сейсмические приборы. 1996. Вып. 25/26. С.189–211.
- 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.

#### Сведения об авторах

**ИЛЬИЧЁВ Павел Вадимович** – заведующий лабораторией, Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке. Кыргызская Республика, 720049, г. Бишкек-49, Научная станция РАН. Тел.: +996-0555-233-951. E-mail: ipv@gdirc.ru; pavel.v1953@mail.ru

**БОБРОВСКИЙ Владимир Владимирович** – ведущий инженер-конструктор, Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке. Кыргызская Республика, 720049, г. Бишкек-49, Научная станция РАН. Тел.: +996-0543-917-911. E-mail: bvlad77@mail.ru

## Application of pseudonoise signals in systems of active geoelectric exploration (on the results of mathematical simulation and field experiment)

P.V. Ilyichev, V.V. Bobrovsky

*Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz Republic*

**Abstract.** We studied special aspects of using pseudonoise signals (PNS) in the systems of active geoelectrical exploration by means of mathematical models and experimentally *in situ* by means of special measuring complex. We obtained a considerable gain in the output signal-to-noise ratio (about 100 times) due to application of correlation processing of special pseudonoise signals in the measuring system with PNS as compared to traditional electromagnetic prospecting systems. It ensured high accuracy of transient signal registration particularly for large periods, which allowed us to measure electric parameters of the Earth's crust in the wider depths range under the reduced power of the sounding generating plant.

**Keywords:** pseudonoise signals, geoelectrical exploration, correlation processing of signals, synchronous accumulation of signals.