

УДК 550.370

ПРИМЕНЕНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ КОДОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

© 2022 г. А. А. Гончаров¹, Д. А. Алексеев^{1, 2, 3, 4}, А. В. Кошурников⁵, А. Ю. Гунар⁵, И. П. Семилетов², П. Ю. Пушкарев^{5, *}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, Россия

²Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

⁴Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

⁵Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*E-mail: pavel_pushkarev@list.ru

Поступила в редакцию 05.03.2022 г.

После доработки 06.04.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

Выполнено численное моделирование, направленное на оценку эффективности применения псевдослучайных последовательностей импульсов тока (шумоподобных сигналов, ШПС) в системах морской импульсной электроразведки (зондирование становлением поля – ЗС) с установкой типа “диполь–диполь” и разработку специализированных методов обработки/интерпретации данных, получаемых в рамках такого подхода. На основе анализа экспериментальных данных ЗС, полученных в рамках экспедиционных работ в акватории моря Лаптевых, выполнена оценка помех и искажений сигналов ЗС, затрудняющих их интерпретацию. С использованием алгоритма генерации псевдослучайных кодовых импульсных M -последовательностей и экспериментальных записей шума имитированы сигналы ШПС-зондирования, соответствующие условиям акваторной съемки на арктическом шельфе. Обработка зашумленных синтетических записей и реконструкция импульсной переходной характеристики (кривой становления поля) выполнялась на основе решения уравнения свертки. По результатам сравнения полученных переходных характеристик, реконструированных по зашумленным синтетическим данным в режиме накопления и ШПС установлено, что в режиме ШПС относительная погрешность оценки отклика с увеличением времени нарастает существенно медленнее, чем при накоплении, и остается в пределах приемлемой величины (до нескольких процентов) до более поздних времен (удлинение кривой может достигать одной декады по времени). Показано, что реализация режима ШПС в морских системах электромагнитного зондирования существенно улучшает характеристики системы в терминах соотношения сигнал/шум и расширяет диапазон применимости электромагнитного зондирования в условиях Арктического шельфа.

Ключевые слова: морская электроразведка, зондирование становлением поля, импульсная переходная характеристика, арктический шельф, псевдослучайные последовательности, шумоподобные сигналы, уравнение свертки.

DOI: 10.31857/S0002333722050167

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее активно применяемых несейсмических методов современной сухопутной геофизической разведки является электромагнитный (ЭМ) метод зондирования становлением поля (ЗС) [Nabighian, Маснае, 1991; Светов, 2009; Кауфман и др., 2016]. Модификация ЗС в ближней зоне (ЗСБ), основанная на изучении процес-

са установления ЭМ поля в поздней стадии и позволяющая проводить зондирование среды при нулевом разnose источник–приемник, обладает наивысшей детальностью (разрешающей способностью) среди всех методов электроразведки, не считая георадиолокацию [Giannino, Leucci, 2021], позволяя изучать как структурные особенности разреза, так и получать оценку коллекторских

(фильтрационно-емкостных свойств) отдельных формаций. Морская модификация ЗС также является эффективным методом зондирования [Barsukov, Fainberg, 2014; Nakayama, Saito, 2016], активно применяемым в последние годы с целью изучения осадочного разреза и многолетнемерзлых пород на мелководных акваториях в зоне Арктического шельфа [Shakhova et al., 2017; Piskunova et al., 2018]. Основные ограничения этой технологии связаны с тем, что изучение достаточно больших глубин требует измерения переходной характеристики (кривой становления) в области времен, где ее значения в силу быстрого убывания со временем оказываются крайне малы и искажены влиянием шума, что не позволяет обеспечить достаточной точности. При этом, стандартный подход к регистрации и обработке ЗС-сигналов состоит в т.н. накоплении – многократном измерении кривой становления для серии импульсов, и последующем ее осреднении по всем измеренным реализациям [Giannino, Leucci, 2021].

Повышение отношения сигнал/шум возможно путем увеличения мощности источника, увеличения длительности регистрации и количества накоплений, а также за счет применения схем возбуждения и обработки с использованием псевдослучайных последовательностей импульсов тока вместо традиционно применяемых серий импульсов одинаковой (обычно – несколько секунд) длительности. Отметим, что первый путь имеет ограничения, связанные с энергетическими возможностями генераторной установки и искажениями формы зондирующих импульсов в высокоамперных цепях, а второй путь сложен в реализации в условиях морских работ, при которых судно с измерительной системой обычно находится в непрерывном движении, т.е. оба этих пути ведут к усложнению работ, возрастанию их стоимости и снижению производительности.

В то же время, из классической теории информации следует, что наиболее информационно емкими, то есть, способными в условиях помех переносить максимальное количество информации за единицу времени, являются шумоподобные сигналы (ШПС), по своим статистическим характеристикам аналогичные белому шуму. Одним из вариантов таких сигналов являются псевдослучайные кодовые последовательности (ПСКП), нашедшие в последние десятилетия широкое применение в качестве носителей информации в радиосвязи, радиолокации, радиоастрономии [Варакин, 1985; Гантмахер и др., 2006; Zepernick, Finger, 2005]. Рядом авторов [Duncan et al., 1980; Helwing, 1999; Светов и др., 2012; Svetov et al., 2012; Ильичев, Бобровский, 2014; Великин А.Б., Великин А.А., 2016] был предложен и исследован теоретически и практически подход, при котором вместо пропускания последовательности длин-

ных импульсов одинаковой амплитуды и осреднения полученных кривых спада в питающую линию подается псевдослучайная последовательность коротких разнополярных импульсов (PseudoRandom Binary Sequence – PRBS), обладающая широкополосным спектром и статистическими свойствами, близкими к белому Гауссовскому шуму (такие последовательности называют шумоподобными сигналами – ШПС).

В работах [Светов и др., 2012; Svetov et al., 2012] применительно к наземной системе ЗС с соосной петлевой установкой было установлено, что при одинаковых мощностях генератора и временах измерения использование ШПС обеспечивает более сильное подавление шумов по сравнению накоплением сигнала. В то же время, для указанного типа установки наблюдаемое возрастание коэффициента помехоподавления по сравнению с накоплением составляет 3–5 раз, что обеспечивает лишь небольшое удлинение надежно измеряемой части переходной характеристики по времени в связи с быстрым убыванием последней (отклик на ступень выключения тока убывает как $t^{-5/2}$, отклик на короткий импульс – как $t^{-7/2}$).

Специфика наиболее распространенной технологии морских работ ЗС состоит в применении установки АВ-MN, в которой поле возбуждается буксируемым у поверхности воды электрическим диполем, а регистрируется (также на поверхности, либо в толще воды) соосная компонента электрического поля. Эта установка характеризуется иной временной зависимостью процесса установления поля, нежели в установке “петля в петле”, а именно – более медленным убыванием в поздней стадии: отклик на ступень пропорционален $t^{-3/2}$, отклик на короткий импульс – $t^{-5/2}$. Этот фактор является благоприятным и позволяет рассчитывать на улучшение соотношения сигнал/шум в режиме ШПС по сравнению с установкой “петля в петле” [Алексеев и др., 2019; Гончаров и др., 2019; 2021]. Актуальность усовершенствования технологии ЗС в морском варианте также связана с относительно низкой помехозащищенностью традиционного варианта этой технологии ввиду особенностей возбуждения и приема сигнала в морских системах (ограниченное время зондирования на одной точке).

В настоящей работе в рамках численного моделирования ШПС-сигналов с использованием экспериментальных записей ЭМ шума анализируются возможности помехоподавления при проведении измерений ЗС с морской буксируемой диполь-дипольной установкой и дается оценка их эффективности по сравнению с традиционной схемой, основанной на методе накопления.

СЛОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ ЗС В РЕЖИМЕ НАКОПЛЕНИЯ С БУКСИРУЕМОЙ ДИПОЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ

Стандартная технология морских зондирований становлением поля с буксируемой измерительной системой предполагает, что в процессе пропускания тока в генераторную линию АВ, с использованием приемного датчика электрического поля (приемной линии MN) регистрируется временная зависимость для соосной составляющей напряженности электрического поля E_x . Использование этой компоненты оказывается наиболее простым и обеспечивает наибольшее соотношение сигнал/шум. Измеряемый с использованием описанной установки переходной процесс установления поля характеризуется определенной скоростью. На практике в большинстве случаев измеряется часть кривой (спад), следующая за фронтом выключения тока в источнике, что связано с отсутствием искажений, вызываемых пропусканием тока и присутствующих на стадии пропускания тока. Форма кривой спада несет информацию об электропроводности слоев исследуемой среды, а саму кривую обычно называют переходной характеристикой (ПХ), считая, что в случае достаточно длинного импульса она слабо отличается от реакции на полубесконечную ступень выключения тока [Светов и др., 2012].

Опыт геоэлектрических исследований, проводимых в шельфовых зонах с дипольной осевой буксируемой установкой (рис. 1а) [Кошурников и др., 2016; Shakhova et al., 2017], реализующей гальваническое возбуждение и прием сигнала, указывает на существенное искажение кривых становления поля в режиме накопления с однополярными импульсами вследствие влияния низкочастотных шумов (рис. 2а). Эти шумы, по-видимому, связаны с электрокинетическими и электрохимическими явлениями, возникающими при движении приемной линии в водной толще [Егоров, Пальшин, 2015], и имеют относительно низкочастотный спектральный состав, оказывая значимое влияние на регистрируемый сигнал в диапазоне времен свыше 70–80 мс (рис. 2). Наличие шумов приводит к существенному искажению формы кривых становления поля, выражающемуся в нереалистично медленном либо, наоборот, быстром убывании, нарушении монотонности, выходе в область отрицательных значений. Характерная амплитуда шума составляет 2–5 мВ, при этом часто можно говорить о наличии квазипостоянной составляющей, приводящей к сдвигу сигнала по амплитуде на несколько мВ.

При представлении в двойном логарифмическом масштабе (рис. 2б) искажение кривых становления поля выражается либо в их резком изгибе на поздних временах в сторону более низких значе-

ний с последующим переходом в отрицательную область, либо, наоборот, завышении значений ПХ и выполаживании ветвей, в зависимости от преобладающего значения квазипостоянной составляющей шумового сигнала в массиве индивидуальных кривых, по которому проводится накопление. В большинстве случаев искаженная часть отклика наблюдается начиная с времени становления, не превышающем 100 мс, что резко сокращает интерпретируемую часть ПХ, поскольку ее начальный сегмент отвечает условиям дальней зоны вследствие значительного разноса и высокой проводимости верхнего слоя геоэлектрического разреза (соленой воды с удельным сопротивлением 0.3–0.7 Ом · м). Отметим, что коррекция кривых путем учета квазипостоянной составляющей, оцениваемой путем усреднения сигнала в области поздних времен становления (500–2000 мс) в большинстве случаев улучшает результат лишь незначительно, что иллюстрируется на рис. 2в.

Таким образом, описанные выше искажающие факторы требуют усовершенствования методов регистрации и обработки сигналов ЗС, которые позволили бы улучшить соотношение сигнал/шум в области поздних времен становления и продлить интерпретируемый сегмент измеренной переходной характеристики.

ОЦЕНКА ПОМЕХОПОДАВЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ ШПС

С целью оценки возможностей применения псевдослучайных последовательностей импульсов тока в терминах результирующего уровня шума и его сравнения с таковым для традиционного режима накопления, было проведено моделирование ШПС-рядов, имитирующих сигналы зондирования с импульсами различной длительности и искусственным зашумлением, а затем выполнена реконструкция импульсной переходной характеристики для каждого из вариантов, и получена количественная характеристика ее погрешности относительно истинных значений.

На первом этапе моделирования с использованием экспериментальных данных ЗС, полученных в рейсе АМК-82, выбрана эталонная (истинная) кривая становления поля (ПХ), отвечающая типичному геоэлектрическому разрезу в южной части моря Лаптевых при средней глубине водного слоя 15–17 м (пунктирная кривая на рис. 2б). Эталонная кривая получена в интервале времен становления 1 мс–2 с путем усреднения большого массива индивидуальных зондирований в области ранних времен (до 70 мс) и экстраполяции кусочно-линейной функцией в двойном логарифмическом масштабе на более поздних временах с последующим сглаживанием кубическим сплайном. На основе полученной ПХ также были рас-

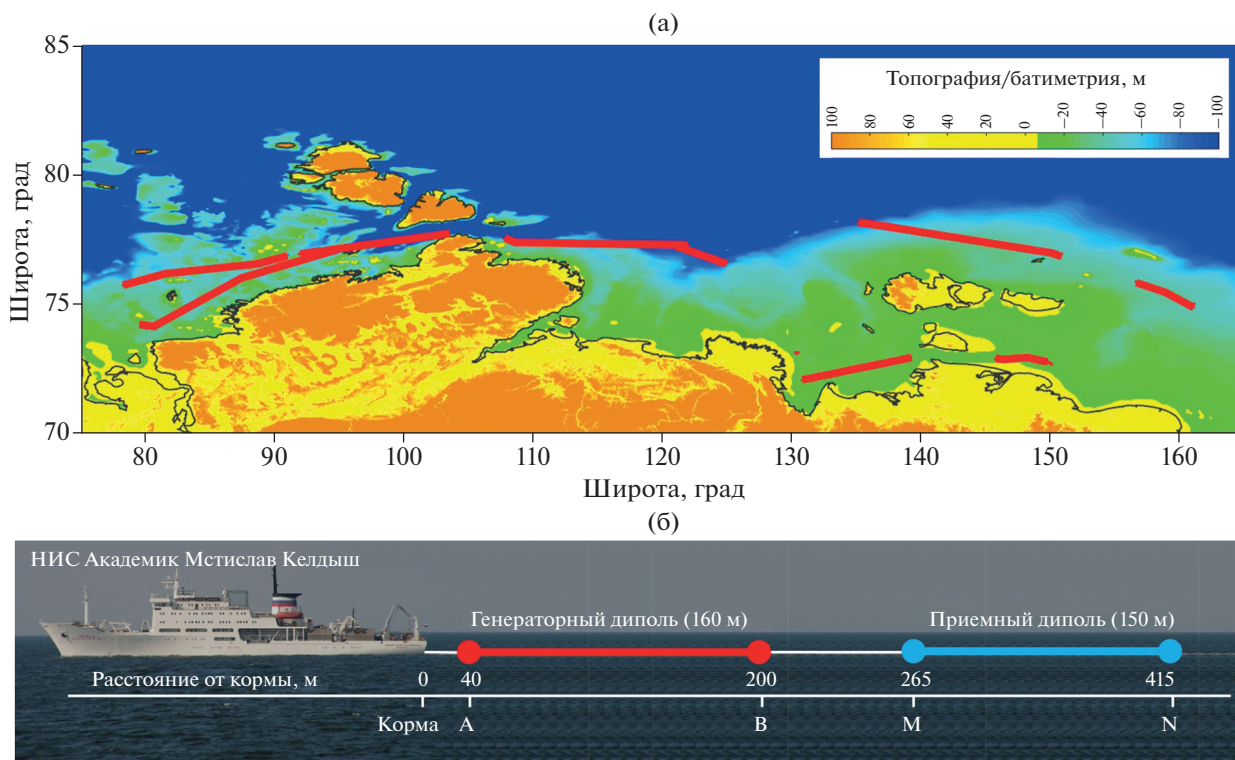


Рис. 1. (а) – Схема расположения профилей (красные линии) с выполнением измерений методом ЗС в рамках 82 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” (2020 г.) на шельфе Российской Арктики; (б) – используемая измерительная установка и ее геометрические параметры.

считаны ИПХ для импульсов длительностью 2 и 16 мс.

Второй этап моделирования предполагал расчет ПСП (ШПС) в виде двоичных M -последовательностей, состоящих из элементарных импульсов прямоугольной формы, с равновероятным распределением. Для этого использовался алгоритм генерации M -последовательностей, основанный на теории конечных полей Галуа и принципах линейных цифровых автоматов [Светов и др., 2012]. Рассматривалось два варианта последовательности – длиной 2^{12} (длительность одного импульса – 16 мс) и 2^{15} (длительность одного импульса – 2 мс) импульсов при одинаковой общей длительности, составляющей около 1 мин (65.536 с).

Задача расчета принятого сигнала $s(t)$, регистрируемого рассматриваемой измерительной системой в ответ на токовый сигнал $m(t)$, описывается сверточным соотношением:

$$s(t) = m(t) * h(t), \tag{1}$$

где $h(t)$ – импульсная характеристика (ИПХ) системы, представляющая собой ее отклик на входное воздействие в форме дельта-функции, а знак * означает операцию свертки.

Переходя к дискретной постановке и полагая, что входное воздействие $m(t)$ задано в виде после-

довательности прямоугольных импульсов, а ИПХ соответствует не дельта-функции, а одиночному импульсу длительности t , т.е. функции m , h и s представляют собой наборы отсчетов с шагом дискретизации t :

$$\begin{aligned} m &= \{m_i\}, \quad i = \overline{1, N}; \quad h = \{h_i\}, \quad i = \overline{1, M}; \\ s &= \{s_j\}, \quad j = \overline{1, N + M - 1}, \end{aligned} \tag{2}$$

соотношение (1) можно записать в виде системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\sum_i m_i h_{j-i} = s_j. \tag{3}$$

В матричной форме операцию моделирования ШПС-рядов можно представить как

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ m_2 & m_1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & m_2 & \ddots & \ddots & \vdots \\ m_N & \vdots & \ddots & m_1 & 0 \\ 0 & m_N & \ddots & m_2 & m_1 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & m_2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & m_N & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & m_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \\ s_{N+1} \\ \vdots \\ s_{N+M-1} \end{pmatrix}. \tag{4}$$

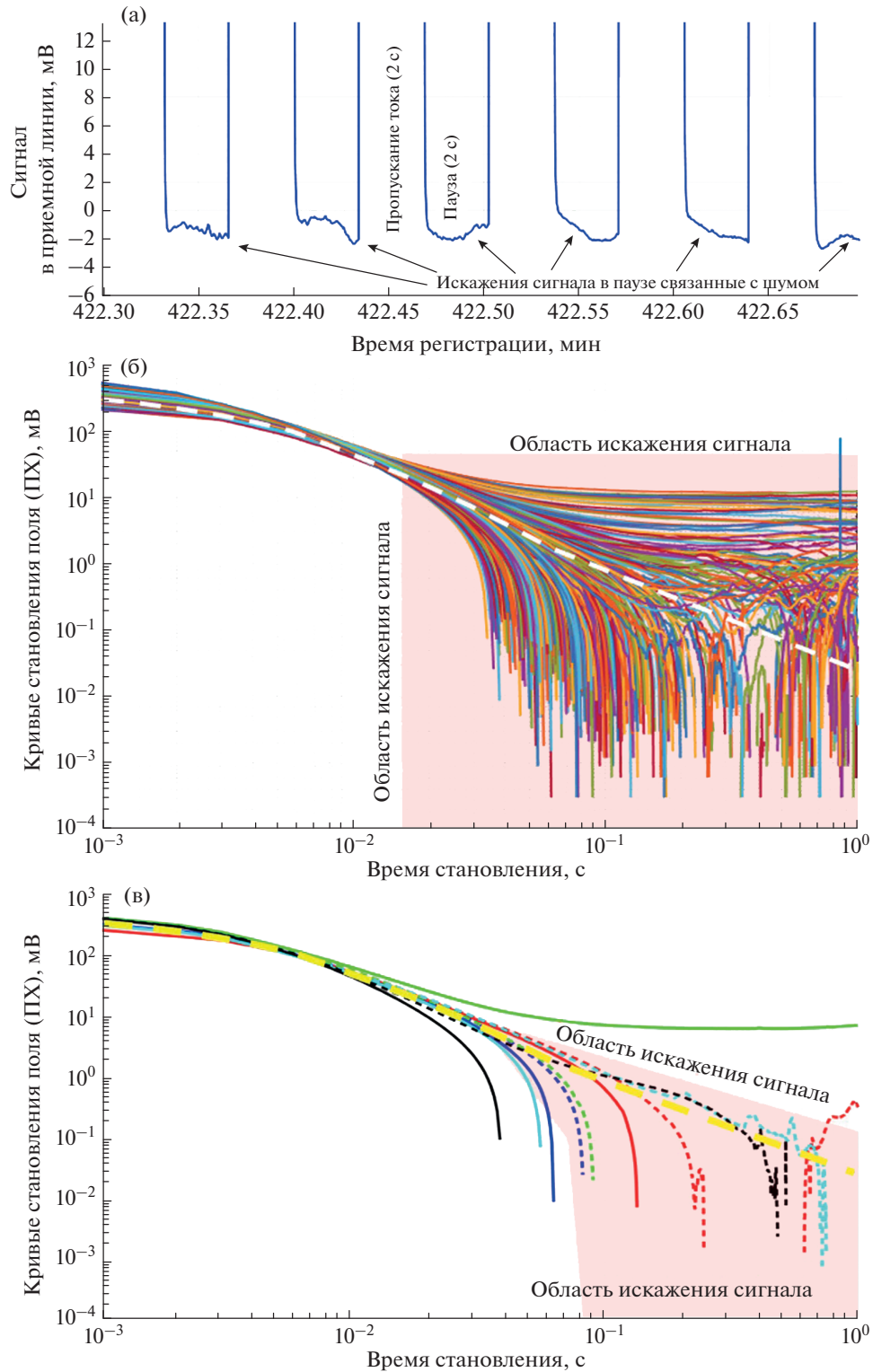


Рис. 2. Примеры данных ЗС по материалам экспедиции НИС "Академик Мстислав Келдыш" 2020 г. (море Лаптевых): (а) – 25-секундный интервал записи с характерными искажениями формы спада в паузах между импульсами; (б) – набор исходных кривых становления поля, полученных в южной части моря Лаптевых вдоль траверса длиной около 300 км. Каждая кривая отвечает 2-секундному импульсу (показана каждая 10 кривая из массива). Белым пунктиром показан результат моделирования ожидаемой кривой становления, отвечающей усредненному геоэлектрическому разрезу, типичному для изучаемого района; (в) – пары кривых до (сплошные линии) и после (пунктирные линии) коррекции постоянной составляющей, отвечающих 5 различным пунктам наблюдения на траверсе (кривые одного цвета соответствуют одному пункту). Желтым пунктиром показана та же истинная кривая, которая изображена белым пунктиром на рис. 2в.

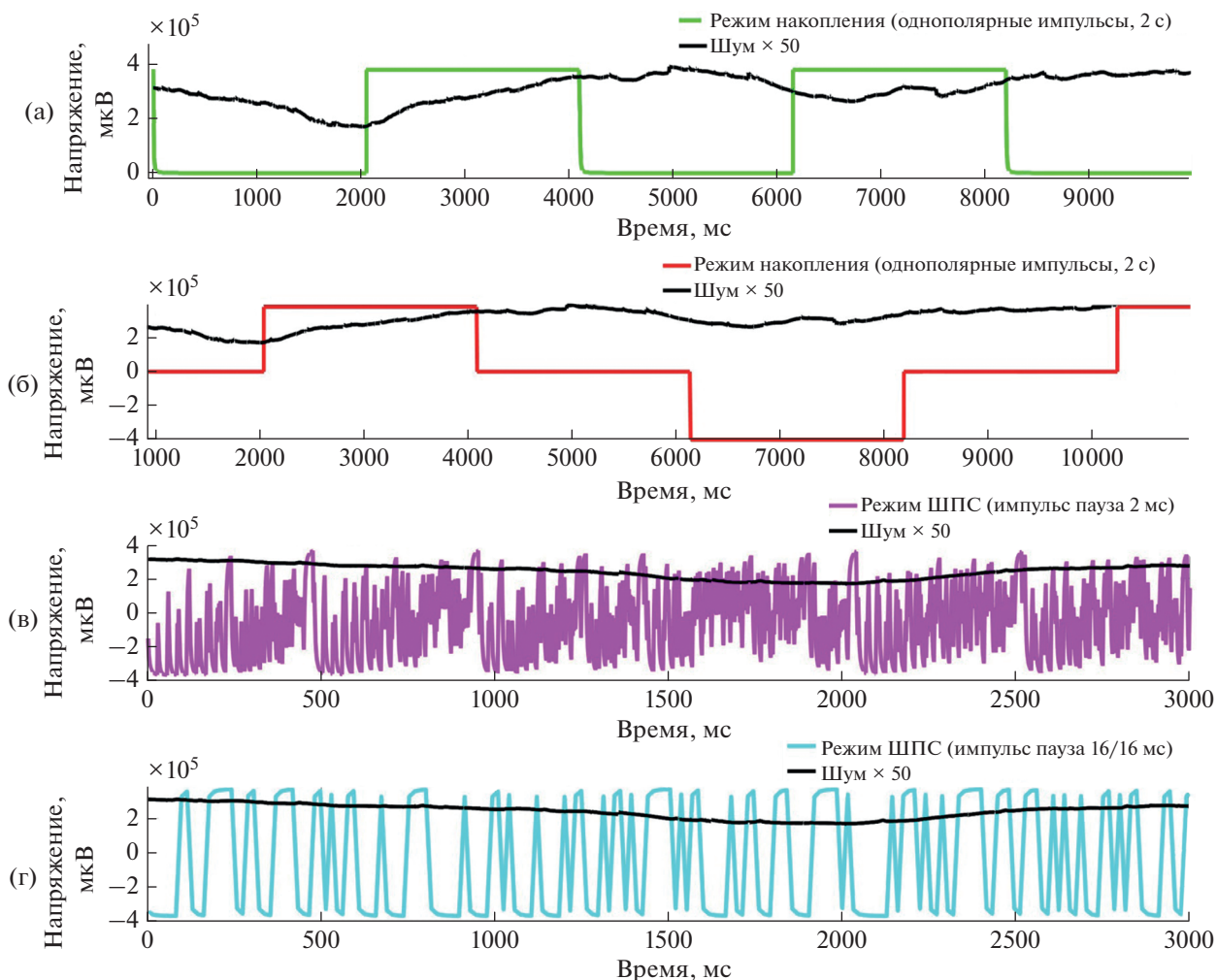


Рис. 3. Фрагменты сигналов, регистрируемых в приемной линии в режимах накопления с однополярными (а), разнополярными (б) импульсами и ШПС (в), (г). Зеленая кривая отвечает режиму накопления с однополярными импульсами и паузами длительностью 2 с; красная – аналогичному режиму с разнополярными импульсами; сиреневая и голубая кривые – сигналу в режиме ШПС с импульсами длительностью 2 и 16 мс, соответственно. Черными кривыми показан аддитивный шум с 50-кратным увеличением по амплитуде.

Таким образом, по построенным M -последовательностям вычисляется их свертка с импульсной переходной характеристикой среды для соответствующей длительности импульса, которая затем используется для имитации зарегистрированного сигнала. Чтобы оценить эффективность подавления шума, правая часть системы $s(t)$ была возмущена аддитивным шумом $n(t)$: $s_n(t) = s(t) + n(t)$. Шум $n(t)$ был выделен из записи в паузах сигнала, зарегистрированной в рамках экспедиции АМК-82 (рис. 2а).

Для сравнения с традиционной технологией был имитирован сигнал в режимах накопления с однополярными и разнополярными импульсами и паузами длительностью 2 с (рис. 3а, 3б). Синтетические ШПС-сигналы в сопоставлении с

накладываемым шумом (показанным с 50-кратным увеличением по амплитуде) приводятся на рис. 3в, 3г.

На следующем этапе выполнялась реконструкция ИПХ по зашумленным ШПС-рядам, а также оценка ПХ в режиме накопления в условиях одинаковой длительности зондирования и строго одинакового ряда наложенного шума. Определение ИПХ $h(t)$ из уравнения свертки (5) с зашумленной правой частью

$$m(t) * h(t) = s_n(t) \tag{5}$$

дает возможность получить оценку ИПХ $\tilde{h}(t)$, содержащую некоторую погрешность относительно

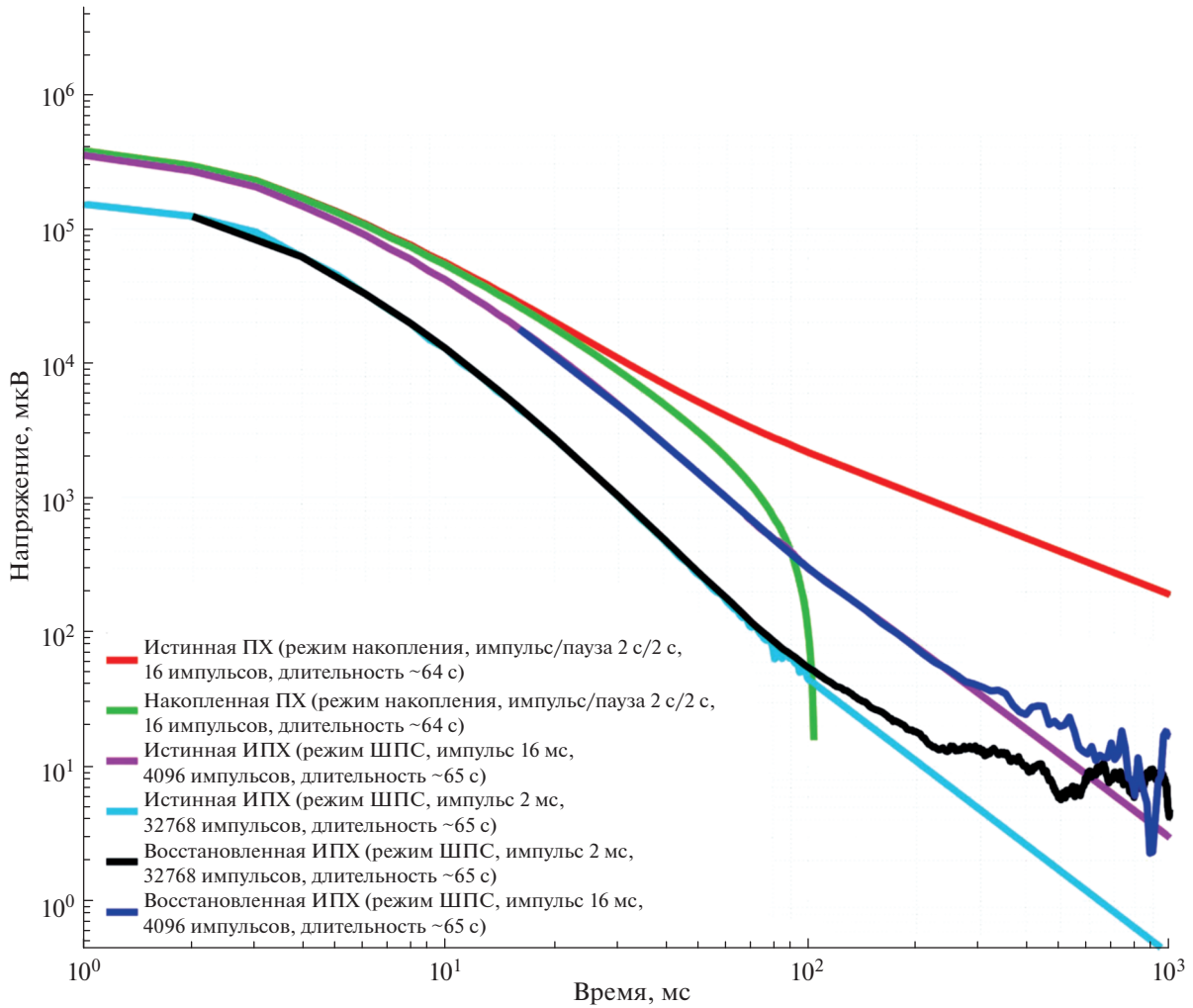


Рис. 4. Сопоставление восстановленных кривых становления поля в режиме накопления и ШПС по зашумленным рядам длительностью 65 с, синтезированным на основе свертки токовой последовательности импульсов, синтетической (истинной) переходной характеристики среды и аддитивного шума (для всех вариантов использован один и тот же фрагмент записи шума). Красной и светло-зеленой кривыми показаны истинная и восстановленная ПХ в режиме накопления с однополярными импульсами (импульс/пауза 2с / 2 с, 16 накоплений). Результаты применения режима ШПС приводятся в двух вариантах: импульс 16 мс, около 4 тыс. импульсов, сиреневая кривая – истинная, синяя – восстановленная ИПХ; импульс 2 мс, около 32 тыс. импульсов, голубая кривая – истинная, черная – восстановленная ИПХ.

истинной ИПХ $h(t)$. Задача состоит в максимальном снижении этой погрешности, то есть в максимальном приближении $\tilde{h}(t)$ к $h(t)$.

Для ее решения уравнения свертки, представляемого переопределенной СЛАУ (4) с зашумленной правой частью использовался метод наименьших квадратов (МНК) [Жданов, 2007]. Применение МНК позволяет сократить вычислительные затраты, обеспечивая переход от СЛАУ, в которой матрица левой части A имеет размер $(N + M - 1)M$, $N \gg M$, к нормальной СЛАУ с матрицей $A^T \times A$ размером $M \times M$ где T означает транспонирование. В результате рассчитывается набор значений ИПХ:

$$\tilde{h} = (A^T \times A)^{-1} A^T s_n \quad (6)$$

Хотя на практике величина $h(t)$ не известна, на этапе модельных исследований расхождение между $\tilde{h}(t)$ и $h(t)$ легко вычислить, например, как

$$\delta(t) = 100\% \times \frac{|\tilde{h}(t) - h(t)|}{h(t)}, \quad (7)$$

и полученная величина может быть использована для оценки коэффициента подавления шума и сравнения качества реконструируемой ИПХ при различных параметрах режима ШПС и режима накопления.

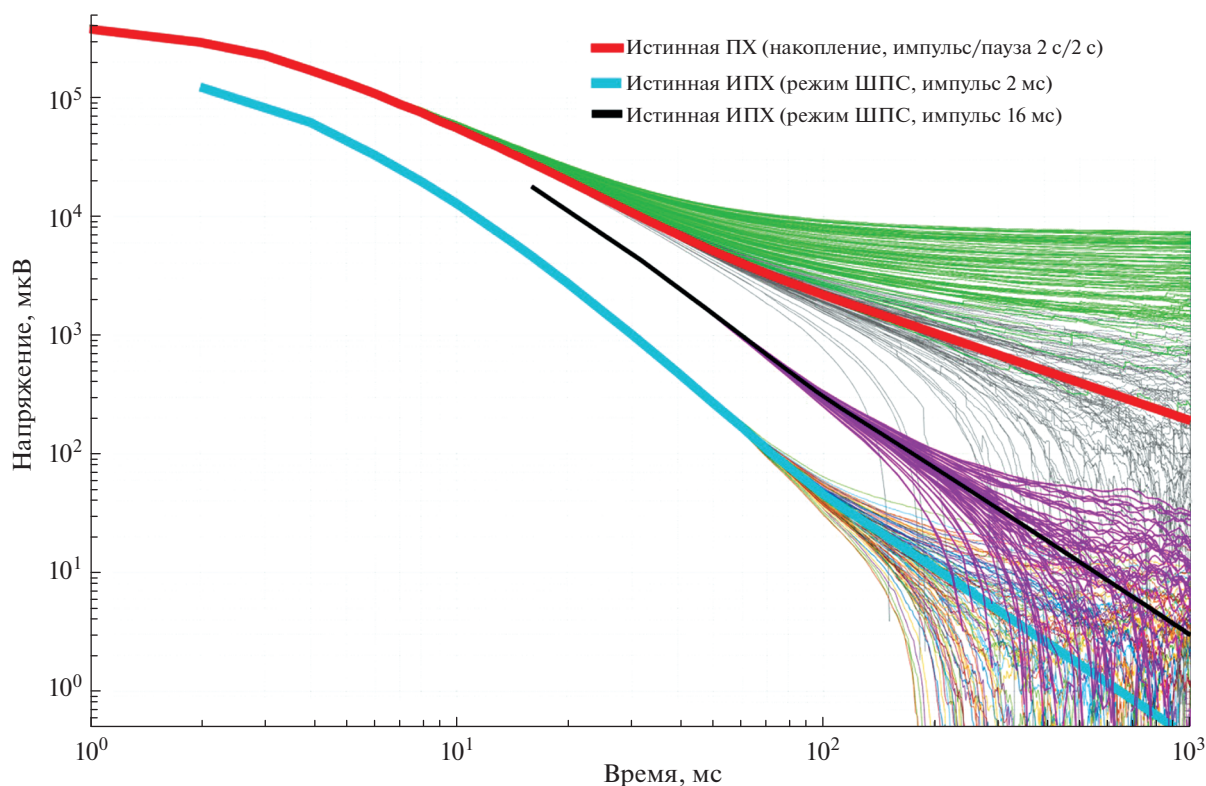


Рис. 5. Сопоставление восстановленных кривых становления поля в режимах накопления (импульс/пауза 2с/2 с, 16 накоплений) с однополярными (облако светло-зеленых кривых) и разнополярными (облако серых кривых) импульсами, а также режиме ШПС с импульсами длительностью 2 мс (около 32 тыс. импульсов, облако разноцветных тонких кривых) и режиме ШПС с импульсами длительностью 16 мс (около 4 тыс. импульсов, облако сиреневых кривых) при одинаковой длительности зондирования (65 с). Применялось аддитивное зашумление различными реализациями шума длительностью 65 с (количество реализаций шума – 100). Толстыми (красной, голубой и черной) кривыми показаны истинные ПХ и ИПХ (для импульсов длительностью 2 и 16 мс), соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты реконструкции переходных характеристик по зашумленным синтетическим данным в режимах накопления и ШПС представлены на рис. 4 для одиночной реализации шума и на рис. 5 для семейства из 100 различных 65-секундных реализаций шума. Можно видеть, что в режиме ШПС средний уровень погрешности ИПХ (при длительности, эквивалентной 16-кратному накоплению в режиме импульс/пауза 2 с/2 с) на любом фиксированном времени становления уменьшается приблизительно на два порядка. При этом полезный сигнал (восстанавливаемая кривая ИПХ) тоже лежит значительно ниже по уровню по сравнению с откликом на длинный импульс (ПХ), получаемым в режиме накопления.

Показанные на рис. 4 кривые $\tilde{h}(t)$ обнаруживают существенно различный уровень погрешности для различных режимов зондирования. Так, ПХ в режиме накопления, усредненная по 16 реализациям с одинаковой полезной составляющей и различным 2-секундным сегментам шума, демонстрирует заниженные значения (светло-зе-

леная кривая), резко отклоняясь от истинной кривой (красная линия) и уходя в область отрицательных значений сигнала на временах около 30–40 мс. Наилучший результат в терминах наибольшего удлинения регистрируемой кривой в сторону поздних времен становления наблюдается в режиме ШПС с импульсами длительностью 16 мс (синяя и сиреневая кривые), для которого приемлемая точность реконструкции сохраняется вплоть до 150–200 мс; в то же время, при такой длительности импульса возникают сложности с реконструкцией сегмента кривой на ранних временах становления. Регистрация в ШПС-режиме с 2-миллисекундными импульсами при тех же условиях обеспечивает хороший результат в интервале времен 2–90 мс (черная и голубая кривые), а с 16-миллисекундными импульсами – в интервале времен 16–120 мс.

С целью более широкого анализа, включающего большой набор реализаций шума, описанный выше численный эксперимент был проведен в двух режимах накопления (с однополярными и разнополярными импульсами длительностью 2 с),

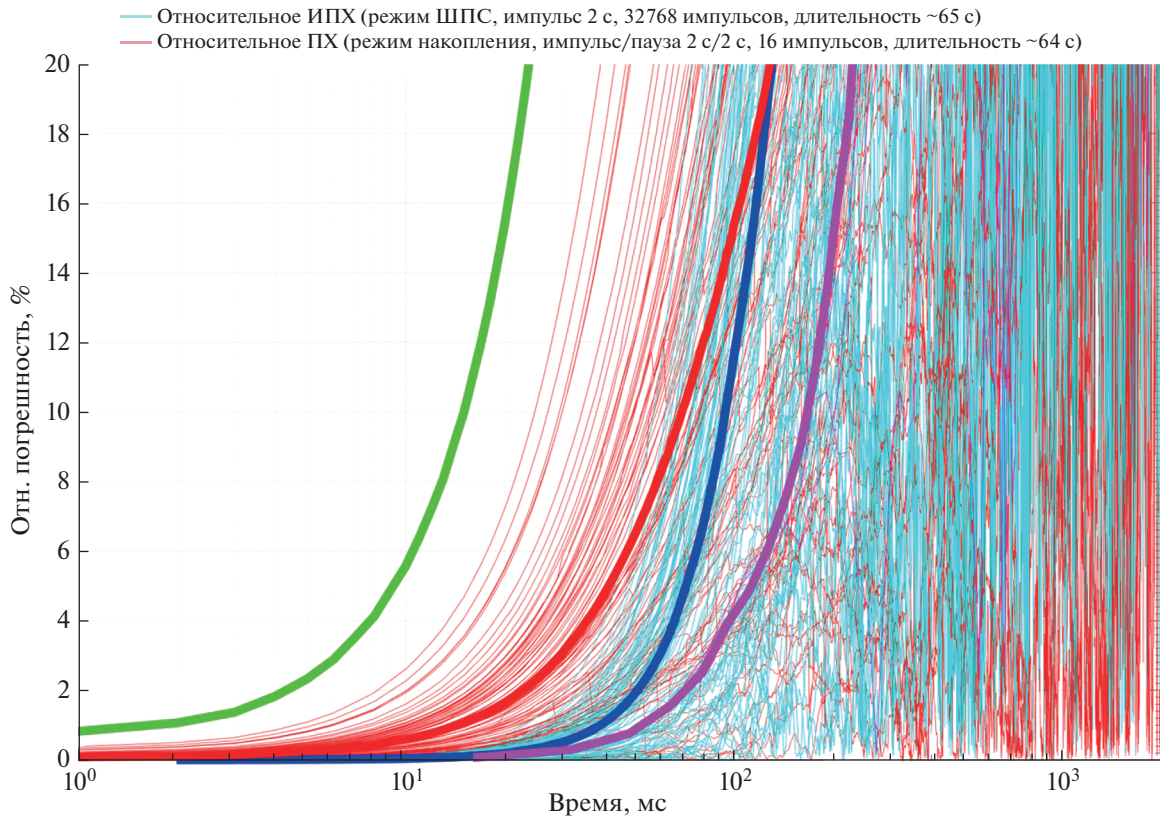


Рис. 6. Графики относительных отклонений восстановленных и истинных ПХ (в режиме накопления) и ИПХ (в режиме ШПС), показанных на рис. 5. Тонкими красными и голубыми линиями показаны погрешности реконструкции отклика для 100 различных реализаций шума в режиме накопления с разнополярными импульсами (красные кривые) и ШПС с импульсами 2 мс (голубые кривые), соответственно. Толстые кривые отвечают средним значениям погрешности по 100 реализациям шума: зеленая — накопление с однополярными импульсами 2 с; красная — накопление с разнополярными импульсами 2 с; синяя — режим ШПС с импульсами 2 мс; сиреневая — режим ШПС с импульсами 16 мс.

а также в режиме ШПС с импульсами 2 и 16 мс для массива из 100 синтетических зондирований с одинаковым полезным сигналом (истинными ПХ/ИПХ) и отличающихся сегментами шума, наложенными на имитированный измеренный сигнал. Результаты реконструкции представлены в виде облака разноцветных кривых, демонстрирующих преимущественно завышенные оценки в случае накопления (ПХ) и более равномерно распределенные кривые в случае ШПС (рис. 5). Характеризуя результат в целом, можно отметить, что систематическое искажение ПХ в режиме накопления с однополярными импульсами наблюдается, начиная с времен становления порядка 10–20 мс, в режиме с разнополярными импульсами — около 50–60 мс. При этом режим ШПС с импульсами длительностью 2 мс обеспечивает получение практически неискаженной ИПХ вплоть до времен около 80–90 мс, а с импульсами 16 мс — до 110–120 мс.

На рис. 6 и рис. 7 приводятся относительные погрешности полученных кривых (в зависимости

от времени становления), рассчитанные согласно (7). Анализируя эти зависимости, можно сделать вывод о том, что относительная погрешность в режиме ШПС с импульсами 2 мс (облако голубых кривых на рис. 6) с увеличением времени нарастает значительно медленнее, чем при накоплении (красные кривые), и остается в пределах приемлемых для интерпретации величин (несколько %) до более поздних времен (80–90 мс против 10 мс для накопления с однополярными импульсами, и 50–60 мс для накопления с разнополярными импульсами), что довольно существенно с точки зрения надежности реконструируемой геоэлектрической модели последующей интерпретации кривых становления. Более того, аналогичный показатель для режима ШПС с импульсами 16 мс (средняя погрешность показана на рис. 6 толстой сиреневой кривой) оказывается еще более выигрышным, достигая порогового значения в 5% на временах около 110–120 мс. Таким образом, можно сделать вывод о большей эффективности режима ШПС по сравнению с накоплением в усло-

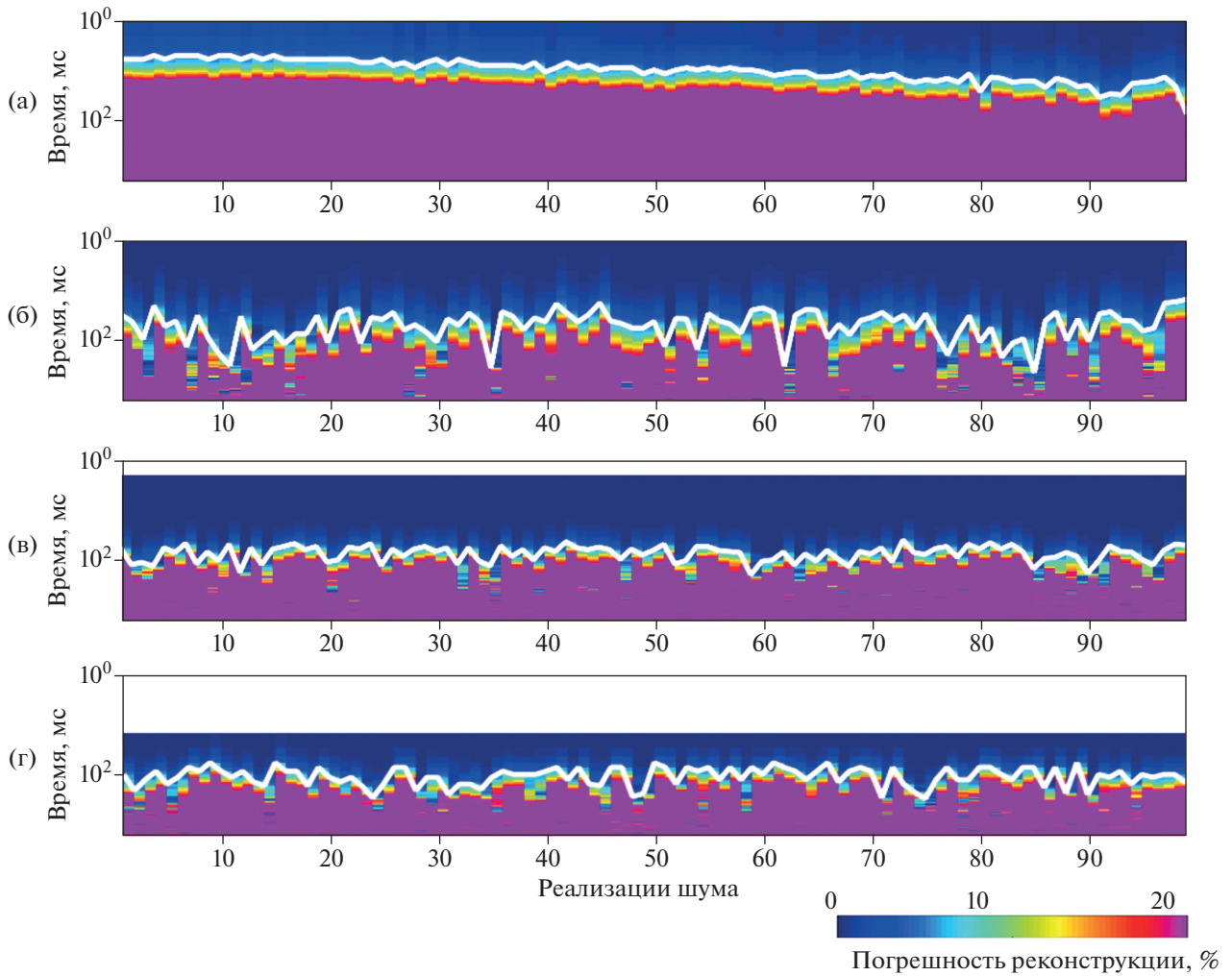


Рис. 7. Псевдоразрезы относительных отклонений восстановленных и истинных ПХ, показанных на рис. 6: (а) – режим накопления с однополярными импульсами 2 с; (б) – режим накопления с разнополярными импульсами 2 с; (в) – режим ШПС импульсами 2 мс; (г) – режим ШПС с импульсами 16 мс. Белыми линиями показаны значения предельно-достижимых времен регистрации откликов, отвечающих уровню относительной погрешности 5% в каждом из рассмотренных режимов зондирования.

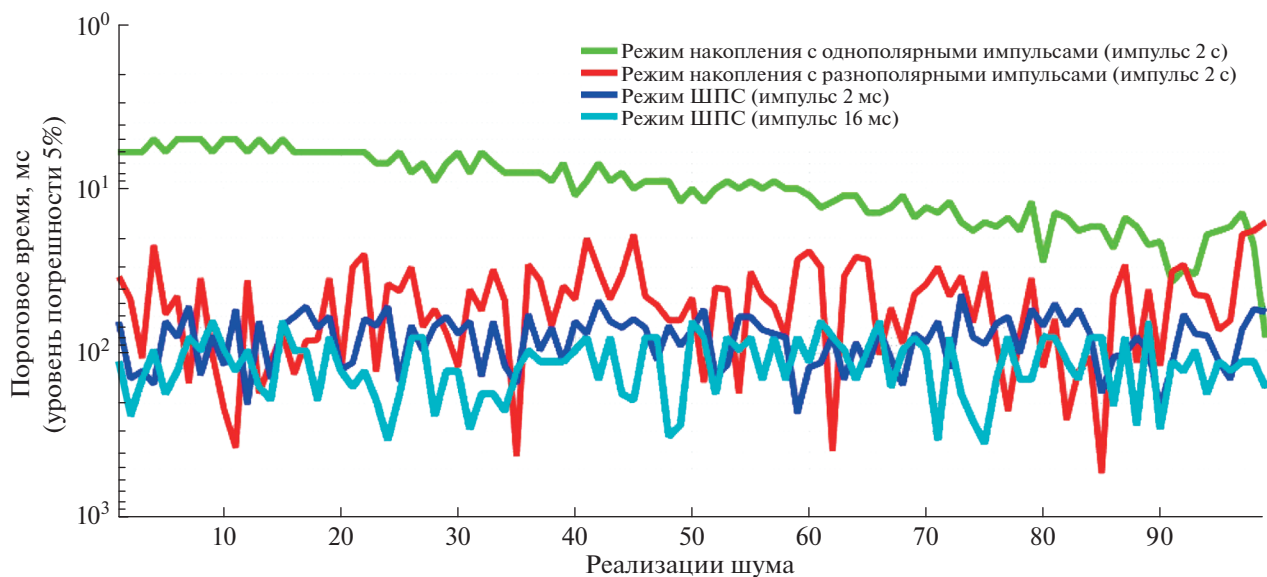


Рис. 8. Графики предельно-достижимых времен регистрации отклика с относительной погрешностью не выше 5% в различных режимах зондирования для рассмотренного массива реализаций шума. Значения по вертикальной оси приводятся в миллисекундах.

виях одинаковой длительности записи и уровня шумов.

Этот же результат представлен и на рис. 7 в форме псевдоразрезов $\delta(t, k)$, где k – номер реализации шума, откладываемый по горизонтальной оси. Из указанного рисунка хорошо видно, что в случае режима ШПС область относительно низких значений реконструкции кривой становления (погрешность до 5%, темно-синий цвет) прослеживается до значительно более поздних времен (80–100 мс) по сравнению с режимами накопления с однополярными (10 мс) и разнополярными (50–60 мс) импульсами.

Среднее значение предельно-достижимого времени становления, отвечающего погрешности 5%, для рассмотренного набора реализаций шума в режиме накопления с однополярными импульсами составляет порядка 10 мс, с разнополярными импульсами – около 50 мс, в режиме ШПС с импульсами 2 мс – порядка 85 мс, с импульсами 16 мс – около 110 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках численного моделирования проведен анализ возможностей зондирования становления поля с использованием морской буксируемой диполь-дипольной измерительной установки на основе псевдослучайных последовательностей импульсов тока (ШПС).

Новизна проведенных исследований состоит в применении принципов ШПС-зондирования в рамках системы морской электроразведки ЗС с учетом специфики измерительных установок, используемых в морской геофизике, характерных помех и геоэлектрических моделей, типичных для Арктического шельфа и решаемых на данной территории геолого-геофизических задач. Рассматривается подход, предполагающий генерацию зондирующих импульсов на основе шумоподобных сигналов, а также применение соответствующих алгоритмов обработки получаемых рядов данных [Светов и др., 2012; Svetov et al., 2012] для морской установки ЗС, искаженных влиянием шумов электрокинетической и электрохимической природы.

В рамках проведенного численного эксперимента показано, что переход от режима накопления с относительно небольшим количеством длинных импульсов к режиму ШПС с существенно большим количеством коротких импульсов позволяет существенно расширить (с 10–50 до 80–110 мс, в зависимости от типа накопления и ШПС) неискаженный шумами диапазон измеряемой переходной характеристики, а значит – увеличить глубинность исследований. Представляется, что при оптимальном выборе параметров ШПС и пространственной конфигурации систе-

мы наблюдения можно рассчитывать на создание системы морских ЭМ исследований, обладающей такой помехоустойчивостью, которая позволит обеспечить глубинность исследований порядка нескольких сотен метров с детальностью, не уступающей наземным системам, и дающей возможность надежного картирования многолетнемерзлых пород и проведения прямых поисков углеводородов на шельфе. Таким образом, как теоретический анализ возможностей применения ШПС, так и создание алгоритмической, программной и аппаратурной базы для внедрения подобной технологии, являются весьма актуальными направлениями развития ЭМ геофизики.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-30001)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Д.А., Гончаров А.А., Т.С. Калинина, А.О. Плисс* Усовершенствование технологии импульсного электромагнитного зондирования на основе кодовых последовательностей импульсов тока для решения задач геологоразведки на Арктическом шельфе. Морские исследования и образование (MARESEDU-2019). Труды VIII Международной научно-практической конференции. М. 2019. С. 252–256.
- Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь. 1985. 384 с.
- Великин А.Б., Великин А.А.* Новый корреляционный метод импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами СТЕМ // Разведка и охрана недр. 2016. № 2. С. 47–54.
- Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В.* Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб.: Наука и техника. 2006. 400 с.
- Гончаров А.А., Кошурников А.В., Пушкарев П.Ю., Гунар А.Ю., Алексеев Д.А.* Анализ возможностей применения псевдослучайных последовательностей импульсов тока с целью повышения эффективности морской технологии электромагнитного зондирования в условиях шельфа Арктики. Материалы VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна. М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 2021. С. 62
- Гончаров А.А., Калинина Т.С., Патракеева Н.А., Алексеев Д.А.* Разработка морской системы электромагнитного зондирования шумоподобными сигналами (ШПС) для решения задач геологоразведки на Арктическом шельфе. Труды 62-й конференции МФТИ. 2019. С.170–172.
- Егоров И.В., Пальшин Н.А.* Возбуждение электрокинетических эффектов на дне мелководья поверхностными волнами // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. С. 461–469.

- Жданов М.С.* Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный Мир. 2007. 712 с.
- 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.
- Кауфман А.А., Алексеев Д.А., Ористальо М.* Принципы электромагнитных методов наземной геофизики. Тверь: Международная Ассоциация “АИС”. 2016. 558 с.
- Кошурников А.В., Тумской В.Е., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Гунар А.Ю., Пушкарев П.Ю., Семилетов И.П., Кошурников А.А.* Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты на шельфе Моря Лаптевых // Докл. РАН. 2016. Т. 469. № 5. С. 616–620.
- Светов Б.С.* Основы геоэлектрики М.: ЛКИ. 2008. 656 с.
- 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.
- Barsukov P.O., Fainberg E.B.* Transient marine electromagnetics in shallow water: A sensitivity and resolution study of the vertical electric field at short ranges // Geophysics. 2014. V. 79. № 1. P. 1–11.
- Duncan P.M., Ywang A., Edwards R.N., Bailey R.C., Garland G.D.* The development and applications of a wide band electromagnetic sounding system using pseudo-noise source // Geophysics. 1980. V. 45. № 8. P. 1276–1296.
- Giannino F., Leucci G.* Electromagnetic Methods in Geophysics: Applications in GeoRadar, FDEM, TDEM, and AEM. Wiley. 2021. 304 p.
- Helwig S.L.* VIBROTEM ein vergleich zu long-offset transient electromagnetic (LOTEM) in theorie und praxis. Inaugural dissertation zur erlangung des doktorgrades der mathematisch-naturwissenschaftlichen fakultat der universitat zu Koln. 1999.
- Nabighian M.N., Macnae J.C.* Time domain electromagnetic prospecting methods. Electromagnetic methods in applied geophysics: SEG, Investigations in Geophysics / M. N. Nabighian (ed.) 1991. V. 2. № 3. P. 427–520.
- Nakayama K., Saito A.* Practical marine TDEM systems using ROV for the ocean bottom hydrothermal deposits. Techno-Ocean. 2016. P. 643–647.
- Piskunova E.A., Palshin N.A., Yakovlev D.V.* Electrical conductivity features of the Arctic shelf permafrost and electromagnetic technologies for their studies // Russian J. Earth sciences. 2018. V. 18. ES5001.
- Shakhova N., Semileto I., Gustafsson O., Sergienk V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskoy V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N., Karnaukh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D.* Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nature Communications. 2017. № 8. P. 15872.
- Svetov B.S., Alekseev D.A., Yakovlev A.G.* On implementation of noise-like signals in time-domain EM imaging. Geobaikal 2012 – 2nd International Research and Application Conference on Electromagnetic Research Methods and Integrated Geophysical Data Interpretation. 2012. P. S4.
- Zepernick H.-J., Finger A.* Pseudo Random Signal Processing. Theory and Application. Wiley. 2005. 432 p.

Using Pseudo-Random Code Sequences for Improving the Efficiency of Near-Field Transient Electromagnetic Sounding on the Arctic Shelf

A. A. Goncharov^a, D. A. Alekseev^{a, b, c, d}, A. V. Koshurnikov^e, A. Yu. Gunar^e, I. P. Semiletov^b, and P. Yu. Pushkarev^{e,*}

^aMoscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow Oblast, Dolgoprudny, Russia

^bIl'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

^cShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^dSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^eMoscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: pavel_pushkarev@list.ru

Numerical modelling was done with the aim to evaluate the efficiency of applying pseudo-random sequences of current pulses (pseudo-noise signals, PNS) in marine time-domain electromagnetic sounding (transient electromagnetic sounding (TEM)) systems with a dipole-dipole array, and to develop specialized methods for processing/interpretation of data obtained under this approach. Based on the analysis of experimental TEM sounding data collected during field studies in the Laptev Sea area, we estimated noise and distortions that obstruct the interpretation of TEM sounding signals. Using the algorithm for the generation of pseudo-random code pulse M-sequences and experimental noise records, we simulated PNS sounding signals corresponding to conditions of marine surveying on the Arctic shelf. Processing of noisy synthetic records and reconstruction of the impulse response were based on a convolution equation. Based on the results of the comparison of derived transient responses, reconstructed on the basis of noisy synthetic data in the commonly

used stacking and newly proposed PNS modes, it was found that in the PNS mode the relative error of the response estimation increases with time much slower than in the stacking mode and remains within an acceptable value range (up to several percent) until later periods (the curve elongation can reach a decade in time). It is demonstrated that the implementation of the PNS mode in marine electromagnetic sounding systems considerably improves the system performance in terms of the signal/noise ratio (SNR) and expands the range of the applicability of electromagnetic sounding in the Arctic shelf setting.

Keywords: marine electromagnetic surveying, transient sounding, impulse response, Arctic shelf, pseudo-random sequences, pseudo-noise signals, convolution equation