

УДК 550.370

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-108-118

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ В МОРСКОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ

Андрей Викторович Кошурников¹✉, Дмитрий Александрович Алексеев², Павел Юрьевич Пушкарев³, Алексей Юрьевич Гунар⁴, Ермолай Игоревич Балихин⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; koshurnikov@msu-geophysics.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6160-7795>

² Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия; Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; alexeevgeo@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; pavel_pushkarev@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2894-2609>

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; gunar@msu-geophysics.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Ermolaybalihin@mail.ru

Аннотация. Используя численное моделирование полезного сигнала на основе характерной геоэлектрической модели подводной мерзлоты и реальные записи сигнала-помехи, мы провели сравнительный анализ помехоподавления при зондировании становлением поля с применением морской буксируемой диполь-дипольной измерительной установки в режимах накопления с разнополярными импульсами тока и шумоподобными сигналами (ШПС). Для серии токовых последовательностей в форме ШПС с различной длительностью и количеством импульсов, а также для сигнала в режиме накопления с наложением идентичного сигнала-помехи, были получены оценки кривых становления поля, отвечающих рассматриваемой геоэлектрической модели при времени записи, составляющем порядка 8–13 с на одну точку зондирования. По результатам сравнения полученных кривых, реконструированных по зашумленным синтетическим данным в режиме накопления и ШПС, установлено, что в режиме ШПС с импульсами длительностью 100 мкс и 1 мс относительная погрешность в режиме ШПС в среднем по профилю оказывается существенно ниже (до 1,5 раз), чем аналогичная погрешность в режиме накопления, и остается в пределах приемлемой величины (до нескольких процентов) до более поздних времен.

Ключевые слова: подводная мерзлота, морская электроразведка, зондирование становлением поля, импульсная переходная характеристика, Арктический шельф, псевдослучайные последовательности, шумоподобные сигналы

Для цитирования: Кошурников А.В., Алексеев Д.А., Пушкарев П.Ю., Гунар А.Ю., Балихин Е.И. Теоретический анализ применения шумоподобных сигналов в морской импульсной электроразведке // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 108–118.

THEORETICAL ANALYSIS OF THE APPLICATION OF PSEUDO-NOISE SIGNALS IN MARINE PULSE ELECTROMAGNETIC PROSPECTING

Andrey V. Koshurnikov¹✉, Dmitriy A. Alekseev², Pavel Yu. Pushkarev³, Aleksey Yu. Gunar⁴, Ermolay I. Balikhin⁵

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; koshurnikov@msu-geophysics.ru✉

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia; Schmidt Institute of Physics RAS, Moscow, Russia; alexeevgeo@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; pavel_pushkarev@list.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; gunar@msu-geophysics.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Ermolaybalihin@mail.ru

Abstract. Using numerical modeling of a useful signal based on a characteristic geoelectric model of underwater permafrost and real recordings of a noise signal, we conducted a comparative analysis of noise suppression during transient sounding using a marine towed dipole-dipole array in accumulation modes with opposite-polar current pulses and pseudo-noise signals (PNS). For a series of current sequences in the form of PNS with different durations and numbers of pulses, as well as for a signal in the accumulation mode, with the superposition of an identical noise signal, transient sounding curves were obtained corresponding to the geoelectric model under consideration at a recording time of the order of 8–13 s per station. Based on the results of comparison of the obtained curves reconstructed from noisy synthetic data in the accumulation and PNS modes, it was established that in the PNS mode with pulses of duration 100 μ s and 1 ms, the relative error in the PNS mode on average over the profile turns out to be significantly lower (up to 1.5 times) than a similar one error in the accumulation mode, and remains within an acceptable value (up to several percent) until later times.

Keywords: underwater permafrost, marine electromagnetic prospecting, transient sounding, impulse transient response, Arctic shelf, pseudo-random code sequences, pseudo-noise signals

For citation: Koshurnikov A.V., Alekseev D.A., Pushkarev P.Yu., Gunar A.Yu., Balikhin E.I. Theoretical analysis of the application of pseudo-noise signals in marine pulse electromagnetic prospecting. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 108–118. (In Russ.).

Введение. Важной составляющей успешного решения геологических задач на шельфе является выбор оптимальных методик наблюдений и интерпретации геофизических данных. Одной из особенностей методов импульсного электромагнитного (ЭМ) зондирования [Светов, 2008; Кауфман и др., 2016; Nabighian, Маснае, 1991] в морском варианте [Петров, 2000; Кошурников, 2020; Krylov et al., 2023] является их относительно низкая помехозащищенность, что связано с характером возбуждения и приема сигнала в морских измерительных установках. В то же время, на протяжении ряда лет авторы активно применяют технологию зондирования становлением поля на основе буксируемой диполь-дипольной измерительной установки с целью изучения осадочного разреза и многолетнемерзлых пород на мелководных акваториях в зоне Арктического шельфа [Shakhova et al., 2017], поскольку она часто является единственным экономически и информационно-эффективным методом зондирования. 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, то есть не позволяют обеспечить достаточной точности. При этом, стандартный подход к регистрации и обработке ЗС-сигналов состоит в накоплении (многократном измерении кривой становления для серии импульсов) и последующем ее осреднении по всем измеренным реализациям [Giannino and Leucci, 2021].

Идея использования шумоподобных последовательностей импульсов тока [Zepernick, Finger, 2005] в системах электромагнитного зондирования уже рассматривалась рядом ученых [Duncan et al., 1980; Helwing, 1999; Светов и др., 2012; Svetov et al., 2012; Ильичев, Бобровский, 2014; Великин, Великин,

2016]. В нашей предшествующей работе [Гончаров и др., 2022] мы получили удовлетворительный прирост точности кривой становления поля при переходе к режиму ШПС, но при условии достаточно длительной регистрации (порядка минуты) на одной точке зондирования, что в реальных условиях далеко не всегда является возможным.

Указанная проблема требует дальнейшей разработки специализированных методов регистрации, обработки и интерпретации данных, что обуславливает актуальность дополнительных теоретических исследований. В настоящей работе на основе имеющегося опыта построена характерная геоэлектрическая модель, включающая неоднородную толщу многолетнемерзлых пород; проведена имитация шумоподобных сигналов (ШПС) импульсного электромагнитного зондирования, направленная на оценку помехоподавления в режиме ШПС по сравнению с традиционным режимом накопления в условиях, приближенных к реальному темпу движения судна с измерительной системой (длительность регистрации на одном пункте 8–13 с).

Материалы и методы. На первом этапе работы мы построили характерную синтетическую квазидвухмерную геоэлектрическую модель, отражающую структурные особенности слоя подводной вечной мерзлоты (многолетнемерзлых пород, ММП), соответствующие различным условиям, включая наличие/отсутствие слоя вечной мерзлоты, различную геометрию верхней и нижней границ ММП, различную ширину и мощность областей протаивания (таликов), переменную глубину морской воды и вариации ее удельного сопротивления. При этом был учтен опыт анализа полевых данных электромагнитного зондирования (ЗСБ, TDEM), полученных на Восточно-Сибирском шельфе Арктики в рамках работ, организуемых и проводимых в последние годы авторами настоящей статьи [Кошурников, 2020; Krylov et al., 2023]. Анализируемая 2-D модель

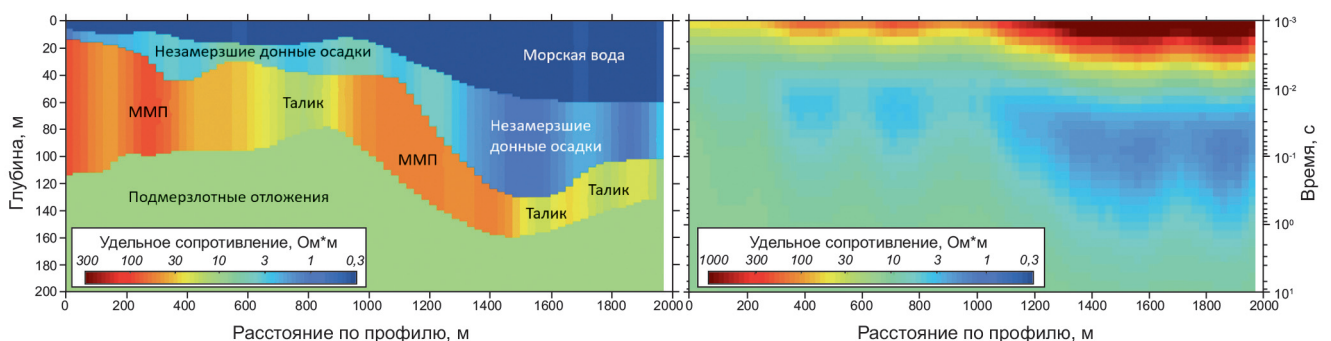


Рис. 1. Анализируемая синтетическая модель и отвечающий ей псевдоразрез кажущегося сопротивления в приближении ближней зоны

представляет собой набор 1-D моделей, скомпонованных с привязкой каждого 1-D столбца шириной 25 м к расстоянию вдоль профиля (диапазон 0–2 км) в интервале глубин 0–200 м (рис. 1).

Модель имеет четырехслойную структуру (сверху вниз: проводящая морская вода, менее проводящие незамерзшие морские донные отложения, высокоомные многолетне-мерзлые породы и проводящие подмерзлотные отложения) со следующими параметрами: сопротивление морской воды 0,3 Ом·м, глубина воды от 5 до примерно 60 м; мощность незамерзших донных отложений от 10 до примерно 70 м; слой многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью от 30 до 100 м; однородный подмерзлотный полубесконечный слой с удельным сопротивлением 10 Ом·м. Удельное сопротивление во всех слоях (кроме подмерзлотного) плавно изменяется в горизонтальном направлении с целью имитации переменной солености в слое воды, неоднородности незамерзших донных отложений и наличия областей протаивания (таликов) в пределах слоя ММП.

Для данной модели была выполнена имитация синтетических откликов ЗСБ для случая буксирной диполь-дипольной установки с использованием модифицированного нами программного кода DIPOLE1D [Key, 2009]. Полученные отклики представляют собой кривые становления поля для соосной составляющей напряженности электрического поля, отражающие процесс установления поля в среде после выключения тока (отклик на ступень выключения, далее — переходная характеристика, ПХ). Полученный двумерный псевдоразрез кажущегося удельного сопротивления в приближении ближней зоны [Кауфман и др., 2016] показан на правой панели рис. 1.

Затем с использованием синтетических ПХ, рассчитанных для каждой точки профиля, были рассчитаны ИПХ для импульсов длительностью 100 мкс (в диапазоне времен 100 мкс — 100 мс) и 1 мс (в диапазоне времен 1 мс — 1 с), имеющие дискретизацию по времени, равную длительности импульса. На рис. 2 даны псевдоразрезы кажущегося сопротивления, рассчитанные по ИПХ для импульса длительностью 100 мкс и 1 мс.

Второй этап моделирования предполагал расчет ШПС токового сигнала $m(t)$ в виде двоичных М-последовательностей, состоящих из элементарных импульсов прямоугольной формы, с равномерным распределением. Для этого использовался алгоритм генерации М-последовательностей, основанный на теории конечных полей Галуа и принципах линейных цифровых автоматов [Светов и др., 2012]. Рассматривалось пять вариантов последовательности разной длины: 2^{17} (длительность одного импульса — 100 мкс, общая длительность около 13 с); 2^{13} (длительность одного импульса — 1 мс, общая длительность около 8 с); 2^{12} (длительность одного импульса — 2 мс, общая длительность около 8 с);

2^{11} (длительность одного импульса — 4 мс, общая длительность около 8 с); 2^{10} (длительность одного импульса — 8 мс, общая длительность около 8 с). Фрагменты токового сигнала приведены в левой части рис. 3.

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

$$s(t) = m(t) * h(t), \quad (1)$$

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

$$m = \{m_i\}, \quad i = 1, N; h = \{h_i\}, \quad i = 1, M; s = \{s_j\}, \\ j = 1, N + M - 1, \quad (2)$$

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

$$\sum_i m_i \cdot h_{j-i} = s_j \quad (3)$$

В матричной форме операцию моделирования ШПС-рядов можно представить как

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

Таким образом, с целью имитации зарегистрированного сигнала по построенным М-последовательностям (токовым сигналам) была вычислена их свертка с импульсной переходной характеристикой среды для соответствующей длительности импульса. Примеры имитированных ШПС-рядов, иллюстрирующие поведение напряжения в приемной линии измерительной установки, приводятся в правой части рис. 3.

С целью оценки возможностей применения псевдослучайных последовательностей импульсов

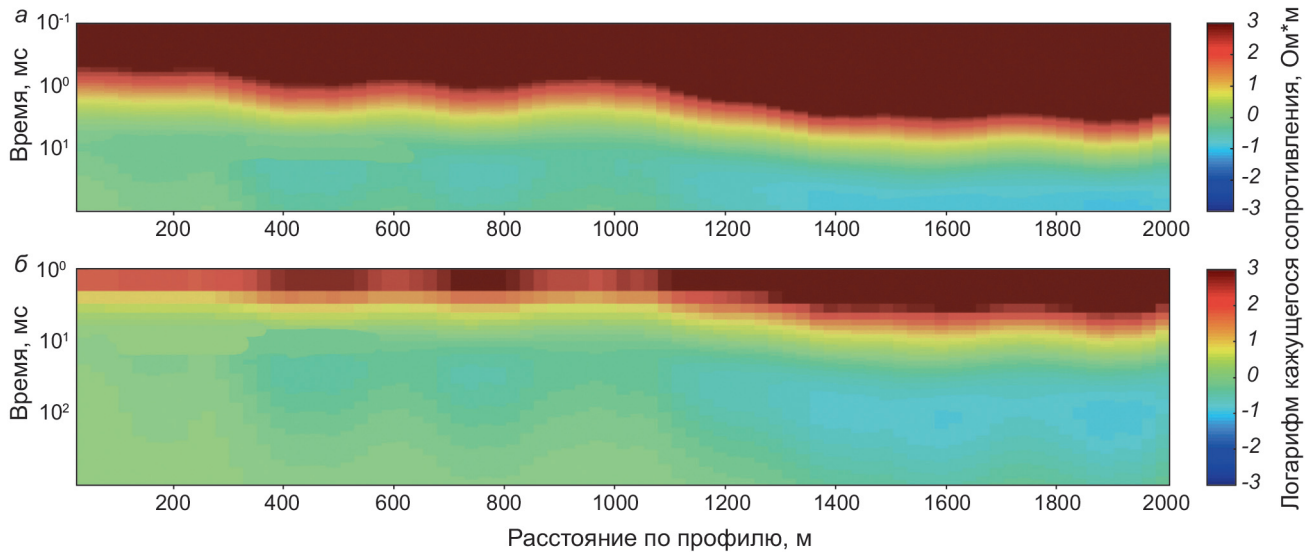


Рис. 2. Псевдоразрезы кажущегося сопротивления, рассчитанные по ИПХ для импульса длительностью 100 мкс (вверху, диапазон времен 100 мкс — 100 мс) и 1 мс (внизу, диапазон времен 1 мс — 1 с)

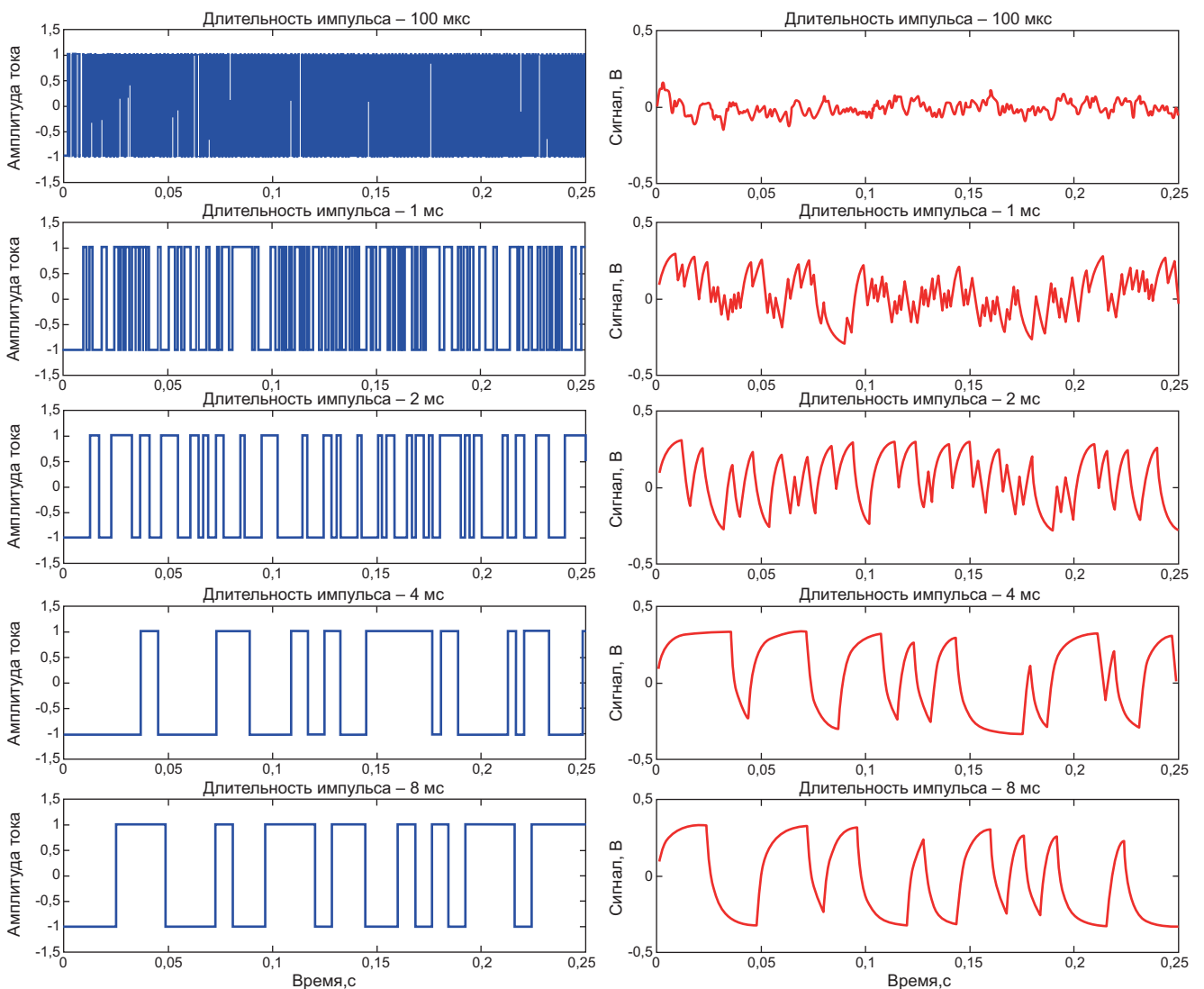


Рис. 3. Фрагменты имитированных токовых (слева) и зарегистрированных (справа) ШПС-сигналов, смоделированных при различной длительности импульса (сверху вниз: 100 мкс, 1 мс, 2 мс, 4 мс и 8 мс)

тока в терминах результирующего уровня шума и его сравнения с таковым для традиционного режима накопления, к смоделированным рядам напряжения был добавлен аддитивный шум: $n(t): s_n(t) = s(t) + n(t)$. Фрагменты шума, равные по длительности ШПС-

сигналам зондирования, были выделены из записи, зарегистрированной при выключенном генераторе в рамках одной из экспедиций в Море Лаптевых. Примеры фрагментов накладываемого шума, а также его спектрограмма, приводятся на рис. 4.

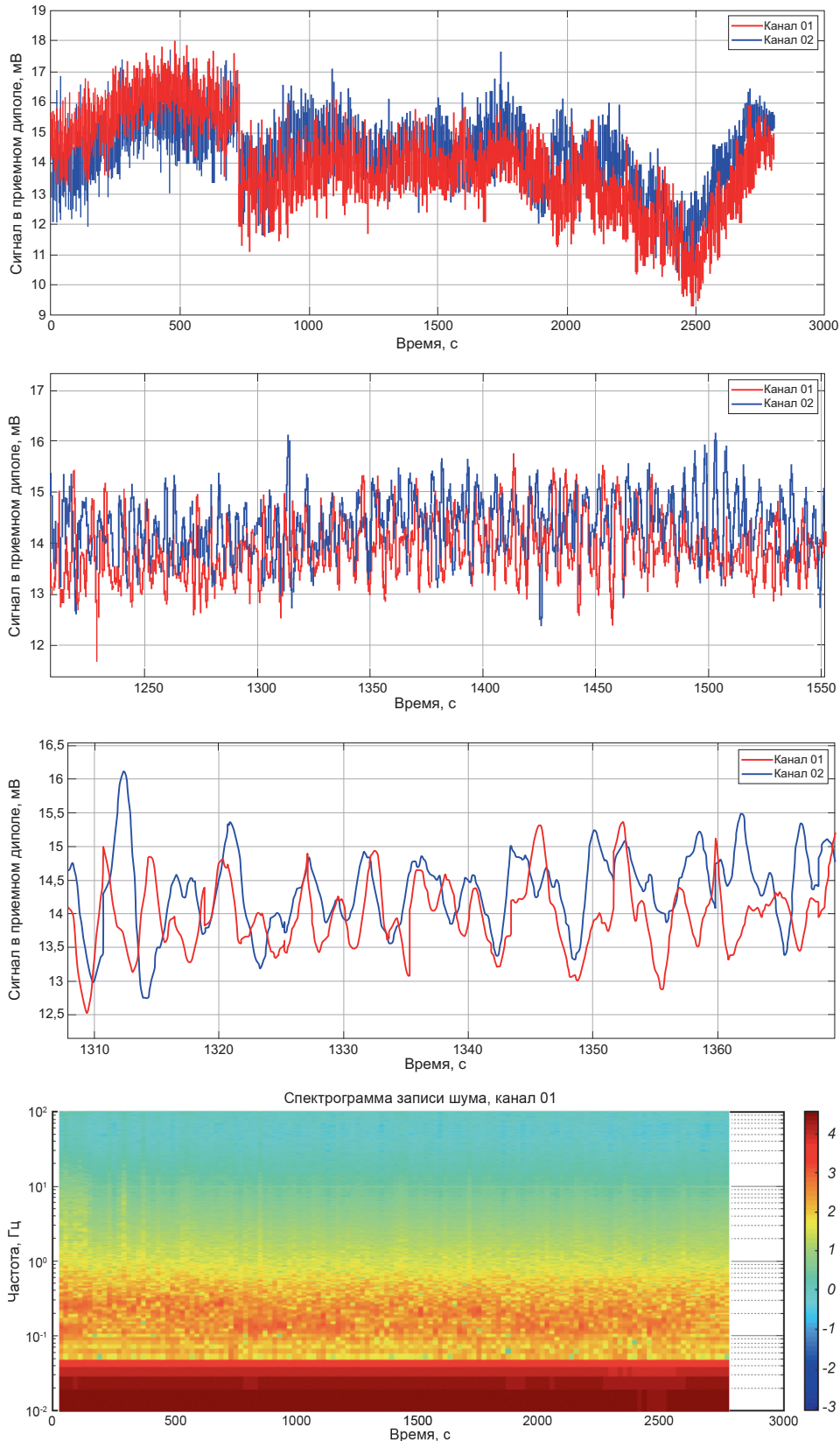


Рис. 4. Примеры сигнала-помехи, накладываемого на имитированные данные в режимах ШПС и накопления. Три верхних панели иллюстрируют поведение шума на различных временных масштабах, на нижней панели показана спектрограмма всей записи шума

Рассматривалось несколько вариантов амплитуды накладываемого шума, основным из которых был вариант со среднеквадратическим значением 1 мВ, что соответствует величинам, наблюдаемым на практике.

В качестве базового результата, с которым проводилось сравнение помехоподавления в режиме ШПС, выступал режим накопления с четырьмя разнополярными импульсами (импульс-пауза 1 с/1с).

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

$$m(t) \cdot h(t) = s_n(t) \quad (5)$$

дает возможность получить оценку ИПХ $\tilde{h}(t)$, содержащую некоторую погрешность относительно истинной ИПХ $h(t)$. Задача состоит в максимальном снижении этой погрешности, т.е. максимальном приближении $\tilde{h}(t)$ к $h(t)$.

Для решения уравнения свертки представляемого переопределенной СЛАУ (4) с зашумленной правой частью, использовался метод наименьших квадратов (МНК) [Жданов, 2007]. Применение МНК дает возможность получить оценку переходной характеристики в следующем виде:

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

где A^T — результат транспонирования матрицы A .

Для регуляризации искомого решения был рассмотрен ряд стабилизирующих функционалов, обеспечивающих повышение гладкости восстанавливаемой кривой ИПХ. Наиболее оптимальным представляется использование модификации метода Марквардта, при которой добавляемое на главную диагональ матрицы $A^T \cdot A$ слагаемое монотонно увеличивается с возрастанием номера столбца/строки данной матрицы, что соответствует увеличению времени становления поля.

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

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

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

Результаты визуализировались и анализировались в форме индивидуальных кривых зондирования на отдельных станциях, а также профильных

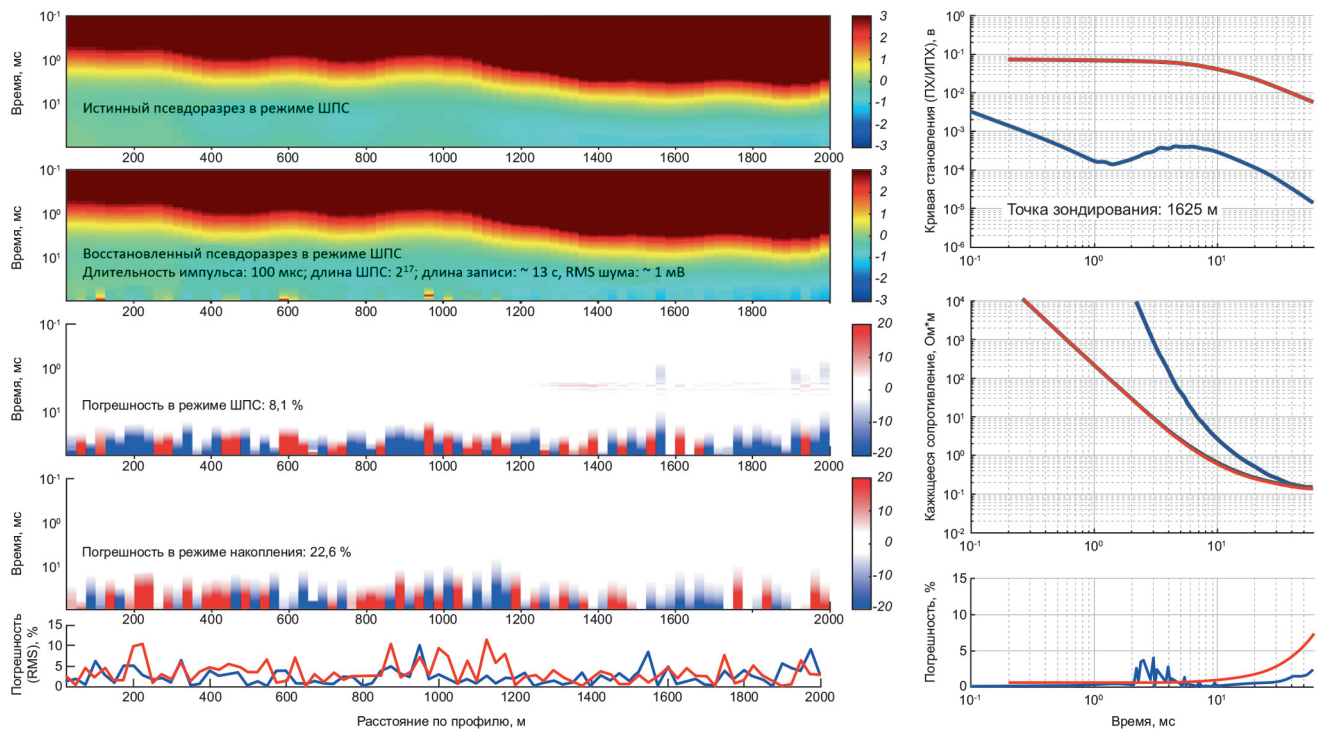


Рис. 5. Пример интерфейса ПО визуализации и анализа результатов в режимах ШПС и накопления. Слева показаны псевдоразрезы кажущегося сопротивления в режиме ШПС (истинного и восстановленного по зашумленным данным), псевдоразрезы отклонений (погрешностей) между истинным и восстановленным кажущимся сопротивлением в режимах ШПС и накопления, а также графики среднеквадратических значений погрешности в заданном временном интервале вдоль профиля (накопление — красным, ШПС — синим). Справа (сверху вниз) представлены кривые становления поля — ПХ (красным) и ИПХ (синим), а также соответствующие им кривые кажущегося сопротивления и погрешности (отклонения от истинных кривых). Истинные кривые показаны серым цветом. Результаты приводятся при длительности импульса 100 мкс

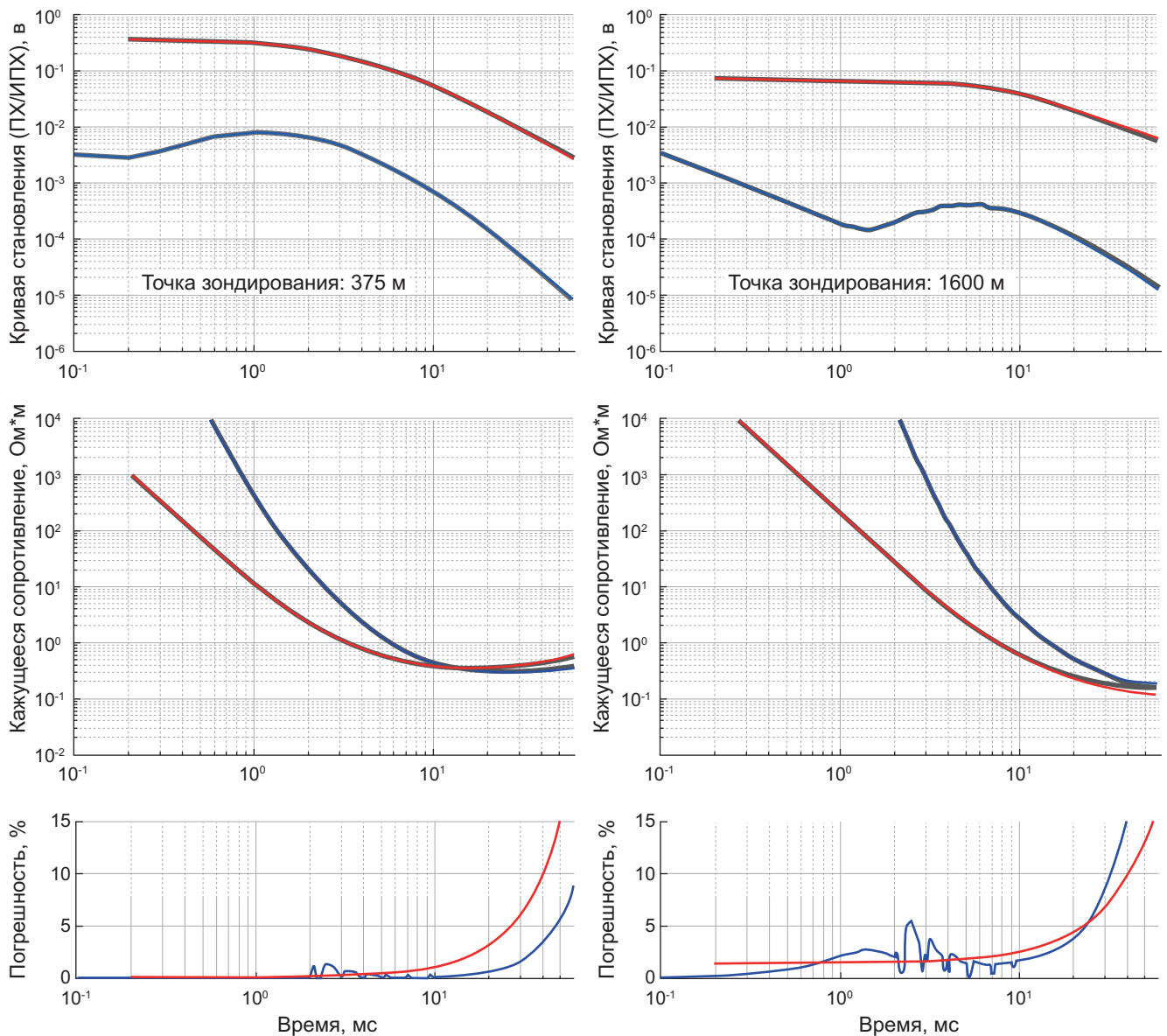


Рис. 6. Примеры сопоставления результатов обработки зашумленных данных в режимах ШПС с длительностью импульса 100 мкс (синий) и накопления (красный). Слева показан результат с преимуществом ШПС, справа — накопления в области времен свыше 20 мс

распределений различных параметров, включая средневзвешенные погрешности реконструкции ИПХ (в режиме ШПС) и ПХ (в режиме накопления) по зашумленным данным с использованием ПО, специально разработанного в рамках выполнения данного проекта. Результирующие погрешности сравнивались.

Результаты. Результаты представлены в виде оцененных по зашумленным данным ПХ (режим накопления), ИПХ (режим ШПС), кажущегося сопротивления (оба режима), а также в виде погрешностей $\delta(t)$ во всех точках зондирования вдоль профиля и средневзвешенных значений δ по профилю. Основные результаты представлены на серии рисунков ниже.

Рисунок 5 демонстрирует результаты анализа зашумленных данных ШПС (средневзвешенное

значение амплитуды шума 1 мВ) для последовательности со 100-мкс импульсами общей длительностью около 13 с. Искомая импульсная переходная характеристика реконструировалась во временном интервале 100 мкс — 100 мс. Распределение относительной погрешности для данного варианта ШПС в рассмотренном временном интервале, в целом, характеризуется более низкими значениями по сравнению с режимом накопления, что также иллюстрируется графиками в нижней левой части рисунка. Кроме того, можно отметить несколько большие значения предельных времен регистрации в режиме ШПС.

На рис. 6 показаны результаты реконструкции кривых становления поля в режимах ШПС (импульсы 100 мкс) и накопления для двух точек профиля, где эффективность указанных подходов существенно отличается. На панелях в левой ча-

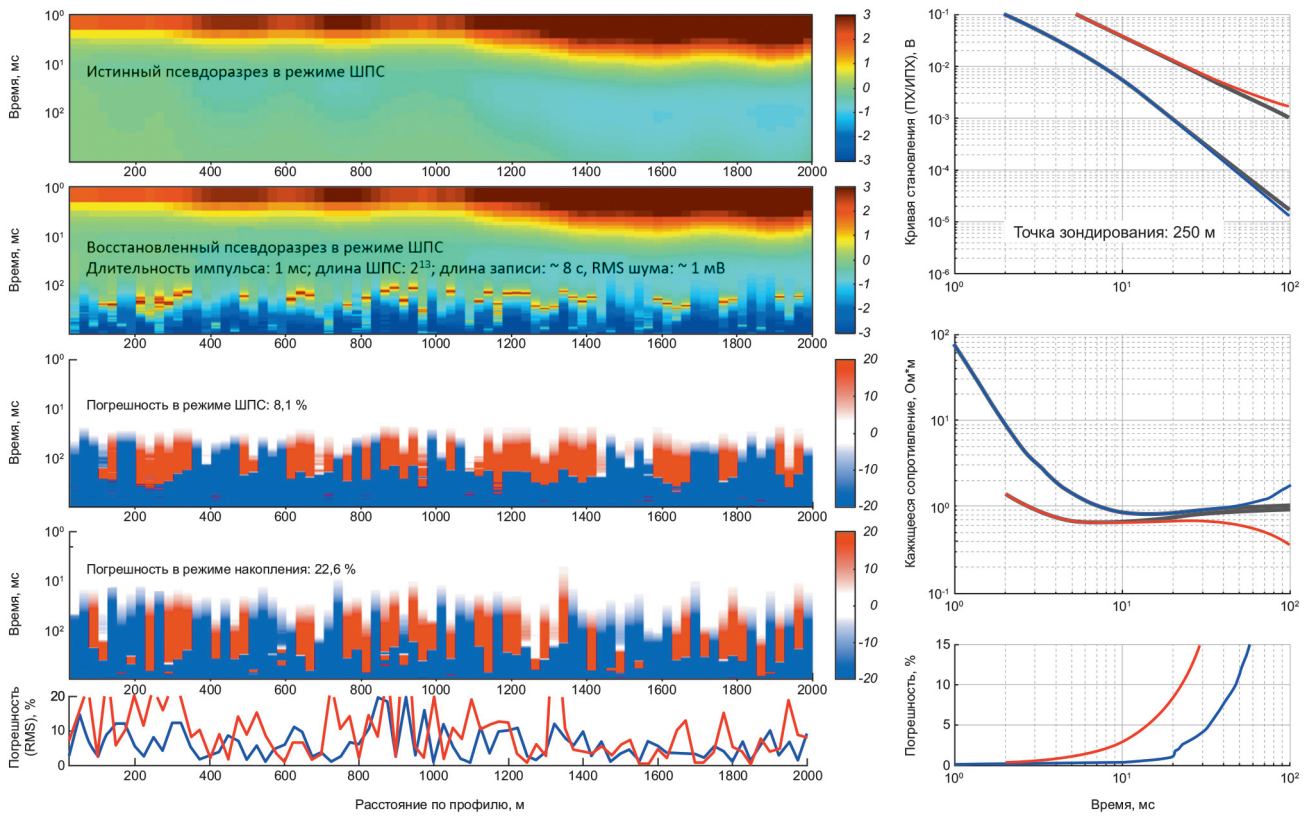


Рис. 7. Результаты сопоставления в режимах ШПС и накопления при длительности импульса 1 мс. Слева показаны псевдоразрезы кажущегося сопротивления в режиме ШПС (истинного и восстановленного по зашумленным данным), псевдоразрезы отклонений (погрешностей) между истинным и восстановленным кажущимся сопротивлении в режимах ШПС и накопления, а также графики среднеквадратической погрешности (накопление — красным, ШПС — синим) в заданном временном интервале вдоль профиля. Справа (сверху вниз) представлены кривые становления поля — ПХ (красным) и ИПХ (синим), а также соответствующие им кривые кажущегося сопротивления и погрешности (отклонения от истинных кривых). Истинные кривые показаны серым цветом

сти рисунка отмечается очевидное преимущество режима ШПС: нарастание погрешности в режиме накопления (красная кривая, нижний график) оказывается гораздо более быстрым. В то же время, кривые в правой части рисунка иллюстрируют некоторое, хотя и не столь радикальное, преимущество режима накопления.

Рисунок 7 аналогичен рис. 5, но иллюстрирует результаты (1–100 мс) для ШПС с длительностью импульса 1 мс и общей длительностью зондирования около 8 с при том же уровне зашумления (1 мВ). Данный вариант ШПС также для большинства пунктов профиля оказывается более эффективным в терминах помехоподавления по сравнению с накоплением.

Примеры сопоставления результатов обработки зашумленных данных в режимах ШПС с длительностью импульса 1 мс приводятся на рис. 8; рис. 9 иллюстрирует снижение эффективности ШПС при увеличении длительности импульса в условиях постоянства общей длины записи. Так, рис. 9, а, построенный для ШПС с импульсами длительностью 2 мс, показывает некоторое снижение качества деконволюции уже при низком уровне шумов (100 мкВ) в диапазоне времен 10–20 мс, а рис. 9, б отражает появление критических искажений при заведомо недостаточной длине последовательности ШПС (импульсы 8 мс).

Ниже приводятся результаты анализа в случае всех рассмотренных последовательностей ШПС.

Для варианта с 100-мкс импульсами средние оценки относительной погрешности в диапазоне времен 10–30 мс составили:

- средняя ошибка в режиме ШПС: 2,0%;
- средняя ошибка в режиме накопления: 3,4%.

Для варианта с 1-мс импульсами (10–60 мс) при RMS шума ~1 мВ:

- средняя ошибка в режиме ШПС: 6,3%;
- средняя ошибка в режиме накопления: 9,9%.

Для варианта с 2-мс импульсами (10–60 мс) при RMS шума ~1 мВ:

- средняя ошибка в режиме ШПС: 9,1%;
- средняя ошибка в режиме накопления: 9,9%.

Для вариантов с 4-мс и 8-мс импульсами (10–60 мс) при RMS шума ~1 мВ средняя погрешность в режиме ШПС превосходит таковую для режима накопления, делая использование ШПС неоправданным.

Таким образом, в рамках рассмотренных условий, в среднем отмечается достаточно значительное преимущество режима ШПС перед накоплением при длительности импульса 100 мкс и 1 мс. При большей длительности импульса это преимущество утрачивается вследствие относительно короткой длины токовой последовательности ШПС и нарушения устойчивости деконволюции.

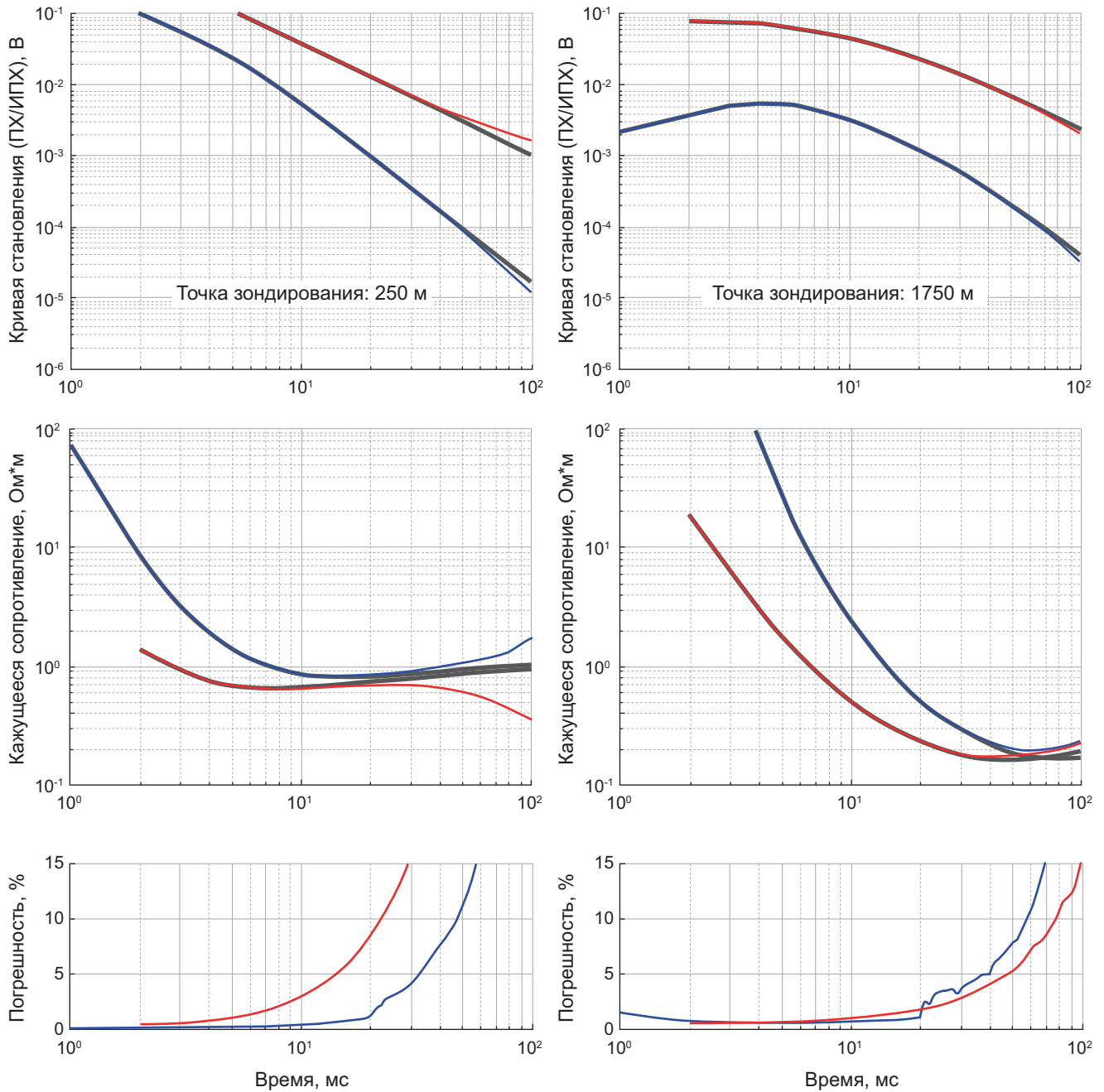


Рис. 8. Примеры сопоставления результатов обработки зашумленных данных в режимах ШПС с длительностью импульса 1 мс (синим) и накопления (красным). Слева показан результат с преимуществом ШПС, справа — накопления в области времен свыше 20 мс

Заключение. Используя численное моделирование полезного сигнала на основе характерной геоэлектрической модели подводной мерзлоты и реальные записи сигнала-помехи, мы провели сравнительный анализ помехоподавления при зондировании становлением поля с применением морской буксируемой диполь-дипольной измерительной установки в режимах накопления с разнополярными импульсами тока и ШПС. Для серии токовых последовательностей в форме ШПС с различной длительностью импульса (100 мкс, 1 мс, 2 мс, 4 мс и 8 мс) и соответствующим количеством импульсов (131072, 8192, 4096, 2048 и 1024 импульса), а также

для сигнала в режиме накопления (импульс/пауза 1 с/1 с) с идентичным аддитивным шумом были получены оценки ИПХ и ПХ для 80 зондирований, имитирующих профиль рассмотренной геоэлектрической модели.

В работе показано, что применение ШПС с достаточным количеством импульсов (не менее 8192) в условиях рассмотренных низкочастотных шумов в среднем обеспечивает приблизительно 1,5-кратное преимущество перед режимом накопления с разнополярными импульсами в терминах средней погрешности кривой зондирования в целевом временном диапазоне (10–60 мс) по всему профилю.

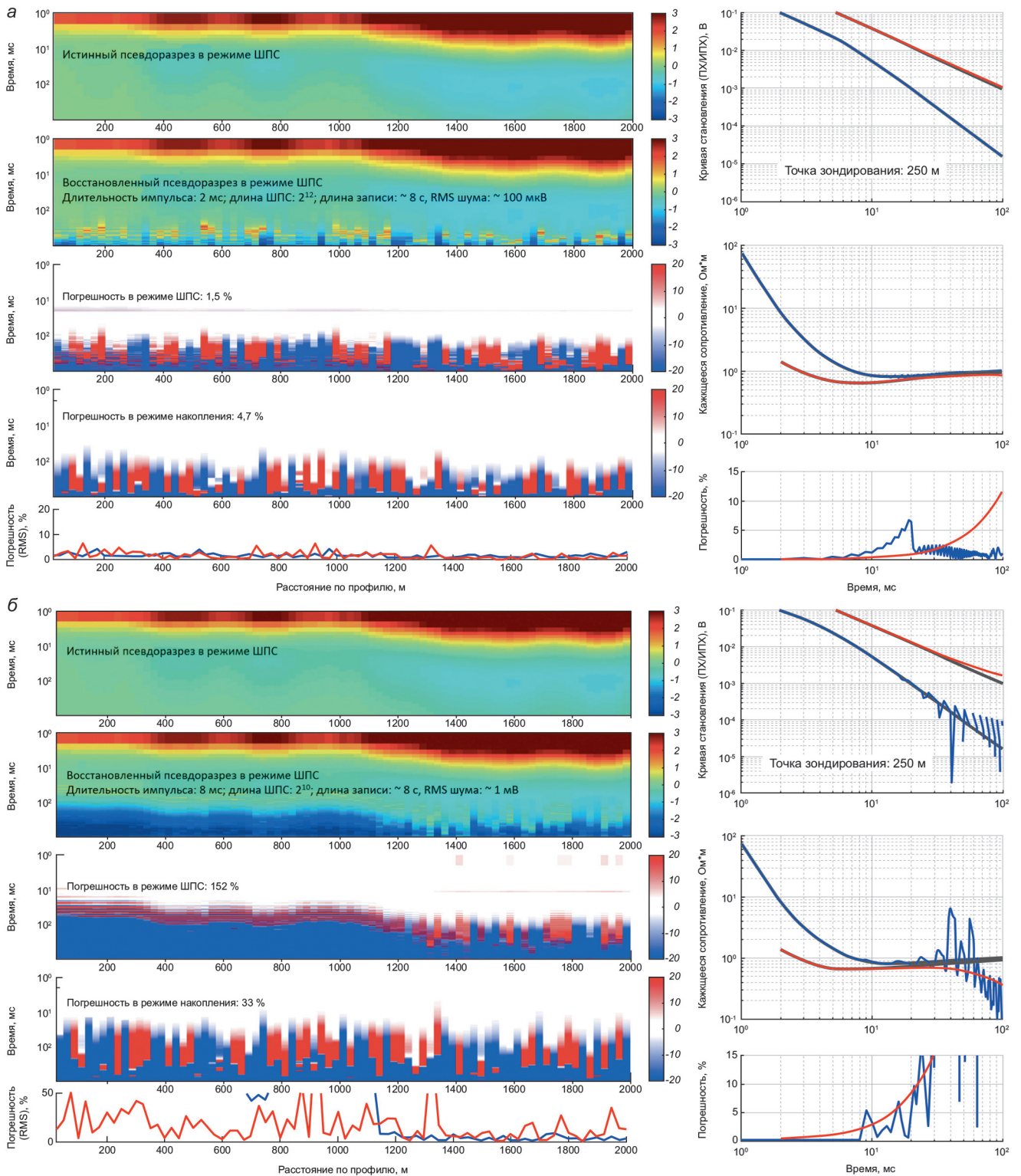


Рис. 9. Результаты сопоставления в режимах ШПС и накопления при длительности импульса 2 мс (а) и 8 мс (б). Слева показаны псевдоразрезы кажущегося сопротивления в режиме ШПС (истинного и восстановленного по зашумленным данным), псевдоразрезы отклонений (погрешностей) между истинным и восстановленным кажущимся сопротивлении в режимах ШПС и накопления, а также графики среднеквадратической погрешности (накопление — красным, ШПС — синим) в заданном временном интервале вдоль профиля. Справа (сверху вниз) представлены кривые становления поля — ПХ (красным) и ИПХ (синим), а также соответствующие им кривые кажущегося сопротивления и погрешности (отклонения от истинных кривых). Истинные кривые показаны серым цветом

На взгляд авторов, несмотря на потенциальные технические трудности с реализацией режима ШПС в системах электромагнитного зондирования, рас-

сматриваемое направление имеет определенные перспективы в связи с рядом ожидаемых преимуществ, которые могут определить дальнейшее развитие

и усовершенствование технологий импульсной электроразведки. Представляется, что при оптимальном выборе параметров ШПС и конфигурации системы наблюдения можно рассчитывать на значительное преимущество перед системами, использующими стандартный режим накопления. 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 разведочной геофизики.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-27-00228).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Великин А.Б., Великин А.А. Новый корреляционный метод импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами СТЕМ // Разведка и охрана недр. 2016. № 2. С. 47–54.

Гончаров А.А., Алексеев Д.А., Кошурников А.В. и др. Применение псевдослучайных кодовых последовательностей для повышения эффективности зондирования становлением поля в ближней зоне на Арктическом шельфе // Физика Земли. 2022. № 5. С. 158–170.

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. Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на Арктическом шельфе России // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2020. № 3. С. 116–125.

Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный Мир, 2007. 712 с.

Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. 2000. № 5. С. 21–26.

Светов Б.С. Основы геоэлектрики М.: ЛКИ, 2008. 656 с.

Светов Б.С., Алексеев Д.А., Агеев В.В. и др. Применение шумоподобных сигналов в зондированиях становлением поля // Геофизика. 2012. № 1. С. 52–60.

Duncan P.M., Ywang A., Edwards R.N., et al. The development and applications of a wide band electromagnetic

sounding system using pseudo-noise source // Geophysics. 1980. V. 45. No. 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.

Key K. 1D inversion of multicomponent, multi-frequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers // Geophysics. 2009. 74. P. F9–F20.

Krylov A.A., Ananiev R.A., Chernykh, D.V., et al. A Complex of Marine Geophysical Methods for Studying Gas Emission Process on the Arctic Shelf // Sensors. 2023. No. 23. P. 3872.

Nabighian M.N., Macnae J.C. Time domain electromagnetic prospecting methods / in M.N. Nabighian, ed., Electromagnetic methods in applied geophysics: SEG, Investigations in Geophysics. 1991. V. 2. No. 3. P. 427–520.

Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nature Communications. 2017. No. 8. P. 15872.

Svetov B.S., Alekseev D.A., Yakovlev A.G. On implementation of noise-like signals in time-domain EM imaging // Geobaiikal 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.

Статья поступила в редакцию 05.12.2023, одобрена после рецензирования 19.12.2023, принята к публикации 13.05.2024