

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта

# СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Том 60            2024            № 4

<https://portal.ifz.ru/sejsmicheskie-priboryi>  
[http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=25597](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=25597)

**Импакт-фактор РИНЦ (2021–2023 гг.): 0.556**

Рецензируемый научный журнал, ориентированный на обмен научной информацией между различными направлениями сейсмологических исследований: геофизиками и инженерами, исследовательскими лабораториями и промышленными компаниями. Рассматриваются теоретические и прикладные вопросы разработки аппаратуры для сейсмологических и смежных областей исследований. Важное место отводится мониторингу сейсмичности и анализу каталогов землетрясений, описанию и интерпретации результатов применения аппаратурных разработок, прогнозу землетрясений.

МОСКВА 2024

# СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Том 60 № 4 2024

Основан в 1961 г.  
Выходит 4 раза в год  
ISSN 0131-6230 (печатная версия)  
ISSN 2312-6965 (онлайн версия)

*Главный редактор*  
член-корр. РАН, д.ф.-м.н. С.А. Тихоцкий

Редакционная коллегия:

к.т.н. С.В. Горбачёв, к.ф.-м.н. В.В. Гравиров, к.ф.-м.н. Д.Л. Зайцев,  
к.т.н. П.А. Казначеев, к.г.-м.н. И.Н. Керусов, к.ф.-м.н. М.А. Краснова,  
д.ф.-м.н. А.Г. Максимов, к.т.н. А.И. Малиханов, член-корр. РАН Е.А. Мареев,  
к.г.-м.н. В.В. Половков, д.ф.-м.н. А.В. Родин, член-корр. РАН А.Л. Собисевич,  
к.ф.-м.н. С.А. Станчиц, к.т.н. М.Ю. Токарев, к.т.н. К.И. Холодков

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), свидетельство о регистрации № ФС77-31201 от 22 февраля 2008 г.

Адрес редакции: Россия, 123242, Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН.  
Сейсмические приборы. E-mail: [si@ifz.ru](mailto:si@ifz.ru)

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 60, номер 4, 2024

---

---

- Эксперимент по решению навигационной задачи уточнения координатного положения с использованием данных глобальных моделей гравитационного поля Земли 5  
*Г.Е. Валов, П.С. Михайлов, В.Н. Конешов*
- Использование комплексных сетей в распознавании типов источников региональных сейсмических событий 26  
*А.Ф. Аношко, О.Г. Берестнева, Г.М. Джафари, А.В. Жуков, А.И. Труфанов, М.А. Хритова*
- Оценка возможностей применения свип-сигналов в морской буксируемой системе импульсной электроразведки на основе математического моделирования 44  
*Д.А. Алексеев, А.В. Кошурников, П.Ю. Пушкарев, Е.И. Балихин, А.Ю. Гунар, А.А. Гончаров*
- О связи локализации пластической деформации в горных породах с изменениями динамических упругих свойств: численное моделирование 62  
*А.М. Антонов, А.В. Вершинин, Н.В. Дубиня, М.А. Краснова*
- 
-

# CONTENTS

---

---

**Volume 60, No. 4, 2024**

---

---

- An experiment to solve the navigation problem of clarifying the coordinate position using data from global models of the Earth's gravitational field 5  
*G.E. Valov, P.S. Mikhailov, V.N. Koneshov*
- Usage of complex networks in source type recognition for regional seismic events 26  
*A.F. Anoshko, O.G. Berestneva, G.M. Jafari, A.V. Zhukov, A.I. Trufanov, M.A. Khritova*
- Numerical simulation-based analysis of source sweeps in a marine towed transient EM acquisition system 44  
*D.A. Alekseev, A.V. Koshurnikov, P.Yu. Pushkarev, E.I. Balikhin, A.Yu. Gunar, A.A. Goncharov*
- On the relationship between localization of plastic deformation in rocks and changes in dynamic elastic properties: Numerical modeling 62  
*A.M. Antonov, A.V. Vershinin, N.V. Dubinya, M.A. Krasnova*
- 
-

## Оценка возможностей применения свип-сигналов в морской буксируемой системе импульсной электроразведки на основе математического моделирования

© 2024 г. Д.А. Алексеев<sup>1,2</sup>, А.В. Кошурников<sup>3</sup>, П.Ю. Пушкарев<sup>3</sup>, Е.И. Балихин<sup>3</sup>,  
А.Ю. Гунар<sup>3</sup>, А.А. Гончаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
г. Долгопрудный, Россия*

<sup>2</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

<sup>3</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

**Автор для переписки:** Д.А. Алексеев, e-mail: alexeevgeo@gmail.com

Поступила в редакцию 10.12.2024 г.; после доработки 13.12.2024 г.

Принята к публикации 16.12.2024 г.

**Аннотация.** С использованием численного моделирования кривых импульсного электромагнитного зондирования в рамках семейства геоэлектрических моделей арктического шельфа проведен сравнительный анализ модельных (синтетических) откликов, имитированных для набора свип-сигналов, отличающихся количеством кодовых элементов псевдослучайных кодовых последовательностей (ПСКП) и их длительностью, а также частотой и формой несущего сигнала. Анализ полученных результатов, представленных в виде серии кривых, позволил выявить закономерности в уровне помехоподавления в зависимости от типа свип-сигнала и его спектральных характеристик. Показано существенное преимущество ряда проанализированных свип-сигналов перед режимом накопления в условиях равной длительности записи и одинаковой максимальной силы тока.

**Ключевые слова:** морская электроразведка, зондирование становлением поля, свип-сигналы, псевдослучайные последовательности, шумоподобные сигналы, деконволюция

**Цитируйте эту статью как:** Алексеев Д.А., Кошурников А.В., Пушкарев П.Ю., Балихин Е.И., Гунар А.Ю., Гончаров А.А. Оценка возможностей применения свип-сигналов в морской буксируемой системе импульсной электроразведки на основе математического моделирования // Сейсмические приборы. 2024. Т. 60, № 4. С. 44–61. <https://doi.org/10.21455/si2024.4-3>

### Введение

Проблема повышения точности и производительности геофизических измерений является критически важной в условиях растущих требований к надежности и детальности решения геологических задач. В частности, рост интереса к изучению подводной мерзлоты в районах арктического шельфа Российской Федерации в последние годы привел к накоплению большого количества данных импульсного электромагнитного (ЭМ) зондирования (зондирования становлением поля) [Shakhova et al., 2017, Кошурников, 2020; Krylov et al., 2023], полученных с применением морской буксируемой измерительной установки [Петров, 2000]. В то же время, одной из особенностей этого

метода является его относительно низкая помехозащищенность, что связано с характером возбуждения и приема сигнала в морских условиях.

Основные ограничения метода связаны с тем, что изучение требуемых глубин предполагает измерение 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 сигналов зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) состоит в так называемом “накоплении” – многократном измерении кривой становления для серии импульсов и последующем ее осреднении по всем измеренным реализациям [Giannino, Leucci, 2021].

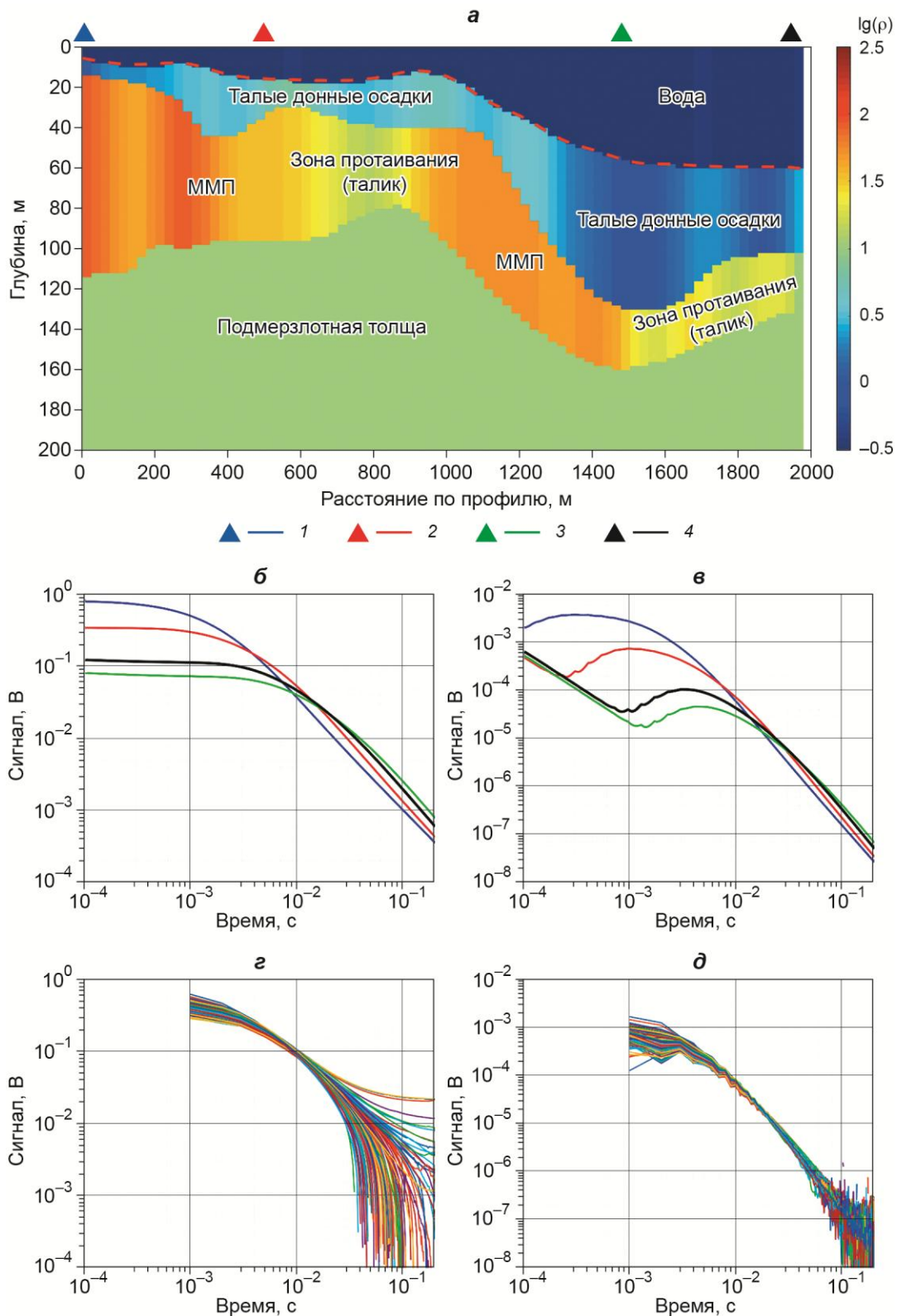
Идея использования в системах электромагнитного зондирования шумоподобных последовательностей импульсов тока [Zepernick, Finger, 2005], называемых также “шумоподобными сигналами” (ШПС) или “псевдослучайными кодовыми последовательностями” (ПСКП), уже рассматривалась рядом авторов [Helwing, 1999; Светов и др., 2012; Ильичев, Бобровский, 2014; Великин А.Б., Великин А.А., 2016]. В наших предшествующих работах [Гончаров и др., 2022; Кошурников и др., 2024] мы изучили возможности ШПС с прямоугольными импульсами (кодовыми элементами) и показали определенные преимущества такого подхода перед традиционным накоплением в условиях равной длительности записи (продолжительности зондирования на одной точке).

В то же время, проблема сложности быстрого переключения тока в источнике, наличие самоиндукции в генераторной цепи и ряд сопутствующих физико-технических аспектов делают затруднительным использование свип-сигналов с достаточно короткими (менее 1 мс) прямоугольными импульсами. Учитывая сказанное, в настоящей статье, на основе математического моделирования, алгоритмов деконволюции и фильтрации, мы проводим сравнительную оценку точности измерения зашумленных данных для набора свип-сигналов источника с различными параметрами, включая прямоугольные, квазигармонические и треугольные, построенных на основе ряда ПСКП и отличающихся длительностью кодовых элементов и их количеством.

## Материалы и методы

Для моделирования синтетических электромагнитных данных была использована квазидвумерная модель разреза (рис. 1, *a*), на качественном уровне имитирующая геоэлектрическое строение донных осадков в районе шельфа моря Лаптевых, включая неоднородный по морфологии и электрическим свойствам слой многолетнемерзлых пород (ММП), а также характерный профиль батиметрии, и подробно рассмотренная в нашей предшествующей работе [Кошурников и др., 2024]. Модель является обобщением опыта изучения ММП на Восточно-Сибирском шельфе Арктики в рамках исследований, организуемых и проводимых в последние годы авторами настоящей статьи [Кошурников, 2020; Krylov et al., 2023].

Для последующего анализа были выбраны 4 положения измерительной установки, отвечающих существенно разным распределениям геоэлектрических параметров по глубине (показаны треугольниками 1–4 на рис. 1, *a*), и выполнен расчет синтетических откликов ЗСБ для случая буксируемой диполь-дипольной установки с использованием модифицированного нами программного кода DIPOLE1D [Key, 2009; Krylov et al., 2023]. Полученные отклики (рис. 1, *b*) представляют собой кривые становления поля для соосной составляющей напряженности электрического поля после ступенчатого выключения тока. С целью последующего использования в сверточном преобразовании данные кривые были дискретизированы с шагом дискретизации 10 мкс, продифференцированы по времени, и из них были получены отклики на короткий (10 мкс) импульс



**Рис. 1.** *a* – синтетическая модель, отражающая основные закономерности геоэлектрического строения шельфа моря Лаптевых (по [Alexseev et al., 2023; Кошурников и др., 2024], с изменениями); *б, в* – кривые становления поля для условных пунктов зондирования в форме откликов на ступень выключения тока (*б*) и откликов на импульс длительностью 10 мкс (*в*); *г, д* – соответствующие экспериментальные данные (пояснение в тексте). 1–4 – положения условных пунктов зондирования и построенные для них кривые становления поля

(рис. 1, в). В качестве примера показаны также соответствующие экспериментальные отклики на ступень выключения тока (рис 1, з) и на импульс длительностью 10 мкс (рис. 1, д), полученные в море Лаптевых в рамках экспедиции 2020 г. [Krylov et al., 2023] и демонстрирующие присутствие значительных искажений.

Построение свип-сигналов осуществлялось с использованием четырех бинарных псевдослучайных кодовых последовательностей (ПСКП), содержащих 16383, 8191, 2047 и 1023 элемента, каждый из которых отождествляется с интервалом пропускания тока соответствующей (бинарной) амплитуды, при этом их длительности равны 500 мкс, 1 мс, 4 мс и 8 мс соответственно (далее в тексте и на рисунках эти ПСКП обозначены индексами А–D). Общая длительность сигнала для каждой из ПСКП одинакова и составляет около 8 с, что соответствует характерному времени прохода морской измерительной установкой расстояния порядка 25 м.

Последовательности рассчитывались на основе алгоритма генерации M-последовательностей [Светов и др., 2012]. Для каждой из построенных ПСКП с использованием логической процедуры, описанной в [Wischmeyer, 1966], был сгенерирован ряд квазисинусоидальных свип-сигналов, отличающихся периодом несущей и модулированных соответствующей ПСКП. Суть алгоритма сводится к тому, что в каждый момент времени  $t$  значение результирующего свип-сигнала сигнала  $m(t)$  совпадает со значением положительной гармоники несущей частоты  $f_c$ , взятой либо с положительным, либо с отрицательным знаком в зависимости от значения бинарной ПСКП  $P(t)$ :

$$m(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}(\sin 2\pi f_c t + 1) & \text{при } P(t) = 1; \\ -\frac{1}{2}(\sin 2\pi f_c t + 1) & \text{при } P(t) = -1. \end{cases} \quad (1)$$

На основе ПСКП А в рамках аналогичной процедуры были также сгенерированы варианты свип-сигнала с треугольными и пилообразными импульсами, а на основе ПСКП С – свип-сигнал с линейным изменением несущей частоты от 1 до 2500 Гц. Кроме того, в целях сравнения со стандартным режимом накопления использовался разнополярный меандр с паузой с одинаковой длительностью импульсов и пауз, составлявшей 500 мс. Примеры рассматриваемых ПСКП и результирующих свип-сигналов приводятся на рис. 2, а их параметры – в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры построенных свип-сигналов

Вариант свип-сигнала	Модулирующая ПСКП	Форма несущей	Период несущей	Число кодовых элементов ПСКП	Длительность кодового элемента ПСКП
1	2	3	4	5	6
A0	А, бинарная, разнополярная (-1; 1)	–	–	16383	500 мкс
A1		Гармоническая	500 мкс		
A2		Гармоническая	250 мкс		
A3		Гармоническая	100 мкс		
A4		Гармоническая	5 мкс		
T1A1		Треугольная	500 мкс		
T2A1		Пилообразная	500 мкс		
B0	В, бинарная, разнополярная (-1; 1)	–	–	8191	1 мс
B1		Гармоническая	500 мкс		
B2		Гармоническая	250 мкс		
B3		Гармоническая	100 мкс		
B4		Гармоническая	5 мкс		
B5		Гармоническая	1 мс		



Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
C0	С, бинарная, разнополярная (-1; 1)	–	–	2047	4 мс
C1		Гармоническая	500 мкс		
C2		Гармоническая	250 мкс		
C3		Гармоническая	100 мкс		
C4		Гармоническая	5 мкс		
C5		Гармоническая	1 мс		
C6		Гармоническая	2 мс		
LC1		Квазигармоническая с линейно изменяющейся частотой	400 мкс – 1 с		
D0	D, бинарная, разнополярная (-1; 1)	–	–	1023	8 мс
D1		Гармоническая	500 мкс		
D2		Гармоническая	250 мкс		
D3		Гармоническая	100 мкс		
D4		Гармоническая	5 мкс		
D5		Гармоническая	1 мс		
D6		Гармоническая	2 мс		
D7		Гармоническая	4 мс		
S	Разнополярный меандр с паузой	–	–	16	500 мс

Оставаясь в рамках сверточной модели измеряемого ЭМ-отклика, мы имеем:

$$s(t) = m(t) * h(t), \quad (2)$$

где  $t$  – время;  $s(t)$  – измеряемый шумоподобный сигнал;  $m(t)$  – сигнал источника;  $h(t)$  – импульсная характеристика (ИПХ) системы, представляющая собой ее отклик на входное воздействие в форме дельта-функции;  $*$  – операция свертки.

При этом, на практике задача состоит в определении  $h(t)$  по зашумленным значениям измеренного сигнала  $s_n(t)$  из соотношения:

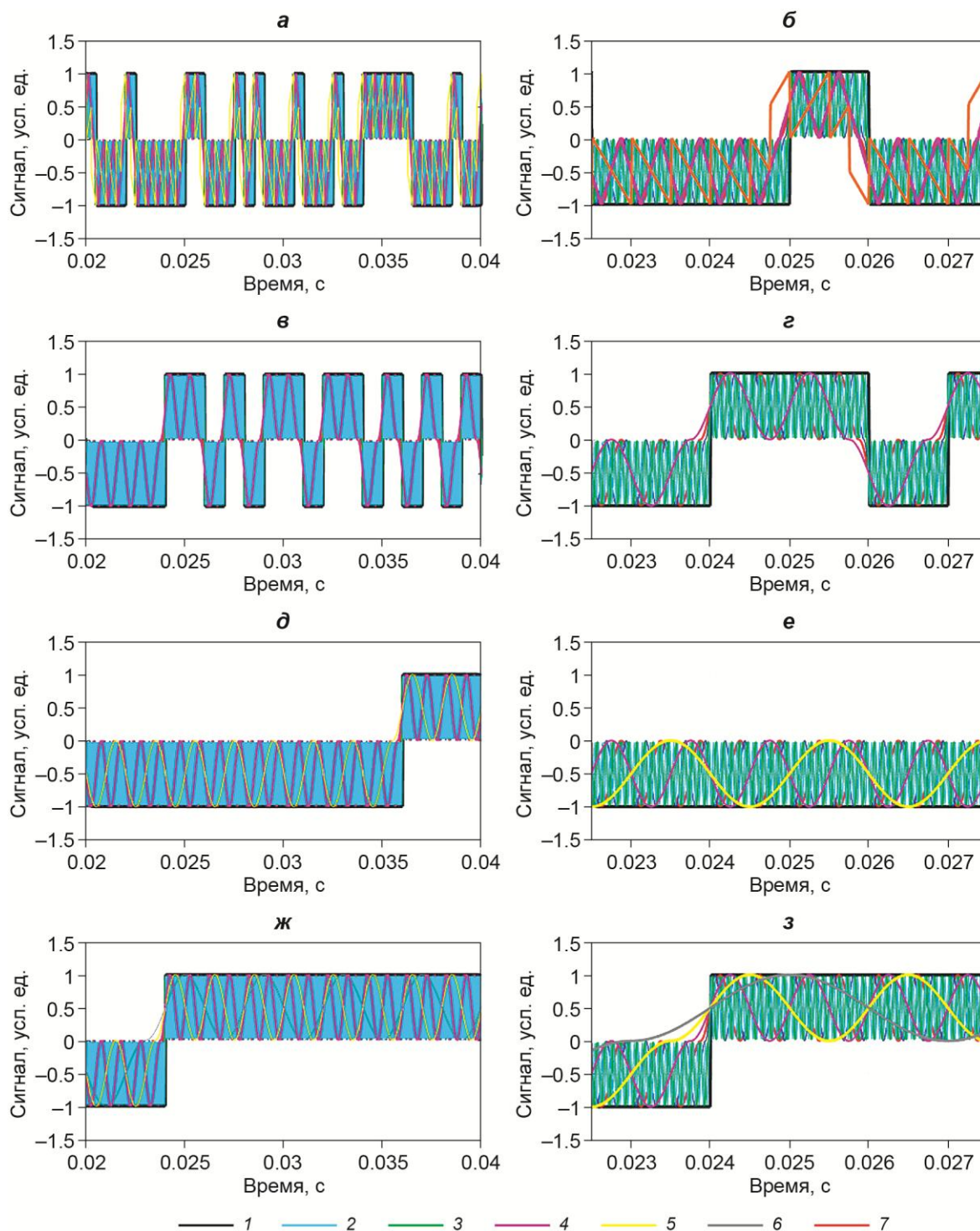
$$m(t) * h(t) = s_n(t) = s(t) + n(t). \quad (3)$$

С целью оценки уровня помехоподавления для каждого из рассматриваемых свип-сигналов источника  $m(t)$  к имитированным записям полезного сигнала  $s(t)$  были добавлены фрагменты шума  $n(t)$  такой же длительности, выделенные случайным образом из записи, полученной в рамках одной из экспедиций в море Лаптевых [Кошурников и др., 2024]. Для имитации заведомо неблагоприятных условий были выбраны два уровня зашумления: двукратный (RMS = 1–2 мВ) и десятикратный (RMS = 7–9 мВ) по отношению к имеющемуся фактическому уровню.

На следующем этапе выполнялась реконструкция отклика на короткий (10 мкс) импульс  $h(t)$  по зашумленным ШПС-рядам из уравнения свертки (3) с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [Жданов, 2007]. В результате были получены зашумленные кривые  $\tilde{h}(t_i)$ , приближенно описывающие истинные кривые  $h(t_i)$ , и рассчитано относительное среднеквадратическое расхождение (RMSE) между ними:

$$RMSE = 100\% \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \left( \frac{\tilde{h}(t_i) - h(t_i)}{h(t_i)} \right)^2}. \quad (4)$$

Вычисленная таким образом величина может быть использована для оценки уровня подавления шума и сравнения качества реконструируемой кривой  $\tilde{h}(t_i)$  в зависимости от выбранного свип-сигнала и конкретной реализации шума, накладываемого на полезный сигнал  $s(t)$ . Для сравнения с режимом накопления были также рассчитаны отклики на разнополярный прямоугольный меандр с импульсами длительностью 500 мс и произведено



**Рис. 2.** Фрагменты свип-сигналов источника и используемые оценки помехоподавления в морской буксируемой системе импульсной электроразведки

*а, в, д, ж* – фрагменты длительностью 20 мс; *б, г, е, з* – длительностью 5 мс; *а, б* – ПСКП А, импульс 500 мкс, свип-сигналы А0–А4, Т1А1, Т2А1; *в, г* – ПСКП В, импульс 1 мс, свип-сигналы В0–В5; *д, е* – ПСКП С, импульс 4 мс, свип-сигналы С0–С6; *ж, з* – ПСКП D, импульс 8 мс, свип-сигналы D0–D7; 1 – базовые ПСКП А–D; 2–7 – семейство квазигармонических (для ПСКП А–D) и кусочно-линейных (только для ПСКП А) свип-сигналов, сформированных путем модуляции несущих различной частоты соответствующими ПСКП согласно алгоритму из [Wischmeyer, 1966]

их усреднение в паузах токовой последовательности с учетом полярности. Полученные кривые сопоставлялись с истинными в рамках аналогичной процедуры.

Результаты визуализировались и анализировались в форме индивидуальных кривых зондирования и значений среднеквадратичных погрешностей деконволюции в сопоставлении с режимом накопления.

### Результаты и обсуждение

Основные результаты представлены в виде серии кривых, полученных в результате деконволюции зашумленных ШПС-сигналов для каждого из свип-сигналов источника. Перед тем, как перейти к их обсуждению, отметим, что сравнительные оценки уровня помехоподавления, достижимого при использовании того или иного свип-сигнала в генераторной цепи, безотносительно конкретного вида сигнала-помехи, могут быть получены и с наиболее общих позиций, на основе сопоставления спектральных характеристик токовых сигналов. В выражении (3) слагаемое  $n(t)$  описывает сигнал-помеху, присутствующий в измеренном сигнале  $s_n(t)$ . При переходе в частотную область, согласно теореме о свертке, выполняется соотношение:

$$M(f)*H(f) = S(f) + N(f), \quad (5)$$

где зависящие от частоты  $f$  величины являются Фурье-образами соответствующих величин из (3).

Соответственно, получая из (5) оценку  $X(f)$  частотной характеристики среды  $H(f)$  в присутствии шумов  $N(f)$  согласно формуле

$$X(f) = H(f) = \frac{S(f)}{M(f)} + \frac{N(f)}{M(f)}, \quad (6)$$

можно видеть, что погрешность данной оценки  $\Delta H(f)$  определяется отношением спектров шума и токового свип-сигнала и, при прочих равных, будет тем меньше, чем больше амплитуда  $M(f)$  в целевом интервале частот (в последующем анализе мы ограничимся рассуждениями только в терминах амплитудных спектров, поскольку они, очевидно, – наиболее важный фактор, влияющий на помехоподавление).

Из общих соображений ясно, что построение оптимального свип-сигнала возможно путем расчета обратного преобразования Фурье от “идеальной” частотной характеристики с амплитудой достаточной величины, равномерно распределенной в пределах требуемого диапазона частот. Однако, с учетом физико-технических аспектов функционирования систем импульсного ЭМ-зондирования, это потребовало бы использования ряда параметров системы (максимальной силы тока, формы импульсов, длительности фронтов включения/выключения тока, общей продолжительности зондирования), которые выходят за рамки практических технических возможностей.

На рис. 3 сопоставлены спектры ПСКП и разнополярного меандра, а на рис. 4 – всех рассмотренных в настоящей работе свип-сигналов.

Основные закономерности поведения представленных спектральных кривых сводятся к наличию основного лепестка в области низких частот и серии боковых лепестков существенно меньшей амплитуды, убывающей с возрастанием частоты (за исключением лепестка, отвечающего несущей частоте), разделенных зонами низких значений амплитуды. При этом у ПСКП с меньшей длительностью кодового элемента максимальные амплитуды лепестков меньше, чем у ПСКП с большей его длительностью, а ширина основного лепестка – больше. Это соотношение приводит к пониманию того, что ПСКП с короткими импульсами обеспечивают сравнительно более слабое, но в то же время более равномерное по частоте помехоподавление по сравнению с ПСКП с более длинными импульсами. Кроме того, на рис. 3 хорошо видно, что разнополярный меандр с паузой имеет наименее благоприятную форму спектральной кривой, характеризующуюся малыми амплитудами и быстрым убыванием с ростом частоты.

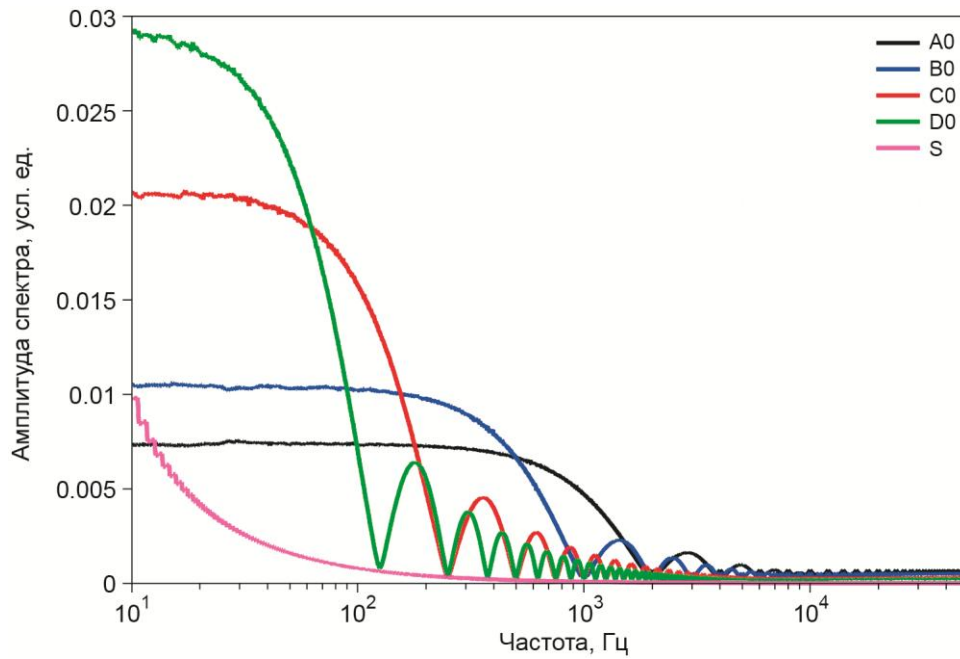


Рис. 3. Амплитудные спектры ПСКП А–D, а также разнополярного меандра с паузой S, используемого для сопоставления с традиционным режимом накопления

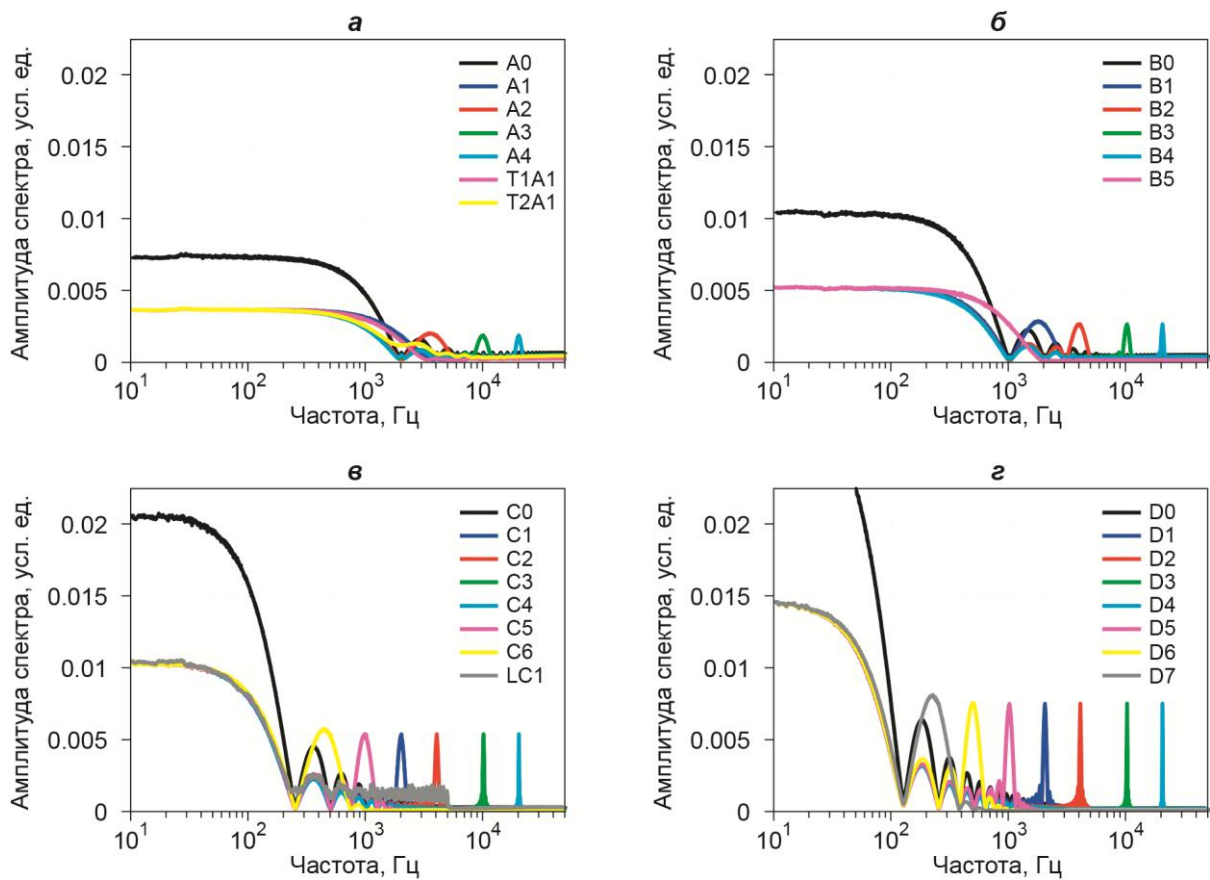
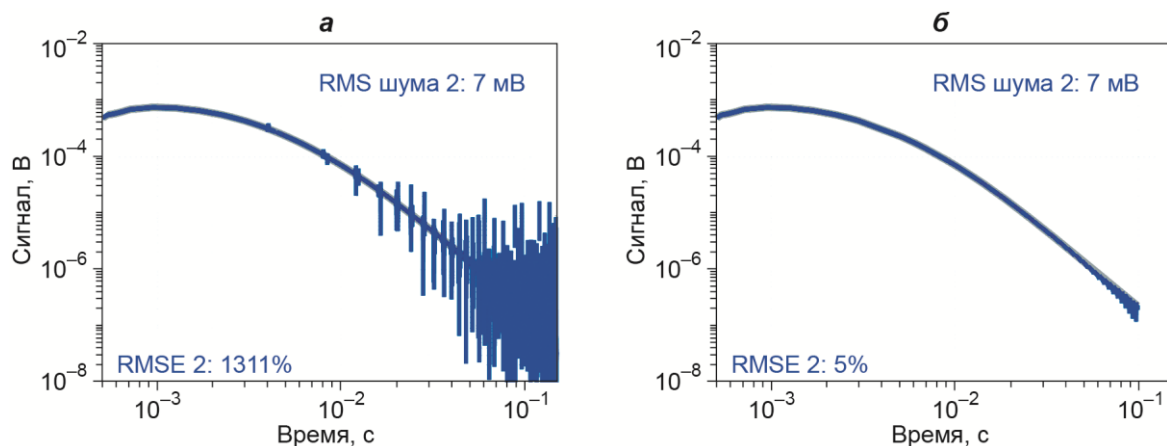


Рис. 4. Амплитудные спектры ПСКП и построенных на их основе модулированных свип-сигналов (см. табл. 1). а – для ПСКП А; б – для ПСКП В; в – для ПСКП С; з – для ПСКП D

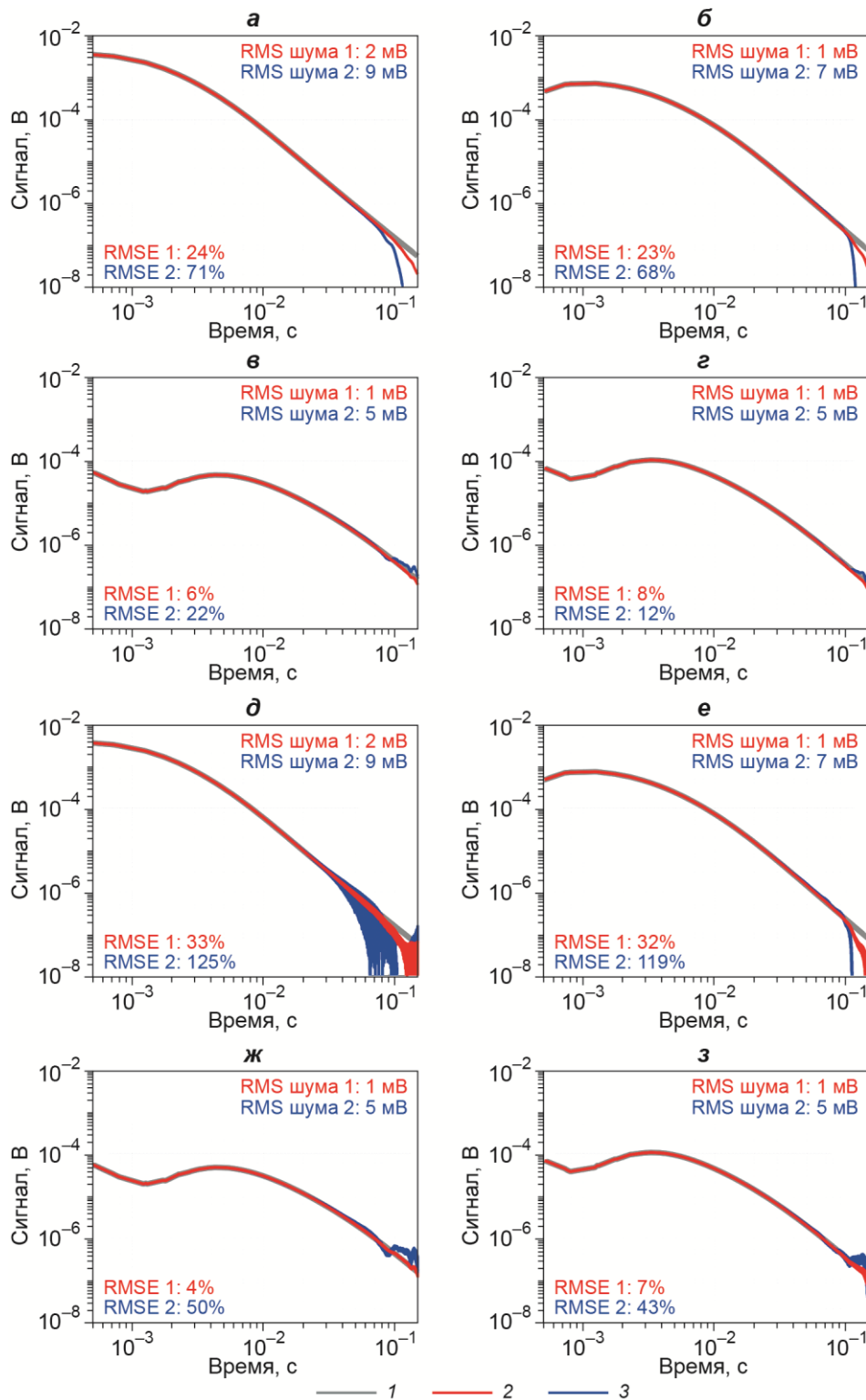
Сравнивая спектры для всех рассматриваемых сигналов, можно видеть, что наибольшей амплитудой основного лепестка характеризуются спектры самих ПСКП (A0, B0, C0, D0), а при переходе к модулированным квазигармоническим сигналам (A1–A4, B1–B5, C1–C6, D1–D7) эта амплитуда снижается приблизительно в два раза, что ставит вопрос о целесообразности применения таких сигналов. Примерно такое же поведение отмечается и для сигналов на основе последовательностей с треугольными и пилообразными импульсами (T1A1 и T2A1). Отдельно необходимо отметить, что спектр модулированного сигнала с линейно изменяющейся во времени частотой (LC1) демонстрирует несколько больший уровень амплитуд в области минимумов между боковыми лепестками, однако их максимумы лежат существенно ниже по сравнению с таковыми для квазигармонических свип-сигналов.

Необходимо также отметить, что во всех случаях наличие относительно узких зон минимума между соседними лепестками приводит не просто к слабому помехоподавлению на данных частотах, но к многократному росту погрешности решения даже на слабозашумленных данных. Это выражается в неустойчивом результате деконволюции в виде паразитных отскоков на кривой, временной период появления которых соответствует частоте минимума спектра между основным и первым боковым лепестками, каковая частота, в свою очередь, при выбранном шаге дискретизации определяется длительностью импульса модулирующей ПСКП (рис. 5, а). В то же время, наблюдаемая картина искажений позволяет предложить простую процедуру для отбраковки подобных отскоков путем удаления относительно узких фрагментов кривой в окрестности каждого из отсчетов, кратных по времени вышеуказанной величине. Результат применения такой процедуры на стадии обработки данных существенно повышает качество получаемой кривой (рис. 5, б). Кривые, представленные на рис. 6–8, приводятся после фильтрации отскоков.



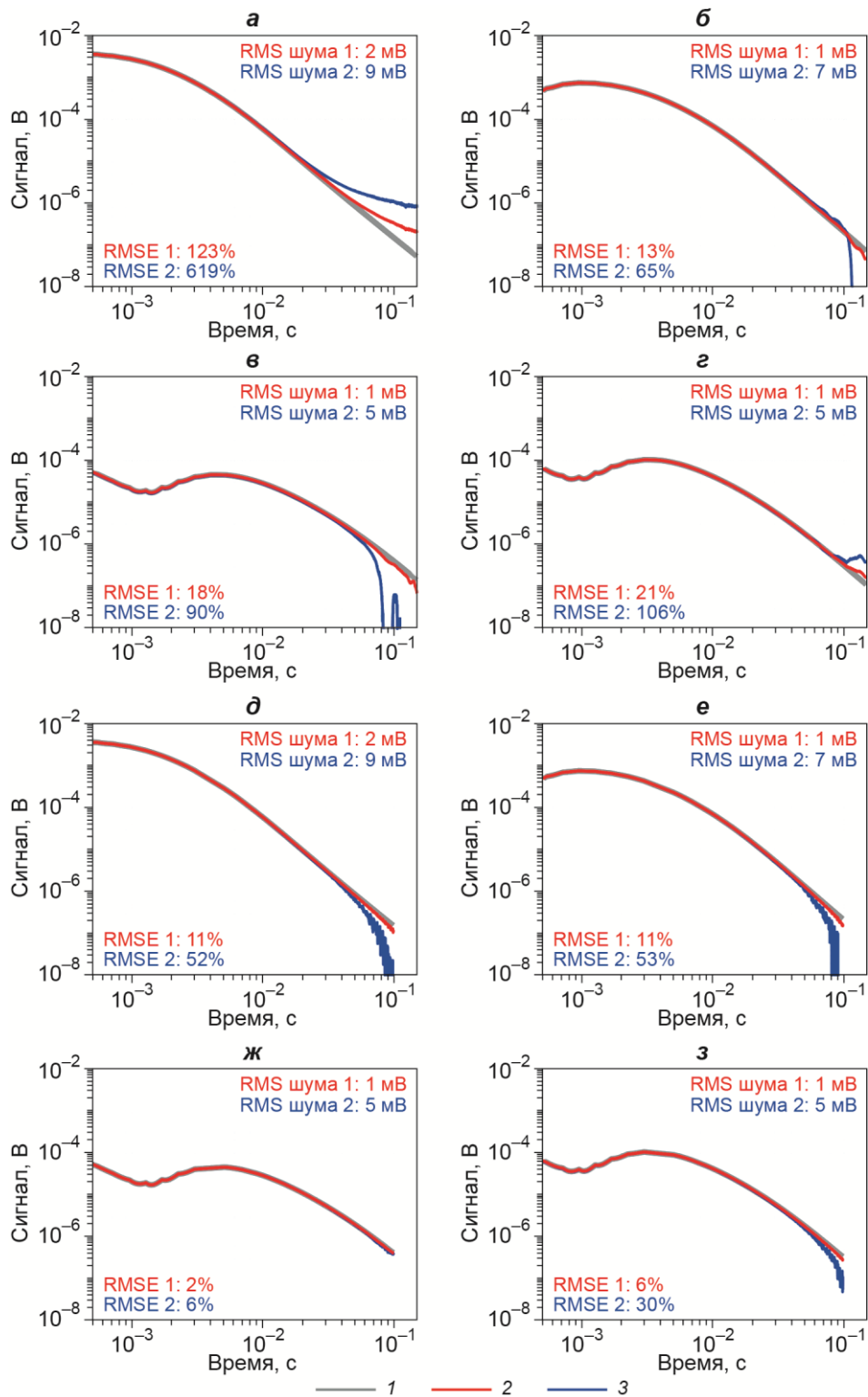
**Рис. 5.** а – пример кривой, полученной в результате деконволюции зашумленных данных (свип-сигнал С2); б – та же кривая с удаленными из нее интервалами длительностью 2 мс, центры которых следуют с шагом по времени 4 мс (длительность кодового элемента ПСКП С)

Результаты имитации режима накопления с разнополярным меандром с паузой представлены в виде серии кривых становления поля на рис. 9 и свидетельствуют о существенных искажениях в области поздних времен, многократно превышающих таковые для режима ШПС со свип-сигналами из групп С и D.

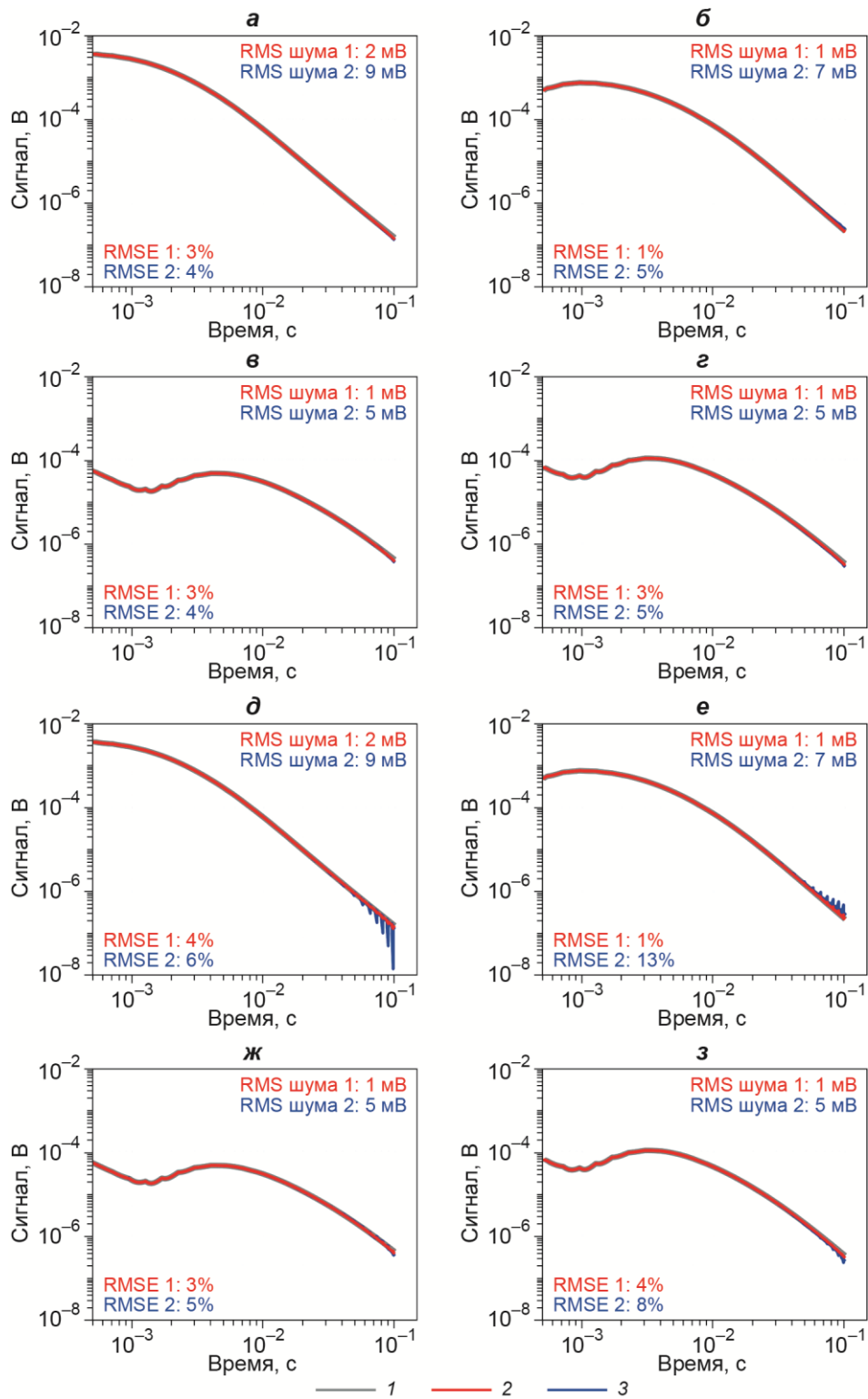


**Рис. 6.** Примеры кривых для 4 пунктов зондирования (см. рис. 1), полученных в результате деконволюции зашумленных данных на основе свип-сигналов А0 (а-г) и А2 (д-з): а, д – для пункта 1; б, е – для пункта 2; в, ж – для пункта 3; г, з – для пункта 4

Здесь и на рис. 7–8: 1 – истинные кривые; 2 – кривые при 2-кратном уровне зашумления; 3 – при 10-кратном уровне зашумления. Приводятся также значения RMS шума во входных данных и RMSE для полученных кривых 2 и 3

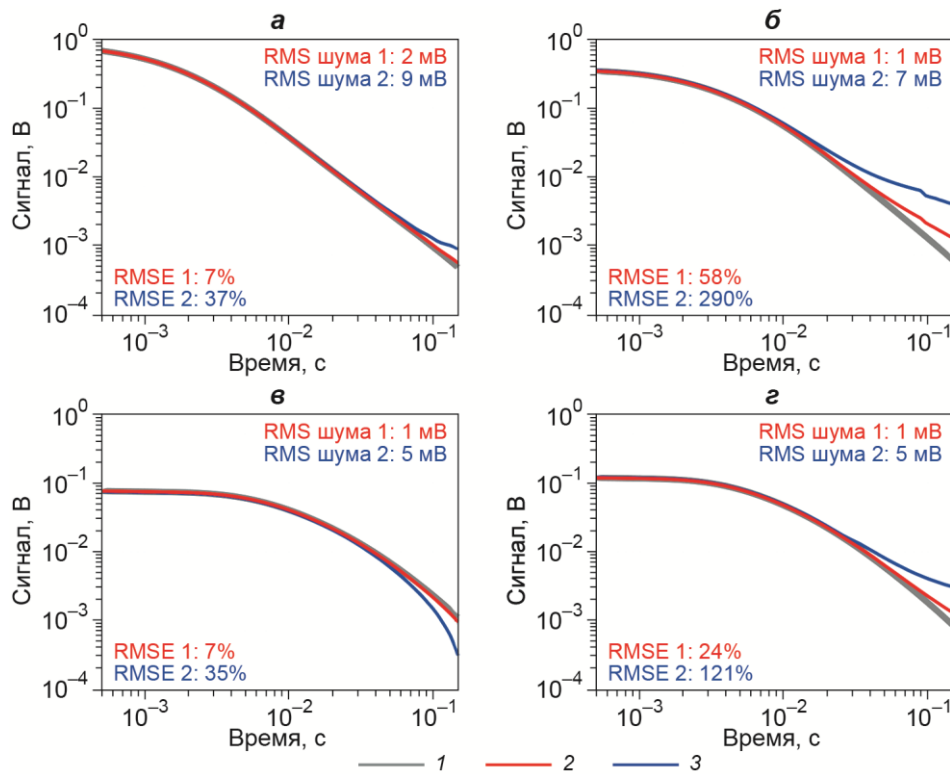


**Рис. 7.** Примеры кривых для 4 пунктов зондирования, полученных в результате деконволюции зашумленных данных на основе свип-сигналов Т2А1 (пилообразные импульсы с периодом 500 мкс, а–г) и LC1 (линейное изменение частоты несущей со временем от 1 до 2500 Гц, д–з): а, д – для пункта 1; б, е – для пункта 2; в, ж – для пункта 3; г, з – для пункта 4



**Рис. 8.** Примеры кривых для 4 пунктов зондирования, полученных в результате деконволюции зашумленных данных на основе свип-сигналов D0 (а-г) и D3 (д-з): а, д – для пункта 1; б, е – для пункта 2; в, ж – для пункта 3; г, з – для пункта 4





**Рис. 9.** Примеры кривых для 4 пунктов зондирования, полученных в результате накопления зашумленных данных на основе свип-сигнала в форме разнополярного меандра с паузой (свип-сигнал S): *а* – для пункта 1; *б* – для пункта 2; *в* – для пункта 3; *г* – для пункта 4

1 – истинные кривые спада для длинного импульса (500 мс); 2 – кривые при 2-кратном уровне зашумления; 3 – при 10-кратном уровне зашумления. Приводятся также значения RMS шума во входных данных и RMSE для полученных кривых 2 и 3

Оценки погрешностей полученных кривых для всех рассмотренных вариантов свип-сигнала источника приводятся в табл. 2.

**Таблица 2.** Значения среднеквадратичных погрешностей (RMSE) кривых после деконволюции при различном уровне зашумления полезного сигнала в режимах ШПС и накопления

Свип-сигнал	Кривая для пункта 1		Кривая для пункта 2		Кривая для пункта 3		Кривая для пункта 4	
	RMSE 1, %	RMSE 2, %	RMSE 1, %	RMSE 2, %	RMSE 1, %	RMSE 2, %	RMSE 1, %	RMSE 2, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
A0	24	71	23	68	6	22	8	12
A1	124	623	17	76	18	91	22	109
A2	33	125	32	119	4	50	7	43
A3	33	118	34	123	4	53	6	34
A4	36	129	34	124	4	54	6	32
T1A1	179	885	22	85	25	137	33	142
T2A1	123	619	13	65	18	90	21	106
B0	10	9	9	6	9	6	7	13
B1	15	67	184	928	30	157	25	132
B2	45	394	873	4247	165	678	136	523
B3	36	286	620	3016	121	508	101	404
B4	40	331	731	3546	142	589	116	460
B5	15	58	169	863	26	145	21	120
C0	3	6	3	3	2	1	2	2
C1	4	10	3	5	2	4	2	3

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
C2	2	4	3	5	2	4	2	3
C3	4	9	3	5	2	4	2	2
C4	4	9	3	4	2	4	2	2
C5	4	10	3	5	2	4	2	3
C6	6	34	4	23	2	6	3	15
LC1	11	52	11	53	2	6	6	30
D0	3	4	1	5	3	4	3	5
D1	4	7	1	14	3	5	4	9
D2	4	7	1	14	3	5	4	9
D3	4	6	1	13	3	5	4	8
D4	3	6	1	13	3	5	4	8
D5	3	6	1	13	3	6	4	9
D6	10	58	11	47	6	15	4	16
D7	47	253	45	202	17	58	13	68
S	7	37	58	290	7	35	24	121

Анализируя полученные значения погрешностей, можно сделать следующие основные выводы, в целом подтверждающие те предварительные оценки, которые следуют из свойств спектральных кривых тех или иных свип-сигналов источника:

1. В каждой из групп свип-сигналов (A–D) наилучшие результаты наблюдаются для базовой ПСКП (A0, B0, C0, D0), а модулированные сигналы с гармониками различных частот показывают существенно худший результат (что ожидаемо с учетом более низких амплитуд основного лепестка), причем для рассмотренных реализаций шума четкой зависимости погрешности от частоты несущей не выявлено.

2. Свип-сигналы с треугольными и пилообразными импульсами, равно как и сигнал с непрерывным изменением частоты, продемонстрировали существенно худшие результаты по сравнению с квазигармоническими свип-сигналами, что может отчасти объясняться недостаточным качеством фильтрации отскоков из-за их более сложного распределения во времени.

3. Свип-сигналы с большей длительностью кодового элемента ПСКП закономерно показали лучшие результаты, что отражается также в более высоких значениях амплитудных спектров.

4. Наконец, сопоставляя полученные оценки погрешностей с таковыми для режима накопления (свип-сигнал S), можно видеть, что этот режим дает результаты, лежащие посередине между ПСКП с малой длительностью элемента (A, B) и ПСКП с “большой” длительностью элемента (C, D), причем последние обеспечивают более чем двукратный выигрыш по сравнению с режимом накопления даже с учетом того, что он был реализован в варианте с укороченными импульсами и паузами для повышения числа накоплений сигнала до 8, тогда как на практике количество накоплений в рассматриваемой системе обычно составляет 1–2.

Подводя итог, отметим, что вышеописанные результаты несколько корректируют те оценки, которые были получены в нашей предыдущей работе [Кошурников и др., 2024] и указывали на ухудшение качества кривых при увеличении длительности кодового элемента ПСКП. В настоящем исследовании, с учетом предложенного метода фильтрации отскоков на результирующих кривых, не использовавшегося нами ранее, наилучший результат демонстрируют, наоборот, ПСКП с большей длительностью элемента.

Кроме того, наблюдаемое (в рамках проведенного анализа) снижение помехоподавления при использовании высокочастотных квазигармонических и треугольных свип-сигналов по сравнению с исходными ПСКП, по-видимому, делает применение

подобных сигналов в измерительных системах малоэффективным, хотя и требует дальнейшего исследования.

### **Заключение**

С использованием численного моделирования кривых импульсного электромагнитного зондирования в рамках семейства геоэлектрических моделей арктического шельфа был проведен сравнительный анализ модельных (синтетических) откликов, имитированных для набора свип-сигналов, отличающихся количеством кодовых элементов ПСКП и их длительностью, а также частотой и формой несущего сигнала. Анализ полученных результатов, представленных в виде серии кривых, позволил найти закономерности в уровне помехоподавления в зависимости от типа свип-сигнала и его спектральных характеристик. Было выявлено существенное преимущество ряда проанализированных свип-сигналов перед режимом накопления в условиях равной длительности записи и одинаковой максимальной силы тока.

Применение свип-сигналов на основе ПСКП, в совокупности с использованием специальных процедур деконволюции и фильтрации получаемых откликов, позволяет существенно повысить помехоподавление в целевом диапазоне времен становления поля. На взгляд авторов, несмотря на потенциальные трудности с реализацией режима ШПС в мощных источниках систем электромагнитного зондирования, рассматриваемое направление имеет определенные перспективы в связи с рядом ожидаемых преимуществ, которые могут определить дальнейшее развитие и усовершенствование технологий электромагнитной разведки в самых различных приложениях.

Представляется, что дальнейшие исследования возможностей применения ШПС-сигналов в системах импульсной электроразведки могут опираться на поиск оптимальных свип-сигналов по желаемым спектральным характеристикам, с учетом их технической реализуемости в рамках подобных систем. Кроме того, возможно проведение дополнительного анализа откликов в частотной области, включая использование дисперсионных соотношений и ряда обработочных процедур, позволяющих повысить точность получаемых данных.

### **Финансирование**

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

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Литература**

- 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., Гунар А.Ю., Семилетов И.П., Пушкарев П.Ю.* Применение псевдослучайных кодовых последовательностей для повышения эффективности зондирования становлением поля в ближней зоне на арктическом шельфе // *Физика Земли.* 2022. № 5. С.158–170. <https://doi.org/10.31857/S0002333722050167>
- 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.
- Кошурников А.В.* Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на арктическом шельфе России // Вестник Моск. ун-та. Серия 4: Геология. 2020. № 3. С.116–125.
- Кошурников А.В., Алексеев Д.А., Пушкарев П.Ю., Гунар А.Ю., Балихин Е.И.* Теоретический анализ применения шумоподобных сигналов в морской импульсной электроразведке // Вестник Моск. ун-та. Серия 4: Геология. 2024. Т. 63, № 2. С.108–118. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-108-118>
- Петров А.А.* Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. 2000. № 5. С.21–26.
- 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.
- Alekseev D.A., Koshurnikov A.V., Gunar A.Yu., Balikhin E.I., Semiletov I.P., Shakhova N.E., Palshin N.A., Lobkovsky L.I.* Time-domain electromagnetics for subsea permafrost mapping in the Arctic: The synthetic response analyses and uncertainty estimates from numerical modelling data // Geosciences. 2023. V. 13, Iss. 5. Art. 144. 20 p. <https://doi.org/10.3390/geosciences13050144>
- Giannino F., Leucci G.* Electromagnetic Methods in Geophysics: Applications in GeoRadar, FDEM, TDEM, and AEM. John Wiley & Sons Ltd., 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. Köln: Universität zu Köln, 1999. 153 p.
- Key K.* 1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers // Geophysics. 2009. V. 74, Iss. 2. P.F9–F20. <https://doi.org/10.1190/1.3058434>
- Krylov A.A., Ananiev R.A., Chernykh D.V., Alekseev D.A., Balikhin E.I., Dmitrevsky N.N., Novikov M.A., Radiuk E.A., Domaniuk, A.V., Kovachev, S.A., Timashkevich G.K., Ivanov V.N., Plinsky D.A., Ganzha O.Yu., Gunar A.Yu., Pushkarev P.Yu., Koshurnikov A.V., Lobkovsky L.I., Semiletov I.P.* A complex of marine geophysical methods for studying gas emission process on the Arctic Shelf // Sensors. 2023. V. 23, Iss. 8. Art. 3872. 24 p. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/8/3872>
- Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskey 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 // Nat. Commun. 2017. V. 8. Art. 15872. 13 p. <https://doi.org/10.1038/ncomms15872>
- Wischmeyer C.R.* Method and apparatus for continuous wave seismic prospecting: USA Patent US3264606A. Publication date: 02.08.1966.
- Zepernick H.-J., Finger A.* Pseudo Random Signal Processing: Theory and Application. John Wiley & Sons Ltd., 2005. 432 p.

### Сведения об авторах

**АЛЕКСЕЕВ Дмитрий Александрович** – Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: alexeevgeo@gmail.com

**КОШУРНИКОВ Андрей Викторович** – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: koshurnikov@msu-geophysics.ru

**ПУШКАРЕВ Павел Юрьевич** – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: Pavel\_pushkarev@list.ru

**БАЛИХИН Ермолай Игоревич** – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: ermolaibalihin@mail.ru

**ГУНАР Алексей Юрьевич** – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: gunar@msu-geophysics.ru

**ГОНЧАРОВ Алексей Алексеевич** – Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. E-mail: goncharov.aa@phystech.edu

## METADATA IN ENGLISH

### About the journal

SEISMICHESKIE PRIBORY, ISSN: 0131-6230, eISSN: 2312-6965, <https://doi.org/10.21455/si>, [http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=25597](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=25597)

English Translation: Seismic Instruments, ISSN: 0747-9239 (Print) 1934-7871 (Online), <https://link.springer.com/journal/11990>

## Numerical simulation-based analysis of source sweeps in a marine towed transient EM acquisition system

D.A. Alekseev<sup>1,2</sup>, A.V. Koshurnikov<sup>3</sup>, P.Yu. Pushkarev<sup>3</sup>, E.I. Balikhin<sup>3</sup>,  
A.Yu. Gunar<sup>3</sup>, A.A. Goncharov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

<sup>2</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

**Corresponding author:** D.A. Alekseev, e-mail: alexeevgeo@gmail.com

**Abstract.** Using synthetic transient electromagnetic response data simulated assuming characteristic resistivity structure of the Arctic Shelf, we carried out a comparative analysis of a series of source sweep signals differing in the number of pseudorandom code elements and their duration, as well as the carrier frequency and waveform. The obtained results, presented in the form of decay curves, allowed us to identify relation between the noise cancellation efficacy, sweep signal type and its spectral characteristics. The study demonstrates a significant advantage of a number of analyzed sweep signals over the conventional stacking approach given the equal recording duration and the maximum current strength.

**Keywords:** marine electromagnetics, transient electromagnetics, sweep signal, pseudorandom signals, pseudo-noise signals, deconvolution

### Financial support

The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 23-27-00228.

### Ethics declarations

The authors declare no conflict of interest.

*About the authors*

**ALEKSEEV Dmitry Aleksandrovich** – Moscow Institute of Physics and Technology. Russia, 141701, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutsky lane 9; Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st. 10-1. E-mail: alexeevgeo@gmail.com

**KOSHURNIKOV Andrey Viktorovich** – Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University. Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory 1. E-mail: koshurnikov@msu-geophysics.ru

**PUSHKAREV Pavel Yuryevich** – Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University. Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory 1. E-mail pavel\_pushkarev@list.ru

**BALIKHIN Ermolay Igorevich** – Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University. Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory 1. E-mail ermolaybalihin@mail.ru

**GUNAR Aleksey Yuryevich** – Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University. Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory 1. E-mail: gunar@msu-geophysics.ru

**GONCHAROV Aleksey Alekseevich** – Moscow Institute of Physics and Technology. Russia, 141701, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutsky lane 9. E-mail: goncharov.aa@phystech.edu

**Cite this article as:** Alekseev D.A., Koshurnikov A.V., Pushkarev P.Yu., Balikhin E.I., Gunar A.Yu., Goncharov A.A. Numerical simulation-based analysis of source sweeps in a marine towed transient EM acquisition system, *Seismicheskie Pribory*, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 44–61. (in Russian). <https://doi.org/10.21455/si2024.4-3>