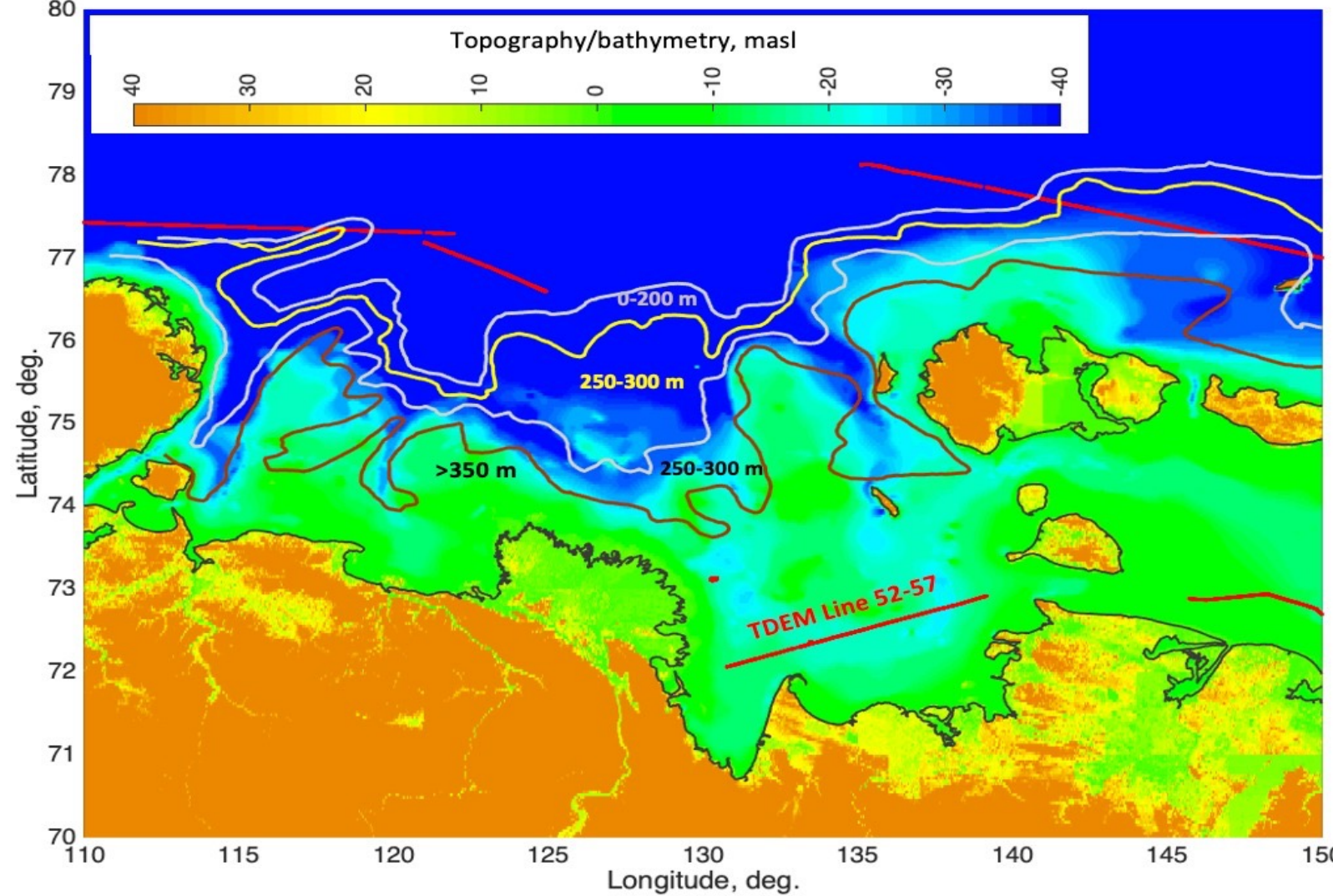


Анализ возможностей применения псевдослучайных последовательностей импульсов тока с целью повышения эффективности морской технологии электромагнитного зондирования в условиях шельфа Арктики

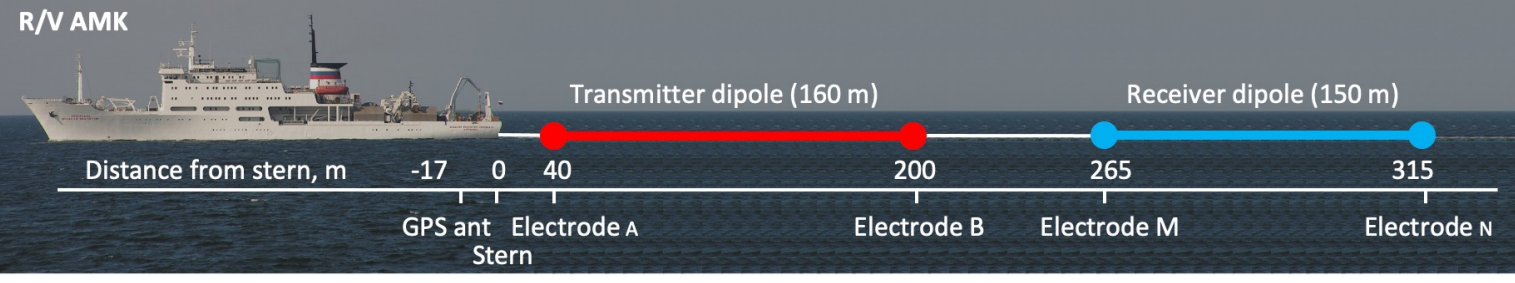
А.А. Гончаров¹, А.В. Кошурников^{2,3}, П.Ю. Пушкарев³, А.Ю. Гунар^{2,3}, Д.А. Алексеев¹

¹Московский физико-технический институт (МФТИ), alexeevgeo@gmail.com; ²МГУ им. М.В. Ломоносова, Геологический ф-т, pavel_pushkarev@list.ru; ³ООО “МГУ-Геофизика”, koshurnikov@msu-geophysics.ru

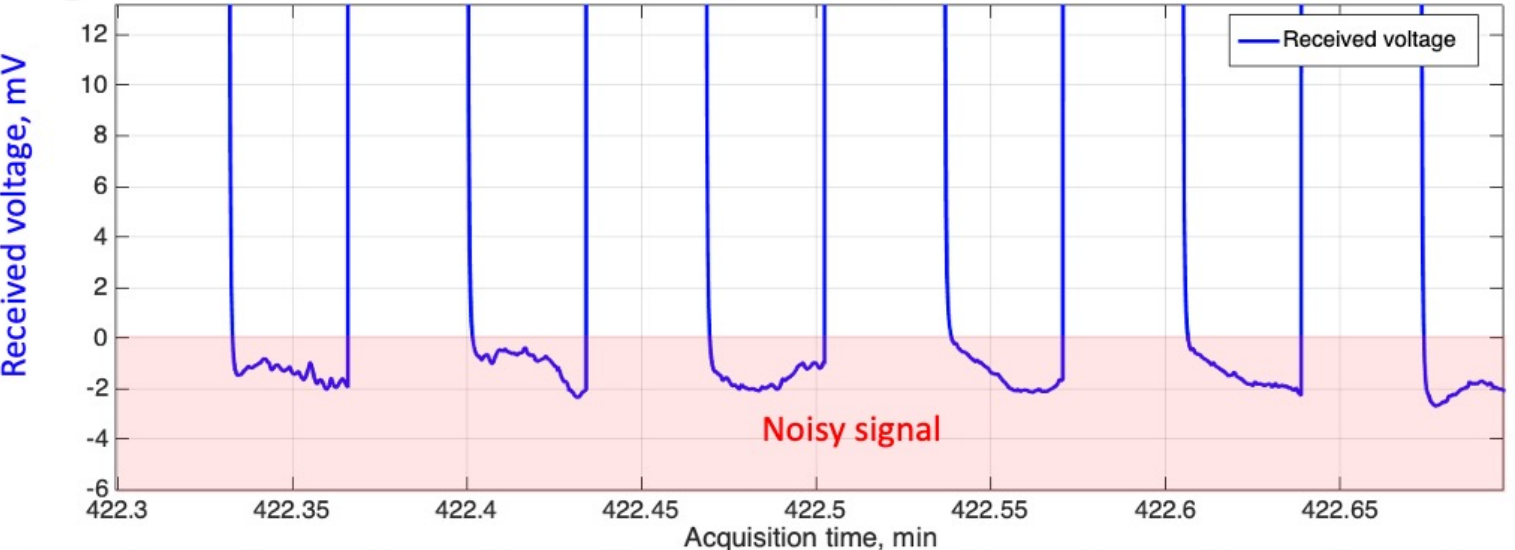
1. Введение



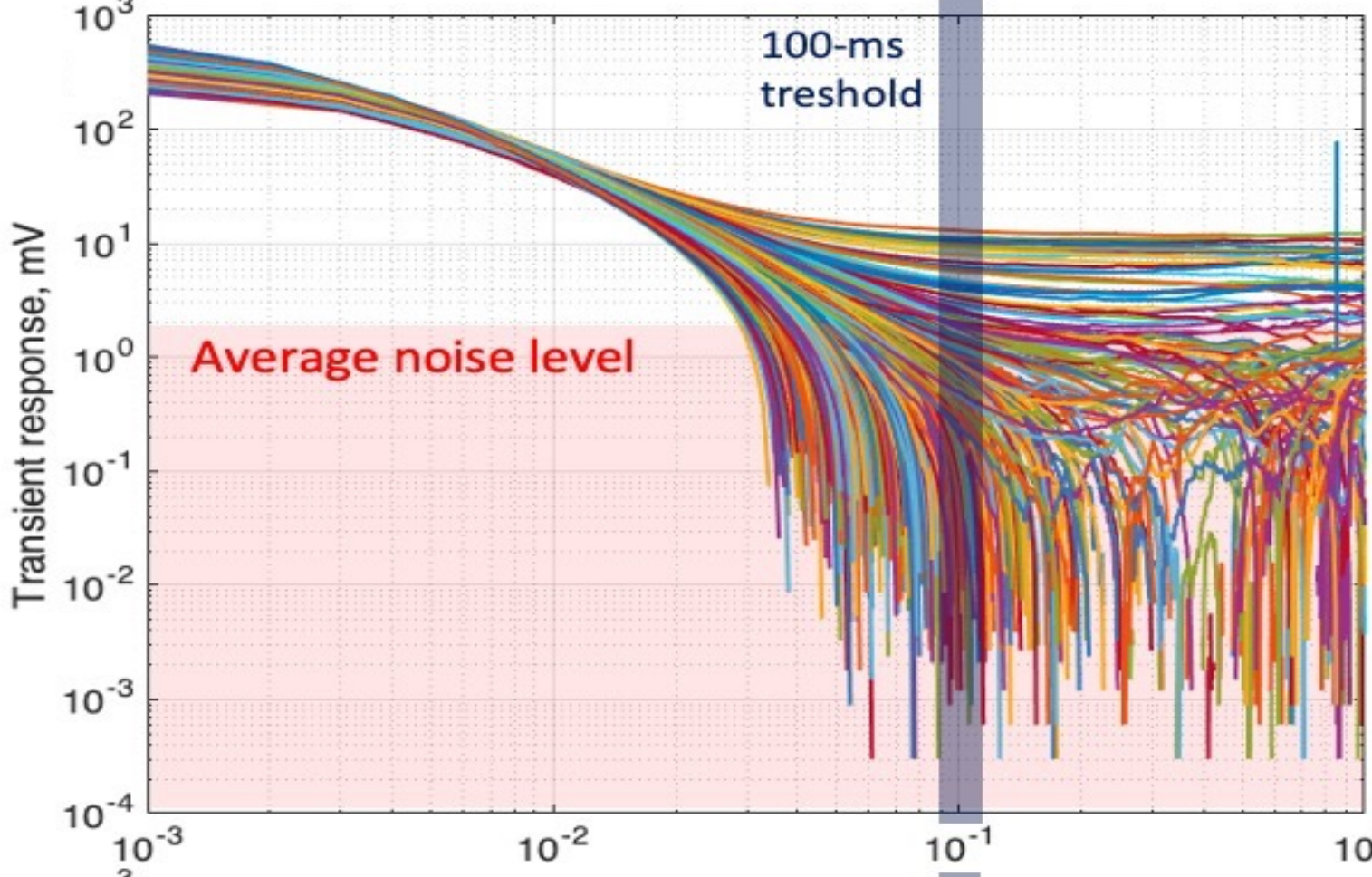
Карта профилей ЗС-исследований толщи ММП на шельфе морей Восточной Арктики (красные линии) и модельные оценки мощности ММП (изолинии)



Пример конфигурации буксируемой диполь-дипольной установки ЗС, используемой на НИС “Академик Мстислав Келдыш”



Пример временного ряда непрерывной регистрации откликов ЗС в движении судна (режим импульс/пауза 2/2 с). Пространственный шаг между зондированиями – от 20 до 50 м, в зависимости от скорости судна.



Серия “одноимпульсных” откликов (переходных характеристик), искаженных в области поздних времен сильным влиянием шумов. По горизонтальной оси отложено время становления в секундах.

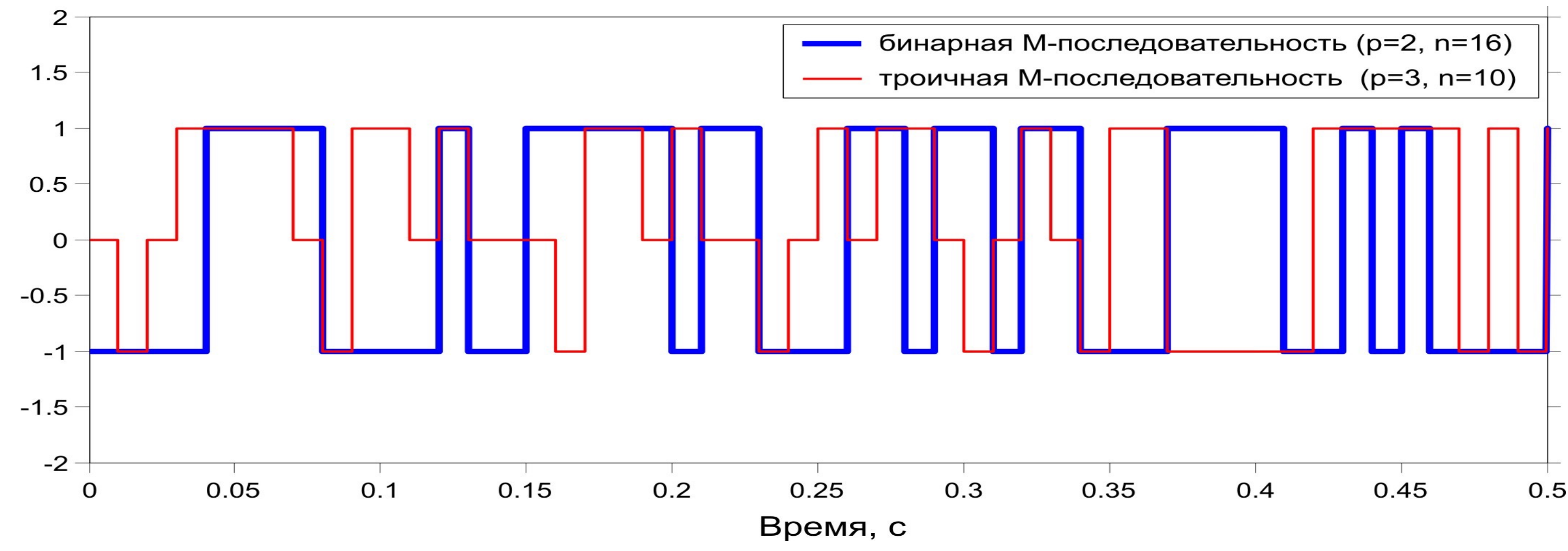
В последние годы на шельфе Арктических морей активно проводятся геофизические исследования, направленные на изучение геологического строения земной коры и состояния подводной мерзлоты. Опыт применения методов морской импульсной электроразведки (зондирования становлением поля в ближней зоне – ЗСБ), активно используемой в арктических исследованиях, весьма успешен [Koshurnikov et al., 2016; Shakhova et al., 2017], но не лишен проблем, связанных со сложностью реализации морских наблюдений, которые бы обеспечивали высокое соотношение уровня полезного сигнала и помех различной природы.

Традиционная технология ЗСБ предполагает выполнение накопления – последовательного повторения зондирующих импульсов и осреднения набора полученных кривых становления. Это требует позиционирования измерительной установки в одном месте в течение достаточно длительного промежутка времени, что в рамках морских исследований практически не выполнимо.

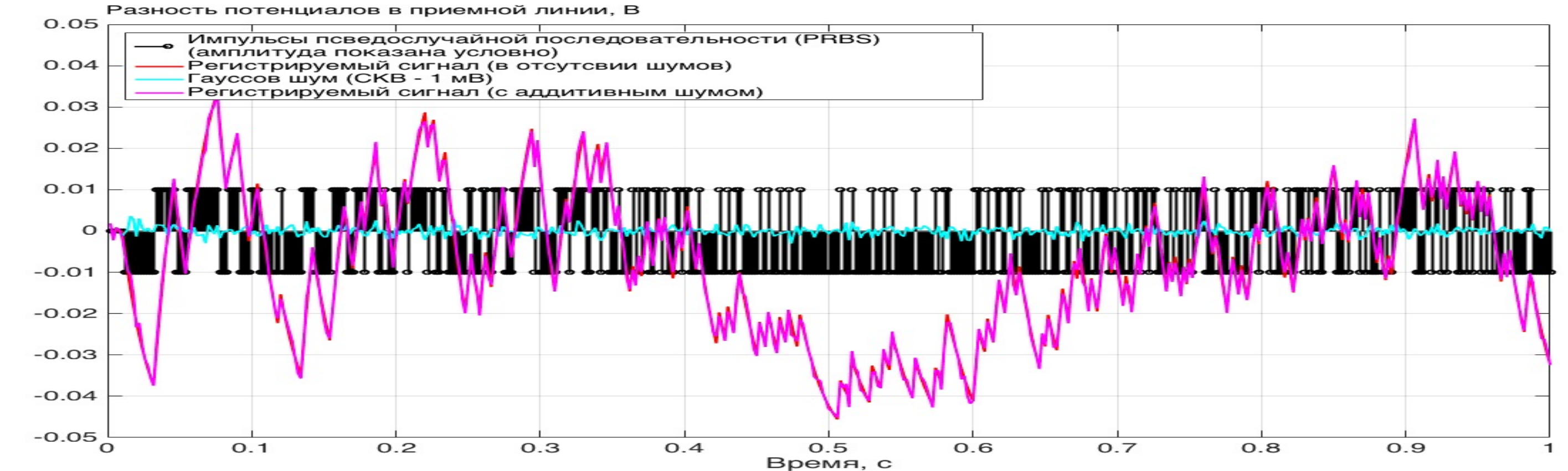
При проведении морских работ ЗСБ с установкой диполь-диполь в условиях мелководного шельфа Арктики измеренные кривые становления поля (переходные характеристики среды) в большинстве случаев осложнены влиянием шума в интервале времен свыше 0.05 с. Данная проблема требует разработки более эффективной технологии регистрации ЗС-данных и повышения отношения сигнал/шум

2. Применение псевдослучайных последовательностей импульсов тока (шумоподобных сигналов) в ЗС

Рядом авторов [Duncan et al., 1980; Helwing, 1999; Светов и др., 2012; Svetov et al., 2012; Великин и Великин, 2016 а,б;] был предложен и опробован подход, при котором в питающую линию подаются шумоподобные сигналы (ШПС).



Примеры бинарной и троичной псевдослучайных последовательностей прямоугольных импульсов тока



Пример бинарной токовой последовательности (черным), имитированного ШПС (розовым) в приемной линии и шума (голубым)

В рамках проведенного нами исследования выполнено численное моделирование, направленное на оценку эффективности применения псевдослучайных последовательностей импульсов тока (шумоподобных сигналов, ШПС) в системах морской электроразведки методом переходных процессов (МПП) и разработку специализированных методов обработки/интерпретации данных, получаемых в рамках такого подхода.

3. Реконструкция импульсной переходной характеристики в режиме ШПС

ИПХ среды $h(t) \sim t^{-5/2}$ Уравнение свертки $\int_0^\infty m(t-\tau)h(\tau)d\tau = s(t)$ $AB: E_x$

В дискретной форме:

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

МНК: $h = (A^T \cdot A)^{-1} A^T \cdot s$

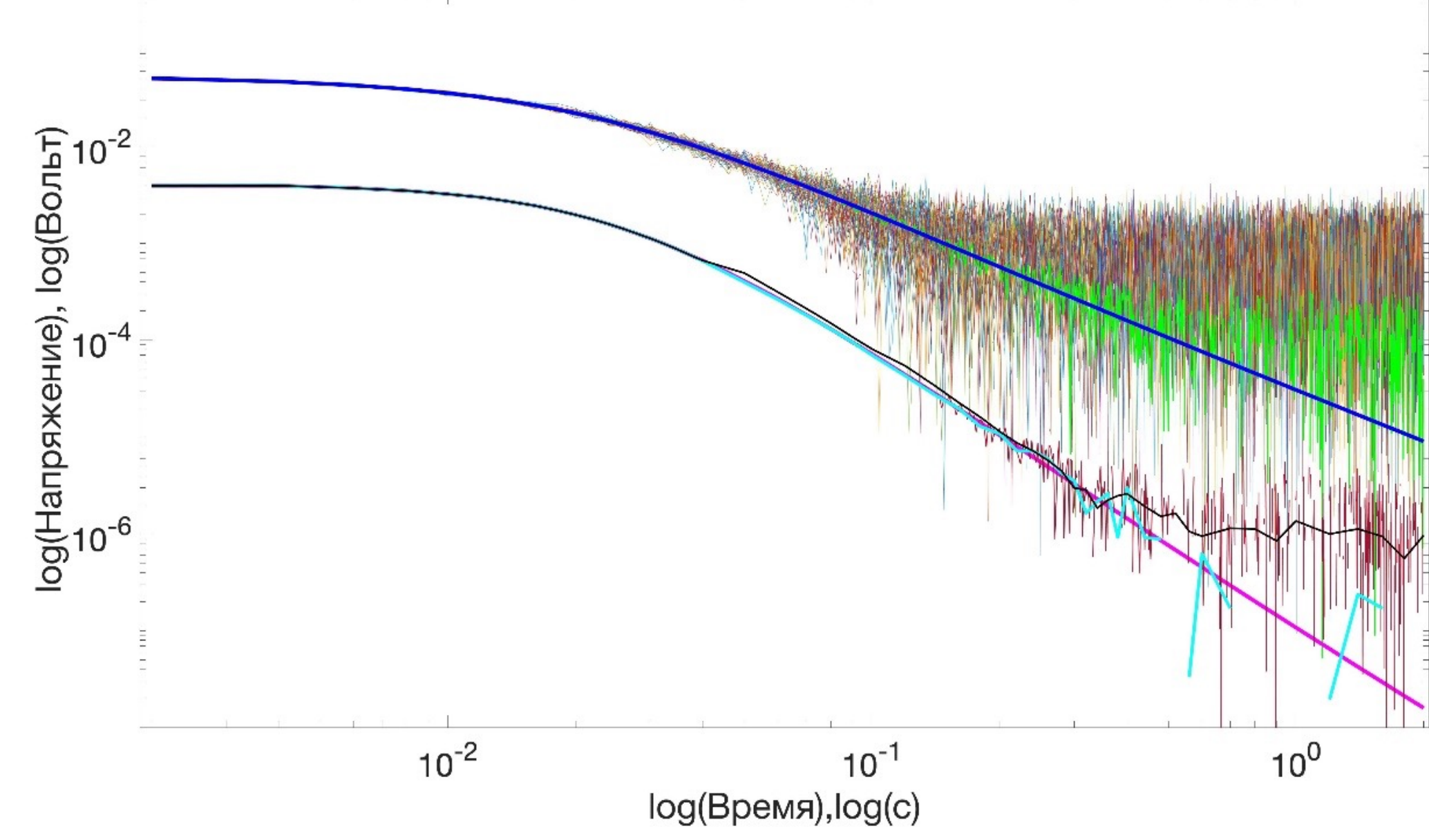
Регуляризация МНК путем использования кусочно-линейной аппроксимации решения Пусть длительность импульсов ШПС равна Δt , а истинная ПХ задана М отсчетами, распределенными во времени с тем же шагом Δt . Тогда задача состоит в восстановлении переходной характеристики, задаваемой Р отсчетами, относимыми к дискретам с номерами l , $l=1\dots P$ в предположении, что между этими отсчетами ПХ меняется по линейному закону. В такой постановке система записывается в форме:

$$\sum_{l=1}^P \left(h_{L_l} \cdot \left(\sum_{k=L_{l-1}}^{L_l-1} m_j^k \cdot \alpha_l^k - \sum_{k=L_l}^{L_{l+1}-1} m_j^k \cdot \beta_l^k \right) + h_{L_P} \cdot m_j^k \right) = (s_j)$$

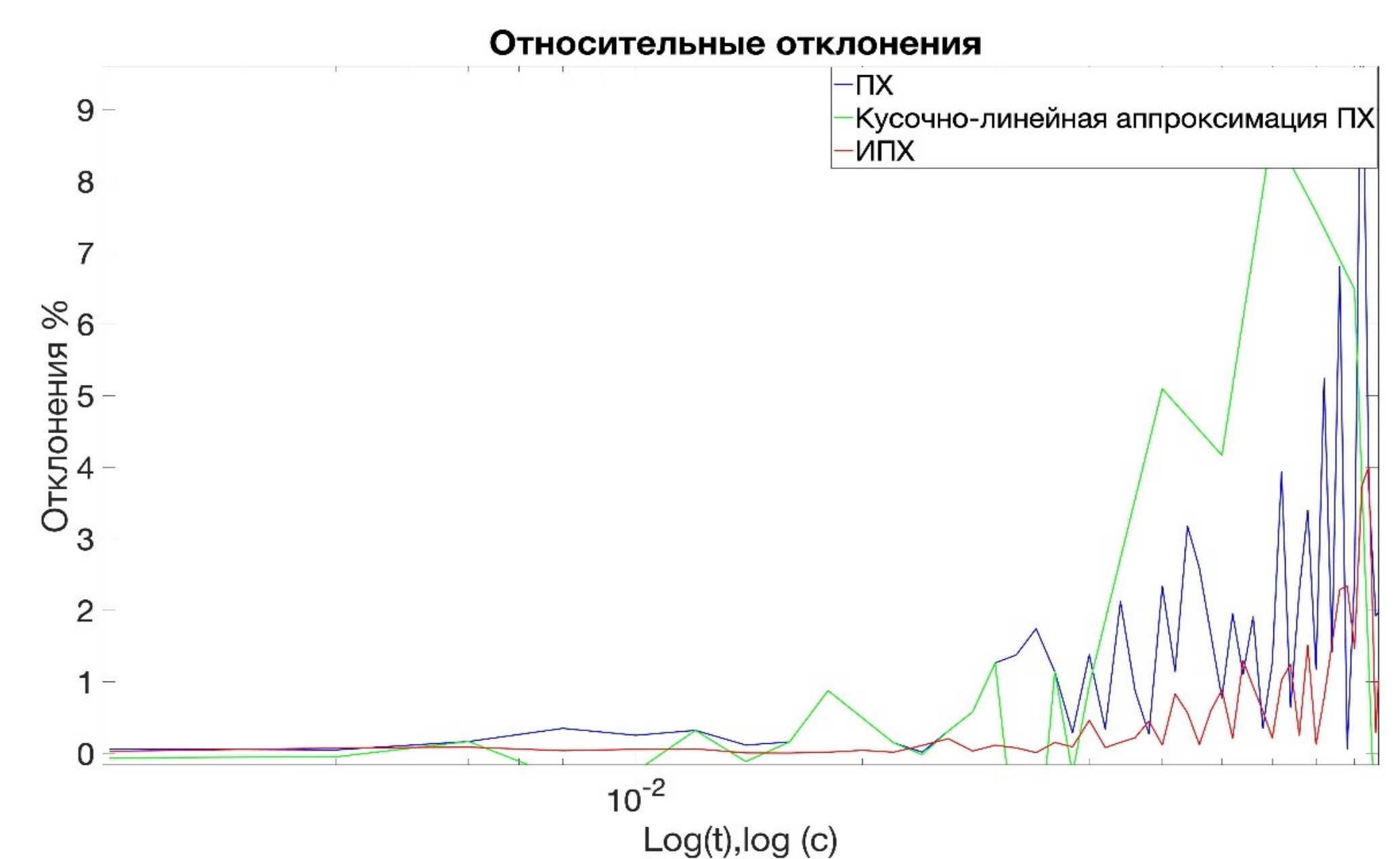
где $\alpha_l^k = \left(\frac{k-L_{l-1}}{L_l-L_{l-1}} \right), \beta_l^k = \left(\frac{k-L_{l+1}}{L_{l+1}-L_l} \right)$

Это выражение дает основу для алгоритма модификации матрицы М, при которой происходит расчет линейных комбинаций столбцов с коэффициентами α и β .

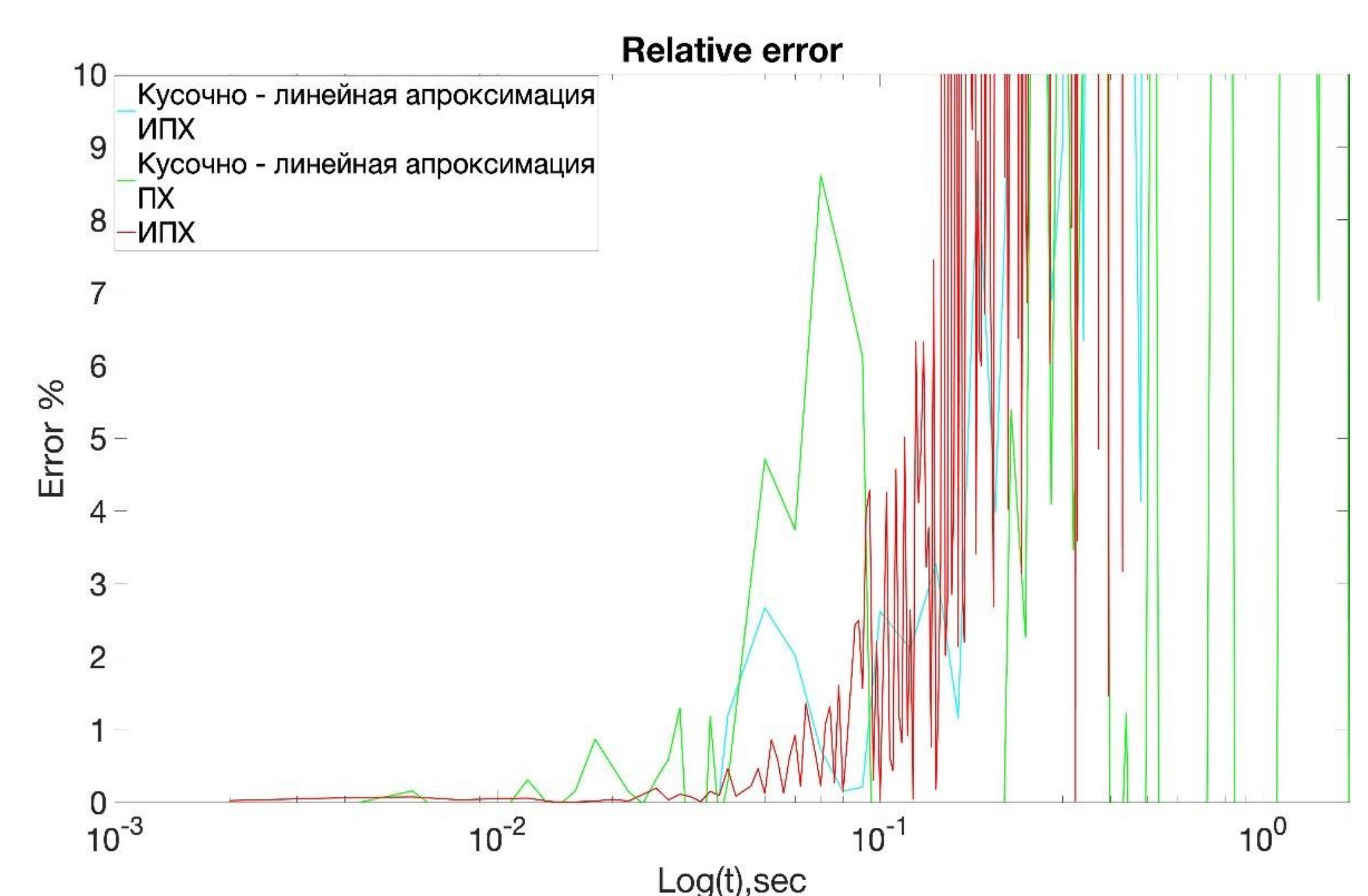
4. Результаты численного эксперимента



Результаты реконструкции кривых по синтетическим зашумленным данным в режиме накопления (верхнее семейство графиков) и ШПС (нижнее семейство графиков)



Относительные погрешности восстановленных кривых: ПХ в режиме накопления (синяя), Кусочно-линейная аппроксимация накопленной ПХ (зеленая) и ИПХ, полученная решением уравнения свертки по ШПС-рядам без регуляризации (коричневая)



Относительные погрешности восстановленных кривых: Кусочно-линейная аппроксимация накопленной ПХ (зеленая) и ИПХ, полученная решением уравнения свертки по ШПС-рядам с кусочно-линейной аппроксимацией решения (голубая) и без регуляризации (коричневая)

Из графиков погрешности видно, что режим ШПС (без регуляризации) имеет преимущества перед накоплением на временах до 0,1 секунды, а применение кусочно-линейной аппроксимации ИПХ обеспечивает дальнейшее улучшение результата на временах от 0,1 до 1 секунды (голубая кривая идет ниже остальных). Для количественного анализа достигаемого помехоподавления были введены коэффициенты α – коэффициент отклонения ИПХ от истинного решения на временах до 1 с. β – коэффициент отклонения ИПХ, полученной с использованием кусочно-линейной аппроксимации, от истинного решения на временах до 1 с.

В анализ включались времена до 1 с, поскольку для более поздних времен погрешность выходит за рамки 10 %, что заведомо выше приемлемого уровня. Расчеты были проведены для трех геоэлектрических моделей.

Модели	α	β
1	3.9375	2.0582
2	3.7687	2.0559
3	4.1176	2.0035

6. Выводы

В работе рассмотрена методика зондирования становлением поля с использованием морской буксируемой диполь-дипольной измерительной установки на основе псевдослучайных последовательностей импульсов тока (ШПС). Проведено моделирование временных рядов, имитирующих измеряемые разности потенциалов в геоэлектрических условиях шельфа Арктики в режиме ШПС. К этим данным применен математический аппарат восстановления импульсной переходной характеристики на основе решения уравнения свертки методом наименьших квадратов. Применялась регуляризация решения в рамках кусочно - постоянной и кусочно-линейной аппроксимации ИПХ.

Результаты тестирования на синтетических зашумленных данных показывают его преимущества перед традиционно-применяемым режимом накопления. Показано, что в области “средних” времен становления (порядка 0.1 с) относительное расхождение с истинными кривыми в режиме накопления может достигать до 40%, в то время как при использовании режима ШПС оно не превышает 10 %.

Реконструкция ИПХ с применением кусочно-линейной аппроксимации обеспечивает наилучшее отношение сигнал шум по сравнению с другими методами регуляризации и классическим методом накопления. Удалось продемонстрировать , что в области времен от 2 мс до 1 с отношение сигнал/ шум возросло примерно 2 раза при кусочно-линейной аппроксимации ШПС по сравнению с исходным вариантом ШПС-обработки.

Полученные результаты определяют предпосылки для внедрения ШПС технологии в практическое использование для проведения экспедиций на Арктическом шельфе.

Алексеев Д.А., Гончаров А.А., Т.С. Калинина, А.О. Плискс. Усовершенствование технологии импульсного электромагнитного зондирования на основе кодовых последовательностей импульсов тока для решения задач геологоразведки на Арктическом шельфе // Тезисы конференции MARESEDU-2019, Москва, 2019
Светов Б.С., Алексеев Д.А., Агеев В.В., Каринский С.Д., Яковлев А.Г. Применение шумоподобных сигналов в зондированиях становлением поля // Геофизика. 2012. No 1. С. 52-60.
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. Vol. 45, No. 8. 1980; P. 1276- 1296.
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 Kohn. 1999
Koshurnikov, A.V. Tumskoy, V. E., Shakhova, N. E., Sergienko, V. I., Dudarev, A. Yu., Gunar, O. V., Pushkarev, P. Yu., Semiletov, I. P. Koshurnikov, A. A. (2016), The first ever application of electromagnetic sounding for mapping the submarine permafrost table on the Laptev Sea, Dokl. Earth Sc. 469, 860-863.
Piskunova E. A., Palshin N. A., and Yakovlev D. V. Electrical conductivity features of the Arctic shelf permafrost and electromagnetic technologies for their studies // Russian journal of Earth sciences, 2018, Vol. 18, E55001, doi:10.2205/2018ES000628, 2018