

## ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34.016

**Сравнительный анализ эффективности деконволюции Винера – Левинсона и преобразования Радона для подавления реверберационных помех в условиях мелководных акваторий****С.К. Карякин<sup>a, b</sup>, А.А. Помосова<sup>a, b</sup>, И.Т. Ложкин<sup>a</sup>, К.К. Малиновский<sup>a</sup>,  
Е.В. Мифтахутдинова<sup>a</sup>, Е.С. Худояр<sup>b</sup>**<sup>a</sup> ПАО Пермнефтегеофизика

614090, Пермь, ул. Лодыгина, 34. E-mail: sem2714@gmail.com

<sup>b</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет

614068, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: elizavetahudoar@gmail.com

*(Статья поступила в редакцию 21.09.2025 г.)*

Проведено исследование, связанное с подавлением интенсивных реверберационных помех при наземных сейсмических работах 3D МОВ ОГТ в условиях развитой гидрографической сети. На примере площади с развитой речной сетью выполнен сравнительный анализ двух подходов к подавлению помех: предсказывающей деконволюции Винера – Левинсона и высокоразрешающего преобразования Радона. Показано, что пространственная нестационарность волнового поля в речных условиях ограничивает эффективность предсказывающей деконволюции. Предложена двухэтапная схема обработки высокоразрешающего преобразования Радона с адаптивной параметризацией границ разделения сигнал/помеха. Результаты визуального анализа демонстрируют существенное ослабление реверберационного фона при сохранении полезных волновых компонент.

Ключевые слова: *реверберация, мелководная акватория, предсказывающая деконволюция, преобразование Радона.*

DOI: 10.17072/psu.geol. 24.4.342

**Введение**

Сейсмические исследования в районах с развитой гидрографической сетью сталкиваются с фундаментальной проблемой – возникновением интенсивных реверберационных помех, обусловленных многократными переотражениями сейсмических волн в водной толще. Эти когерентные помехи, характеризующиеся строгой периодичностью, формируют на сейсмограммах маскирующий фон, существенно снижающий соотношение сигнал/шум и затрудняющий идентификацию целевых геологических объектов. В случае мелководных рек с изменяющейся морфометрией дна проблема усугубляется

пространственной нестационарностью параметров реверберации. Эффект реверберации принципиально отличается от классических кратных волн своей физической природой и пространственно-временными характеристиками. Если кратные отражения обычно связаны с глубокозалегающими рефлекторами, то реверберации формируются в приповерхностном слое, представляя собой волновое поле, между высокоимпедансными границами раздела. Следует отметить, что в наземной взрывной сейморазведке существующий набор методик для подавления ревербераций раскрыт гораздо меньше, чем для условий морской среды, характеризующейся высокой стационарностью и регулярностью

© Карякин С.К., Помосова А.А., Ложкин И.Т., Малиновский К.К., Мифтахутдинова Е.В., Худояр Е.С., 2025



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

волноводных границ. Данное исследование ставит своей целью восполнить этот методический пробел на примере детального анализа конкретного случая с последующим сравнением эффективности различных подходов к обработке.

### Объект исследования

В административном отношении площадь работ расположена на территории РФ, а именно Пермского края. На участке проведены сейсмические работы МОВ ОГТ-3D по методике крестовых наблюдений. Территория района работ характеризуется развитой речной сетью – 61 %, заболоченность развито локально: в поймах долин рек, ручьев и на низких седловинах, составляет порядка 15 % от площади проектных работ.

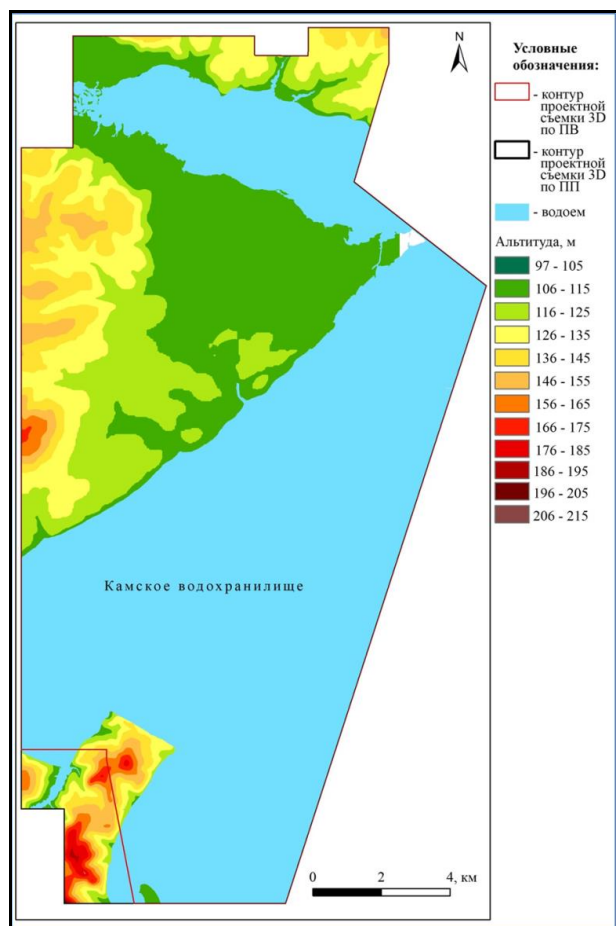


Рис. 1. Рельеф местности

### Сейсмогеологическая характеристика разреза

По условиям возбуждения и приема упругих колебаний проектная съемка 3D

расположена во II (благоприятной) сейсмогеологической зоне (СГЗ), характеризующейся хорошими условиями для возбуждения, прохождения и приема сейсмических колебаний, достаточными для полноты исследования геологического разреза, искажение волновых полей для данной территории несвойственно. Поверхностные условия определяются строением верхней части разреза (составом пород и выдержанностью верхней части разреза; характером зоны малых скоростей; положением водоносных горизонтов; рельефом местности), от них зависят условия возбуждения и приема сейсмических колебаний.

Поверхностные условия исследуемой территории характеризуются равнинно-холмистым рельефом Предуральской низменности, расчлененной речными долинами, со слабыми и умеренными поднятиями. К поверхностным условиям, определяющим строение верхней части разреза (ВЧР), относят зоны малых (ЗМС) и пониженных (ЗПС) скоростей, их мощность и изменчивость являются основными факторами, влияющими на качество полевого материала, так как именно здесь происходит сильное поглощение полезных волн.

Зону малых скоростей (первые десятки метров) образуют породы четвертичного возраста, зону пониженных скоростей – преимущественно терригенные отложения казанского яруса. Породы представлены песчаниками с линзами конгломератов, глинами, алевролитами. Общие сведения о строении верхней части разреза (ВЧР), полученные по данным СК, МСК, представлены в табл. 1.

### Полевые работы

Полевые работы осуществлялись с декабря по март. Буровые работы проводились в сухопутной, транзитной и мелководной зоне.

- Шаг между линиями ПП – 250 м;
- Шаг между ПП – 25 м;
- Шаг между линиями ПВ – 250 м;
- Шаг между ПВ – 50 м;
- Сеймостанция Sercel 508 XT;
- Активных каналов – 1960 (14×140);
- Кратность по ОГТ составила 49;
- Длительность записи – 3 сек;
- Шаг дискретизации – 1 мс;

– Источник возбуждения сигналов – – 0,09 %, вес заряда на 1 ф.н. 0,6 кг; группа взрывы: одиночные скв. Н = 8 м – 39,33 %, из 3-х скв. (3×3 м) – 0,01 %, вес заряда на 1 вес заряда – 0,6 кг; группа из 2-х скв. (2×5 м) ф.н. 0,9 кг.

**Таблица 1.** Сведения о строении верхней части разреза (ВЧР)

№ слоя	Толща, слой	Возраст пород	Пределы изменения параметров		Литологический состав
			мощность, м	скорость, м/с	
1	водораздел	Q	10–20	600–1000	Разрез неустойчив. Глины пластичные с прослоями песка мелкозернистого и гравия
	ЗМС		10–30		Глина песчанистая, песок с галькой и гравием
2	ЗПС	Q-P <sub>2</sub> bl	10–80	1200–2000	Слои по литологии разделяются слабо. Глины коричневые с прослоями аргиллитов, песчаники с редкими прослоями известняков, линзы гравелитов и конгломератов
3	ЗПС	P <sub>2</sub> bl	40–70	2000–2300	
4	ЗПС	P <sub>2</sub> bl-P <sub>1</sub> šš	>50	2700–3050	Распространен повсеместно. Глины коричнево-красные известковистые, песчаники, алевролиты, прослой известняка и гипса

В пределах акватории Камского водохранилища одиночные скважины глубиной погружения заряда в грунт независимо от толщины водного слоя – 4,0–6,0 м, максимальный вес заряда 0,150 кг – 60,57 %.

Во льду ледобурами бурились лунки, через которые опускался буровой инструмент до дна водоема. Замер толщины льда производился мерной линейкой, а водного слоя – эхолотом или специально размеченным шнуром с закрепленным на конце грузом.

Скважины глубиной 4–6 м бурились полыми шнеками диаметром 80 мм в придонной части. На акватории реки зарядка скважин осуществлялась после бурения через полый шнек. После погружения заряда на забой шнеки поднимались.

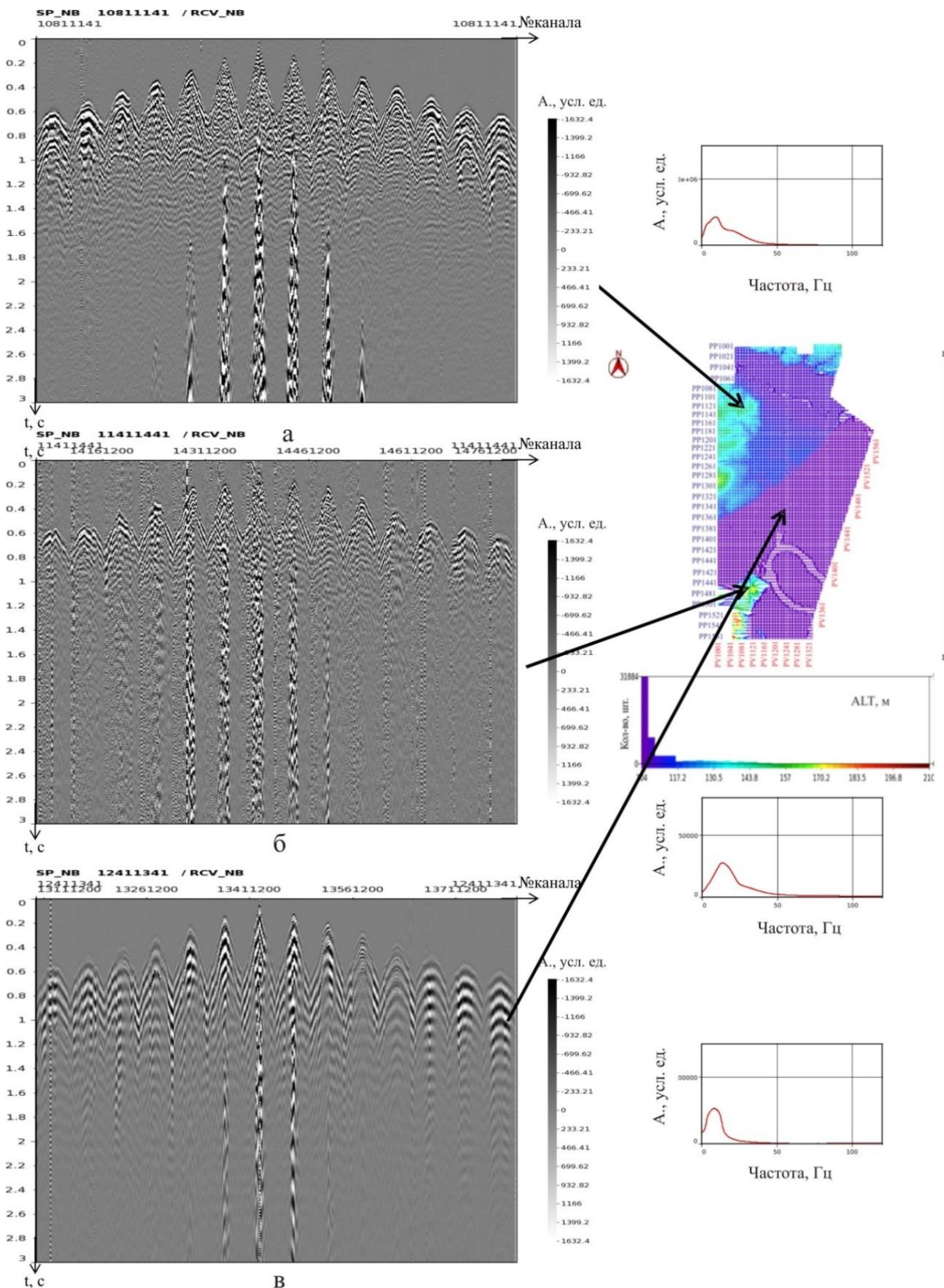
### Качество сейсмических материалов

Большинство сейсмограмм имеют удовлетворительное качество. В зонах акватории наблюдаются участки с полным отсутствием материала, сейсмограммы забиты реверберациями. В сухопутной части площади на большинстве сейсмограмм можно проследить устойчивое поведение целевых гори-

зонтов. Однако следует выделить сейсмограмму «в» (рис. 2), расположенную на акватории. Материал на данной сейсмограмме перекрывается реверберацией. Практически весь материал в акватории характеризуется преобладанием интенсивных реверберационных помех, что приводит к значительному ухудшению качества данных. Сплошной маскирующий фон, создаваемый этими помехами, практически полностью подавляет полезный сигнал, делая корректный кинематический и динамический анализ невозможным на значительной части акватории.

### Реверберация

Реверберационные помехи в наземной сейсморазведке представляют собой класс регулярных кратных волн, формирующихся в результате многократных переотражений сейсмической энергии в приповерхностном интерференционном слое. Они локализируются в зоне малых скоростей (ЗМС). Реверберация зависит от места, где производится возбуждение и, вероятно, от характера пород дна.



**Рис. 2.** Сейсмограммы ОТВ и их АЧХ с разных участков площади: а – сейсмограмма ОТВ № 10811141 (суша); б – сейсмограмма ОТВ № 11411441 (возвышенность); в – сейсмограмма ОТВ № 12411341 (низменность, водохранилище)

Проведенная количественная оценка реверберационных помех (КОР) выявила их значительную пространственную неоднородность в пределах площади работ. Вариация КОР прослеживается между отдельными линиями приема. Эта пространственная изменчивость напрямую коррелирует с неоднородностью строения и физическими свойствами верхней части разреза (ВЧР) донных отложений, которые выступают в качестве нижней границы реверберационного волновода.

Можно предположить, что ключевым фактором, контролирующим как интенсивность реверберации, так и ее частотный состав, является не просто факт наличия аллювиальных отложений, а их детальные литолого-акустические характеристики: мощность, гранулометрический состав, пористость, а также латеральная и вертикальная однородность этих параметров. Именно изменчивостью этих свойств, по-видимому, объясняется наблюдаемое разнообразие частотного состава отражений в слое «дно-лед».

Примером описанной неоднородности являются сейсмограммы, на которых фиксируется эффект «просвечивания» (проявления полезного сигнала), когда средне- и высокочастотные полезные оси синфазности, соответствующие глубинным отражающим границам, отчетливо проступают сквозь маскирующий низкочастотный фон ревербераций. Пространственное распределение этого явления весьма просто объяснить: в северо-западной и западной частях сейсмический материал менее затронут проявлением реверберационных помех. В противоположность этому, юго-восточный и северо-восточный секторы участка в значительной степени затронуты реверберацией, что обусловлено углубления водоема и, вероятнее всего, указывает на более сложное строение ВЧР, а также большую мощность слабо консолидированных аллювиальных отложений в этих зонах.

### **Анализ эффективности предсказывающей деконволюции Винера – Левинсона при подавлении ревербераций**

Теоретической основой метода является подход Винера – Левинсона, направленный

на минимизацию среднеквадратичной ошибки предсказания регулярной составляющей сигнала. Особенностью алгоритма является параметризация, учитывающая пространственную неоднородность волнового поля. Ключевым аспектом реализации выступает введение параметра  $gap$ , характеризующего латеральные вариации в системе наблюдений. Алгоритмическая структура модуля базируется на следующих принципах:

- лучевое моделирование распространения сейсмических волн составляет основу параметризации. Для каждого луча, описываемого параметром  $p$ , вычисляется предельное время пробега в заданной геометрической конфигурации источника и приемника;

- геометрическая составляющая алгоритма учитывает пространственную нерегулярность расстановки через параметр  $gap$ , количественно характеризующий латеральные неоднородности системы наблюдений. Данный параметр непосредственно определяет амплитуду и форму кинематической поправки.

Функциональная зависимость поправки описывается выражением:

$$GAP(p) = \max[dt, gap \times \sqrt{(1,0 - p^2 \times v^2)}], \quad (1)$$

где  $GAP(p)$  – результирующая поправка для луча с параметром  $p$ ;  $dt$  – базовая временная задержка, определяемая шагом дискретизации;  $gap$  – параметр, характеризующий пространственную неоднородность системы наблюдений;  $p$  – ray parameter, определяющий направление распространения сейсмической волны;  $v$  – эффективная скорость распространения волн в приповерхностной зоне.

Применение оператора  $\max[]$  обеспечивает адаптивный характер поправки, гарантируя учет наихудшего сценария волновых искажений. Данный формализм позволяет эффективно компенсировать реверберационные помехи, возникающие из-за многократных переотражений в приповерхностном слое.

Учитывая пространственную нестационарность реверберационных помех, ключевой задачей являлась адаптация параметров предсказывающей деконволюции, работающей в режиме независимой обработки трасс. Стратегия поэтапной параметризации включала итерационный подбор значений  $GAP$  на основе анализа автокорреляционных функций и спектральных характеристик, выпол-

ненных для репрезентативных трасс из различных частей разреза, характеризующихся разной интенсивностью проявления помех. Такой подход позволил определить оптимальные параметры, которые затем применялись ко всему массиву данных с учетом индивидуальных особенностей каждой трассы.

Параметры, выбранные для предсказывающей деконволюции:

- *TIMEGATE*
- *STIME* = 400;
- *ETIME* = 1800;
- *VALUES* = 300;
- *TWINDC*
- *STIME* = 1800;
- *ETIME* = 2800;
- *PARAMA*
- *LENGTH* = 300;
- *PARAMF*
- *LENGTH* = 240;
- *GAP* = 60.

Несмотря на теоретическую обоснованность применяемого алгоритма и тщательно разработанную стратегию параметризации, практическая реализация метода предсказывающей деконволюции не позволила достичь удовлетворительных результатов в подавлении реверберационных помех. Более детальный анализ выявил, что основной причиной недостаточной эффективности метода стала принципиальная неспособность алгоритма учесть сложную пространственно-временную структуру реверберационного волнового поля. Нелинейный характер изменения параметров реверберации в пределах даже отдельных сейсмических трасс существенно ограничил применимость линейного предсказания, лежащего в основе алгоритма Винера – Левинсона.

Сравнительный анализ автокорреляционных функций до (рис. 3–4) и после (рис. 5–6) обработки продемонстрировал, что хотя алгоритм подавлял регулярные компоненты помех с периодичностью, соответствующей параметру *GAP*, он оказался неэффективен против нерегулярных и многомодовых ревербераций, характерных для сложно построенных донных отложений.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о принципиальных ограни-

чениях применения предсказывающей деконволюции Винера – Левинсона в условиях сильной пространственной нестационарности реверберационных помех. В условиях мелководных рек с резко изменяющейся морфометрией дна и неоднородными физическими свойствами донных отложений, предположение о стационарности оказывается некорректным. Быстрая пространственная изменчивость параметров реверберационного волновода приводит к необходимости непрерывной адаптации параметров деконволюции, что противоречит фундаментальным принципам классического алгоритма Винера – Левинсона.

### **Высокоразрешающее подавление волн-помех в области Радона (наклонов)**

Теоретической основой метода выступает параметрическое разложение волнового поля на совокупность параболических или линейных траекторий, направленное на сепарацию полезных волн и помех в области  $\tau$ - $\rho$ .

Особенностью алгоритма является применение метода наименьших квадратов с регуляризацией, обеспечивающей высокую разрешающую способность и подавление пространственного наложения. Ключевым аспектом реализации выступает введение адаптивных пороговых параметров, характеризующих границу разделения между полезным сигналом и помехой в пространстве кривизн или наклонов. Было выполнено 2 итерации в области Радона, первая за пункты взрыва (SP), вторая на пункты приема (PP).

Для каждой параболы, описываемой параметром  $p$ , вычисляется временная задержка относительно нулевого удаления в соответствии с заданным диапазоном *DTMIN-DTMAX* и шагом *DDT* на опорном удалении *XRM*. Также в основе метода лежит пространственно-частотная декомпозиция данных, которая выполняется в скользящих окнах, задаваемых параметрами *NC* (число трасс в пространственном окне) и *NCT* (длина временного окна в мс). Это позволяет локализовать обработку и адаптировать алгоритм к пространственно-временной нестационарности волнового поля.

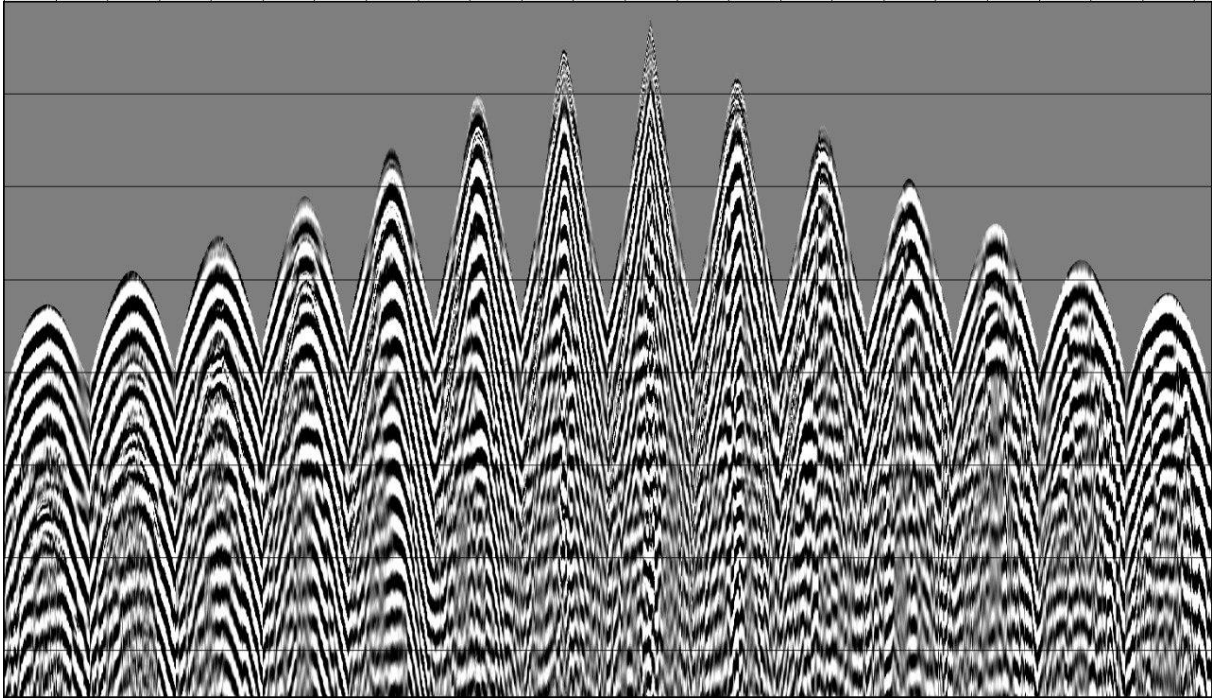


Рис. 3. Фрагмент сейсмограммы ОПВ № 10711279 до применения предсказывающей деконволюции

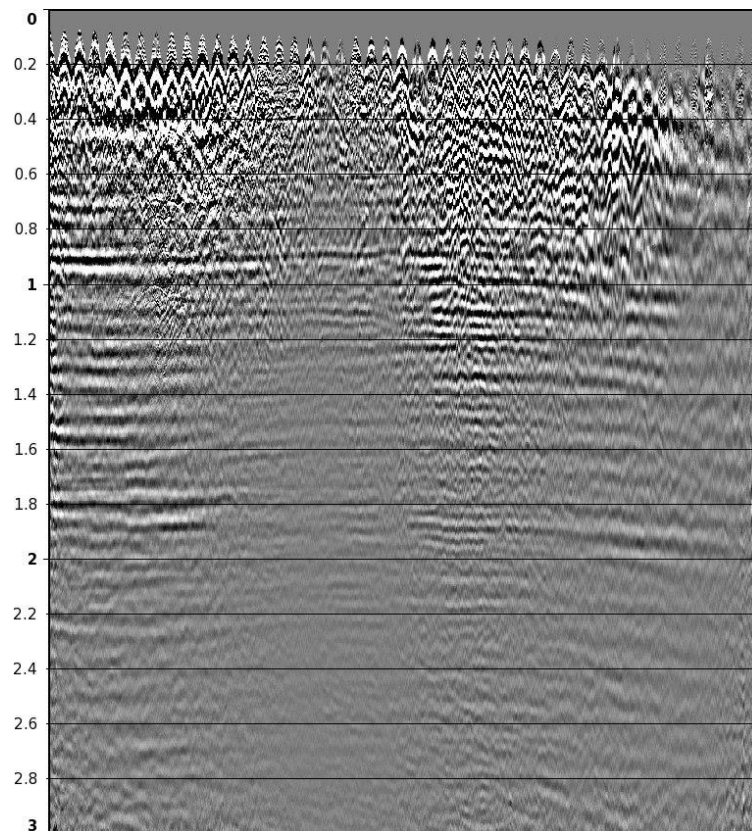


Рис. 4. Временной разрез до применения предсказывающей деконволюции

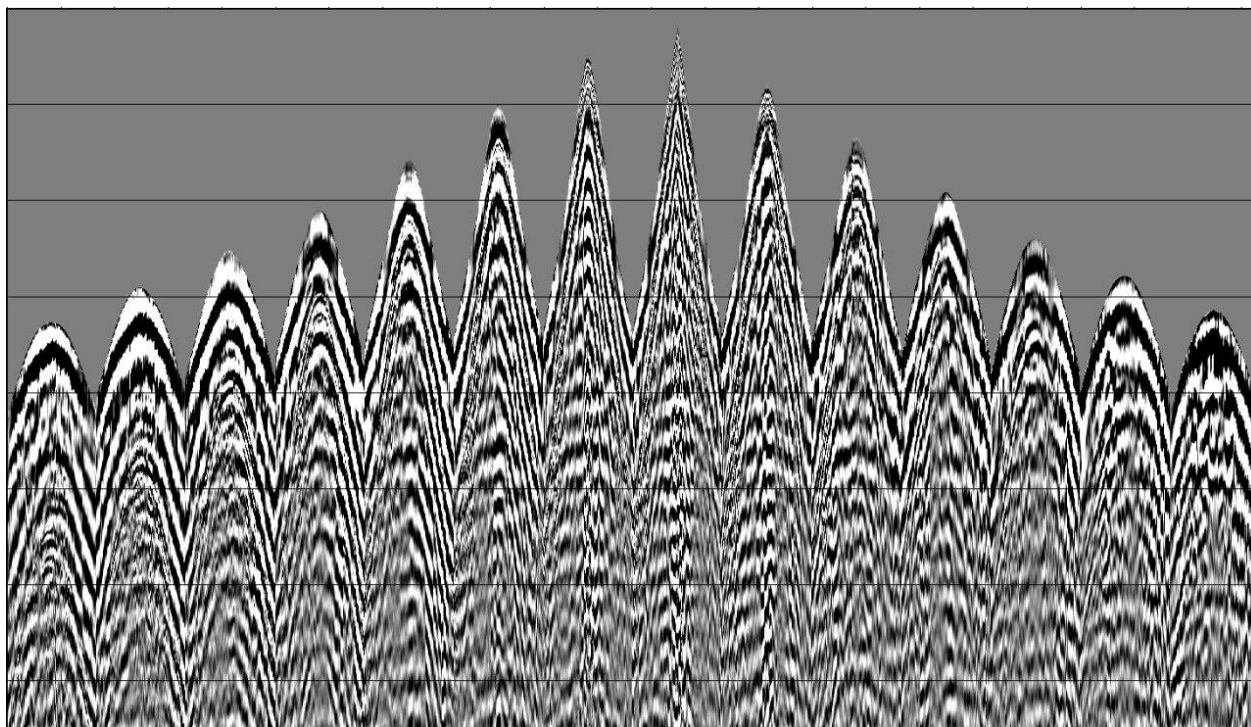


Рис. 5. Фрагмент сейсмограммы ОПВ № 10711279 в результате применения предсказывающей деконволюции

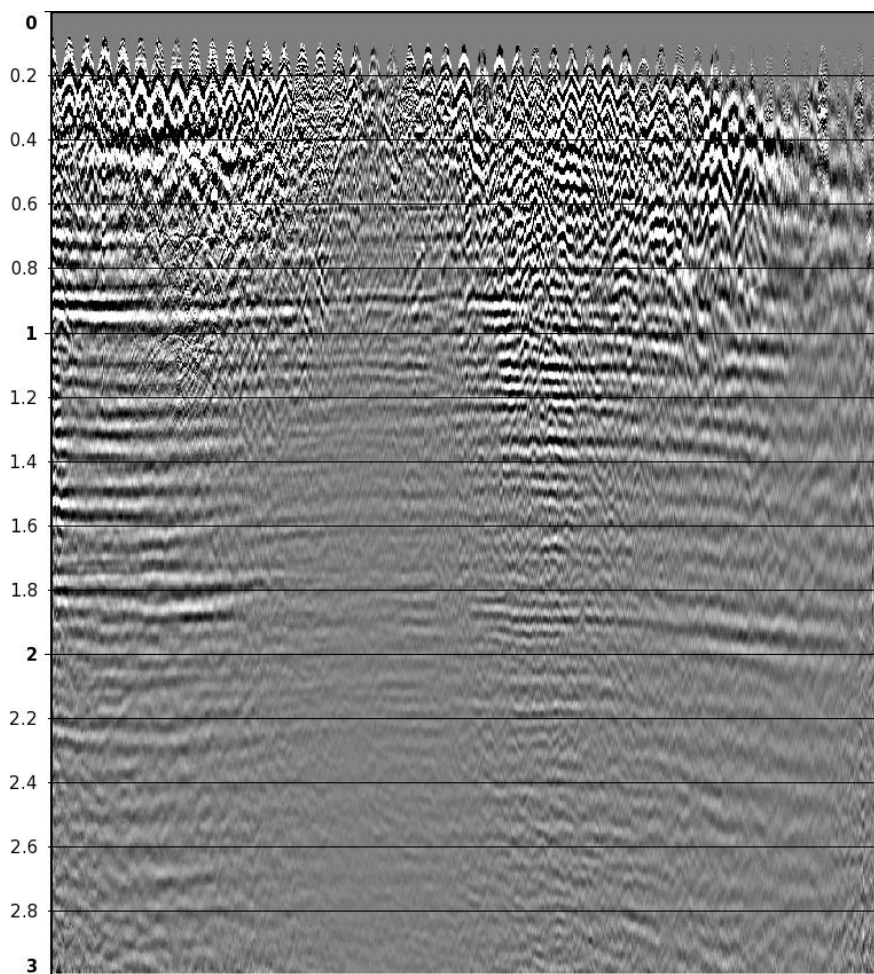


Рис. 6. Временной разрез в результате применения предсказывающей деконволюции

Первая итерация разделения полезных волн и помех основана на применении порогового критерия с постоянными временными границами. В заданной конфигурации полезный сигнал определяется как события, попадающие в диапазон кинематических параметров от  $-500$  до  $+500$  мс на опорном удалении  $2600$  м, тогда как компоненты волнового поля за пределами указанного диапазона интерпретируются как линейные помехи и подлежат подавлению (рис. 7).

Вторая итерация включала итерационный подбор значений DTMIN, DTMAX, DDT, а также граничных параметров на основе анализа кинематических характеристик и спектрального содержания доминирующих помех. Такой подход позволил определить оптимальные параметры, которые затем применялись ко всему массиву данных в рамках последовательной обработки, что часто улучшало конечные результаты (рис. 8).

Параметры использования волн-помех в наклонной области определены как:

- $T=400, DTCUTS=-390, DTCUTE=390,$
- $T=750, DTCUTS=-350, DTCUTE=350,$
- $T=910, DTCUTS=-600, DTCUTE=600,$

- $T=1500, DTCUTS=-530, DTCUTE=530,$
- $T=1700, DTCUTS=-530, DTCUTE=530,$
- $T=2300, DTCUTS=-500, DTCUTE=500;$
- Число трасс в пространственном окне (NC) – 10;

– Длина временного окна в мс – 300;

–  $T_{ар}$  – 300.

Проведенное двухэтапное преобразование Радона продемонстрировало высокую эффективность подавления реверберационных помех в аквальных условиях. Последовательная обработка в направлениях пунктов взрыва и приема позволила дифференцированно воздействовать на различные компоненты волн-помех, проявляющих пространственную нестационарность.

Важнейшим результатом обработки стало выявление полезных волновых компонент, которые ранее были полностью маскированы интенсивным реверберационным фоном. В результате применения методики достигнуто существенное улучшение соотношения сигнал/помеха за счет целенаправленного подавления реверберационных компонент при сохранении полезных волновых полей (рис. 9).

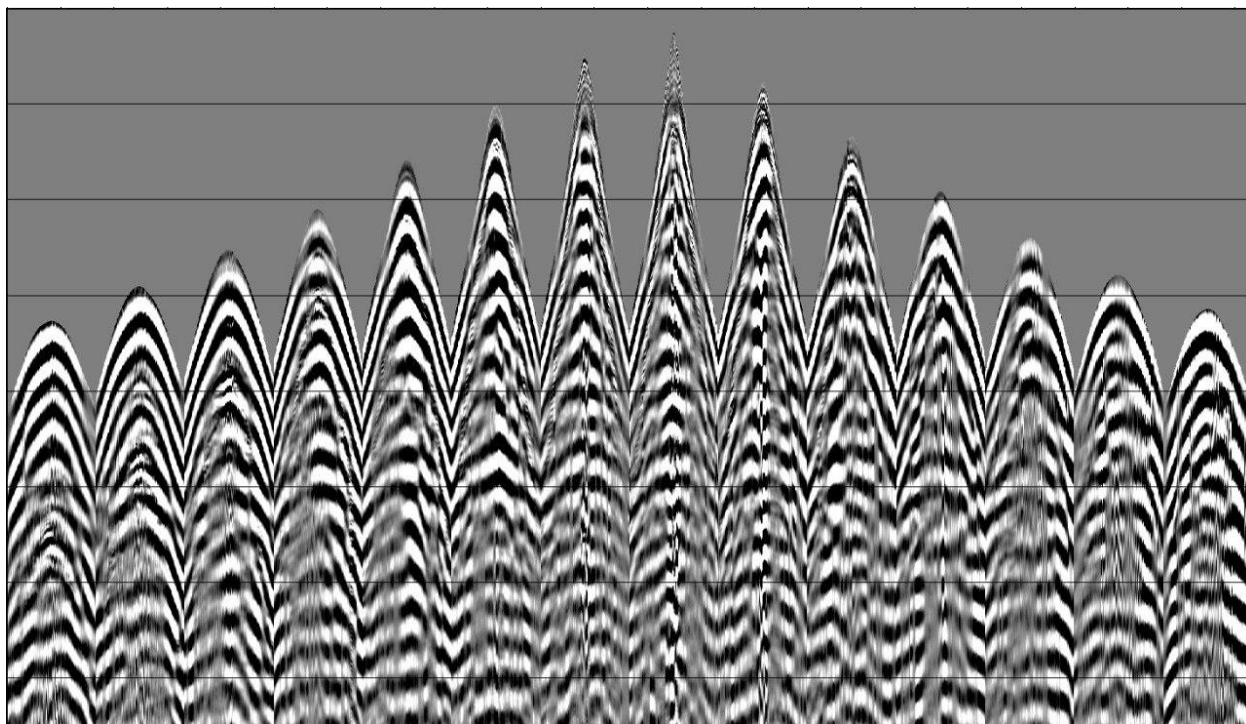


Рис. 7. Фрагмент сейсмограммы ОПВ № 10711279 после вычитания линейных помех (1 итерация)

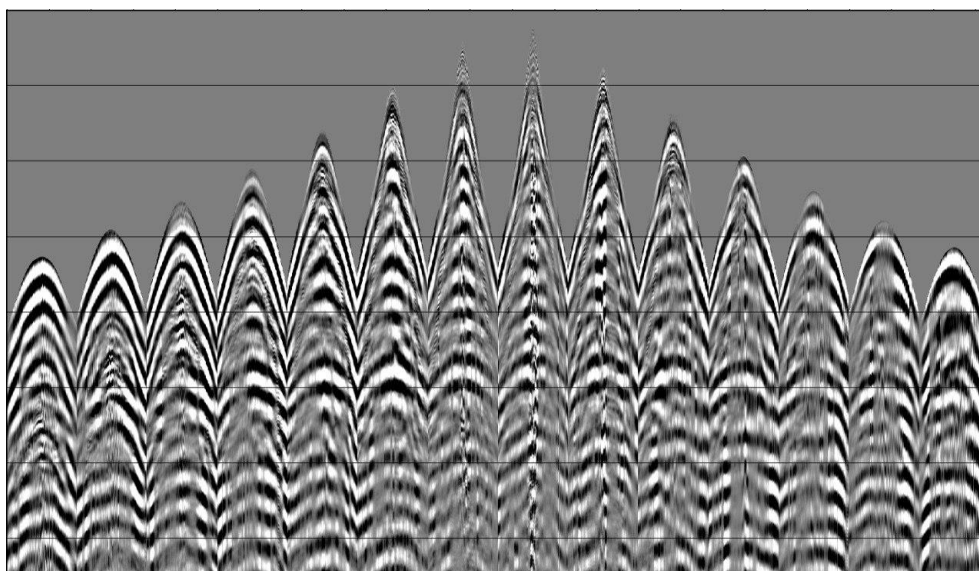


Рис. 8. Фрагмент сейсмограммы ОПП № 10711279 после вычитания линейных помех (2 итерация)

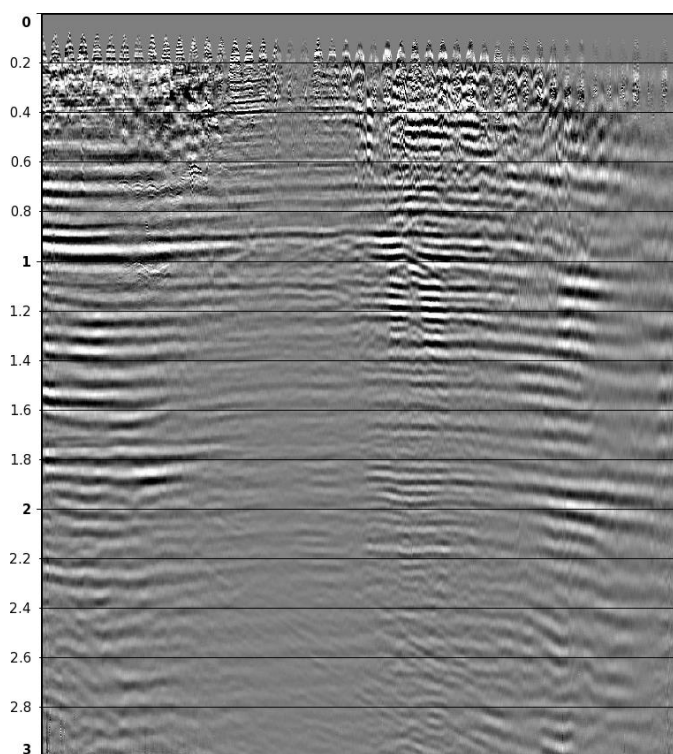


Рис. 9. Временной разрез в результате применения двух итераций высокоразрешающего подавления волн-помех в области Радона

Проведенное исследование подтвердило фундаментальные различия в природе реверберационных помех в условиях наземной взрывной сейсморазведки с развитой гидрографической сетью по сравнению с классическими морскими условиями. Сравнительный анализ алгоритмов обработки, наглядно продемонстрированный на временных разрезах, выявил принци-

пальные ограничения предсказывающей деконволюции Винера – Левинсона. Визуальный анализ разрезов подтвердил, что применение данного метода не позволило достичь удовлетворительных результатов – реверберационные помехи сохранили свою интенсивность, а полезный сигнал остался маскированным, особенно в верхней части разреза.

Напротив, двухэтапная обработка с использованием высокоразрешающего преобразования Радона продемонстрировала высокую эффективность, что наглядно отражено на сравнительных временных разрезах. Последовательное применение алгоритма в направлениях пунктов взрыва и приема с адаптивной параметризацией границ разделения сигнал/помеха позволило дифференцированно подавить различные компоненты реверберационных помех. Стоит отметить, что использование преобразования Радона, в отличие от предсказывающей деконволюции, также вычитает линейные волны помехи. Сравнение временных разрезов до и после обработки убедительно показывает значительное ослабление.

Полученные результаты свидетельствуют о неэффективности предсказывающей де-

конволюции для речных акваторий и перспективности применения последовательного преобразования Радона для обработки сейсмических данных в сложных гидрогеологических условиях наземных съемок.

#### Библиографический список

- Колесов С.В., Кузин А.М., Зимовский А.В., Щедров В.А. Особенности результатов морских сейсмических работ в Карском море // Серийное издание: Технологии сейсморазведки. 2010. Вып. 4. С. 77–85. EDN: NDHMGN
- Салин Б.М., Баханов В.В., Кемарская О.Н., Салина М.Б. Исследование спектральных характеристик реверберации в мелком море при разнесении в пространстве точек излучения и приема сигнала // Акустический журнал. 2025. Т. 71, № 1. С. 118–128. DOI: 10.31857/S0320791925010125 EDN: BQDNEB

## Comparative Effectiveness Analysis of Wiener – Levinson Deconvolution and Radon Transform for Suppressing the Reverberation Noise in Shallow Water Environments

S.K. Karyakin<sup>a,b</sup>, A.A. Pomosova<sup>a,b</sup>, I.T. Lozhkin<sup>a</sup>, K.K. Malinovsky<sup>a</sup>, E.V. Miftakhutdinova<sup>a</sup>, E.S. Khudoyar<sup>b</sup>

<sup>a</sup> PJSC Permneftegeofizika, 34 Lodygina Str., Perm 614090, Russia

E-mail: sem2714@gmail.com

<sup>b</sup> Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614068, Russia

E-mail: elizavetahudoar@gmail.com

A study of the suppression of intense reverberation noise during onshore 3D CMP seismic surveys in areas with a developed hydrographic network was conducted. Using as an example an area with extensive river network, a comparative analysis of two noise suppression approaches was performed: predictive Wiener-Levinson deconvolution and high-resolution Radon transform. It is shown that the spatial non-stationarity of the waveguide in river conditions limits the effectiveness of predictive deconvolution. A two-step processing scheme for the high-resolution Radon transform with adaptive parameterization of the signal/noise separation boundaries is proposed. The results of visual analysis demonstrate a significant attenuation of the reverberation noise while preserving useful wave components.

Keywords: *reverberation; shallow water area; predictive deconvolution; Radon transform*

#### Reference

- Salin B.M., Bahanov V.V., Kemarskaya O.N., Salina M.B. 2025. Issledovanie spektralnykh kharakteristik reverberatsii v melkom more pri raznesenii v prostranstve toчек izlucheniya i priema signala [Study of the spectral characteristics of reverberation in shallow seas with spatial separation of signal source and receiving points]. Akusticheskiy zhurnal. 71(1):118-128 (in Russian)
- Kolesov S.V., Kuzin A.M., Zimovsky A.V., Shchedrov V.A. 2010. Osobennosti rezultatov morskikh seysmicheskikh rabot v Karskom more [Features of the results of marine seismic surveys in the Kara Sea]. Tekhnologii seysmorazvedki. 4:77-85. (in Russian)