



РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ПОВЕРХНОСТНО-СОГЛАСОВАННОЙ КОРРЕКЦИИ АМПЛИТУД

Р.С. Кушнарев^{1,2}, Н.А. Горевачев^{1,2}, Г.М. Митрофанов^{1,2,3}

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия*

³*Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20, Россия
e-mail: R.kushnarev@g.nsu.ru*

Рассматриваются особенности создания процедуры поверхностно-согласованной коррекции амплитуд с применением подходов факторной декомпозиции. Демонстрируется возможность изменения используемых моделей корректировки, что позволяет выбирать оптимальные модели, обладающие наибольшим соответствием обрабатываемому сейсмическому материалу в рамках решаемой задачи. Исследовано влияние значений энергии, относящихся к различным временным интервалам, содержащим сигналы, на качество получаемых оценок факторов. Тестирование процедуры выполнялось на модельных и реальных данных. Оно продемонстрировало возможности разработанной процедуры и соответствие получаемых ею результатов существующим программным продуктам мирового уровня.

Коррекция амплитуд сейсмических сигналов, факторная декомпозиция, качество получаемых оценок

TESTING PROCESSING ALGORITHMS FOR SEISMIC DATA FROM LABORATORY MODELING

R.S. Kushnarev^{1,2}, N.A. Goreyavchev^{1,2}, G.M. Mitrofanov^{1,2,3}

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,*

³*Novosibirsk State Technical University, K. Marks Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia,
e-mail: R.kushnarev@g.nsu.ru*

The features of creating a procedure for surface-consistent amplitude correction using factors decomposition approaches are considered. The possibility of changing the models used is demonstrated, which makes it possible to choose the optimal models that have the best correspondence to the processed seismic material within the framework of the problem being solved. The effect of energy values related to different time intervals containing signals on the quality of the obtained factor estimates is studied. The procedure was tested on models and real data. It demonstrated the capabilities of the developed procedure and the correspondence of the results obtained by it to existing world-class software products.

Correction of seismic signal amplitudes, factors decomposition, quality of obtained estimates

ВВЕДЕНИЕ

Для корректного изучения свойств целевых горизонтов важным этапом является динамическая обработка сигнала. На этом этапе проводят отделение динамических особенностей сигнала, связанных с целевыми горизонтами, от особенностей его формирования, прохождения через покрывающую среду и

аддитивной помехи. Одной из основных процедур динамической обработки сейсмического сигнала является поверхностно-согласованная коррекция формы записи, включающая и амплитуду [Гольдин и Митрофанов, 1975; Taner, Koehler, 1981].

Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд участвует в различных этапах обработки сейсмических материалов, начиная с предварительной корректировки данных и заканчивая их подготовкой к интерпретационному этапу. Важность коррекции определяется тем, что сейсмический сигнал, содержащий информацию о целевых горизонтах, осложнен различными помехами. Источниками таких помех, в частности, являются неоднородные поверхностные условия проведения сейсморазведочных работ, наличие неоднородностей в верхней части разреза [Давлетханов, 2017].

Разнообразие данных и решаемых задач требует высокой универсальности разрабатываемой процедуры. Она должна выполнять анализ и корректировку исходных трасс на уровне энергетических характеристик, а также анализировать целевые сигналы. При этом при решении различных задач необходимо использовать различные модели обработки с возможностью их адаптации под решаемую задачу и обрабатываемые данные. Указанные требования могут быть выполнены при использовании факторной декомпозиции, которая стала одним из классических подходов для процедур коррекции динамики сейсмических сигналов. Идея факторного представления сформировалась в 70-х годах [Гольдин, Митрофанов, 1973; Taner et al., 1974]. Введенное Гольдиным и Митрофановым в 1972 году факторное представление [Митрофанов, 1972] опиралось на предложенную в 1970 году Гурвичем модель [Гурвич, 1970], представляющую форму отраженного сигнала последовательной сверткой нескольких импульсных характеристик. Эти импульсные характеристики описывают влияние различных областей (область источника, приемника и отражения от границы, пройденный путь) на форму отраженного сигнала. Полное описание подхода дано в монографии [Митрофанов, 2018], а его применение позволило разработать алгоритм поверхностно-согласованной компенсации сейсмических амплитуд. Особенности алгоритма и его реализации изложены в статье [Кушнарев и др., 2021]. Главная сложность состоит в нахождении решения для вырожденной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Одним из способов такого решения является применение итерационных схем, обладающих простотой реализации и сходимостью к одному из решений СЛАУ [Козырев и др., 2003; Долгих, 2010; Давлетханов, 2017]. Нами предлагается другой способ, основанный на переходе к расширенным невырожденным матрицам СЛАУ. Расширение матриц обеспечивается введением дополнительных условий.

Настоящая работа продолжает развитие этих исследований. Основное внимание уделяется вопросам усложнения факторных моделей, используемых в процессе обработки данных. Такое усложнение влечет за собой решение двух значительных проблем. Первая связана с априорной информацией, необходимой для построения расширенных матриц. Вторая определяется объемами и качеством современных сейсмических данных, что усложняет детальный анализ регистрируемых колебаний, требуя его автоматизации. Следовательно, создаваемые процедуры должны обладать набором возможных моделей, позволяющих решать поставленную геофизическую задачу, и критериями, обеспечивающими выбор оптимальной модели.

При разработке процедуры коррекции амплитуд мы стремились учесть обе указанные проблемы. Ниже приводится описание нашего подхода. Тестирование разработанной процедуры осуществлялось на двух видах сейсмических материалов: модельные данные и реальные наблюдения. Во втором случае результаты, полученные с применением процедуры, сравнивались с результатами стандартной обработки сейсмических данных в пакете GEOVATION.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕДУРЫ

Описание алгоритма, положенного в основу разработанной процедуры, приведено в работе [Кушнарев и др., 2021]. Там дана общая модель и схема определения значений факторов посредством решения соответствующей СЛАУ. Придерживаясь изложенной схемы, отметим два важных момента.

Первый момент связан с выбором частных случаев общей модели Гурвича, которая приводится в указанной работе. Таких случаев может быть четыре при реализации классической схемы поверхностно-согласованной коррекции амплитуд. Наиболее простой случай представлен двухфакторной моделью, содержащей факторы источников ($s_i(t)$) и приемников ($r_j(t)$), которые описывают вариации формы сигналов, связанные с неоднородностью условий возбуждения и приема реальных колебаний. Индексы i и j определяют номера источников и приемников в системе наблюдений. Они также однозначно задают географическое положение областей возбуждения и приема сейсмических колебаний.

Именно двухфакторная модель служила основой для различных представлений, включая модельные эксперименты, в предыдущей статье. Несмотря на ее простоту, она может быть использована не только для модельных экспериментов, но и при обработке реальных данных [Taner et al., 1998; Mitrofanov et al., 2021]. Общий вид двухфакторной модели представляется выражением:

$$y_{ij}(t) = S^0(t) * s_i(t) * r_j(t) + \xi_{ij}(t), \quad (1)$$

где $y_{ij}(t)$ – наблюдаемые данные, которыми могут являться сейсмограммы, отдельные сигналы, энергии или амплитуды; $S^0(t)$ – идеальный исходный импульс, возбуждаемый во всех источниках рассматриваемого сейсмического эксперимента (выполняемого исследования); $\xi_{ij}(t)$ – оставшаяся аддитивная часть волнового поля или сигнала, не описываемая первым слагаемым, t – временная переменная.

При применении модели (1) для описания данных нужно учитывать, что она не предполагает каких-либо других изменений в форме исходного импульса кроме вариаций в источниках и приемниках. Такое предположение может быть обосновано для небольшого класса задач, где отсутствует информация о регулярных особенностях среды. Например, считается, что среда обладает случайным распределением свойств, приводящим к импульсной характеристике $U_{ij}(t)$, являющейся реализацией случайного процесса. Подобное предположение может быть использовано на этапах предварительной обработки данных.

В случае появления некоторых регулярных особенностей в анализируемом волновом поле или сейсмическом сигнале необходимо применять более сложные факторные модели. Ими являются два частных случая общей модели, которые представимы следующими трехфакторными моделями:

$$y_{ij}(t) = S^0(t) * s_i(t) * r_j(t) * G_k(t) + \xi_{ij}(t), \quad (2)$$

и

$$y_{ij}(t) = S^0(t) * s_i(t) * r_j(t) * L_l(t) + \xi_{ij}(t). \quad (3)$$

Различие этих моделей состоит в видах выделяемых регулярностей. Для первой из указанных моделей такая регулярность определяется фактором $G_k(t)$, который связан с общей центральной точкой (ОЦТ) системы наблюдений. Мы предполагаем, что наблюдения, относящиеся к заданной ОЦТ, могут обладать специфическими особенностями, описываемыми значениями $G_k(t)$. Для второй модели предполагается, что особенности связаны с фактором $L_l(t)$, характеризующим изменения волнового поля или сигнала в зависимости от удаления источник–приемник. Такая зависимость представляется достаточно очевидной. Ее наиболее простое описание дается через изменение амплитуды сигнала за счет расхождения фронта распространяющейся волны. В лог-спектральной области на фиксированной частоте факторы за ОЦТ и удаление источник–приемник обозначаются соответственно γ_k и λ_l .

Для выражения (1) в лог-спектральной области на фиксированной частоте мы имеем двухфакторную модель простого вида:

$$z_{ij} = \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}, \quad (4)$$

где факторы: α_i и β_j характеризуют изменения условий возбуждения и приема сейсмических колебаний на фиксированной частоте, а ε_{ij} – помеха. В этой модели, как и во всех последующих, нами опущена постоянная составляющая, которая определяется неоднозначно [Кушнарев и др., 2021].

Переход от модели (1) к моделям (2)–(3) сопровождается усложнением факторных моделей и увеличением количества неоднозначно определяемых составляющих в получаемом решении СЛАУ. Поэтому нам уже недостаточно условия, вводимого в предыдущей работе [Кушнарев и др., 2021]. Это достаточно просто показать, используя линеаризованное представление модель (3) в лог-спектральной области:

$$z_{ij} = \alpha_i + \beta_j + \lambda_l + \varepsilon_{ij}. \quad (5)$$

Теперь, добавив линейную составляющую $c(i-j)$ к фактору за удаление и вычитая соответствующие компоненты из α_i и β_j , приходим к равенству

$$\alpha_i + \beta_j + \lambda_l = (\alpha_i - ci) + (\beta_j + cj) + (\lambda_l + c(i-j)), \quad (6)$$

указывающему на неединственность определения линейных составляющих в значениях факторов. Общие исследования вопросов неединственности получаемых решении СЛАУ были выполнены в [Митрофанов, 2018]. Там же предложены способы введения априорной информации необходимой для получения однозначных решений СЛАУ. В частности, показано, что в случае моделей (2)–(3), требуется введения трех дополнительных условий, фиксирующих линейные составляющие.

Укажем, что при применении общей четырехфакторной модели, приведенной в предыдущей работе, требуется дополнительное расширение числа условий. В разработанной нами процедуре поверхностно-согласованной коррекции амплитуд ввод требуемых условий выполняется автоматически при изменении типа используемой модели.

Второй важный момент, который не был представлен в предыдущей работе, относится к критериям качества используемых моделей. Такие критерии важны, как при выборе наилучшей из используемых моделей, так и обоснованности всей процедуры коррекции амплитуд. Наиболее простыми из них являются критерии Фишера [Кобзарь, 2006], позволяющие определить, насколько значимыми будут вариации различных факторов относительно всевозможных других вариаций, присутствующих в рассматриваемых данных.

ПОДГОТОВКА МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сопоставление двухфакторной и трехфакторной модели проводилось на синтетических данных, полученных с использованием 3D системы наблюдений. Для моделирования синтетических данных, с последующим моделированием неоднородностей верхней части разреза, была реализована 3D модель, представленная на рис. 1. Данная модель была сделана для демонстрации работы алгоритма по разделению и учету факторов, относящихся к различным областям модели, и влияющих на регистрируемый сигнал.

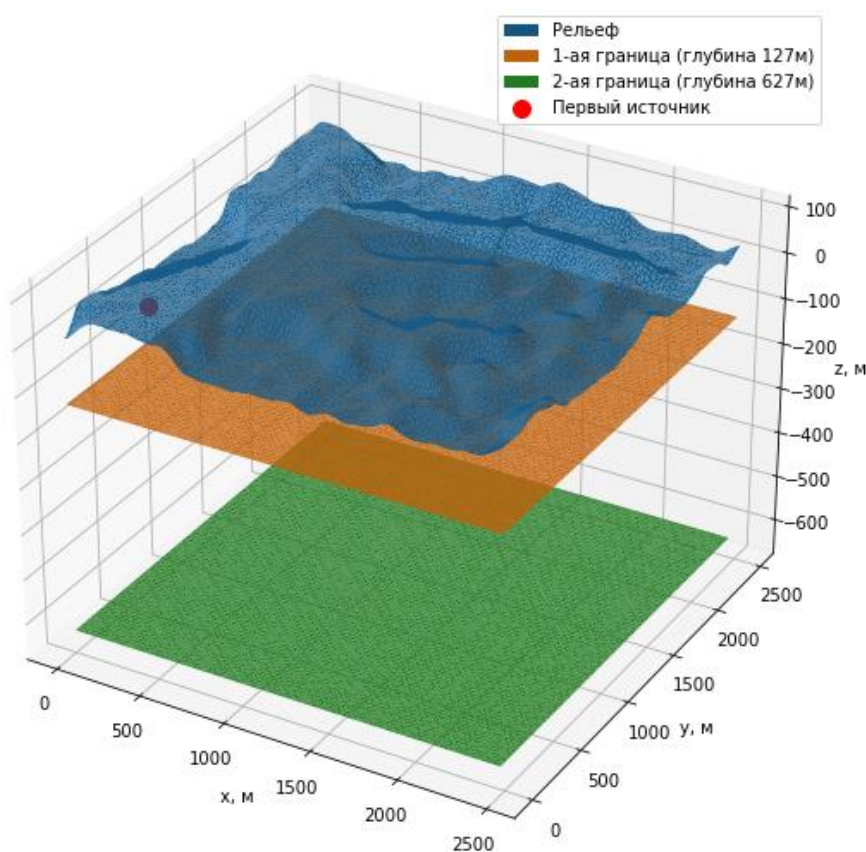


Рис. 1. Структура 3D модели

Модель содержит две горизонтальные границы на глубине 200 и 700 м. Скорости продольной волны между поверхностью наблюдения и первой границей – 1852 м/с, между 1-ой и 2-ой границей – 2229 м/с, под 2 границей – 2947 м/с. Скорость поперечной волны во всех слоях в два раза меньше продольной скорости, плотность всюду составляет 2500 кг/м³.

Рельеф, показанный на рис. 2, основан на картах рельефа Западной Сибири. Перепады высот от 0 до 70 м, угол перепада высот порой достигает 30°.

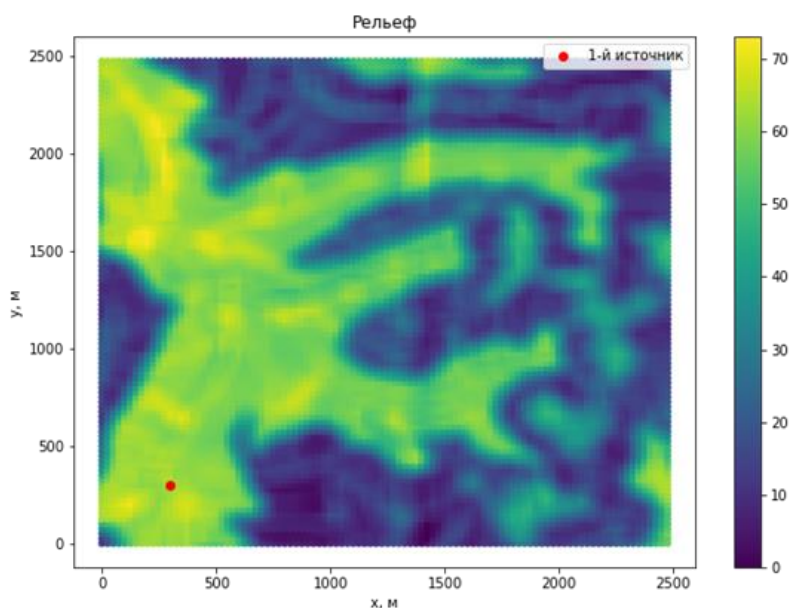


Рис. 2. Рельеф с положением первого источника

Система 3D наблюдений включает в себя 10 000 фиксированных приемников и 400 перемещаемых источников. Расстояние между источниками по координатам x и y равняется 25 м, для приемников расстояние по обеим координатам равняется 100 м. Приемники имеют фиксированное положение, покрывая всю поверхность. Общий объем наблюдений составляет 4 млн.

В данной модели, были рассчитаны амплитуды пришедшего сигнала для отраженных волн от 1-ой и 2-ой границ. Расчет проводился с применением лучевого метода, дальнейший анализ – с использованием максимального значения амплитуды отраженной волны (далее для краткости просто амплитуды). Вид амплитуд, первого источника, указанного на рис. 2, показан на рис. 3, а. Наблюдаемое отличие полученных амплитуд зависит от пройденного лучом пути, зависящего от рельефа и положения источника. Вариации значений амплитуд по всей площади представлены гистограммами, которые приведены на рис. 4, а.

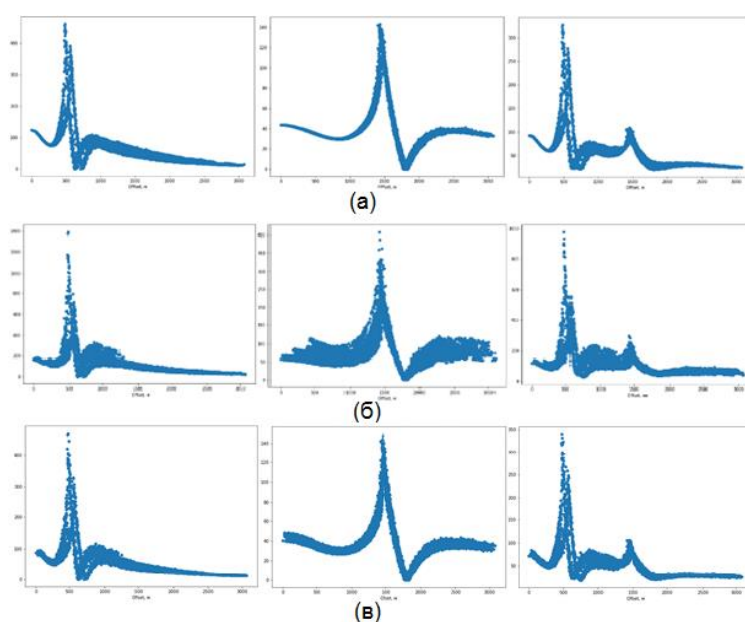


Рис. 3. Зависимость амплитуд отраженных волн от удаления (слева направо): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений. Описание вариантов (а), (б), (в) дано в тексте

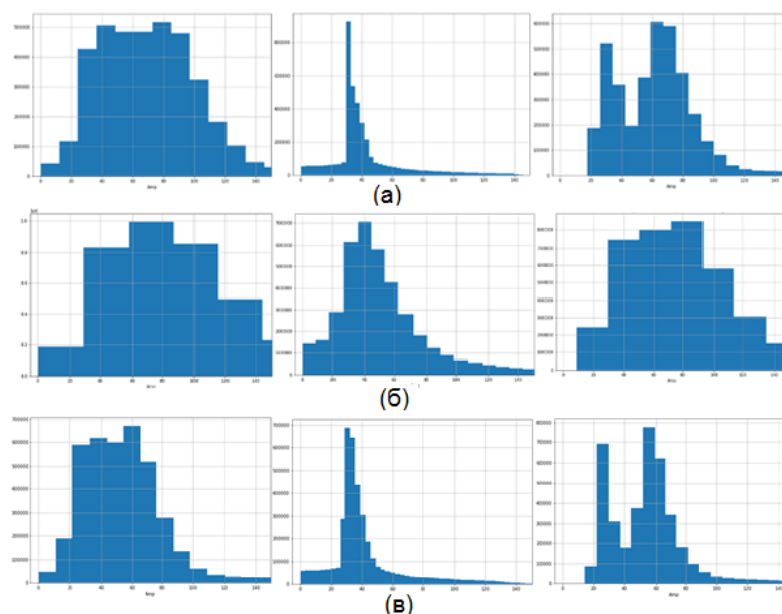


Рис. 4. Гистограммы амплитуд отраженных волн (слева направо): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений. Описание вариантов (а), (б), (в) дано в тексте

Дальнейшее усложнение амплитуд проводилось посредством умножения каждой рассчитанной амплитуды на три множителя, моделирующих неоднородность верхней части разреза, влияющую на изменение условий возбуждения и приема. Для каждого приемника значение амплитудного множителя определялось в зависимости от того, в каком месте находится приемник. На рисунке 5 показана карта распределения неоднородностей для приемников. На карте видны области с одинаковым множителем, каждая из таких областей соответствует своей физической модели. Так область с более низким значением соответствует более рыхлой, мягкой почве, а более высокие значения соответствуют более плотным породам. Минимальное значение коэффициента равняется 0.75, а максимальное 1.5.

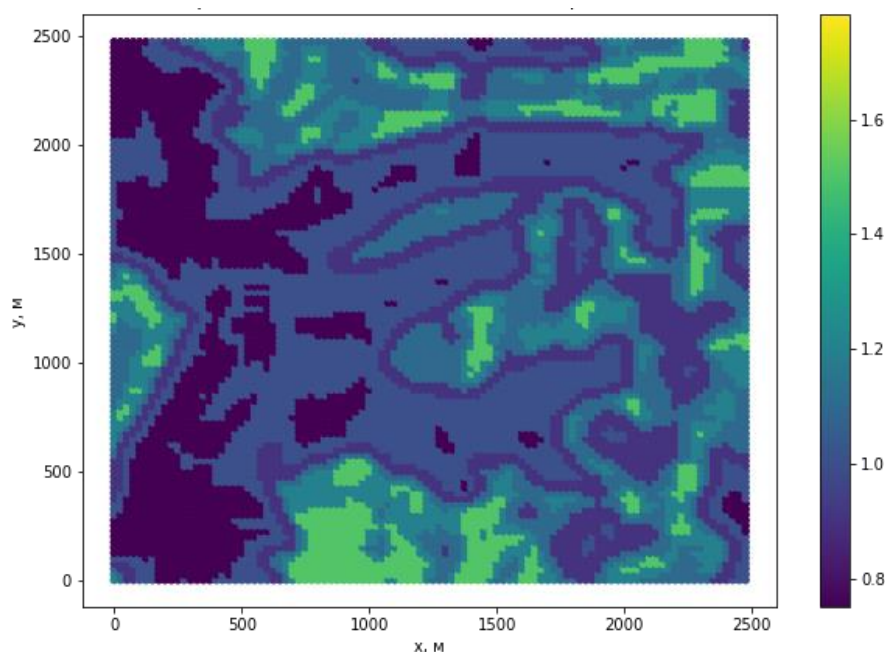


Рис. 5. Вариации амплитуд для приемников

Таким же образом была введена неоднородность для источников. Главным отличием между неоднородностями за источник и приемник состоит в том, что они разночастотные. На рисунке 6 показана карта распределения неоднородностей для источников. Видно, что они носят более низкочастотный характер, чем у приемников. Вариация значений амплитуд в источнике составляет от 0.52 до 1.93.

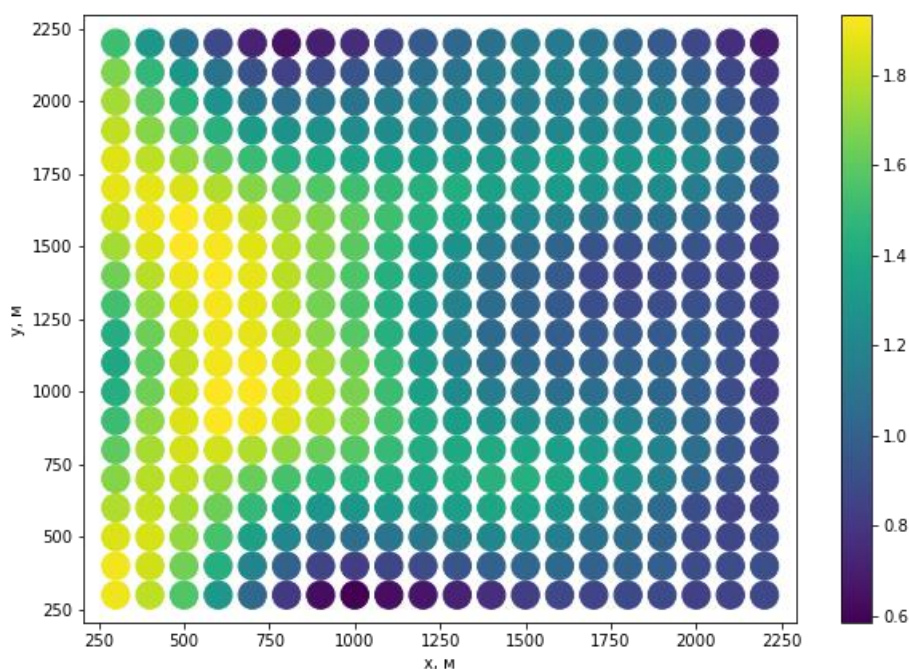


Рис. 6. Вариации амплитуд для источников

Кроме двух указанных типов вариаций, в амплитуды были введены мультипликативные случайные помехи, заданные высокочастотными поверхностно-несогласованная вариациями, величина которых изменялась в интервале от 0.9 до 1.1.

После введения всех указанных вариаций в сигнал, зависимость амплитуды от удаления для анализируемых данных стала не столь однозначной, как у исходных сигналов. Так, сравнение изменений в амплитудах для первого источника (см. рис. 3, б) показывает, что для одного и того же удаления, встречаются большие разбросы по амплитудам, при этом основной вид зависимости сохраняется. Эти изменения проявляются и в структуре гистограмм, характеризующих всю совокупность данных (см. рис. 4, б).

ОЦЕНКА И КОРРЕКТИРОВКА АМПЛИТУД ПО МОДЕЛЬНЫМ ДАННЫМ

Для оценивания вариаций амплитуд в рамках модельного эксперимента применялись две модели: двухфакторная (4) и трехфакторная (5). Это позволило продемонстрировать возможности разрабатываемой процедуры поверхностно-согласованной коррекции амплитуд по выбору оптимальной факторной модели при работе с имеющимися данными.

Для каждой из моделей была выполнена факторная декомпозиция на основе решения соответствующей СЛАУ. Полученные оценки факторов после их потенцирования были использованы для формирования оценок амплитуд сигналов, очищенных от вариаций, связанных с неоднородностью условий возбуждения и приема сейсмических колебаний, а также вариаций, вызванных случайными некоррелированными мультипликативными помехами. Эти значения амплитуд были вычтены из

наблюденных амплитуд. Полученные разности представлены в виде гистограмм, которые показаны на рис. 7. Здесь же приведены значения среднеквадратических отклонений.

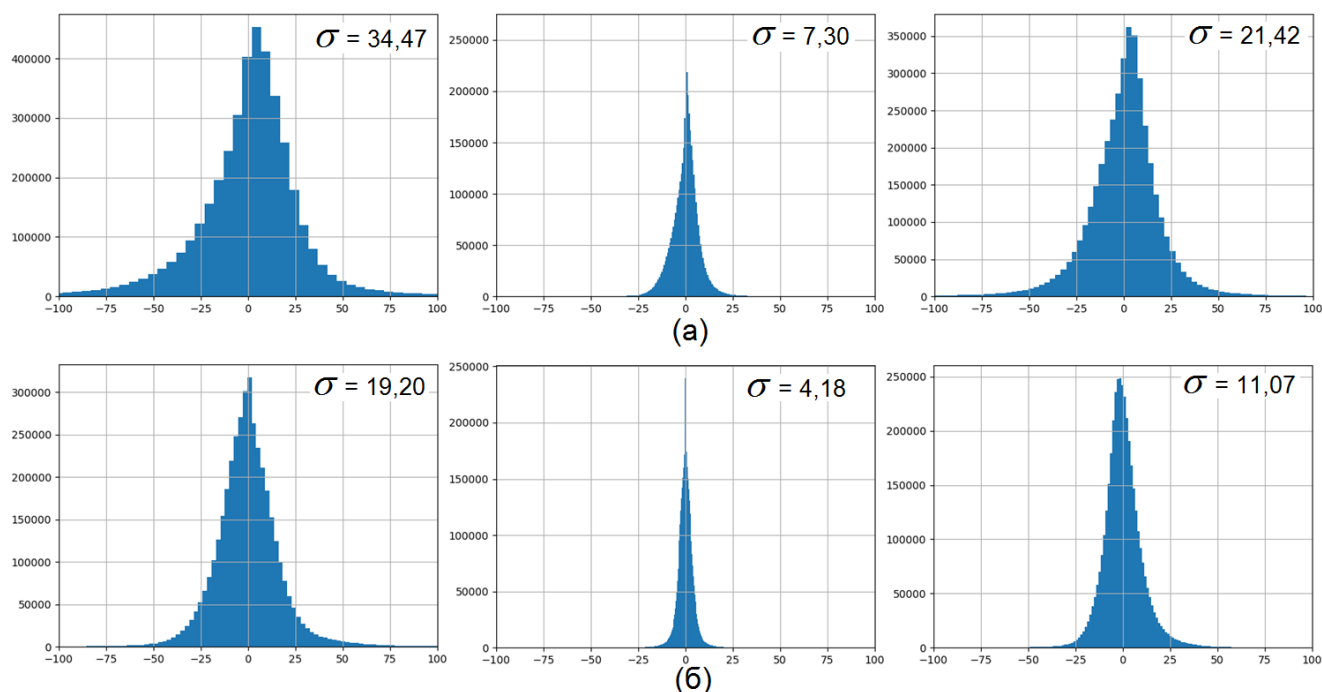


Рис. 7. Гистограммы разностей амплитуд, полученные для отраженных волн (слева направо): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений, в случае применения двухфакторной (а) и трехфакторной (б) модели

Согласно рис. 7, применение трехфакторной модели обеспечивает повышение точности корректировки амплитуд. При этом не только уменьшается значение среднеквадратического отклонения, но и улучшается структура разностных гистограмм, приобретающая более симметричную форму. Выполненный анализ позволил нам выбрать трехфакторную модель в качестве основной для процедуры поверхностно-согласованной коррекции амплитуд модельных данных.

Выбранная трехфакторная модель служила основой для построения СЛАУ, содержащей 4 млн. уравнений. Здесь неизвестными являлись 400 значений фактора за источник, 10 тысяч значений фактора за приемник и 176 значений фактора за удаление. Отметим, что при формировании части матрицы, отвечающей фактору за удаление, наблюдения и соответствующие уравнения были объединены в группы по 20 м. В качестве наблюдений в левой части могут выступать амплитуда отраженной волны от первой границы, амплитуда отраженной волны от второй границы или же среднеквадратичное значение энергии, отнесенное к единичному отсчету для двух сигналов. Таким образом, получается не одна, а три системы уравнений с одинаковой правой, но разными левыми частями.

Для того чтобы однозначно решить любую из полученных СЛАУ, необходимо добавить уравнения, содержащие априорную информацию. Для данной факторной модели и данной системы наблюдений достаточно добавить априорную информацию за один источник и один приемник. Таким же образом делается для двух других систем уравнений.

В результате решения систем уравнений были получены поправки за источники, приемники и удаления. Полученные поправки за приемники приведены на рис. 8, поправки за источники приведены на рис. 9.

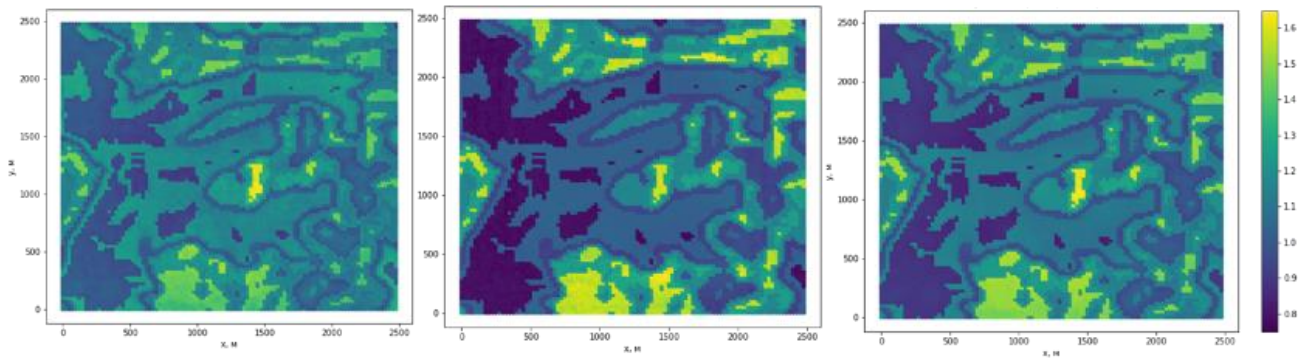


Рис. 8. Оценки фактора за приемники, полученные для разных отраженных волн (слева направо): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений

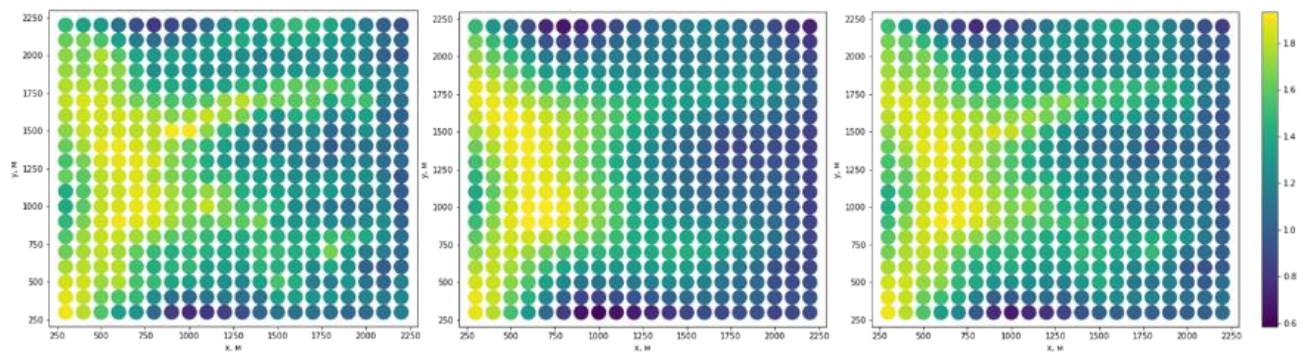


Рис. 9. Оценки фактора за источник, полученные для разных отраженных волн (слева направо): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений

Полученные поправки за удаления приведены на рис. 11. Зависимость полученных поправок от удаления имеет вид аналогичный зависимости амплитуды исходных отраженных сигналов (см. рис. 3, а).

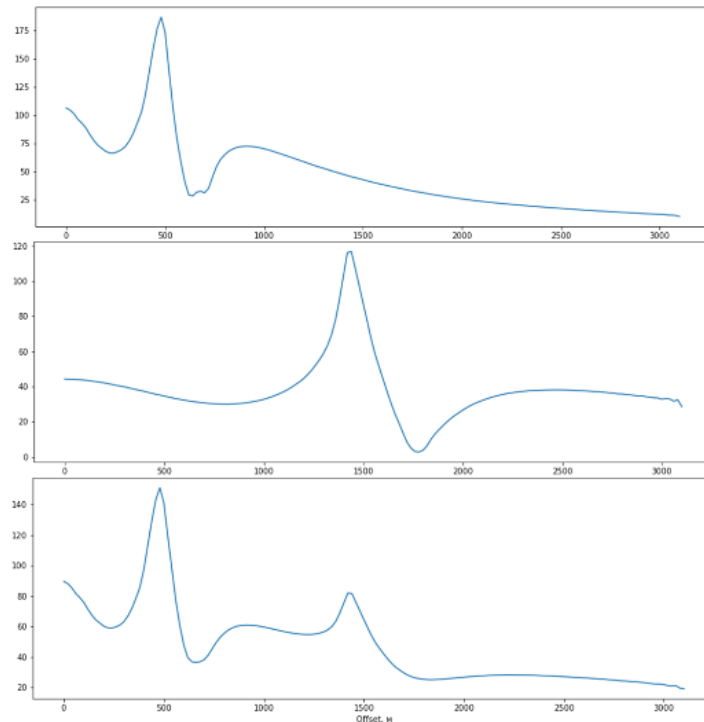


Рис. 10. Оценки фактора за удаление, полученные для разных отраженных волн (сверху вниз): 1-ое отражение, 2-ое отражение, объединение двух отражений

Сравнивая полученные оценки фактора за приемники (см. рис. 8) и за источники (см. рис. 9) с модельными вариациями (см. рис. 5 и 6), видим, что применяемое нами решение позволяет разделять разнопериодные вариации для источников, приемников и удалений.

Полученные поправки за источник и приемник были введены в модельные трассы для устранения влияния верхней части разреза. Зависимость амплитуды от удаления для первого источника после учета вариаций приведена на рис. 3, в. Сравнивая начальные зависимости амплитуды отраженной волны от удаления для первого источника и распределения амплитуды по всей площади (рис. 3, а и 4, а) с результатами, полученными после корректировки данных (см. рис. 3, в и 4, в) можно сделать следующий вывод: разработанная процедура позволяет достаточно точно получить амплитуды отраженных сигналов, освобожденные от влияния неоднородностей в условиях возбуждения и приема колебаний.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ К РЕАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Тестирование процедуры на реальных данных проводилось с применением двухфакторной модели. Это было связано с тем, что исходные данные были подвергнуты предварительной обработке, устранившей изменение амплитуд в зависимости от удаления источник–приемник. 3D система наблюдений имела 23 777 уникальных источников, 25 686 уникальных приемников. Общее количество наблюдений составляло 110 621 697. Поверхностное расположение 3D системы наблюдений показано на рис. 11.

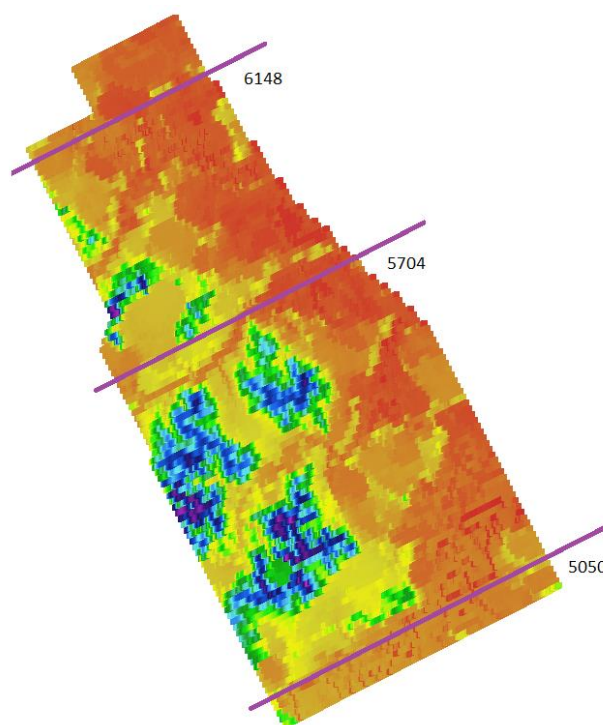


Рис. 11. Поверхностное расположение системы наблюдений. Линиями указаны тестовые профили. Цветом показаны высоты приемников (минимальная высота – синий цвет, максимальная высота – красный цвет)

На рисунке 12 показаны суммарные разрезы и энергия по опорным горизонтам для тестовых профилей до применения процедуры. Заметно наличие трасс, амплитуда которых сильно отличается от амплитуды соседних трасс. Это так же видно на графиках с энергией по опорным горизонтам, приведенным на рис.12 над разрезами.

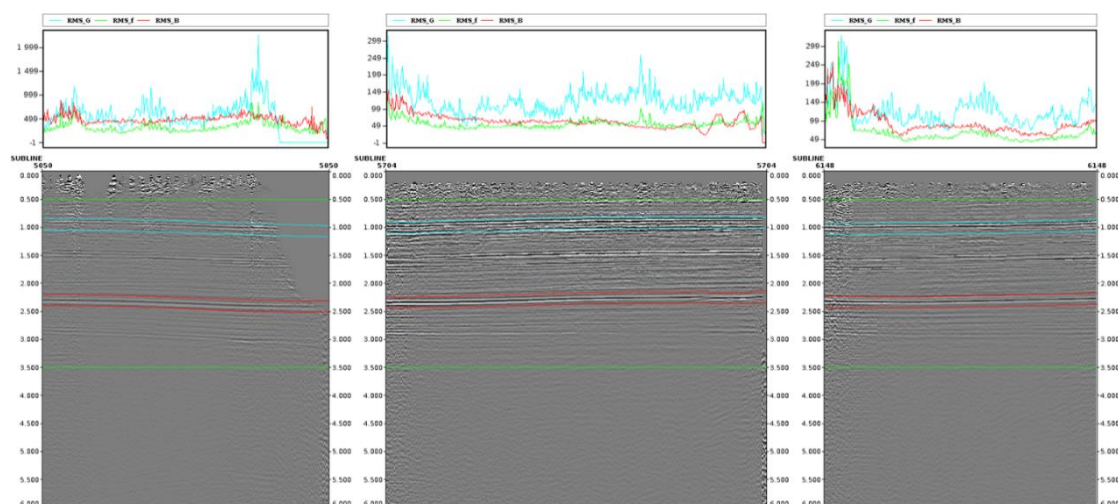


Рис. 12. Суммарные разрезы по тестовым профилям (слева профиль 5050, в центре 5704, справа 6148), синим цветом выделен горизонт G, красным цветом – горизонт B, зеленым цветом – окно 500–3500 мс

На рисунке 13 показана энергия по опорным горизонтам по всей площади. На этом рисунке видно, что амплитуды отраженных волн сильно отличаются в различных областях опорных горизонтов. По мнению заказчика, многие из имеющихся амплитудных аномалий могли быть связаны с поверхностно-согласованными неоднородностями.

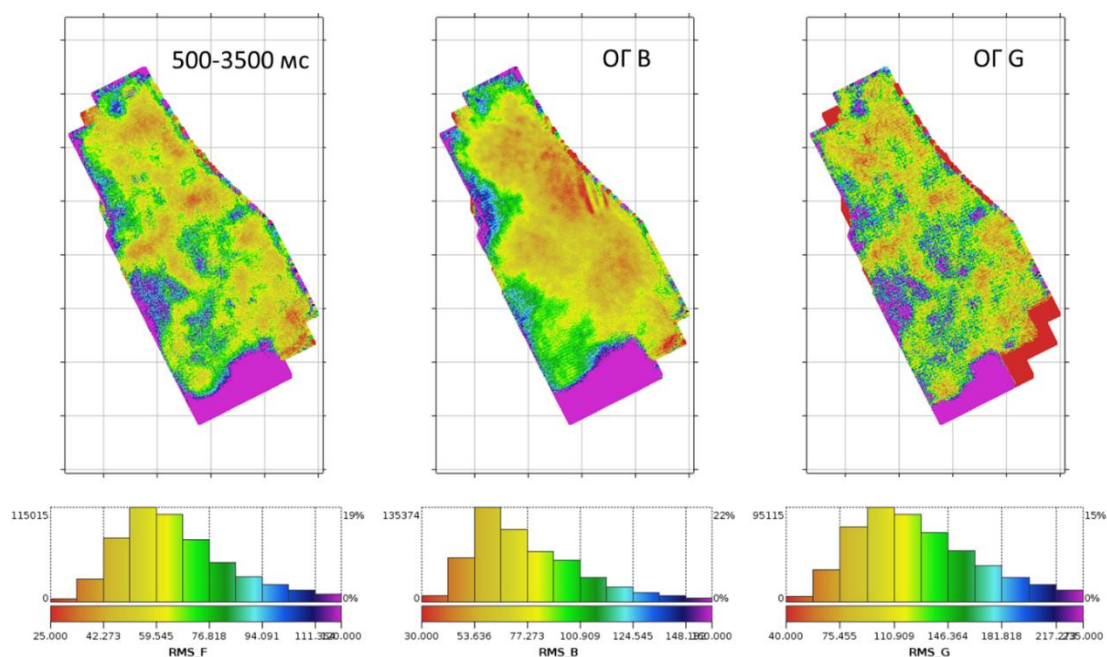


Рис. 13. Энергия по опорным горизонтам до применения процедуры

Согласно статье [Кушнарев и др., 2021], решение проблемы вырожденности СЛАУ для двухфакторной модели требует добавления псевдо-априорной информация. В качестве такого дополнения выступает одно уравнение, которое содержит информацию о том, что среднее значение поправок за источник равно нулю. Оно полностью устраняет неоднозначность решения.

Для оценивания качества результата применения поправок, полученных разработанной процедурой (рис. 14 и 15), была выполнена аналогичная процедура, реализованная в программном пакете GEOVATION (рис. 16 и 17).

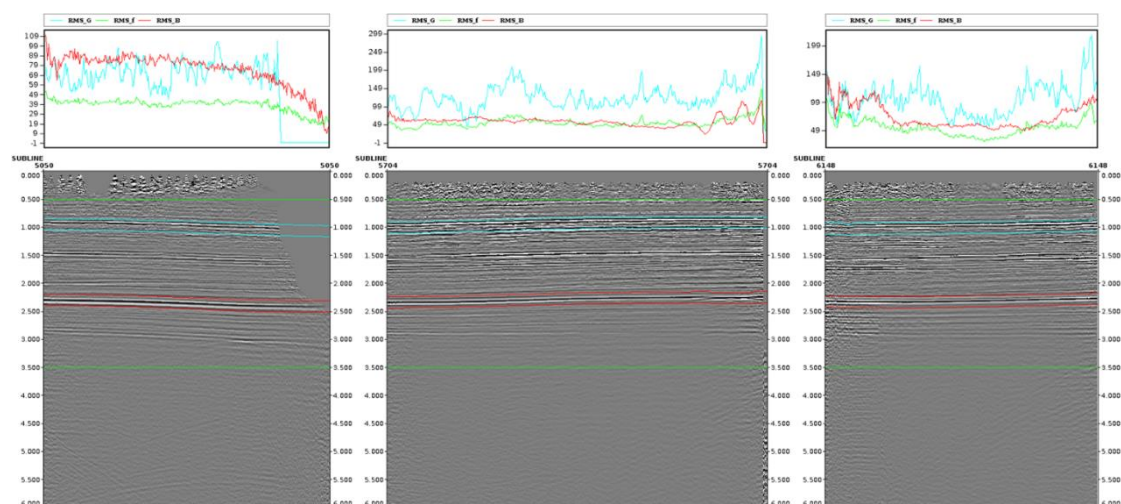


Рис. 14. Суммарный разрез после применения разработанной процедуры

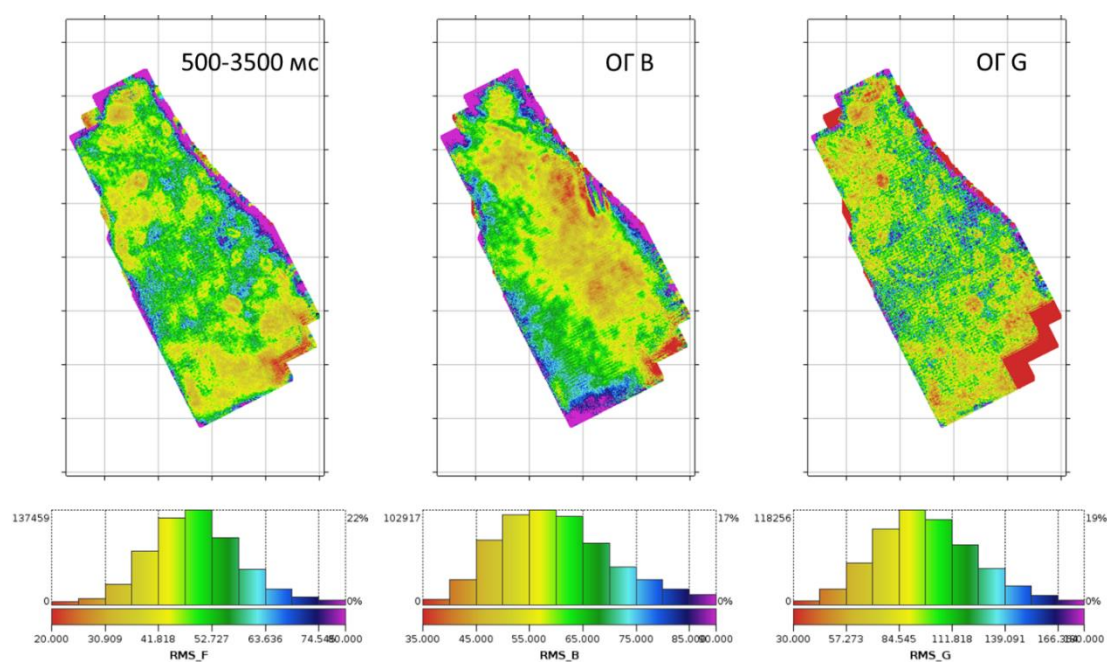


Рис. 15. Энергия по опорным горизонтам после применения разработанной процедуры

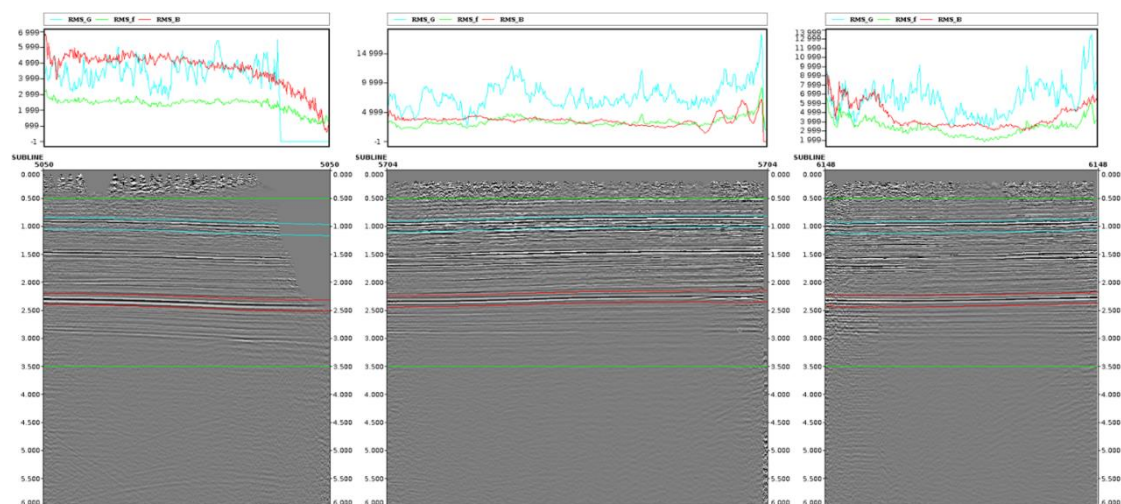


Рис. 16. Суммарный разрез после процедуры GEOVATION

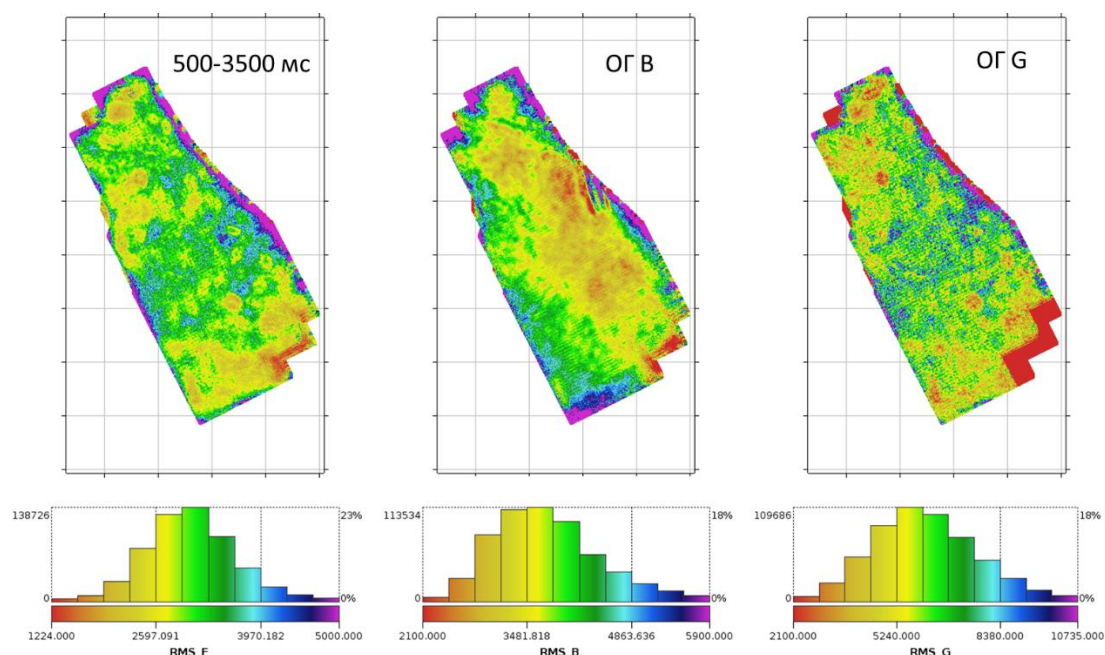


Рис. 17. Энергия по опорным горизонтам после процедуры GEOVATION

После введения полученных поправок, распределение амплитуд по опорным горизонтам стало более однородным, как по результатам разработанной процедуры, так и с применением процедуры из пакета GEOVATION. Тестовые суммарные разрезы показывают, что полученные поправки позволили скорректированы трассы, амплитуда которых сильно отличалась от соседних трасс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка модельных данных с применением различных факторных моделей продемонстрировала возможность выбора оптимальной модели, обеспечивающей наилучшую поверхностно-согласованную коррекцию амплитуд. При этом применение трехфакторной модели на синтетических данных, позволило разделить разночастотные вариации за источник и приемник, а также получить зависимость амплитуды сейсмического сигнала от удаления. Интересными представляются результаты, относящиеся к отдельным сигналам и их совокупности. Они указывают на различие в получаемых оценках факторов.

Результаты применения разработанной процедуры на реальных данных показали, что на ее основе удастся получать корректировку данных, которая не уступает процедуре, реализованной в зарубежном программном комплексе GEOVATION, широко используемом в российских нефтегазовых компаниях.

Работа выполнена при поддержке базового проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0017.

ЛИТЕРАТУРА

- Гольдин С.В., Митрофанов Г.М. Восстановление формы сигнала при наличии поверхностных неоднородностей // Сейсмические методы поиска и разведки полезных ископаемых. – Киев: Знание, 1973. – С. 6–8.
- Гольдин С.В., Митрофанов Г.М. Спектрально-статистический метод учета поверхностных неоднородностей в системах многократного прослеживания отраженных волн // Геология и геофизика. – 1975. – № 6. – С. 102–112.

- Гурвич И.И.** О теоретических основах динамических измерений в сейсморазведке // Известия вузов. Геология и разведка. – 1970. – № 6. – С. 108–113.
- Давлетханов Р.Т.** Коррекция сейсмических записей за влияние верхней части разреза с сохранением кинематики отраженных волн, соответствующих пластовой модели среды: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.10. – М.: МГУ, 2017.
- Долгих Ю.Н.** Методика коррекции сейсмоструктурных построений за длиннопериодные погрешности, обусловленные влиянием неоднородностей ВЧР // Технологии сейсморазведки. – 2010. – № 3. – С. 60–68.
- Кобзарь А.И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
- Кушнарев Р.С., Гореев Н.А., Митрофанов Г.М.** Алгоритм поверхностно-согласованной компенсации сейсмических амплитуд и его тестирование на модельных данных // Геофизические технологии. – 2021. – № 4. – С. 26–35, doi: 10.18303/2619-1563-2021-4-26.
- Козырев В.С., Жуков А.П., Коротков И.П., Жуков А.А., Шнеерсон М.Б.** Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке. Современные технологии. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 227 с.
- Митрофанов Г.М.** Учет поверхностных неоднородностей в методе ОГТ // Тезисы докладов X научной студенческой конференции (Геология. Геофизика. Геохимия). – Новосибирск: НГУ, 1972. – С. 44–45.
- Митрофанов Г.М.** Нелинейные преобразования сигналов с применением спектральных и факторных разложений (приложение к сейсморазведке). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 444 с.
- Mitrofanov G., Goreyavchev N., Kushnarev R.** Improving accuracy in studying the interactions of seismic waves with bottom sediments // Journal of Marine Sand Engineering. – 2021. – Vol. 9 (2). – 229, doi: 10.3390/jmse9020229.
- Taner M.T., Koehler F., Alhilali K.A.** Estimation and correction of near-surface time anomalies // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (4). – P. 441–463, doi: 10.1190/1.1440441.
- Taner M.T., Koehler F.** Surface consistent corrections // Geophysics. – 1981. – Vol. 46 (1). – P. 17–22, doi: 10.1190/1.1441133.
- Taner M.T., Wagner D.E., Baysal E., Lu L.** A unified method for 2-D and 3-D refraction statics // Geophysics. – 1998. – Vol. 63 (1). – P. 260–274, doi: 10.1190/1.1444320.

REFERENCES

- Davletkhanov R.T.** Correction of seismic records for the influence of the upper part of the section with the preservation of the kinematics of reflected waves corresponding to the reservoir model of the medium. PhD Thes. [in Russian]. – MSU, Moscow, 2017.
- Dolgikh Yu.N.** Method of correction of seismostructural constructions for long-period errors caused by the influence of inhomogeneities of the RF // Technologies of Seismic Exploration. – 2010. – Vol. 3. – P. 60–68.
- Goldin S.V., Mitrofanov G.M.** Reconstruction of the signal shape in the presence of surface inhomogeneities. // Seismic methods of prospecting and exploration of minerals [in Russian]. – Znanie, Kiev, 1973. – P. 6–8.
- Goldin S.V., Mitrofanov G.M.** Spectral-statistical method for accounting for surface inhomogeneities in systems for multiple tracking of reflected waves // Soviet Geology and Geophysics. – 1975. – Vol. 6. – P. 102–112.
- Gurvich I.I.** On the theoretical foundations of dynamic measurements in seismic exploration. Izvestiya Vuzov. Geologiya i Razvedka. – 1970. – Vol. 6. – P. 108–113.

- Kobzar A.I.** Applied mathematical statistics. For engineers and scientists [in Russian]. – Fizmatlit, Moscow, 2006. – 816 p.
- Kozyrev V.S., Zhukov A.P., Korotkov I.P., Zhukov A.A., Schneerson M.B.** Consideration of inhomogeneities of the upper part of the section in seismic exploration. Modern technologies [in Russian]. – LLC "Nedra-Businesscenter", Moscow, 2003. – 227 p.
- Kushnarev R.S., Goreyavchev N.A., Mitrofanov G.M.** Algorithm of surface-matched compensation of seismic amplitudes and its testing on model data // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2021. – Vol. 4. – P. 26–35, doi: 10.18303/2619-1563-2021-4-26.
- Mitrofanov G.M.** Accounting for surface inhomogeneities in the CDP method // Abstracts of the X scientific student conference (Geology. Geophysics. Geochemistry). – NSU, Novosibirsk, 1972. – P. 44–45.
- Mitrofanov G.M.** Nonlinear signal transformations using spectral and factor decompositions (appendix to seismic exploration) [in Russian]. – NSTU Publishing House, Novosibirsk, 2018. – 444 p.
- Mitrofanov G., Goreyavchev N., Kushnarev R.** Improving accuracy in studying the interactions of seismic waves with bottom sediments // Journal of Marine Sand Engineering. – 2021. – Vol. 9 (2). – 229, doi: 10.3390/jmse9020229.
- Taner M.T., Koehler F., Alhilali K.A.** Estimation and correction of near-surface time anomalies // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (4). – P. 441–463, doi: 10.1190/1.1440441.
- Taner M.T., Koehler F.** Surface consistent corrections // Geophysics. – 1981. – Vol. 46 (1). – P. 17–22, doi: 10.1190/1.1441133.
- Taner M.T., Wagner D.E., Baysal E., Lu L.** A unified method for 2-D and 3-D refraction statics // Geophysics. – 1998. – Vol. 63 (1). – P. 260–274, doi: 10.1190/1.1444320.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КУШНАРЕВ Роман Сергеевич – студент НГУ, лаборант лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: исследование систем линейных уравнений в задачах обработки геофизических данных.

ГОРЕЯВЧЕВ Никита Алексеевич – младший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: методы повышения эффективности обработки геофизических данных.

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: обработка и интерпретация геофизических данных, методы решения обратных задач.