

Комплексирование геофизических методов для 2D и 3D данных в ПО "Tomplex"

■ Молчанов А. Б., Лыгин И. В., Твердохлебов Д. Н., Мостовой Д. В.,
ООО «РН-Эксплорейшн», г. Москва

В данной работе приводятся результаты исследований по развитию количественного подхода к комплексированию геофизических методов при решении задач геологоразведки. Рассматриваются следующие основные методы: сейсмо-, грави-, магнито- и электроразведка. В рамках проведённых исследований разработан подход, позволяющий проводить комплексирование всех четырёх названных методов с получением численного результата, использующегося на ранних этапах обработки сейсмических данных и позволяющего повысить их качество. Также создано не имеющее аналогов программное обеспечение (ПО) «Tomplex», реализующее данный подход как для 2D, так и для 3D данных.

Введение

В настоящее время активно ведутся исследования новых методик, способных повысить успешность геологоразведочных работ (ГРР) в сложных сейсмо-геологических условиях. В ходе районирования лицензионных участков (ЛУ) Восточной Сибири по качеству имеющихся архивных сейсмических данных было выделено четыре класса сложности [Гуренцов, 2020]. Получение качественных данных в результате обработки профилей первого и второго классов по стандартному графу, как правило, не представляет трудностей. Третий и четвёртый классы характеризуются наличием скоростных аномалий ВЧР, которые имеют нетривиальную морфологию и приводят к появлению слепых зон на обработанном сейсмическом разрезе, приводящих к потере полезной информации. Для её восполнения применяется комплексирование геофизических методов, которое в контексте проводимых работ представляет собой совместный сбор, анализ и поиск корреляционных зависимостей в данных грави-, магнито-, электро-, сейсморазведки и других методов по каждому профилю или площади. При помощи комплексирования становится возможным обнаружить и локализовать аномалии ВЧР, приводящие к ухудшению

качества сейсмического материала. Однако, получаемый таким образом результат является лишь констатацией аномалий ВЧР и не позволяет напрямую улучшить качество.

Количественный подход к комплексированию имеет своей целью компенсацию аномалий. Такая компенсация осуществляется при получении глубинно-скоростной модели (ГСМ) ВЧР на основе найденных корреляционных зависимостей используемых методов с последующим вычислением априорных статических поправок. К настоящему моменту известны методики реконструкции эффективной ГСМ по данным гравиразведки [Кочнев, 2020] и электроразведки [Шёлохов, 2018].

Первый подход основан на пересчёте измеряемого на поверхности гравитационного эффекта в среднюю плотность и затем в среднюю скорость участка разреза в пределах бина до заданного уровня замещения. При этом получается вертикально-слоистая модель. Такая модель не является геологически обоснованной и используется только для расчёта априорных статических поправок. Автором отмечено увеличение точности структурных построений при применении методики на некоторых площадях Восточной Сибири. Однако, следует указать на то, что класс сложности строения ВЧР сей-

смических разрезов, продемонстрированных в проведённом исследовании, не доходит до третьего. В ходе тестирования данного подхода в группе геофизических работ ООО «РН-Эксплорейшн» было показано, что в случае присутствия в ВЧР высокоплотных аномалий сложной формы описанная методика не приводит к улучшению качества сейсмического разреза.

Второй подход основывается на применении уравнения Фауста к данным мЗСБ (малоглубинное зондирование становлением поля в ближней зоне) и получении таким образом эффективной ГСМ, соответствующей разрезу удельных электрических сопротивлений (УЭС). Следует, однако, иметь в виду, что такое преобразование не является однозначным без учёта априорной информации о типе присутствующих горных пород, поскольку значения проводимости для различных типов во многих случаях совпадают. Таким образом, данная методика может быть применена только в составе комплексирования с другими геофизическими методами.

Главным недостатком известных методик является то, что в них производится комплексирование какого-либо одного несейсмического метода с данными сейсморазведки, что не позволяет применять их в условиях III и IV классов сложности.

Методика

В ходе исследований в группе геофизических работ ООО «РН-Эксплорейшн» был разработан собственный количественный подход к комплексированию геофизических методов, суть которого состоит в коррекции томографической ГСМ на основе полного набора данных грави-, магнито- и электроразведки по каждому профилю. Данный подход описан в работе [Мостовой, 2021]. Здесь же будет детально обсуждаться количественная часть этого подхода и алгоритмы её автоматизации. Данная процедура для 2D случая включает в себя четыре основных этапа (рис. 1):

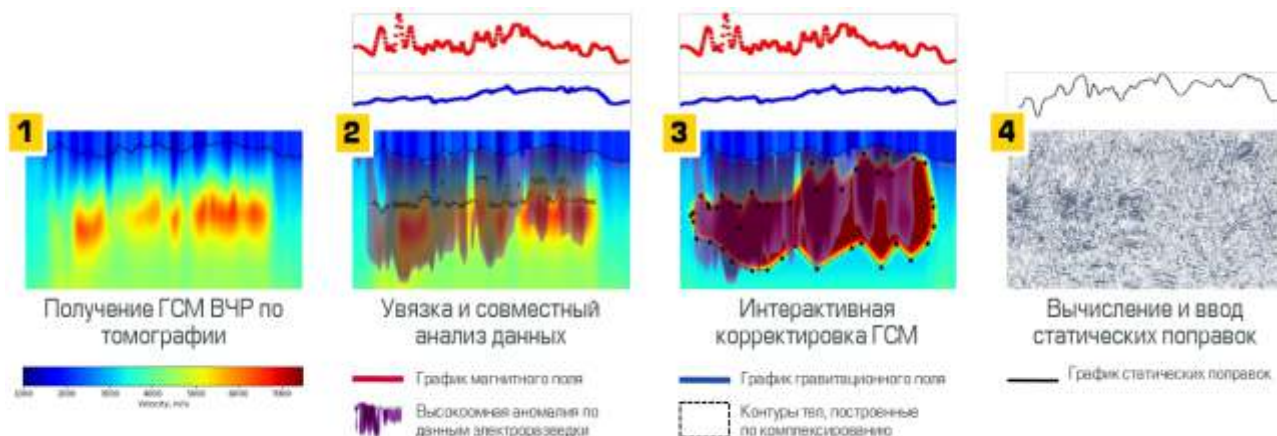
1. Построение первичной скоростной модели по сейсмической томографии и предварительный расчет статических поправок.

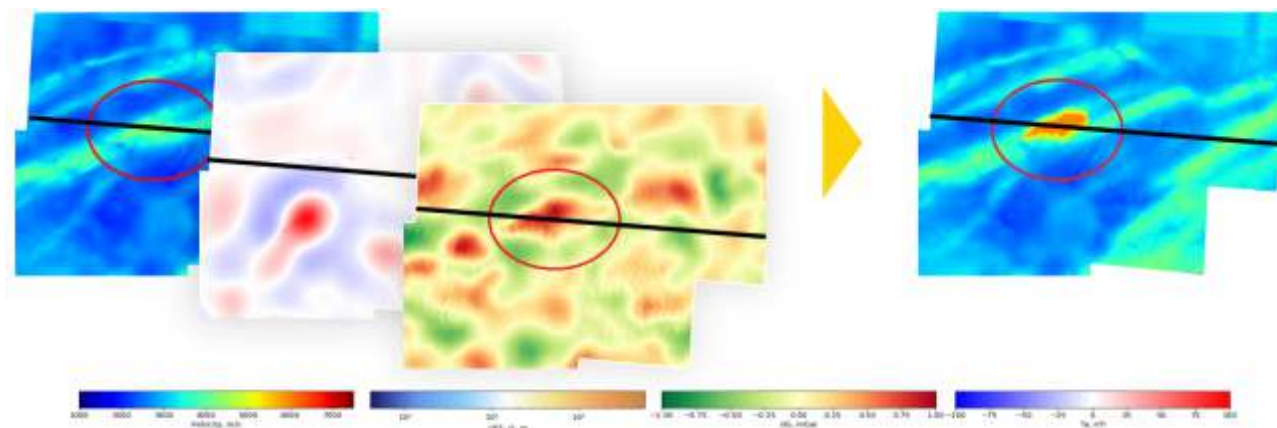
2. Увязка и совместный анализ томографической модели, геоэлектрического разреза, значений гравитационного и магнитного полей на протяжении профиля. Первичная реконструкция формы аномалиеобразующих тел, представляемых многоугольниками.

3. Интерактивный подбор геометрии и физических свойств аномалиеобразующих тел с соответствующим изменением ГСМ.

4. Вычисление априорных статических поправок по скорректированной ГСМ.

▼ Рис. 1. Количественная методика комплексирования геофизических данных.





▲ Рис. 2. Модификация ГСМ 3D в выделенной области аномальных значений гравитационного поля. Чёрным показано контрольное сечение.

Следует отметить, что на первом этапе может использоваться любой другой процесс получения ГСМ по исходным сейсмическим данным (в частности, раннее тестирование описанной процедуры проводилось с использованием ГСМ, полученной по первым вступлениям преломлённых волн). Поскольку на настоящий момент в большинстве случаев томография позволяет получить наиболее точный результат, выбор был сделан в её пользу. Алгоритмы автоматического расчёта результатов томографии изучены достаточно хорошо, и мы не будем приводить их здесь.

Увязка геофизических данных между собой, как правило, не представляет серьёзных проблем, эта задача решается приведением всех геофизических данных к единой координатной сетке. В настоящей работе используется сетка, соответствующая трассам исходной ГСМ.

Первичная реконструкция формы аномалиеобразующих тел выполняется по следующему алгоритму. Вначале вычисляются точки максимального (или минимального при низкоскоростных аномалиях) градиента скорости, по ним производится отбивка кровли аномалиеобразующих тел. Если градиент изменяется слабо, отбивка кровли производится по изолиниям разреза УЭС. Далее для отбивки подошвы тел в интерактивном

режиме решается прямая задача грави- и магниторазведки с использованием априорных значений плотности и намагниченности тел.

На этапе интерактивного подбора скорость, плотность, намагниченность и положения вершин многоугольников, задающих тела, изменяются пользователем так, чтобы с одной стороны минимизировать разности модельных и реальных полей, согласовав по возможности подошву тел с изолиниями УЭС, а с другой – чтобы добиться наилучшего качества априорных статических поправок, вычисляемых по ГСМ с введёнными аномалиеобразующими телами. В этой связи расчёт априорных статических поправок с получением суммарного разреза должен производиться сразу же после внесения изменений.

Таким образом, этап коррекции ГСМ представляет собой итерационный процесс. Однако, поскольку алгоритмы вычисления гравитационного и магнитного эффектов, расчёта априорных статических поправок, введения их в сейсмограммы и суммирования выполняются независимо для каждой трассы итогового разреза, они могут быть эффективно распараллелены. Как будет показано далее, это позволяет получать результаты коррекции ГСМ в реальном времени.

Обобщение данной методики на работу с 3D данными может быть проведено следующим образом (рис. 2). Во-первых, при совместном анализе площадных данных грави- и магниторазведки, а также кубов УЭС, локализуются зоны наличия аномалий ВЧР. Далее, для каждой такой зоны выбираются контрольные сечения исходного куба скоростей по томографии (инлайн и/или кросслайн, пересекающий аномалию). Для каждого сечения выполняются последние три этапа из описанной выше методики комплексирования. Затем, форма и свойства полученных на предыдущем шаге аномалиеобразующих тел, экстраполируются на все инлайны/кросслайны, пересекающие зону аномалии. Наконец, итоговый куб получается усреднением экстраполированных по инлайнам и кросслайнам кубов.

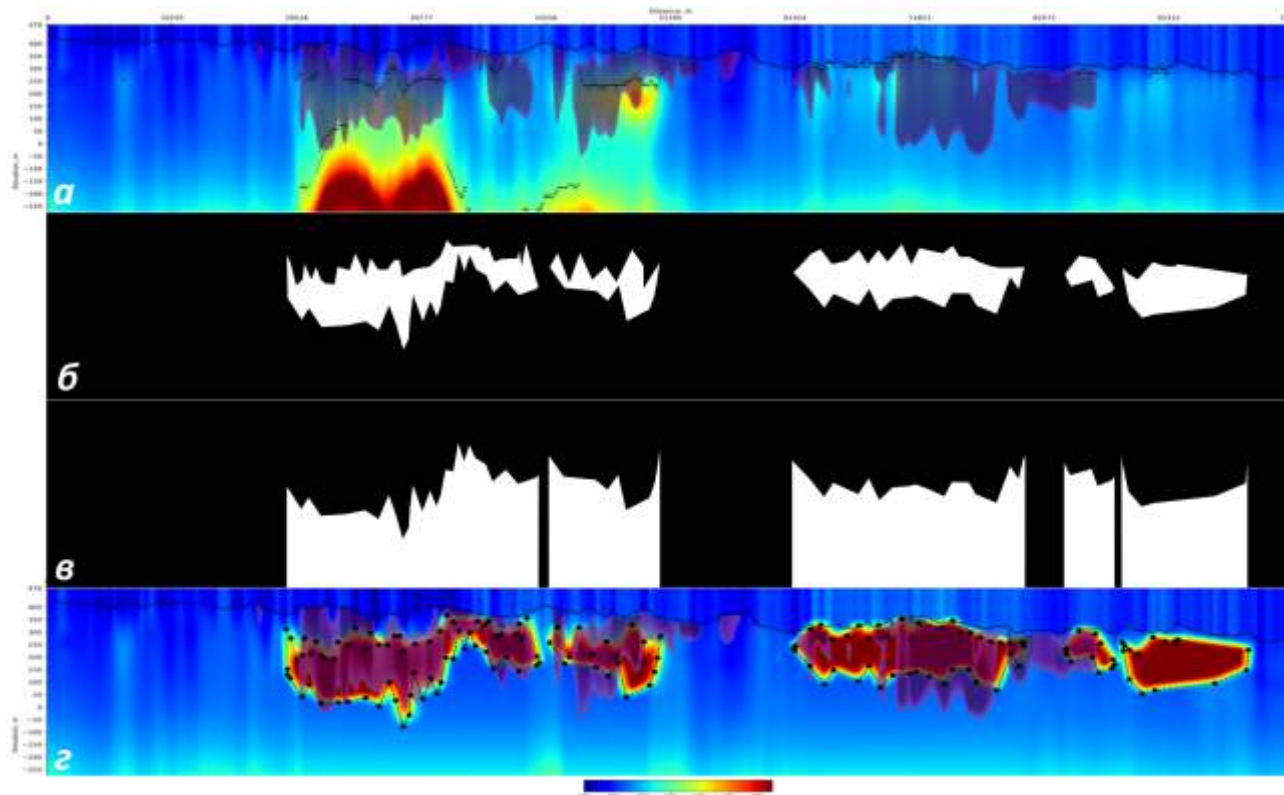
Заметим, что предложенный путь решения не является прямым обобщением описанной процедуры на трёхмерный случай, поскольку последнее предполагает построение и подбор параметров аномалиеобразующих тел посредством коррекции формы объёмных блоков (представляемых многогранниками), а не их 2D сечений. Однако, такой «честный» подход оказывается гораздо более ресурсозатратным, чем предложенный, поскольку тогда при интерактивной коррекции формы тел пришлось бы вводить априорные статические поправки во все сейсмограммы и получать сумму для всего куба целиком (или для той его части, на которую могут повлиять локальные изменения ГСМ), что занимает на порядок больше времени, чем выполнение того же процесса на одном-двух сечениях. При этом оба пути дают одинаковый результат, пока и поскольку свойства одного аномалиеобразующего тела слабо изменяются в его пределах.

Программная реализация вычислительных алгоритмов

Процесс комплексирования геофизических данных с использованием описанного выше подхода автоматизируется следующим образом. Центральной особенностью является моделирование аномалиеобразующих тел, представляемых многоугольниками произвольной формы и произвольного числа вершин (не менее четырёх, – по две на кровлю и подошву).

Внесение в ГСМ изменений, отвечающих первичному введению тел, осуществляется путём создания масок по контурам многоугольников с использованием функций, доступных в библиотеке OpenCV для Python (рис. 3б). Применение масок может осуществляться по одному из трёх сценариев: 1) использование априорно заданного значения скорости внутри тела, 2) взятие максимума (минимума или среднего) внутри части исходной ГСМ, ограниченной данным контуром, 3) взятие глобального максимума (минимума или среднего) внутри части исходной ГСМ, ограниченной всеми контурами тел на данном профиле/сечении. Для недопущения резких скачков в статических поправках, вычисляемых по изменённой ГСМ, края масок размываются фильтром бегущего среднего. Размер его окна в трассах по латерали и в семплах по глубине задаётся пользователем вручную в зависимости от того, насколько детальной требуется сделать итоговую ГСМ.

Если исходная ГСМ получена по классическим алгоритмам томографии (без инверсий скорости), то при наличии высокоскоростных аномалий ВЧР она, как правило, содержит «затяжки», когда большие значения скорости продолжают на всю глубину модели и не ограничиваются подошвой аномалиеобразующего тела. Предлагается следующее



▲ Рис. 3. Введение аномалиеобразующих тел в ГСМ: а – исходная ГСМ по томографии; б – маски многоугольников, задающих тела; в – маски областей возможных скоростных затяжек; г – результат модификации ГСМ.

решение этой проблемы. Аномальные значения скорости под подошвой тела заменяются интерполированными значениями, полученными с использованием участков модели, где аномалий нет. Для этого также создаются полигональные маски, ограниченные сверху подошвами тел, а снизу – нижней границей модели (рис. 3в). Интерполированные значения скоростей, применяемые по этим маскам, рассчитываются для каждого слоя постоянной глубины по одному из двух сценариев: 1) с использованием глобальных средних значений скоростей по всем областям между телами, 2) с использованием средних значений в областях между данным телом и соседними телами. Первый сценарий необходимо использовать в случае горизонтально-слоистой ВЧР, второй – если это условие нарушается. Края масок также размываются для предотвращения скачков статических поправок.

Для последующей коррекции ГСМ путём изменения формы многоугольников от каждого из них вычисляются гравитационный и магнитный эффекты во всех точках дневного рельефа. Алгоритм вычисления реализован в соответствии с существующим аналитическим решением прямых задач грави- и магниторазведки для постоянной плотности и намагниченности внутри многоугольников [Булычёв, 2010]. Поскольку векторизация таких вычислений позволяет выполнять их на CPU в реальном времени, при коррекции формы многоугольников становится возможным сразу видеть полученный результат, представляемый на графиках гравитационного и магнитного полей.

Ещё более важной задачей является реализация возможности в реальном времени видеть итоговый результат всего процесса комплексирования на

суммарном разрезе. Добиться этого позволяет оптимизация и максимальная параллелизация алгоритмов вычисления априорных статических поправок, ввода их в сейсмограммы и получения суммарного разреза (далее – «основные вычисления») на ядрах GPGPU. Следует отметить, что для этой процедуры сейсмограммы необходимо подготовить определённым образом: они должны быть в сортировке ОГТ, в них должны быть введены априорные кинематические поправки и мьютинг, а в заголовках трасс должны быть помещены номера ПП и ПВ, соответствующие номерам ОГТ исходной ГСМ. Кроме того, необходимо заранее вычислить нормировочные коэффициенты для суммарного разреза, поскольку эти величины нелокальны, и процедура их вычисления не может быть полностью распараллелена для каждого временного дискрета сейсмограмм. Используется следующая формула расчёта нормировочных коэффициентов для каждой ОГТ [Robinson, 1970]:

$$N = \frac{S}{\sqrt{n_0}} + \frac{(1-S)}{n_0},$$

где n_0 – число нулевых сэмплов в трассах сейсмограмм, относящихся к данной ОГТ, S – общий весовой множитель от 0 до 1, выбор которого обычно производится в соответствии с программным пакетом, в котором будет осуществляться дальнейшая обработка.

Перед выполнением основных вычислений необходимо определить интервал ОГТ, в котором изменения, вносимые в данный момент в ГСМ, могут влиять на суммарный разрез. Поскольку вносимые изменения связаны с перемещением одной из вершин многоугольника, берётся интервал между соседними вершинами (если перемещаемая вершина лежит между ними) или интервал между перемещаемой вершиной и наиболее уда-

лённой соседней (если обе соседние вершины лежат по одну сторону от перемещаемой). К интервалу с обеих сторон добавляется ширина окна сглаживания маски многоугольника. Затем по границам интервала находится минимальный и максимальный номера ПВ сейсмограмм, на которые будут влиять изменения ГСМ. Наконец, для данных номеров ПВ находятся минимальный и максимальный номера ОГТ, на которые будут распространяться изменения на итоговом разрезе после суммирования. Такой подход позволяет проводить основные вычисления непосредственно для того участка, на котором происходят изменения, а не для всей модели целиком, что существенно сокращает время расчёта.

Реализация параллельных алгоритмов основных вычислений проводилась с использованием API Nvidia CUDA и библиотеки PyCuda для Python [Kirk, 2007].

Вычисление априорных статических поправок осуществляется по стандартной формуле для каждой трассы ГСМ [Cox, 1999]:

$$\Delta t = \frac{H_i - H_f}{v_{rep}} - \sum_{i=1}^k \frac{dh}{v_i},$$

где H_f – уровень приведения, H_i – уровень замещения, v_{rep} – скорость замещения, dh – шаг ГСМ по глубине, v_i – значение дискрета, k – число дискретов на данной трассе. Выражение под знаком суммы вычисляется параллельно для каждого дискрета изменяемого участка модели, итоговое значение поправки для каждой трассы ГСМ получается с использованием атомарных операций суммирования.

Алгоритмы введения статических поправок и суммирования реализуются в

одной функции, которая выполняется параллельно для каждого временного дискрета сейсмограмм в найденном ранее интервале ОГТ. По переданному значению статических поправок для ПВ и ПП производится поиск временного дискрета, который после умножения на соответствующий нормировочный коэффициент будет добавлен в итоговую сумму. Суммирование также производится с использованием атомарных операций.

Всё вышеперечисленное позволило провести полный цикл вычислений в среднем за 30-50 мс (в зависимости от размера изменяемой области) на одной видеокарте Nvidia RTX 2080Ti, что делает возможным комплексирование в реальном времени.

ПО «Tomplex»

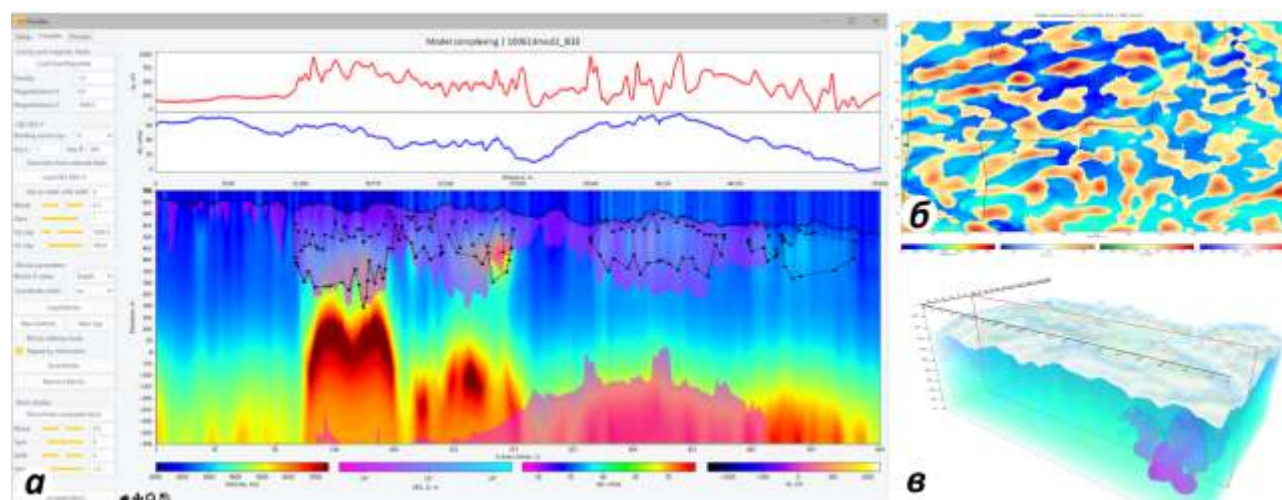
На настоящий момент существует ряд сторонних программных комплексов, позволяющих выполнять первый этап предложенной методики (вычисление ГСМ по сейсмической томографии) в том числе для 3D случая. Для реализации остальных этапов было разработано специализированное ПО «Tomplex», написанное на языке программирования

Python для использования в 64-разрядных системах Windows. ПО имеет интуитивно понятный пользовательский интерфейс (рис. 4), организованный в соответствии с порядком выполнения этапов комплексирования.

В начале работы пользователем загружаются исходные данные: первичная ГСМ в формате SEG-Y, сейсмограммы с введёнными кинематическими поправками (в том же формате), данные гравитационного и магнитного полей в формате Zmap или текстовой таблицы, разрез или куб УЭС в формате SEG-Y. Если в заголовках исходной ГСМ отсутствуют данные о координатах трасс и/или высотах дневного рельефа, дополнительно загружается текстовая таблица, содержащая эти данные. Кроме того, при работе с 2D данными есть возможность дополнительно загрузить растровое изображение с альфа-каналом, что особенно полезно для сопоставления геофизических данных с геологическим разрезом. Также отметим, что наличие всех перечисленных данных не является необходимым условием для работы с программой, обязательной является только загрузка ГСМ с геометрией.

После того, как необходимые данные

▼ Рис. 4. Интерфейс ПО «Tomplex»: а – главное окно программы; б – просмотр 3D данных по слайсам; в – интерактивная 3D визуализация.



загружены, пользователь может приступить к нанесению многоугольников, моделирующих аномалиеобразующие тела. Это производится последовательными щелчками мыши по отображаемому в интерфейсе программы профилю/сечению исходной ГСМ с наложением привязанных данных УЭС и точек максимального градиента. Когда многоугольники нанесены, в интерфейсе ПО указываются характеристики аномалиеобразующих тел: плотность, намагниченность, скорость, а также степень усреднения масок многоугольников и метод удаления «затяжек», если таковые присутствуют. Затем производится первичная модификация ГСМ и расчёт априорных статических поправок; если в ПО загружены сейсмограммы, вычисляется суммарный разрез или куб.

Дальнейшая модификация модели может проводиться в реальном времени (если на компьютере пользователя установлена поддерживаемая видеокарта и активирован соответствующий режим). Пользователь может перемещать, добавлять и удалять вершины многоугольников, наблюдая за изменениями гравитационного и магнитного эффектов, а также суммарного разреза в окне программы. Свойства тел также могут быть изменены в любой момент (однако после этого следует пересчитать статические поправки для всей модели).

По окончании процесса комплексирования пользователь может сохранить как вычисленные априорные статические поправки (в текстовый файл), так и изменённую ГСМ с получившимся разрезом (в SEG-Y).

Для работы с 3D данными в ПО кроме просмотра исходного куба по сечениям (инлайнам, кросслайнам и слайсам) реализована общая 3D визуализация

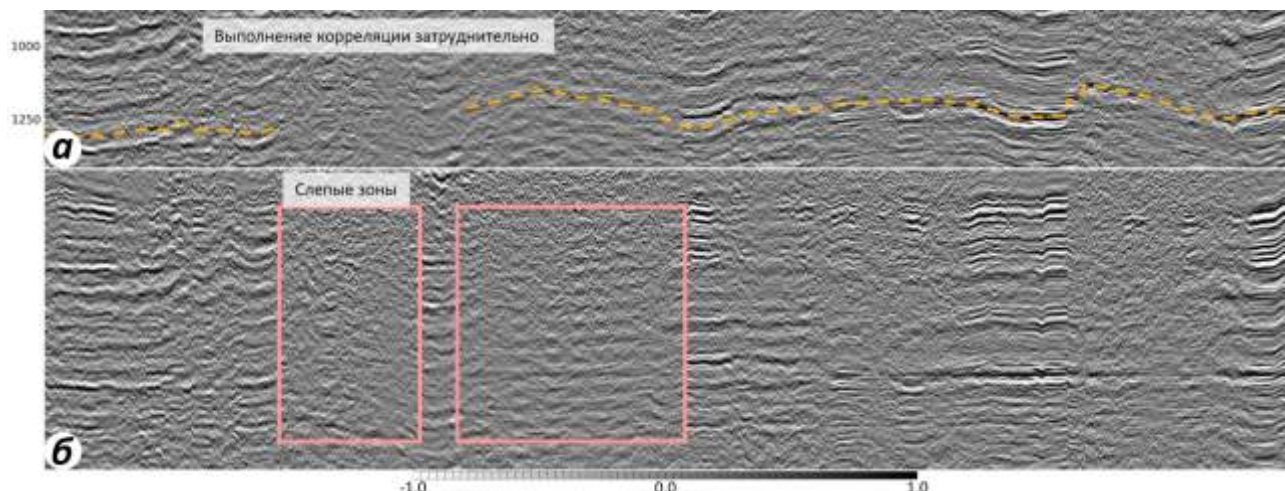
всего объёма ГСМ, привязанного к нему куба УЭС, контуров тел, вводимых в модель, с отображением дневного рельефа и текущего сечения, с которым ведётся работа (рис. 4в).

Результаты тестирования и выводы

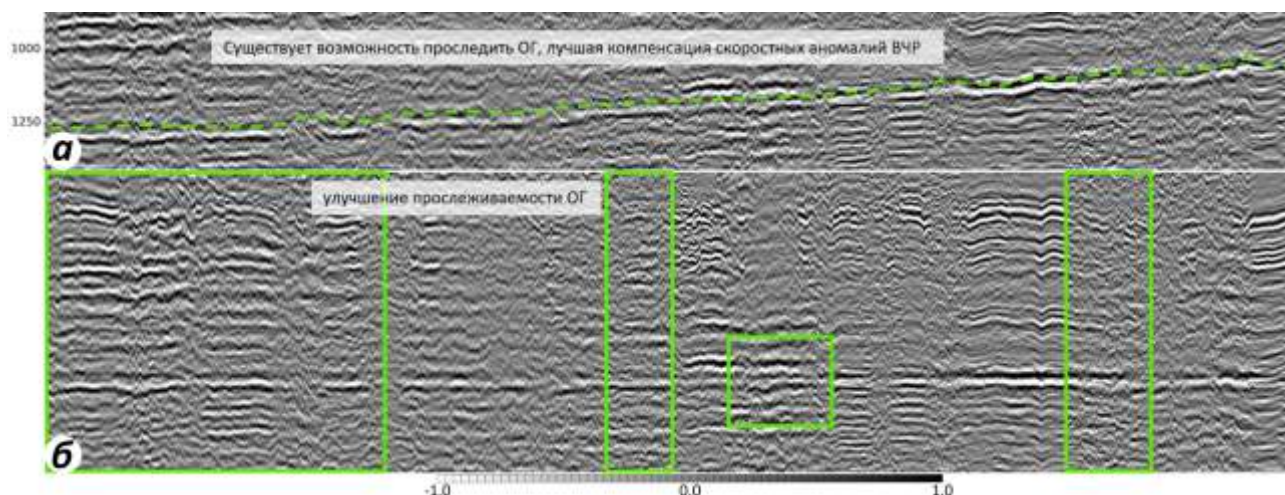
В ходе исследований были разработаны алгоритмы совместного комплексирования данных грави-, магнито- и электроразведки с ГСМ ВЧР по сейсмической томографии. Эти алгоритмы были обобщены на работу с 3D данными. Была произведена параллелизация алгоритмов, позволившая выполнять комплексирование в реальном времени. Создано независимое ПО «Tomplex», реализующее данные алгоритмы.

Тестирование ПО проводилось на реальных 2D данных ЛУ Восточной Сибири, имеющих низкое качество из-за наличия трапповых интрузий в ВЧР. Был выполнен полный цикл обработки данных по одинаковому графу для двух случаев, с использованием априорных статических поправок, вычисленных 1) по исходной неизменённой ГСМ, 2) по скорректированной в ходе комплексирования ГСМ. Результат обработки без комплексирования представлен на рис. 5. Результат обработки с комплексированием показан на рис. 6.

Как видно из данного результата, применение описанной методики комплексирования позволило улучшить прослеживаемость отражающих горизонтов (ОГ) и повысить надёжность интерпретации не только непосредственно в зонах наличия интрузий, но и в соседних зонах. Это связано с повышением точности расчёта остаточных статических поправок на длинных базах за счёт лучшего качества априорных поправок.



▲ Рис. 5. Результат без комплексирования: а – итоговый разрез; б – выравнивание на кровлю интрузии.



▲ Рис. 6. Результат с комплексированием: а – итоговый разрез; б – выравнивание на кровлю интрузии.

Следует отметить, что в рамках описанной в статье методики пока не производится решение прямой задачи электроразведки: данные ЭРР, как было отмечено, используются для отбивки контуров аномалиеобразующих тел по изолиниям, соответствующим заданному пользователем значению УЭС. Выбор этого значения должен быть сделан в соответствии с геологическими особенностями ЛУ, иначе в процесс комплексирования будет внесён субъективный фактор. Чтобы этого не допустить, предлагается дополнить методику моделированием разреза/сечения куба УЭС и его сравнением с реальными данными. Таким образом, итоговую ГСМ можно будет считать результатом совместной

инверсии данных несейсмических методов.

Список литературы

1. Cox M.J.G. Static Corrections for Seismic Reflection Surveys. SEG, 1999, 531 p.
2. Kirk D.B. NVIDIA CUDA Software and GPU Parallel Computing Architecture // Proceedings of the 6th International Symposium on Memory Management, ISMM 2007, Montreal, Quebec, Canada, October 21-22, 2007.
3. Robinson J.C. Statistically Optimal Stacking of Seismic Data // Geophysics, Vol. 35, №3 (June 1970), pp. 436-446.
4. Shelokhov I.A., Buddo I.V., Sharlov M.V., Agafonov Yu.A. Inversion of TEM

responses to create a near surface velocity structure // First Break, №36(10)/2018, P. 47-51.

5. Булычев А.А., Лыгин И.В., Мелихов В.Р. Численные методы решения прямых задач грави- и магниторазведки (конспект лекций). Учебное пособие для студентов и магистрантов специализации “Геофизика” – М. 2010. 164 с.

6. Гуренцов Н.Е., Твердохлебов Д.Н., Мельников Р.С. Повышение качества регистрируемых сейсмических данных на основе передовых технологий 2D/3D моделирования // Труды III Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии» Том III (III) [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020, С. 22-25.

7. Кочнев В.А., Гоз И.В., Поляков В.С. Технология расчета плотностной и скоростной моделей и статических поправок по гравиметрическим данным // Геофизика, №1/2014. С. 2-7.

8. Мостовой Д.В., Твердохлебов Д.Н., Лыгин И.В., Молчанов А.Б., Габова М.Н., Гвоздик С.А., Емельянова К.Л., Мельников Р.С. Построение модели ВЧР на основе комплекса геофизических методов с целью улучшения качества данных обработки сейсморазведки // Геофизика, №2/2021. С. 25-35.

Подробнее об авторах



Молчанов
Алексей Борисович

специалист группы
геофизических работ
ООО «РН-Эксплорейшн»



Лыгин Иван
Владимирович

старший геофизик группы
геофизических работ
ООО «РН-Эксплорейшн»



Твердохлебов
Данила Николаевич

к.т.н., руководитель группы
геофизических работ
ООО «РН-Эксплорейшн»



Мостовой
Дмитрий Владимирович

ведущий специалист группы
геофизических работ
ООО «РН-Эксплорейшн»