

Разработка численного алгоритма решения задачи обработки и определения базовой скоростной модели

А.Э. Шумейко, В.А. Цыганков*

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

Работа посвящена разработке автоматического алгоритма построения скоростной модели по данным полевого сейсмического профиля. Первоначально определяется полная энергия принятого сигнала и положения первых приходов отраженных волн. Трассы сортируются по общей глубинной точке, и выявляются спектры возможных скоростей в каждой точке трассы и каждой сборке общей глубинной точки (ОГТ) (в отличие от существующего способа определения скоростной модели, когда берется порядка 10 точек в нескольких точках трассы и, примерно, на одной из 10борок ОГТ). Процедура полностью автоматизирована, и в исследованном профиле, вместо 150 точек ручной обработки, получаются 4 млн точек. Значения выбранных эффективных скоростей соответствуют не только существующим критериям их определения (по совокупности трасс, отсортированных по ОГТ), но и требованию гладкости по первой производной. Это позволяет находить и достоверный профиль интервальной скорости в каждой точке трассы и каждой сборке общей глубинной точки. Точность определения скоростей в интервале 10–50 м/с. После пересчета временного профиля в глубинный, становится возможным получение высокоразрешенной и детализованной модели скоростного строения геологического профиля при проведении миграционных преобразований. Предусмотрен итерационный процесс уточнения полученных расчетов геологами и геофизиками с целью нахождения согласованных и непротиворечивых результатов.

Ключевые слова: сейсморазведка, общая глубинная точка, скоростная модель, геологическая модель, полевые записи, автоматизированная обработка, поточечная детализация, когнитивная технология

Для цитирования: Шумейко А.Э., Цыганков В.А. (2022). Разработка численного алгоритма решения задачи обработки и определения базовой скоростной модели. *Георесурсы*, 24(4), с. 138–147. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.4.12>

Введение

В настоящее время процесс обработки данных полевой сейсморазведки в основном рассматривается как комбинация математических методов, позволяющих улучшать качество исходного материала. Преимущественно это различные алгоритмы фильтрации, то есть чисто математические операции, в той или иной степени соответствующие физическим аспектам решаемой задачи. При этом список базовых математических методов остается практически неизменным последние несколько десятилетий. В предложениях компаний и специалистов, занимающихся практической обработкой данных, основную часть составляет умение составить граф обработки данных, состоящий из примерно сотни алгоритмов, позволяющий получить практически полезный результат. Выбор и связывание этих алгоритмов составляют существенную долю затрат времени и средств, а вычислительные мощности используются для этапных расчетов по выбранному пути обработки и представления результатов (Половников и др., 2018; Ажгалиев и др., 2019; Коробейников, Сидоркина, 2018; Захаров, Путилов, 2020; Галушкин и др., 2018).

В работе (Половников и др., 2018) авторы указывают, что достижение положительного результата обработки

и интерпретации сейсморазведочных данных зависит от ряда условий: качества исходных данных; наличия геолого-геофизической информации по площади исследований; приемлемого графа обработки и методики. Авторы акцентируют внимание на кинематической обработке данных, а именно: на выборе априорных статических поправок, определении скоростей суммирования, автоматической коррекции статических поправок, подавлении помех различного рода – в качестве оптимизационных решений.

Статья (Ажгалиев и др., 2019) представляет перспективность нефтегазоносных объектов через оценку совершенствования новых трендов в вопросе повышения качества результатов интерпретаций сейсмических событий путем оптимизации первичной информации, внедрения нового программного обеспечения и подходов к процедуре интерпретации. Однако предложенные подходы могут являться развитием уже существующих приемов по определению скоростной модели прохождения акустических волн в неоднородной среде.

Предметом исследования в статье (Коробейников, Сидоркина, 2018) являются методы обработки сейсмической информации в системе MATLAB. Первичный вейвлет-анализ данных позволяет проводить оптимизацию за счет экспресс-метода определения времени начала сейсмических событий и их магнитуды. Данные предложения авторов, вероятно, могут послужить первым шагом для оптимизации процесса алгоритмизации и автоматизации интерпретационных подходов.

* Ответственный автор: Вадим Андреевич Цыганков
e-mail: tsygankov.v@gubkin.ru

© 2022 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

В работе (Захаров, Путилов, 2020) рассматривается проблематика получения достоверных сейсмических данных на заболоченных участках. Заимствование подходов работы с данными от источников возбуждения волн различных типов (взрывного и импульсного) проводились с целью оценки возможностей получения качественных данных для подобных условий (болотистых местностей). Математическая алгоритмизация также подверглась оптимизации, ввиду анизотропных свойств объектов на разных уровнях. Авторами разработан ряд методологических подходов к работе над сложными объектами, что требует внимания и рассмотрения.

Повышение эффективности выполнения межскважинного сейсмического просвечивания требует перехода от методов с дискретной оценкой параметров среды к методам, позволяющим получать эти значения непрерывно в массиве (Галушкин и др., 2018). В статье описаны результаты применения многоволновой томографической модификации метода при проведении геофизических исследований. Представлена методика выделения полей падающих и отраженных волн, полученных в результате проведения сейсмостатического зондирования с целью детального расчленения геологического разреза. Также демонстрируются скоростные разрезы для продольных и поперечных волн, полученные в результате томографической инверсии. Однако рассмотренный подход не позволяет полностью автоматизировать задачу повышения точности получаемых выходных данных.

В процессе обработки и интерпретации полевых сейсмических наблюдений важную роль играет определение скоростной модели прохождения акустических волн в неоднородной среде (Шерифф, Гелдарт, 1987). Существующая практика обработки полевых данных включает работу как с теоретическими моделями, так и их практическое применение. Традиционный способ предусматривает сортировку полевых трасс по схеме общей глубинной точки (ОГТ), выделение годографов скоростей в виде гиперболической зависимости времени прихода волны в глубинную точку, в зависимости от расстояния от точки положения источника возбуждения до точки положения приемника относительно общей точки ОГТ. Далее, по кривизне годографа скорости отраженной волны в данной глубинной точке возможно определить условную скорость прохождения звуковой волны, называемую эффективной, получаемую из параметров гиперболы отраженной волны. Это связано с допущением в математической модели годографа, что скорость распространения волны постоянна от поверхности до данной глубинной точки. Несмотря на то, что скорость прохождения акустической волны меняется от точки к точке, такое с виду грубое допущение позволяет детализовать соотношение скоростей, а в дальнейшем, посредством дифференциальной процедуры, найти интервальные скорости распространения, связанные со слоистым строением изучаемого пространства.

Целью настоящей работы являлась автоматизация процесса преобразования исходных полевых данных в глубинно-скоростную модель (из временного разреза в глубинный, пересчетом по дифференциальному алгоритму) для преодоления погрешностей, связанных с необходимостью ручной обработки потока данных.

В рамках проведения исследований выполнялись следующие задачи. Во-первых, было необходимо выделить отражения одной границы как одного отражения, вместо суперпозиции суммы отражений в пределах длины интервала времени сигнала излучения, воспринимаемой источником как один отсчет. Авторы исходят из модели посланного сигнала как протяженного во времени процесса. Соответственно, посланный сигнал отражается от отражающей границы всей своей формой в течение интервала времени прохождения сигнала через границу. В это же самое время другие границы, через которые сигнал проходит другими своими частями, тоже порождают соответствующее отражение. В результате в точке приема принимается суммированный сигнал от разных границ с элементами посланного сигнала в разных сдвигах от начала сигнала. Фактически, так называемая деконволюция должна решать эту проблему, но исследование авторами возможных численных решений показали необходимость знать форму посланного сигнала с точностью не менее 5%. Иначе численное решение невозможно. Во-вторых, было необходимо получить качественно новую информацию о строении геологического разреза за счет ожидаемого повышения разрешения отражений в сборках полевых сигналов, позволяющего построить более точно скоростную модель эффективных скоростей по профилю. Авторы подразумевают, что при применении импульсных трасс, теоретическая разрешенность границ отражения достигает 2 отсчетов по записи трассы. В существующих методах выделить отдельную границу возможно лишь при их расположении на временной записи только для интервалов, превышающих длину во времени посылаемого импульса. На числа: при записи 2 мс можно получить отражения границ, отстоящих на 2–3 мс по времени прямого прохождения волны. При длине посланного импульса порядка 10 мс, при решении классическим методом, разрешение составит не менее 12 мс. Если импульс длиннее, то и разрешение ниже.

Необходимость не только в усовершенствовании алгоритмов и процесса обработки полевых сейсмических данных в рамках существующих представлений о моделях распространения и обработки акустического сигнала в неоднородной среде, но и необходимость связать их в общую цепочку с минимальным применением ручной работы специалистов приводят к созданию новой дифференциальной скоростной модели среды с переменными скоростями отраженной продольной волны. Эту модель можно использовать для дальнейшей обработки в целях выявления свойств и неоднородностей в структуре земной коры, что, несомненно, позволяет решать ряд практических задач поиска и разработки полезных ископаемых (Шерифф, Гелдарт, 1987).

Материалы и методы

На данный момент работа выполнена для оценки перспективности нового подхода к решению поставленных задач, связанных с разработкой алгоритма для построения геологической модели повышенного разрешения по данным наземной сейсморазведки. К сожалению, скважинные данные и данные о разрезе отсутствуют. Впоследствии предполагается провести сравнение получаемых в результате применения алгоритма данных с данными после

сигнальной обработки (вычитания волн-помех, применения поверхностно-согласованных процедур обработки) и дальнейшего построения финальных интервальных скоростей для сравнения вариантов оптимизации процесса интерпретации сейсмограмм через применение алгоритма и через обработку исходных данных.

О существовании целого ряда предварительных операций по подготовке данных для выявления годографов ОГТ хорошо известно всем специалистам по обработке полевых сейсмических данных. На практике существует понятие «графа обработки», предполагающее полное осмысление специалистами существа производимых операций с целью получения качественного результата (Клаербоут, 1989). Этот граф может предлагаться как обработка десятком процедур, выбранных из сотни возможных, и вносить существенный вклад в себестоимость работ. При этом оценка всех промежуточных результатов и определение скоростной модели производится вручную путем кропотливой и трудоемкой ручной работы специалистом-геофизиком, то есть является субъективным процессом. Контрольная процедура качества определенной скоростной модели называется суммированием по ОГТ с использованием принятых эффективных скоростей (рис. 1, 2) и по проявлению контрастных границ отражения позволяет судить о точности проделанной работы. Суммирование по ОГТ дает возможность из сейсмограммы ОГТ получить одну суммарную трассу; в результате последующего суммирования всех таких трасс получают временной или глубинный разрез вдоль сейсмического профиля. Пример уточненного профиля, являющегося источником для геологических интерпретаций, представлен на рисунке 2 (Шерифф, Гелдарт, 1987).

Общая идея получения из принятых математических процедур более полного и качественного результата

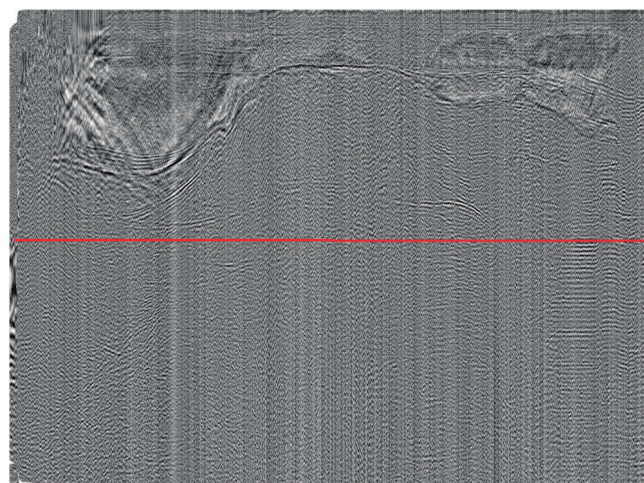


Рис. 1. Результат суммирования по ОГТ (оригинальная обработка – временной разрез). Красная линия соответствует нижней границе рис. 2. По осям представлены: горизонталь – полевой профиль (1360 трасс), вертикаль – время (3000 мс, отсчет ведется сверху вниз).

после проведенных исследований показала возможность автоматического получения скоростной модели среды с определением необходимых скоростей в каждой точке полевой записи и для каждого профиля ОГТ с точностью до 5 м/с (рис. 3–5). Практически это означает, что была построена скоростная модель примерно в 4 млн точек профиля по сравнению со 150 точками, получаемыми вручную с поточечной выверкой данных. 4 млн точек определяются как произведение количества точек ОГТ (1360) на длину записи трассы (3000 точек – с интервалом 2 мс). Геометрически шаг ОГТ по профилю – около 80 м, по глубине – около 6000 м (шаг 5 м). В подрисунковой подписи демонстрируется общепринятое распределение

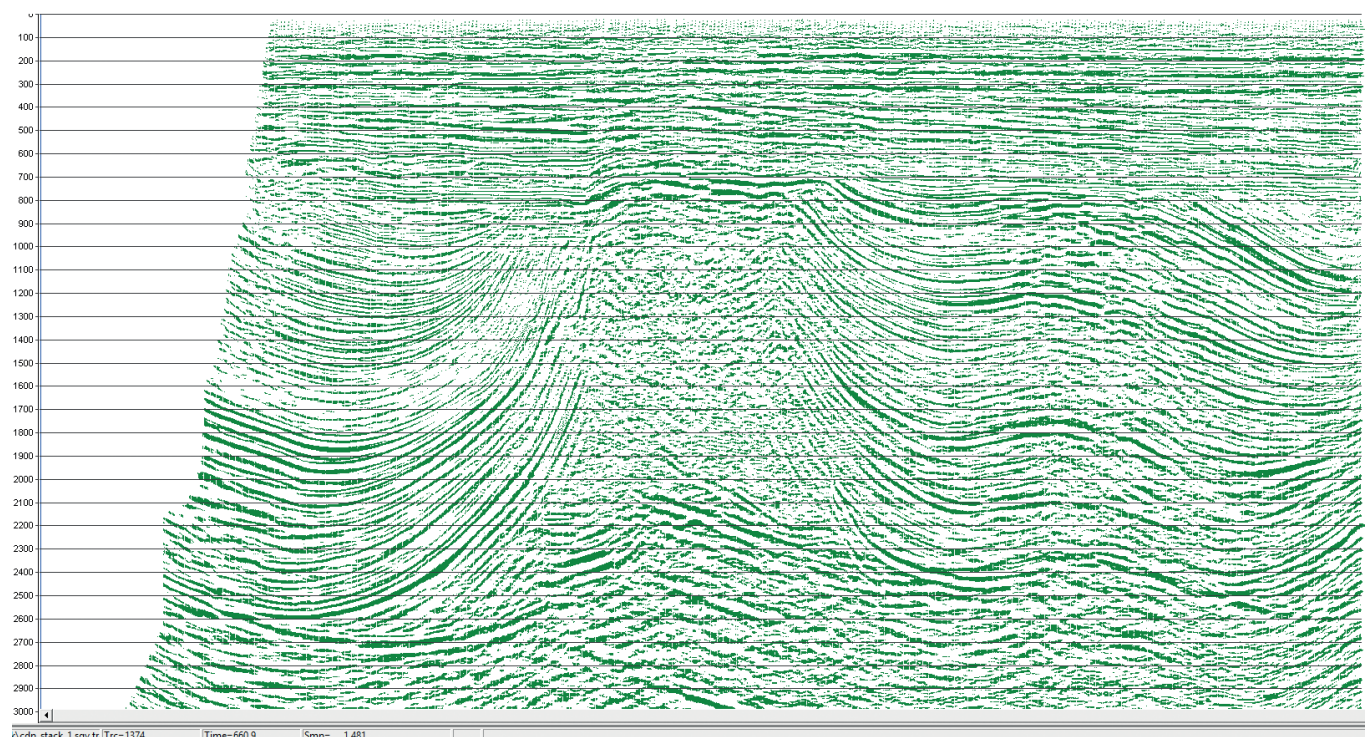


Рис. 2. Результат суммирования по ОГТ с оптимальным выбором модели эффективных скоростей (стандартная обработка). Вертикальный масштаб – в мс. По осям представлены: горизонталь – полевой профиль (1360 отсчетов), вертикаль – время (3000 мс, отсчет ведется сверху вниз).

литотипов по скоростям продольной отраженной волны. Трехбуквенные аббревиатуры представляют литологический состав, а знак «+» обозначает, что в некотором интервале используется несколько литотипов.

Для решения задачи автоматической обработки на первом этапе применялся алгоритм определения полной энергии принятого сейсмического сигнала, что позволило повысить детализацию исходной записи

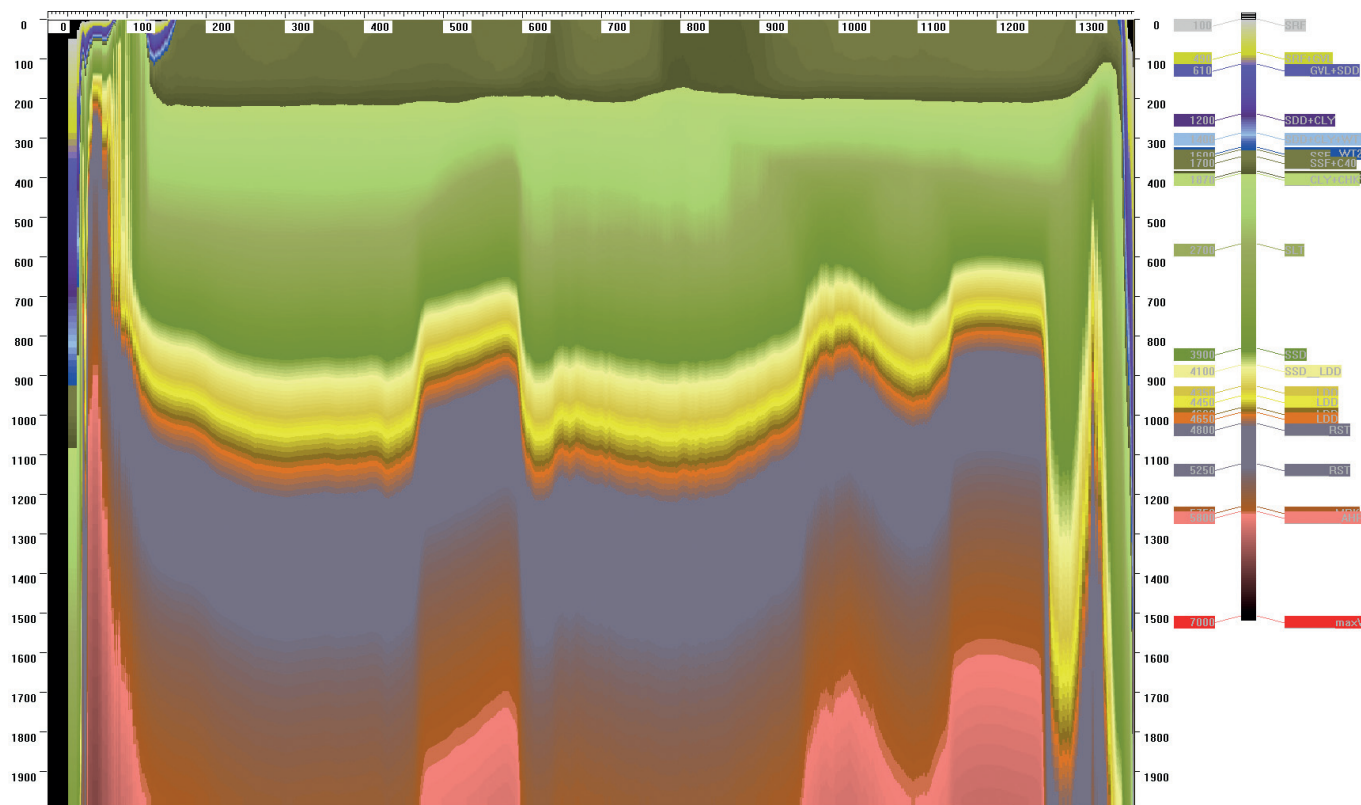


Рис. 3. Эффективная скорость во временном разрезе по новому методу. Красная линия соответствует нижней границе на рис. 2. Вертикальный масштаб в отсчетах трассы. Шаг по времени – 2 мс. По осям представлены: горизонталь – полевой профиль (1360 отсчетов), вертикаль – глубина (2000 м, отсчет ведется сверху вниз).

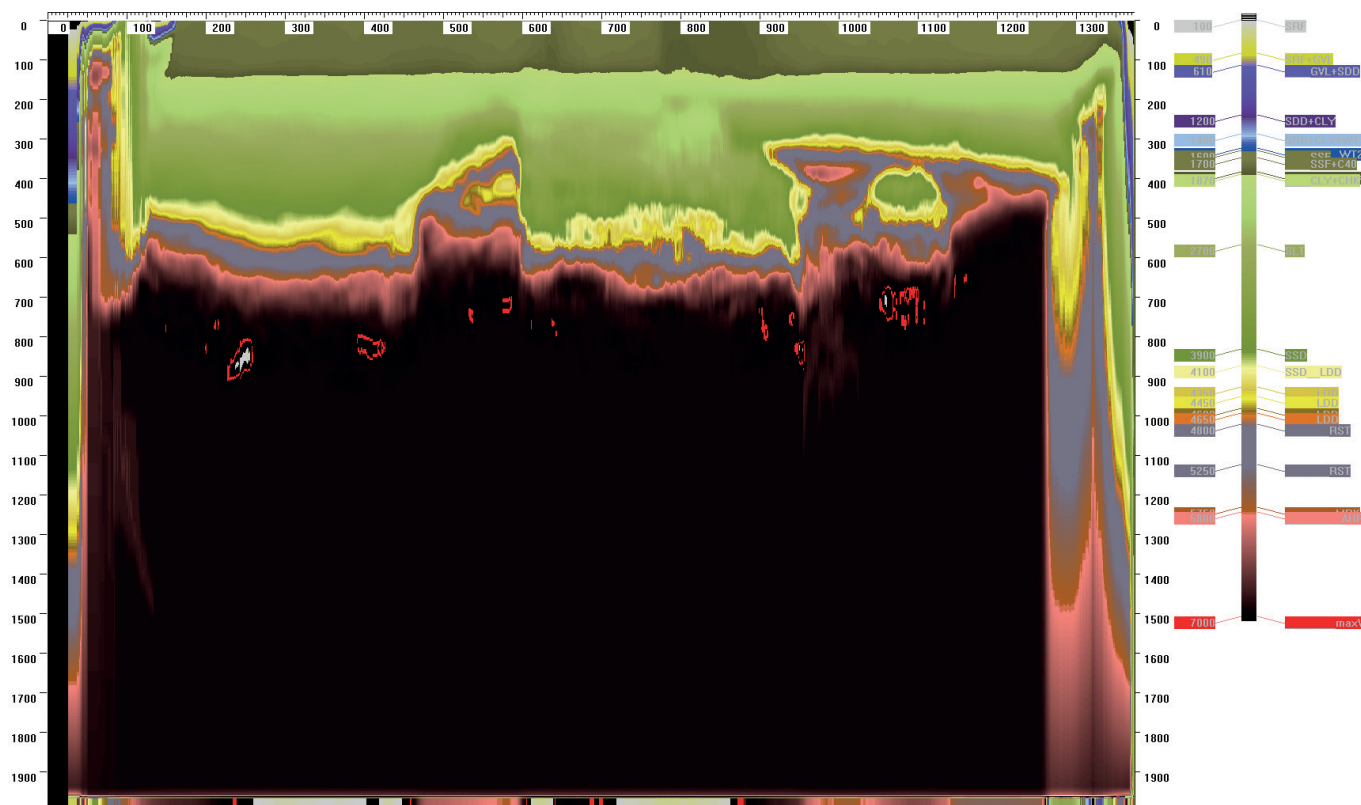


Рис. 4. Интервальная скорость во временном разрезе по новому методу. По осям представлены: горизонталь – полевой профиль (1360 отсчетов), вертикаль – глубина (2000 м, отсчет ведется сверху вниз).

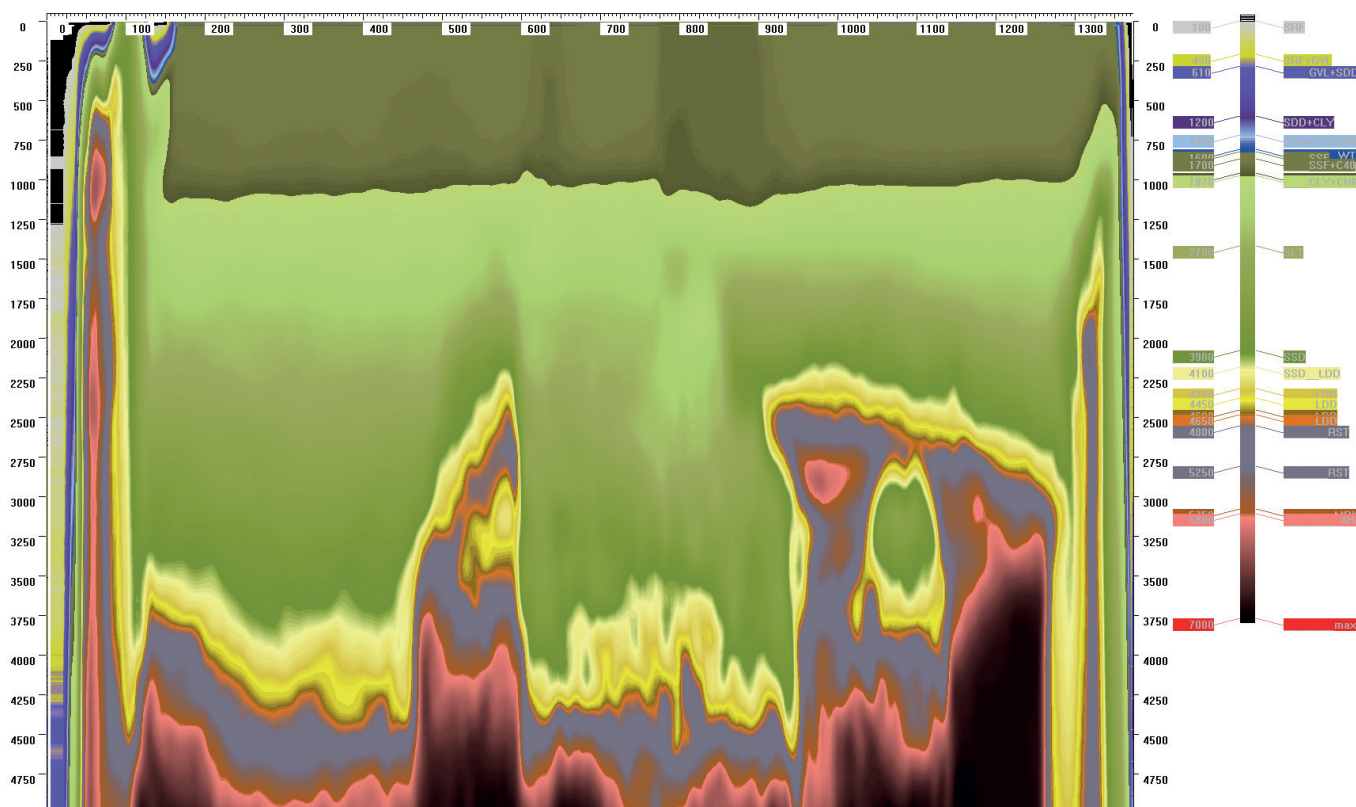


Рис. 5. Интервальная скорость в глубинном разрезе по новому методу. По осям представлены: горизонталь – полевой профиль (1360 отсчетов), вертикаль – глубина (5000 м, отсчет ведется сверху вниз).

(начальная – представлена на рисунке 6, после обработки – на рисунке 7). Более крупная схема на рисунке 8 демонстрирует полученный результат в терминах первого прихода волны, т.е. времени прямого распространения волны от источника до отражающей границы. На рисунках 9 и 10 дополнительно определены спектры возможных скоростей для профиля ОГТ, и отображено сравнение профилей скорости, полученных традиционным и предлагаемым способами. Там же представлено определение профиля интервальной скорости, которая также должна соответствовать критериям допустимой физической модели. Пересчет временного разреза в глубинный также может быть осуществлен с разрешением до одного отсчета временной трассы, что впоследствии позволит применить методы расчета миграции трасс для приведения модели к виду, учитывающему реальные отклонения условной трассы ОГТ от вертикали, принятой как допущение на первом этапе обработки. Сам алгоритм оптимизации является авторским ноу-хау, не раскрывая который можно лишь сказать, что полная энергия определялась как сумма кинетической (скорость изменения сигнала) и потенциальной (текущее смещение) энергий по динамической форме сигнала как периодического процесса.

Промежуточный результат проведенных работ, оцениваемый как доступный для геологического уточнения и интерпретации, представлен на рисунке 5.

В настоящее время самый трудоемкий этап обработки заключается в подборе совокупности точек для определения эффективной скорости. Эта рутинная процедура имеет потенциал к оптимизации путем автоматизации алгоритмов, но все равно заставляет профессионалов-геофизиков тратить много сил и внимания для ее реализации. Предлагаемый автоматический алгоритм переводит

ручную работу в контроль качества получаемого результата и позволяет сосредоточиться специалистам на существенных аспектах геофизики и геологии.

В предлагаемом решении спектр возможного распределения вероятностей скоростей связан с каждым отсчетом сейсмической трассы и дает специалисту фактически непрерывное представление допустимых значений скорости. На рисунке 9, справа представлен исходный энергетический профиль сборки трасс по ОГТ, в центре – синей линией и точками на ней – представлен результат ручной обработки специалистом по принятым методикам, а слева этот же результат показан красной линией на фоне поточечного спектра вероятностей скоростей после применения предлагаемого алгоритма.

Прослеживание по красной трассе на фоне полного спектра показывает, при ручной обработке, тенденцию определения максимума вероятности при выборе максимально возможного значения скорости и непрерывности изменения ее величины. При этом в верхней части разреза, там, где сборка ОГТ представлена полным и необрезанным видом, детализация спектра высокая, и линия проведена уверенно.

В верхней части сборки ОГТ есть все записи отраженных сигналов. Набор трасс имеет огибающую, и ее видно полностью. В средней и нижних частях сборки огибающая трасс отсутствует по причине прекращения линии приемников, т.е. запись неполная. Это как раз видно на рисунках в статье. То, что в верхней части запись узкая – не важно. Годографы продолжают вниз до конца записи трассы и видны полностью, во всех приемниках. А вот отражения с большой задержкой имеют обрезанные годографы и не содержат огибающую сборки, т.е. они неполные. Тем более, что годографы спрямляются при увеличении глубины

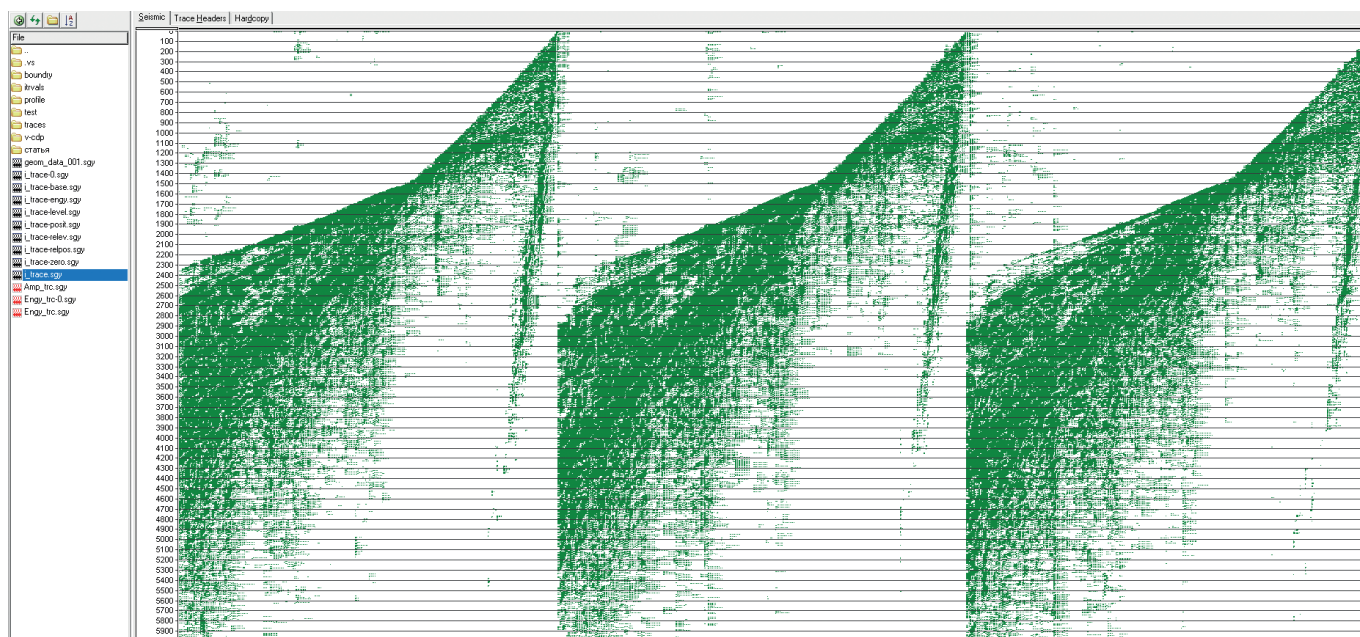


Рис. 6. Исходная полевая запись сейсмического сигнала. По осям представлены: горизонталь – сборки ОГТ (3 шт.), вертикаль – глубина (6000 м, отсчет ведется сверху вниз) или время (3000 мс, отсчет ведется сверху вниз).

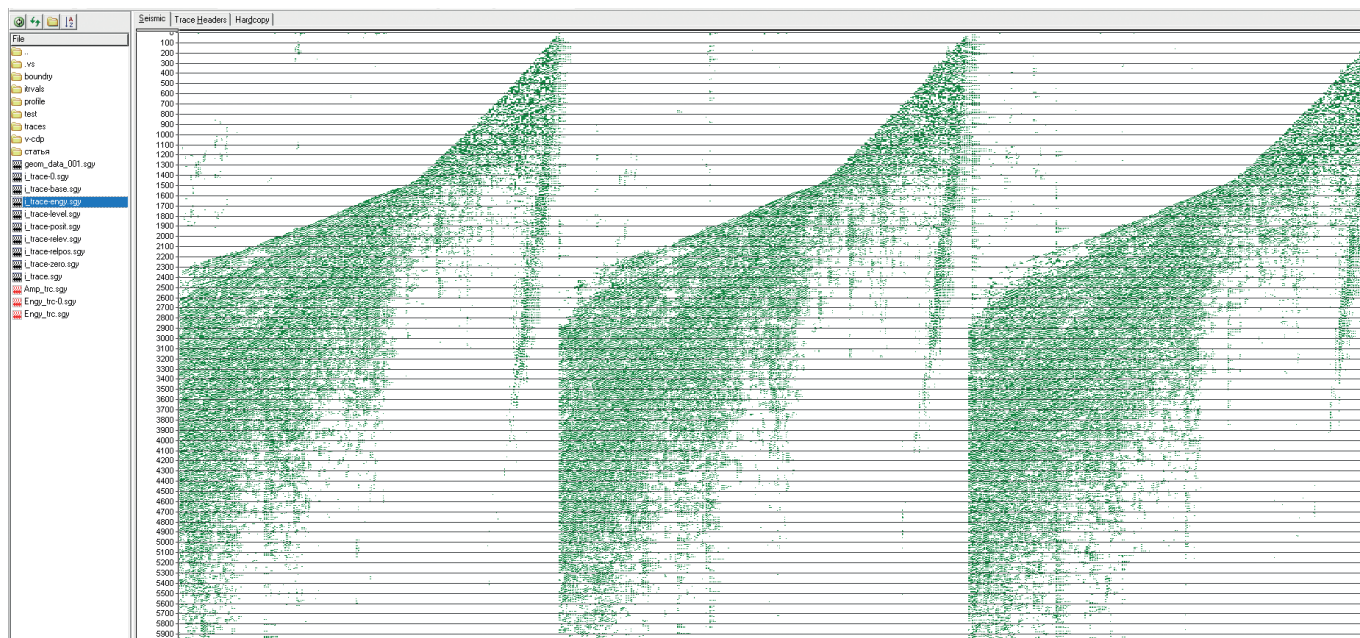


Рис. 7. Сборка ОГТ в полной энергии сейсмического сигнала. По осям представлены: горизонталь – сборки ОГТ (3 шт.), вертикаль – глубина (6000 м, отсчет ведется сверху вниз) или время (3000 мс, отсчет ведется сверху вниз).

отражения, поэтому обрезка записи по бокам значительно снижает точность определения глубины отражения и скорости по годографу. Но авторов больше волнует именно присутствие полной формы огибающей. Полное представление трасс при сборке ОГТ должно иметь вид необрезанной с боков «елки» с полным видом годографов отражений. Это требует значительной длины линии расстановки датчиков и дает полную картину распределения скоростей. Если длина линии расстановки датчиков недостаточна, то происходит обрезка данных сбоку, и в нашем представлении картина отражений становится неполной из-за неполного прослеживания годографа отражений. Соответственно, это ухудшает восстановление границ отражений на больших глубинах. В приведенном примере для возможной глубины отражений более 6000 м надежно,

по полному годографу, можно определить эффективную скорость лишь до 2500–3000 м, далее годограф обрезается, и определение эффективной скорости приобретает большую погрешность. Для сравнения можем сказать, что и в существующих методах на подобном соотношении глубин и линий расстановки датчиков, прослеживание скоростей практически невозможно и определяется лишь опытом интерпретатора.

В средней и нижней частях сборки трасс, с неполным представлением записи, положение выбранного профиля скорости становится менее определенным. На более детализованном рисунке 10 видно, что при недостатке данных специалист опирается на доступную возможность выбора значения, и трасса скорости становится более гладкой.

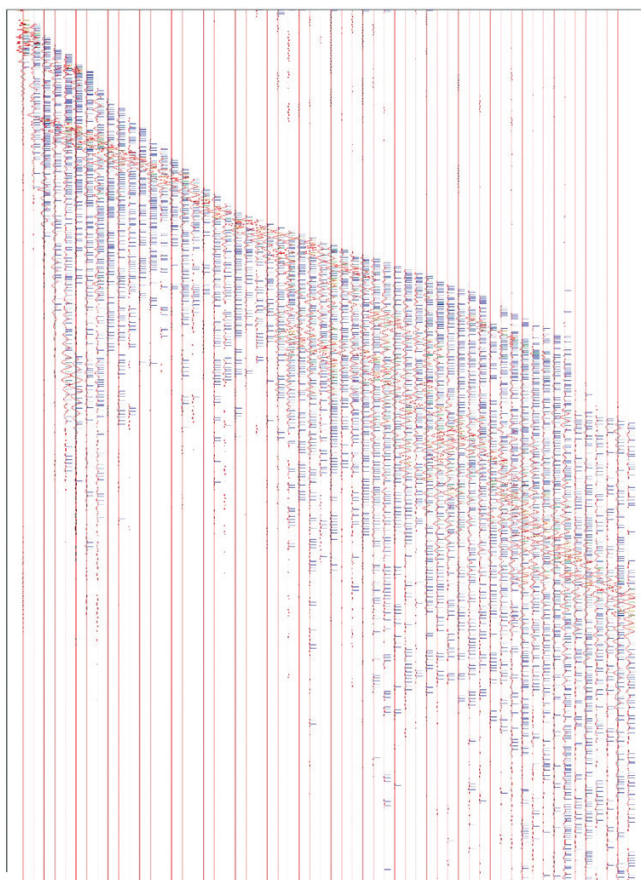


Рис. 8. Трассировка по возможным первым приходам в сборке полной энергии сигнала, схема ОГТ. Цвет показывает условный уровень энергии отражения на границе. Огибающая – распределение условной относительной скорости по профилю. По осям представлены: горизонталь – сборки ОГТ (200 трасс), вертикаль – время (3000 мс, отсчет ведется сверху вниз).

На рисунке 10 приведено сравнение результата автоматического алгоритма (синяя линия) и алгоритма ручной обработки (красная линия). Главным критерием выбора алгоритма автоматической обработки было приближение к экспертной ручной работе специалиста. На данном рисунке изображена только одна сборка ОГТ; но и другие сборки, выбранные для ручной обработки, демонстрируют аналогичный результат. К алгоритму автоматической обработки предъявлено более строгое требование получаемого результата – обеспечение достаточно гладкого и физически корректного профиля интервальной скорости. Поскольку интервальная скорость определяется дифференциально относительно эффективной, то и требования к рассчитанному профилю эффективной скорости включают требования по величине первой производной. Все это вместе потребовало значительных затрат в реализации поставленной цели, и некоторые аспекты требуют дополнительных исследований.

Тем не менее общий результат определения эффективных скоростей во временном разрезе для полевого сейсмического профиля показан на рис. 3. Его приходится сравнивать с традиционным результатом обработки на рис. 2, поскольку оценка результата (рис. 1) выполнена скорее для традиционного представления. Проблема состоит в том, что для улучшения разрешенности исходных трасс была построена фактически импульсная трасса первых приходов (рис. 7, 8), а сигнал отражения от границы потерял свою «протяженность».

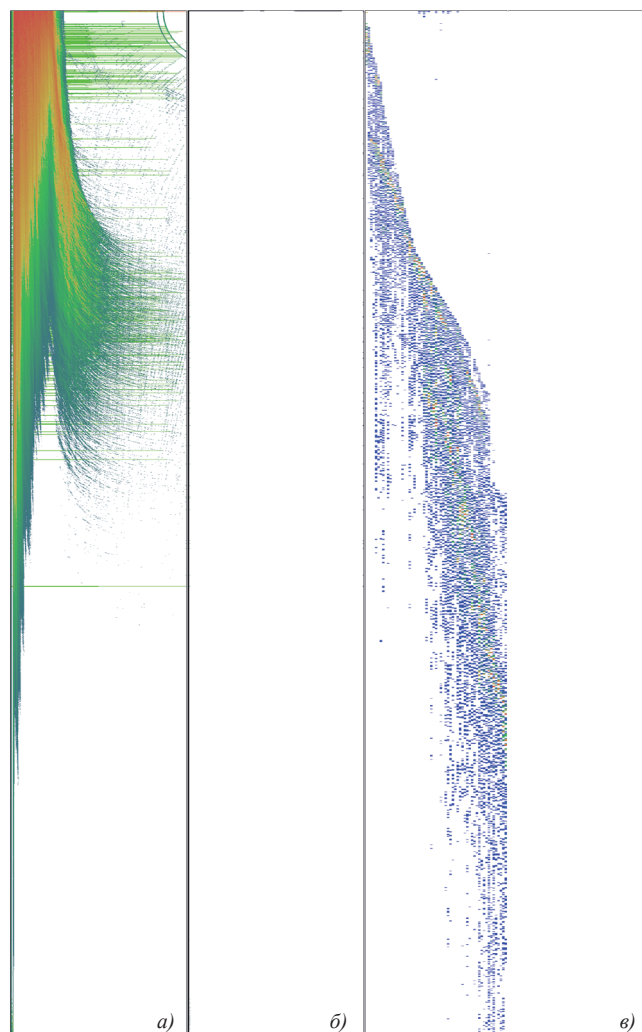


Рис. 9. а) Спектр возможных эффективных скоростей и профиль эффективной скорости. б) Профиль эффективной скорости. в) Профиль ОГТ по первым приходам волн. По осям представлены: горизонталь – эффективная скорость (до 600 м/с), вертикаль – время (3000 мс, отсчет ведется сверху вниз).

И если в традиционном виде суммирование по ОГТ фактически представляется суммированием знакопеременного сигнала со сдвигом фазы (Ажгалиев и др., 2019), то для нового алгоритма такое суммирование невозможно по причине отсутствия «протяженности» и «знакопеременности» для трасс, представленных импульсами. Сборка на рис. 1 отображает суммирование исходной трассы (рис. 6) с найденным поточечным распределением скоростей (рис. 3) и формирует малоинформативный образ в смысле новой технологии, но традиционный для существующих.

Дальнейшее использование полученного поточечного распределения для определения интервальных скоростей (рис. 4) потребовало разработки специальных алгоритмов определения эффективной скорости во временном разрезе. Это связано с тем, что расчет интервальной скорости требует гладкости функции эффективной скорости не только по значениям, но и по первой производной. Иначе рассчитанные значения интервальной скорости начинают значительно осциллировать и выпадают из корректного физического диапазона значений 500–6000 м/с. Оценка получаемого результата отражена на рисунке 10. Центральная часть – в соотношении поточечная эффективная скорость

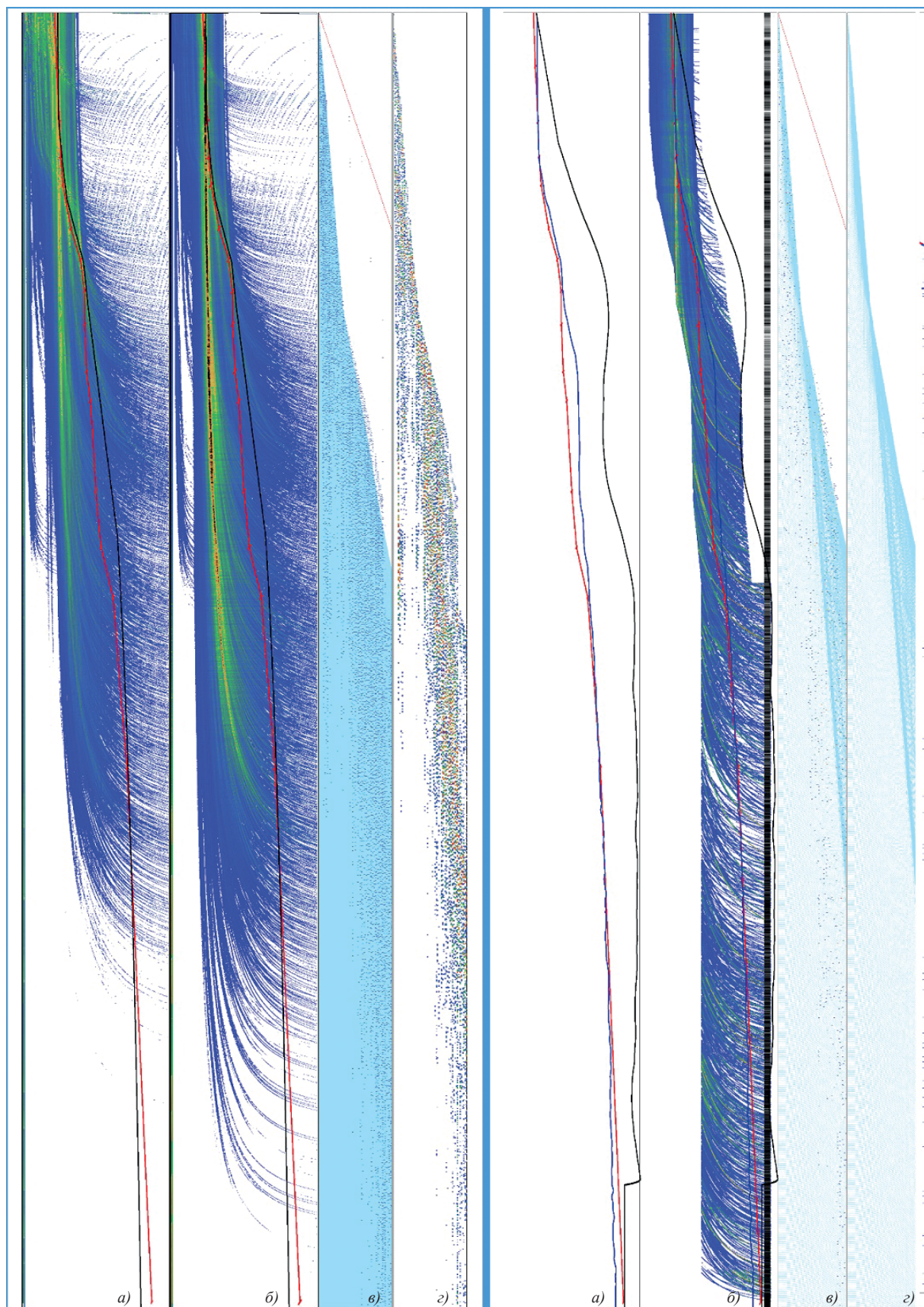


Рис. 10. Два варианта анализа данных (4 левых и 4 правых профиля). Левая сборка. Сравнение традиционного определения эффективной скорости (красная линия) и автоматический способ (черная линия). а) и б) Спектры возможных эффективных скоростей и профиль эффективной скорости с разными алгоритмами анализа спектра. в) Профиль ОГТ по первым приходам волн. г) Профиль ОГТ по первым приходам волн. Правая сборка. Сравнение традиционного определения эффективной скорости (красная линия) и автоматический способ (синяя линия). Интервальная скорость по автоматическому методу (черная линия). а) и б) Профиль эффективной и интервальной скоростей с разными алгоритмами анализа спектра. в) Профиль ОГТ по первым приходам волн. г) Профиль ОГТ по первым приходам волн. По осям представлены: горизонталь – эффективная скорость (до 600 м/с), вертикаль – время (3000 мс, отсчет ведется сверху вниз).

(синяя линия) и поточечная интервальная скорость (черная линия). Во всех представленных трассах во временном разрезе показаны полные результаты для 3000 отсчетов с интервалом 2 мс. Еще раз стоит обратить внимание на то, что исходный материал по нижней половине записи обрзан и мало информативен. Это приводит к значительной неопределенности в определении эффективной скорости как в традиционной обработке, так и в новом алгоритме. Здесь, скорее, приходится применять теоретическую оценку распределения скоростей на большой глубине.

Хотя для нового алгоритма при его высокой детализации возможно провести выравнивание и предельной глубинной скорости, исходя из определения значения на глубине для каждой точки профиля ОГТ. Для представленного полевого профиля оценка достаточно точно определяемого интервала по времени составляет 1500 отсчетов с интервалом записи 2 мс и 200 пунктов приема в расстановке с шагом между приемниками 30 м. При традиционной обработке скоростная модель определяется с интервалом по профилю полевой трассы до 1000 м, для разработанной – 30 м. При определенной скорости в верхней части разреза от 1700 до 1800 м/с и максимальной глубинной эффективной и интервальной до 5000 м/с оценка реальной качественной скоростной модели по глубине составляет до 3000 м. Для увеличения глубинности необходимо увеличить базу поверхностной расстановки, по крайней мере, в 2–2,5 раза. Тогда появляются дополнительные возможности в определении величин скорости в профиле разреза.

При наличии поточечного распределения интервальной скорости и известного времени положения отсчета легко пересчитать временной профиль к глубинному. Согласно приведенной выше оценке, предельная глубина была ограничена 6000 м, что для 1500 отсчетов определяет шаг по глубине в 4 м. Полученный результат представлен на рисунке 5. Этот результат можно рассматривать как конечный в определении скоростной модели сейсмического профиля. Дальнейшая обработка алгоритмами типа миграции позволит получить корректную геометрию распределения скорости (разрешение до 5 м/с) по глубине (шаг около 5 м) и горизонтали (шаг около 3 м) и передать полученную модель геологам для правок и уточнений.

Обсуждение и выводы

Изложенные выше результаты отражают первый этап в достижении цели более полной и автоматизированной обработки полевых сейсмических данных. Анализ полученных результатов показал необходимость повышения уровня применяемых алгоритмов до уровня искусственного интеллекта из-за значительных разбросов в значениях исходных данных и низкой адаптации математических процедур к реальности исходных данных. Тем не менее при надежном определении профиля эффективных скоростей и соответствующих интервальных скоростей возможно получить высокодетализованный скоростной разрез. Для него разработан и протестирован алгоритм уточнения геометрии структуры по глубине и профилю на основе модельного решения задачи эйконала с характеристиками по точности и быстродействию, соответствующими представленным результатам. Произведена оценка применения описанного подхода к решению задач 3D сейсмоки, и

результаты выглядят вполне обнадеживающими, особенно при применении современных вычислительных многопроцессорных систем (практически, расчет профиля в данном объеме 1360 ОГТ * 3000 отсчетов при 200 приемниках занимал около 1 часа машинного времени). Конечный результат работы определен как получение высокоскоростного и автоматического алгоритма с выходом на построение геологической модели по данным полевой сейсморазведки.

Организация итерационного процесса согласования скоростной модели геологами и геофизиками позволит получить хорошее приближение к реальной геологической модели с возможно высокой геологической интерпретацией по литотипам и пористости. При применении разработанного алгоритма геофизики освобождаются от ручной, рутинной и тяжелой работы по выявлению точек, пригодных для определения скорости, и смогут решать в большей степени геофизические задачи построения достоверной и выверенной геологической модели.

Заключение

В настоящее время решены основные задачи по преобразованию полевых записей в трассы первых приходов волн (получаемые трассы авторы называли импульсными, но специалисты их классифицировали как времена первого прихода), определению эффективной скорости по сборкам ОГТ во всех точках ОГТ и всех точках временных отсчетов трасс. Используются алгоритмы только автоматической обработки, предусматривающие малую чувствительность расчетного процесса к изменению исходных данных. Проанализированы и используются дифференциальные и интегральные связи между эффективными и интервальными скоростями. Для получения физически корректных значений скоростей эти связи накладывают ограничения на допустимые изменения величин, тем самым повышая устойчивость решения поставленной задачи.

Однако процесс решения выявил новые проблемы и трудности в получении приемлемого результата. Во-первых, оказалось, что первичный материал представляется в диапазонах изменений, которые плохо поддаются автоматизации, что, в свою очередь, требует усложнения алгоритмов, приближаясь к уровню искусственного интеллекта. Во-вторых, применяемая схема суммирования трасс по ОГТ не совместима с трассами первых приходов вследствие их импульсного характера и процесс повышения соотношения сигнал/шум не реализуется, а повышение точности определения эффективной скорости обеспечивается только увеличением количества учитываемых точек.

В данной работе описаны достигнутые результаты, но сам процесс создания алгоритма требует дополнительных изысканий для получения действительно автоматического процесса получения скоростной модели среды с определением необходимых скоростей в каждой точке полевой записи и для каждого профиля ОГТ. В настоящий момент все усилия направлены на разработку алгоритма когнитивного анализа исходного материала, так как существующие результаты могут частично облегчить выбор скоростной модели, но полностью заменить специалиста пока компьютерные технологии машинного зрения не способны.

Финансирование/Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2022-300 в рамках программы развития НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

Авторы выражают благодарность рецензенту за критический анализ рукописи, ценные комментарии и замечания, которые способствовали улучшению работы.

Литература

Ажгалиев Д.К., Исенов С.М., Каримов С.Г. (2019). Новые возможности обработки и интерпретации сейсмических данных в оценке перспективности локальных объектов. *Известия Уральского государственного горного университета*, 1(53), с. 48–59.

Галушкин И.В., Рагозин Н.А., Стенин Д.В., Игнатьев В.И. (2018). Опыт применения сейсмоакустических методов исследования для построения детальной модели среды при проектировании особо ответственных объектов атомного строительства. *Инженерные изыскания*, 12(11-12). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800597>

Захаров Ю.М., Путилов И.С. (2020). Получение качественных сейсмических данных на заболоченных территориях севера пермского края. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, 20(2), с. 215–225. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2020.2.2>

Клаербоут Д.Ф. (1989). Сейсмическое изображение земных недр. М.: Недра, 407 с.

Коробейников А.Г., Сидоркина И.Г. (2018). Первичная обработка данных о сейсмическом событии при помощи вейвлетов в MATLAB. *Кибернетика и программирование*, 1, с. 36–47. <https://doi.org/10.25136/2306-4196.2018.1.25245>

Половников С.С., Табрин В.Л., Шабалин С.В. (2018). Кинематическая обработка сейсморазведочных данных, полученных в сложных сейсмогеологических условиях. *Вести газовой науки*, 3(35), с. 315–421.

Шерифф Р., Гелдарт Л. (1987). Сейсморазведка. Т. 1, 2. М.: Мир.

Сведения об авторах

Александр Эдуардович Шумейко – кандидат тех. наук, доцент, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

Россия, 119991, Москва, пр. Ленинский, д. 65, корп. 1

Вадим Андреевич Цыганков – кандидат тех. наук, доцент, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

Россия, 119991, Москва, пр. Ленинский, д. 65, корп. 1
e-mail: geomodel@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.07.2022;

Принята к публикации 09.11.2022; Опубликована 20.12.2022

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Development of a numerical algorithm for solving the problem of processing and determining the basic velocity model

A.E. Shumeiko, V.A. Tsygankov*

National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Vadim A. Tsygankov, e-mail: tsygankov.v@gubkin.ru

Abstract. This work is devoted to development of an automatic algorithm for determining the velocity model from the data of the field seismic profile. First of all total energy of received signal and the positions of the first arrivals of reflected waves has to be determined. The traces sort by common depth point and the spectra of possible velocities determine at each point of the trace and each assembly of the common deep point. The procedure is fully automated and as a result, instead of about 150 points of manual processing, 4 million points are obtained on the test profile. The values of chosen effective speeds correspond not only to existing criteria for their determination, but also to requirement of smoothness in first derivative. This makes it possible to determine reliable interval velocity profile at each track point and each collection of the common depth point. Speed determination accuracy in the range of 10-50 m/s. After recalculating the time profile into a depth profile, it becomes possible to obtain high-resolution and detailed model of the velocity structure of the geological profile during migration transformations. An iteration process refines the calculations obtained by geologists and geophysicists in order to obtain consistent and consistent results.

Keywords: seismic, common depth point, velocity model, geological model

Acknowledgements

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement No. 075-15-2022-300 within the framework of the development program for a world-class Research Center "Efficient development of the global liquid hydrocarbon reserves".

The authors are grateful to the reviewer for valuable comments and suggestions that made it possible to improve the article.

Recommended citation: Shumeiko A.E., Tsygankov V.A. (2022). Development of a numerical algorithm for solving the

problem of processing and determining the basic velocity model. *Georesursy = Georesources*, 24(4), pp. 138–147. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.4.12>

References

Azhgaliev D.K. et al. (2019). New opportunities for processing and interpreting seismic data in assessing the prospects of local objects. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 53(1), pp. 48–59. (In Russ.)

Clairbout D.F. (1989). Seismic image of the Earth's interior. Moscow: Nedra, 407 p. (In Russ.)

Galushkin I.V., Ragozin N.A., Stenin D.V., Ignatiev V.I. (2018). Experience in the use of seismoacoustic research methods for constructing a detailed model of the environment in the design of especially critical objects of nuclear construction. *Inzhenernye izyskaniya*, 12(11–12), pp. 52–62. (In Russ.)

Korobeinikov A.G., Sidorkina I.G. (2018). Primary processing of data on a seismic event using wavelets in MATLAB. *Kibernetika i programmirovaniye*, 1, pp. 36–47. (In Russ.)

Polovnikov S.S., Tabrin V.L., Shabalin S.V. (2018). Kinematic processing of seismic data obtained in difficult seismogeological conditions. *Vesti gazovoy nauki*, 35(3), pp. 315–421. (In Russ.)

Sheriff R., Geldart L. (1987). Seismic exploration. Moscow: MIR. (In Russ.)

Zakharov Yu.M., Putilov I.S. (2020). Obtaining high-quality seismic data in the wetlands of the north of the Perm region. *Vestnik PNIU. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 20(2), pp. 215–225. (In Russ.)

About the Authors

Alexander E. Shumeiko – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, National University of Oil and Gas "Gubkin University" Leninsky ave., 65/1, Moscow, 119991, Russian Federation

Vadim A. Tsygankov – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, National University of Oil and Gas "Gubkin University" Leninsky ave., 65/1, Moscow, 119991, Russian Federation

Manuscript received 7 July 2022;

Accepted 9 November 2022; Published 20 December 2022