

Подход к восстановлению скоростных характеристик верхней части разреза на основе данных нестационарных электромагнитных зондирований

- И.А. Шелохов, АО ИЭРП, Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск;
- И.В. Буддо, АО ИЭРП, Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск;
- А.С. Смирнов, ООО «Газпром геологоразведка», ФГБОУ ВО «ТИУ», г. Тюмень.

Аннотация

Подавляющее большинство месторождений нефти и газа Западной Сибири находятся в области распространения многолетнемерзлых пород (ММП). При интерпретации материалов сейсморазведочных работ на территориях, где развиты ММП, необходимо учитывать их влияние на материалы сейсморазведки. Недоучёт влияния ММП на форму отражающих горизонтов может привести к значительным ошибкам в структурных построениях.

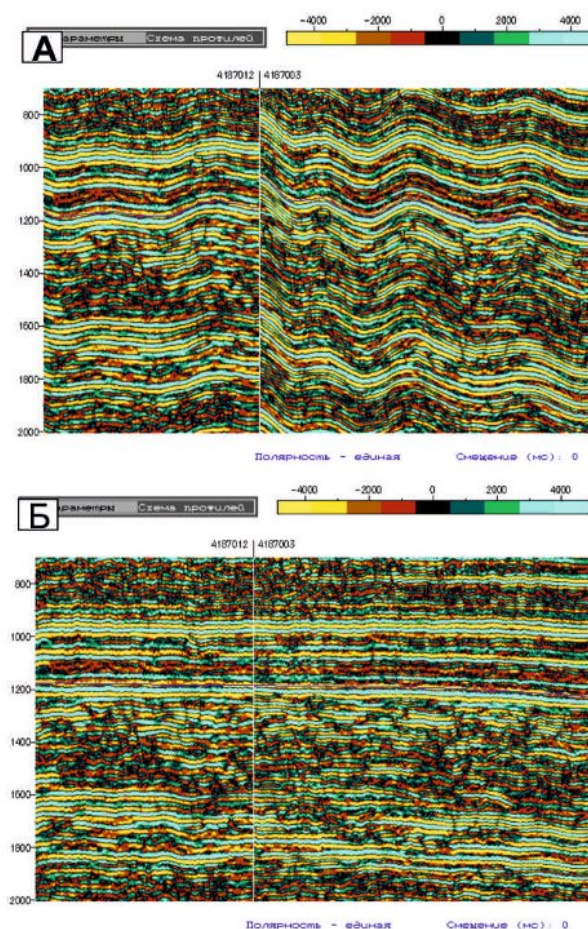
По результатам математического моделирования и на основе экспериментальных данных показано, что практическое применение разработанной методики приводит к повышению качества обработки данных сейсморазведки, т.е. позволяет повысить точность геологических моделей месторождений нефти и газа.

Введение

Области распространения многолетнемерзлых пород (ММП) занимают около 5 млн. км² территории России [10]. Значительное количество разведанных месторождений России, как рудных так и нерудных, также сосредоточены в области распространения ММП.

Одним из немаловажных является вопрос влияния ММП на ухудшение качества материалов сейсморазведочных работ при поисках на нефть и газ на территории Западной Сибири.

При интерпретации материалов сейсморазведочных работ на территориях, где развиты ММП, необходимо учитывать их влияние на материалы сейсморазведки. Источником такого влияния выступают скоростные аномалии, сосредоточенные в относительно тонком, но неоднородном по толщине приповерхностном интервале залегания слоёв многолетнемерзлых пород. Недоучёт влияния ММП на форму отражающих горизонтов может привести к значительным ошибкам в структурных построениях и ухудшению волновой картины во всем временном диапазоне (Рис1.).



▲ Рис. 1. Пример сейсмического разреза, осложненного влиянием ВЧР (по данным ОАО «СибНАЦ», 2003): а – до коррекции; б – после коррекции за ВЧР

При расчете статических поправок традиционными методами (путем сглаживания вариаций времен годографа) на разрезе возникают искусственные синклинали. Комбинация глубоких низкочастотных вариаций статических задержек с интенсивным полем помех, затрудняющих прослеживание отражений, создает трудноразрешимую ситуацию [7].

Поправки за влияние локальных изменений свойств ММП определяются заменой слоя после проведения детального скоростного анализа. Значения скоростей для расчёта поправок за ММП снимаются по траектории прослеживания горизонтов, связанных с мерзлотой, или по условному уровню ниже ММП.

Авторами предлагается подход к восстановлению упругих свойств верхней части разреза по данным малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне (мЗСБ.)

Повышение информативности модели ВЧР

Проблема учета влияния сложной ВЧР на данные сейсморазведки освещалась в работах многих исследователей [2, 3, 4].

Верхняя часть разреза может характеризоваться как повышением, так и понижением скоростей с глубиной. Первый тип разреза более распространен, второй наблюдается главным образом в районах многолетней мерзлоты, особенно в зимнее время. И тот, и другой тип разреза может осложняться наличием тонких высокоскоростных прослоев. Распределение скоростей по латерали определяется соотношением льда и свободной воды в порах породы. Скорость продольных колебаний изменяется от 2700-4000 м/с в мерзлых терригенных породах до 1500-2500 м/с в зонах «растеплений».

Изменения скорости в мерзлых породах зависят от температуры, пористости и влагонасыщенности. Наибольшее увеличение скорости при промерзании происходит в рыхлой грубозернистой породе (до 5 раз в чистом кварцевом песке). При этом значительную роль играет, видимо, и уплотнение породы за счет возникающих при промерзании давлений. Присутствие глинистого материала сглаживает скачок скорости продольных волн (повышение в глинах на 10-20 %). Дифференцированность отложений ВЧР может возрасти по сравнению с талой породой за счет переменной льдистости. Даже в литологически однородной породе (песок), температура в которой в интервале нескольких десятков метров практически постоянна, при акустическом каротаже наблюдались изменения скорости от 2000 до 4500 м/с.

Учет неоднородностей мерзлоты различными способами с точки зрения характера распределения и величин остаточных ошибок может привести к неоднозначным и неудовлетворительным результатам.

Минимальный (4 - 6 м) уровень среднеквадратических остаточных погрешностей глубин Ногт после ввода поправок за мерзлоту наблюдается только для относительно глубоко залегающих (более 2000 м) горизонтов при поперечных размерах аномалий 1 – 6 км.

Во всем остальном спектре глубин и размеров аномалий учет неоднородностей мерзлоты статическими поправками не обеспечивает соответствующей корректировки Ногт. Остаточные погрешности глубин Ногт при этом меняются в самых широких пределах.

Использование методики учета преломленного луча во многом зависит от качества и степени сглаживания полученных горизонтальных спектров, парамет-

ров их расчета, последующей увязки рассчитанных значений интервальных скоростей и других особенностей самой методики [3].

«Золотой серединой» является сочетание обоих методов, однако без наличия детальной скоростной модели они будут вносить ошибки друг в друга.

Вместе с тем, в условиях Западной Сибири получить детальную модель ВЧР возможно при помощи методов индуктивной электроразведки. Геоэлектрические условия Западной Сибири благоприятны для использования метода мЗСБ. Отличительной особенностью литологии отложений осадочного чехла Западной Сибири является его относительно «молодой» – мезо-кайнозойский возраст, типично осадочного происхождения. Это обуславливает слабую литификацию отложений, относительно большое распространение слабосцементированных пород, что отражается в геоэлектрических характеристиках разреза.

Так, за счет наличия в разрезе относительно «молодых» мезо-кайнозойских отложений, осадочный чехол территории исследования характеризуется низкими значениями УЭС. На фоне высокопроводящего разреза повышенным электрическим сопротивлением могут обладать многолетнемерзлые горные породы верхней части разреза.

Методика специальной обработки данных мЗСБ позволит восстановить из детальной геоэлектрической модели ВЧР скоростную модель.

Методика работ методом мЗСБ

Метод ЗСБ является одним из ведущих методов электроразведки и применяется для решения широкого круга геологических задач.

Данный метод относится к группе индуктивной электроразведки с искусственными источниками электромагнитных полей.

Среди различных вариантов источников и приемников электромагнитного поля наиболее распространены установки типа «петля - петля» либо «петля в петле». Это объясняется высокой технологичностью подобного рода установок, не требующих устройства заземлений, что позволяет проводить исследования в любое время года.

Работы методом мЗСБ проводились с использованием электроразведочной станции «FastSnap» [8].

Площадные сети использовались для решения задач детального картирования верхней части разреза. Такие сети проектируются по заранее имеющейся сети сейсмических профилей. Плотность таких наблюдений составляет 33 ф.т./км². Использование площадных высокоплотных сетей наблюдений делает возможным восстановление модели ВЧР с высокой степенью детальности [8, 13].

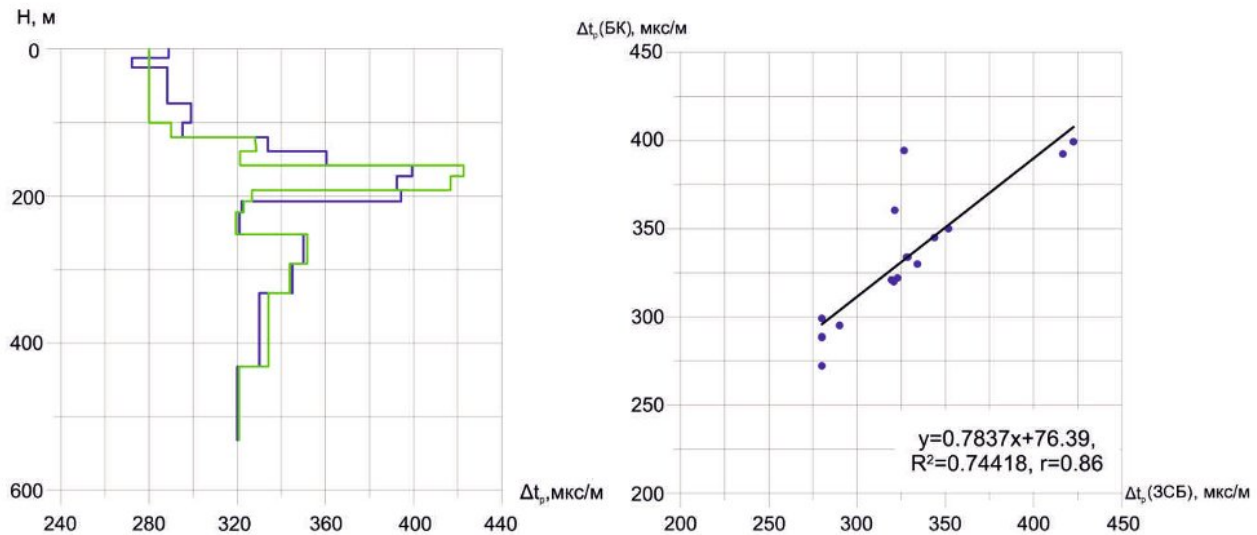
Прогноз акустических свойств разреза на основе эмпирических зависимостей Фауста

Для того, чтобы от геоэлектрических свойств пород перейти на акустические, возможно использование эмпирических зависимостей. Зависимость между удельным электрическим сопротивлением и скоростью продольных волн впервые была представлена Л. Фаустом в 1953 г. [11], (1).

Первоначальная форма эмпирической зависимости Фауста:

$$sonic = const \times (TVD \times Resistivity)^{(-exp)} \quad (1)$$

где sonic – интервальное время пробега продольной волны, TVD – глубина в футах, resistivity – удельное электрическое сопротивление, const и exp – эмпирические коэффициенты уравнения [12].



Авторами была проанализирована возможность применения данного эмпирического уравнения для восстановления акустических свойств разреза по данным мЗСБ.

Следующим шагом выполнялся расчет и калибровка эмпирических коэффициентов уравнения Фауста. Для расчета коэффициентов использовалась опорная скважина. Основные требования для такой скважины - это наличие акустического и бокового каротажа в как можно более широком диапазоне глубин, начиная от первых метров. Производится многократная итерация пересчета бокового каротажа в акустический. Первым производится подбор экспоненты ввиду того, что именно она отвечает за уровень итоговой кривой, константа при этом фиксируется. При достижении корректного уровня кривой экспонента фиксируется и производится подбор константы.

Для исследуемой площади были приняты коэффициенты: $\text{const} = 1470$, $\text{exp} = 0.155$.

С учетом уравнения Фауста геоэлектрическая модель по данным мЗСБ была пересчитана в акустическую модель. Достоверность применения уравнения к данным ЗСБ можно оценить исходя из анализа полученных акустических моделей, рассчитанных из БК и из ЗСБ (Рис. 2).

▲ Рис. 2. Акустические модели, рассчитанные по БК и по ЗСБ. а – сходимость моделей; б – кроссплот корреляционной зависимости.

Скоростные модели, полученные в результате выполненных преобразований, также обладают высокой корреляционной зависимостью. Средняя ошибка восстановления Δt_p составляет 4% (Табл. 1).

▼ Табл. 1. Ошибка восстановления Δt_p

Δt_p (ГИС), мкс/м	Δt_p (ЗСБ), мкс/м	ошибка, %
436	438	0.4
441	442	0.2
397	376	5.2
361	369	2.2
327	345	5.5
364	325	10.7
средняя ошибка, %		4.06

Комплексная методика восстановления скоростных характеристик разреза

Доказав правомерность применения эмпирической зависимости, был составлен граф расчета скоростной модели ВЧР (Рис. 3).

Первым шагом выполняется калибровка коэффициентов уравнения Фауста на эталонной скважине, далее выполняется преобразование геоэлектрических моделей, полученных по данным мЗСБ, в



▲ Рис. 3. Принципиальная схема расчета скоростной модели ВЧР на основе данных мЗСБ через эмпирические зависимости Фауста.

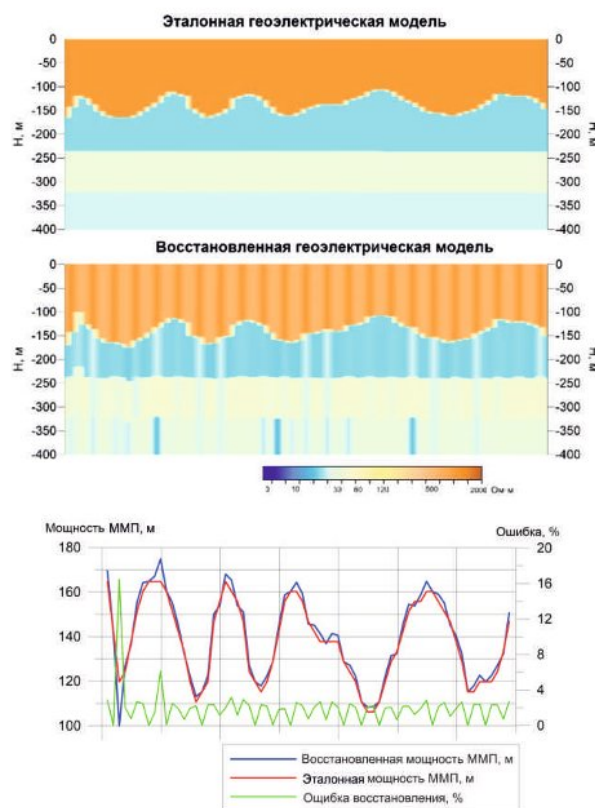
акустические модели. За счет высокой пространственной плотности данных мЗСБ акустические модели получены с шагом 100×300 м. Помимо геоэлектрических характеристик, мЗСБ позволяет с высокой степенью детальности восстановить структуру ММП, которая, в свою очередь, является неотъемлемой частью модели ВЧР.

Оценка точности восстановления структуры современных ММП

Для успешного применения методики необходимо восстанавливать модель ВЧР с высокой точностью. Существуют различные методы изучения ММП, такие как: электротомография, сейсморазведка методом лучевой томографии и др. Однако существуют сложности, связанные с трудностями выполнения полевых работ в зимний период, а также сравнительно низкой глубиной методов. Методы малоглубинной индуктивной электроразведки хорошо зарекомендовали себя в данном вопросе [8, 13].

Чтобы подтвердить эффективность применения метода мЗСБ для картирования структуры ММП, было проведено математическое моделирование. На основе данных бокового каротажа была построена геоэлектрическая модель ВЧР. По данной модели были сгенерированы кривые ЗСБ и проведена инверсия.

Инверсия выполнялась в автоматическом режиме на основе алгоритма Нелдера-Мида. Раскреплялись параметры мощности и УЭС слоев. По результатам выполненной инверсии средняя погрешность определения мощности ММП составила 1.7%, что соответствует 2.4 м (Рис. 4).



▲ Рис. 4. Геоэлектрическая модель ММП: А – Эталонная геоэлектрическая модель; Б – восстановленная геоэлектрическая модель; В – график ошибки восстановления мощности ММП

Исходя из проведенного исследования можно сделать уверенный вывод, что метод мЗСБ картирует области распространения ММП с высокой точностью.

Возможности применения методики для уточнения модели ВЧР

В основе обоснования любого подхода лежит математическое моделирование. Сущность эксперимента заключается в обосновании предлагаемой выше методики на основе математического моделирования сигналов мЗСБ и данных сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ).

Эксперимент включает в себя следующие процедуры:

1. Создание акустической модели изучаемого объекта на основе данных акустического каротажа одной из скважин исследуемого участка и осложнение ВЧР слоем многолетнемерзлых пород с неравномерной мощностью.

2. Расчет синтетических сейсмограмм.

3. Создание геоэлектрической модели ВЧР на основе данных бокового каротажа, структура ММП задается равнозначно акустической модели.

4. Создание синтетических кривых ЗСБ и их зашумление.

5. Автоматическая инверсия зашумленных данных ЗСБ.

6. Расчет статических поправок на основе первых вступлений.

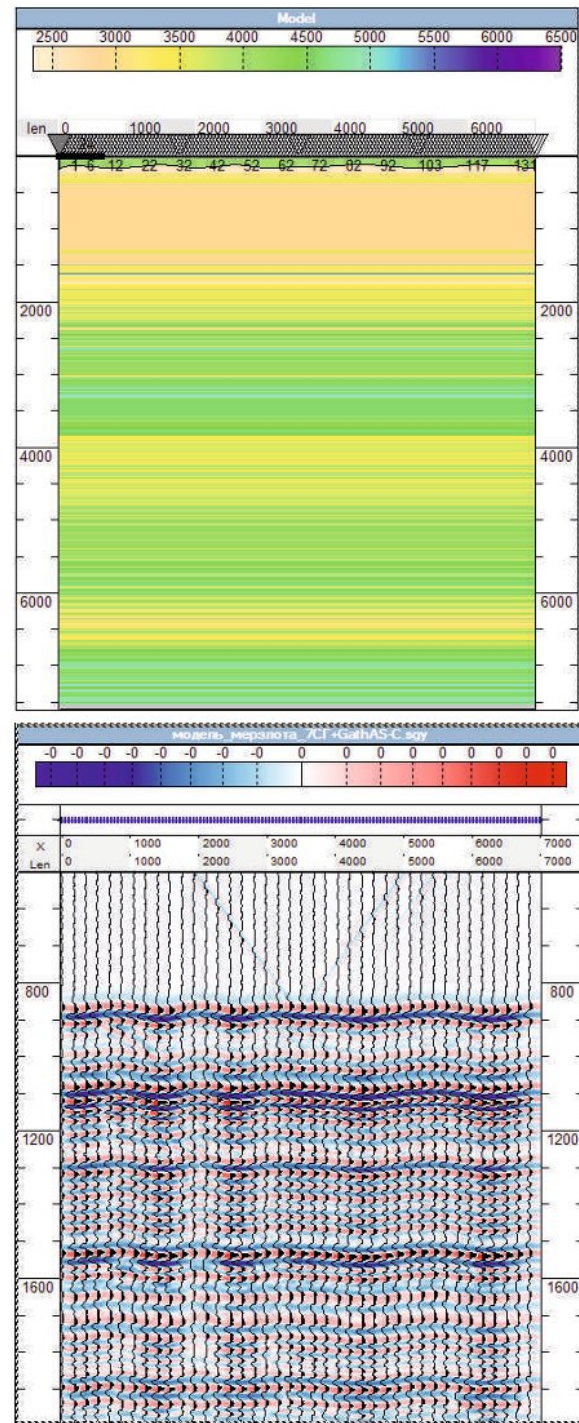
7. Расчет статических поправок на основе данных мЗСБ по предложенной методике.

8. Ввод статических поправок и сравнение итоговых синтетических разрезов.

Моделирование волновой картины производилось в программном комплексе Tesseral Pro. Модель создана на основе данных акустического каротажа. Далее в модель внедрялся слой, ММП мощность которого варьируется от 100 до 170 м. Скорость продольных волн в слое ММП

составляет 4000 м/с, что в свою очередь соответствует высокольдистым ММП.

Расчет синтетических сейсмограмм выполнялся при помощи свертки скоростной модели с импульсом Риккера частотой 25 Гц (Рис. 5).



▲ Рис. 5. Скоростная модель со слоем ММП: А – скоростная модель; Б – сейсмический отклик без дополнительной обработки (Tesseral Pro)

Следующим шагом была построена геоэлектрическая модель ВЧР на основе данных бокового каротажа. Геометрия слоя ММП неравномерной мощности была взята с построенной ранее акустической модели. Был выполнен расчет синтетических кривых. Автоматическая инверсия производилась на основе алгоритма Нелдера-Мида. По результатам инверсии восстановленная геоэлектрическая модель конвертировалась в акустическую. Далее, зная мощность ММП и восстановив скоростную модель, можно произвести расчет статических поправок.

Скорости продольных волн по данным ЗСБ восстанавливаются с средней погрешностью 14%, что соответствует 550 м/с (Рис. 6).

Известно, что статические поправки рассчитываются различными способами, в нашем случае будет использован один из традиционных методов – расчет

статических поправок по первым вступлениям [1].

Первые вступления аппроксимируются гиперболой, после чего подбирается скорость таким образом, чтобы гипербола соответствовала первым вступлениям. В нашем случае скорость была равна 4110 м/с.

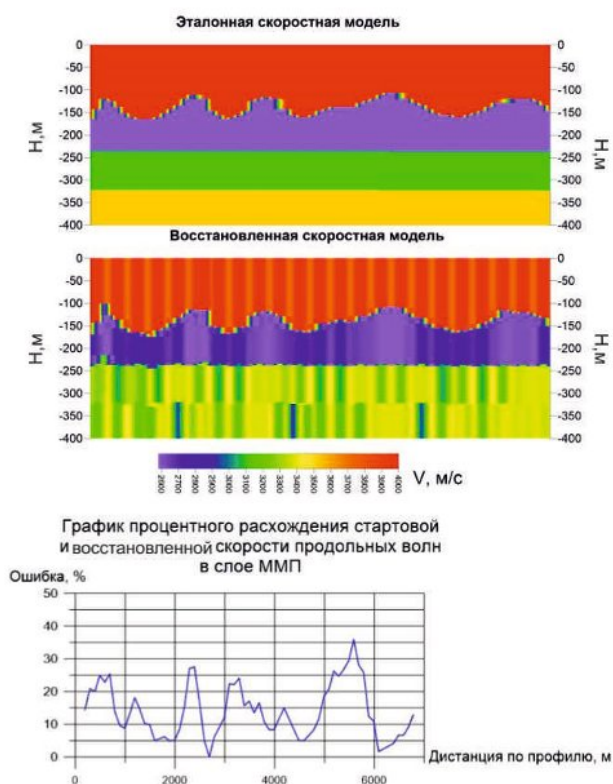
Далее производился расчет статических поправок на основе представления, что средняя мощность неоднородного слоя ММП составляла примерно 200 м. Полученные статические поправки были введены в разрез, обработанный по стандартному графу.

Анализируя структурные построения по полученным разрезам был сделан вывод, что средняя погрешность определения целевого горизонта составляет 20 м (15 мс), что в свою очередь является недостаточно точным результатом.

Следующим шагом был выполнен расчет и ввод статических поправок на основе данных мЗСБ. За основу для расчета была взята скоростная модель ВЧР, восстановленная ранее на основе результата автоматической инверсии. Для расчета статических поправок использовалась мощность ММП, восстановленная по результатам инверсии, и скорость в слое ММП, полученная в результате применения уравнения Фауста. Далее полученные статические поправки были введены в сейсмограммы, обработанные теми же процедурами, что и в первом случае, в две итерации: ввод статики и коррекция.

Анализ структурных построений по целевому горизонту позволил сделать вывод, что применение статических поправок по данным ЗСБ позволило достичь средней погрешности в 4 м (5 мс).

Чтобы оценить, какой из методов определения статических поправок дает



▲ Рис. 6. Скоростная модель ММП по данным мЗСБ

наиболее точный результат, было выполнено сопоставление различных вариантов расчета статических поправок (Рис. 7). Исходя из полученных разрезов видно, что расчет статических поправок по первым вступлениям искажает разрез и дает невыдержанность отражений, в свою очередь статические поправки по данным ЗСБ позволяют получить выдержанные отражения и наиболее близкие к стартовой модели структурные построения (Рис. 8).

Верификация структурных построений с использованием эффективных скоростей $V_{огт}$

Под эффективной скоростью понимают скорость в однородной среде с плоской отражающей границей, определяемой по соответствующему ей гиперболическому годографу ОГТ, наилучшим образом совпадающему с наблюдаемым годографом. Правило наилучшего совпадения подразделяет такие скорости на два вида: интегральные и предельные [6].

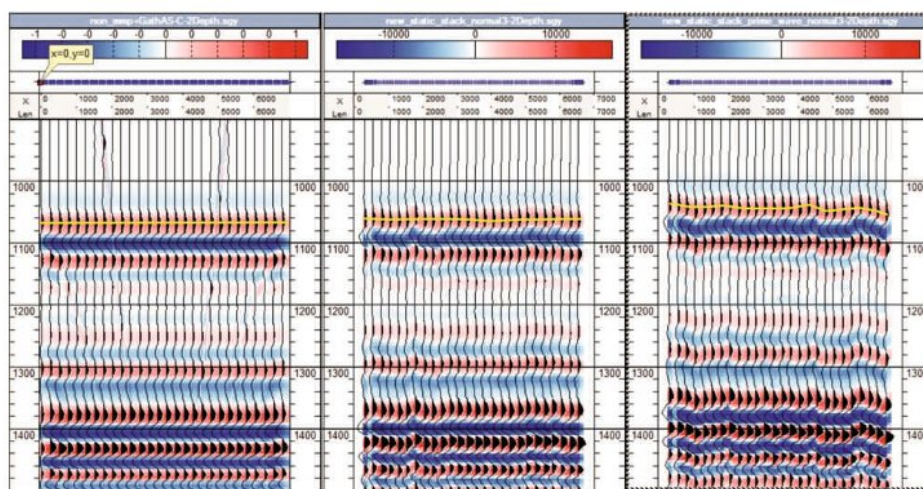


Рис. 7. Сопоставление разных подходов к расчету статических поправок с эталонным разрезом: А – эталонный разрез; Б – разрез со статическими поправками по данным ЗСБ; В – разрез со статическими поправками по первым вступлениям.

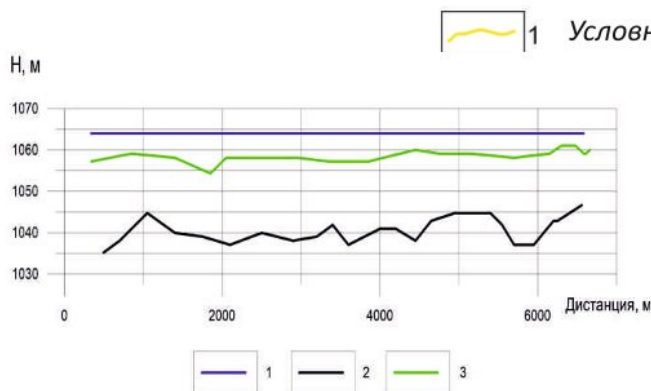


Рис. 8. Анализ структурных построений с применением различных подходов к определению статических поправок. Условные обозначения: 1 – отметка целевого горизонта без осложняющего влияния ММП (эталон); 2 – отметка целевого горизонта со статическими поправками по первым вступлениям; 3 – отметка целевого горизонта со статическими поправками по данным мЗСБ.

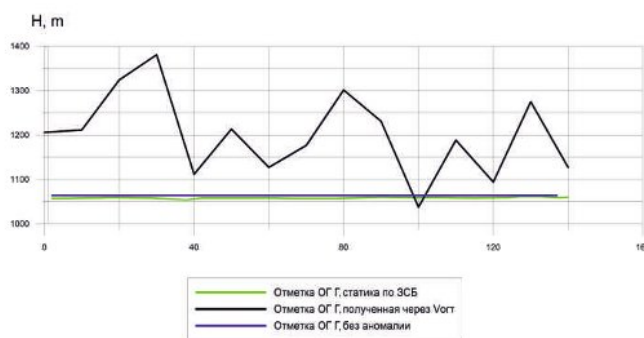
Традиционно $V_{огт}$ используется для восстановления глубин по верхнему отражающему горизонту. Отметка отражающего горизонта рассчитывается по формуле:

$$H = t_0 * V_{огт} / 2$$

Скорости $V_{огт}$ анализировались по вертикальным спектрам скоростей, затем времена t_0 целевого горизонта пересчитывались в глубины.

Исходя из полученных структурных построений, можно сделать вывод, что глубины, полученные таким путем, без дополнительного учета влияния ММП, имеют среднюю ошибку порядка 100 м (Рис. 9).

Таким образом, неучёт влияния ММП влечет за собой катастрофические ошибки в структурных построениях.



▲ Рис. 9. График структурных построений по целевому горизонту

О перспективах дальнейших исследований

Как известно, современные подходы к учету неоднородностей ММП заключаются не в определении и вводе среднепериодно-длиннопериодных статических поправок, а в построении эффективной модели мерзлоты и дальнейшем использовании этой модели в качестве априорной информации при решении обратной кинематической задачи сейсморазведки (кинематической инверсии).

Например, детальный анализ специфики проблемы, особенностей применения современных алгоритмов кинематической инверсии, влияния различных факторов ВЧР (и, в частности, ММП) – содержится в монографии Долгих Ю.Н. [3] В той – же работе упоминается о перспективах несейсмических методов (и, в частности, электроразведки) для получения независимой информации о модели ВЧР.

Поэтому следующим логическим шагом может быть поиск путей рационального комплексирования, интеграции сейсмических и электроразведочных данных с целью построения более точной глубинно-скоростной модели геологического разреза, включающей модель ВЧР.

Для этого необходимо будет разработать и обосновать наиболее эффективную методическую схему кинематической обработки и интерпретации сейсмических данных, включающую использование (на определенном этапе) модели мерзлоты, построенной с применением электроразведки, в том числе способы верификации и адаптации данной модели.

Нет сомнений, что подобная комплексная технология будет способствовать дальнейшему повышению точности построения структурного каркаса геологических моделей.

Заключение

Очевидно, что влияние слоя многолетне-мерзлых пород необходимо учитывать при обработке данных сейсморазведки в условиях Западной Сибири. Если коротко- и средне-периодные статические поправки можно получать из данных той же сейсморазведки, то прогноз длиннопериодных статических поправок – задача актуальная. По результатам проведенных исследований показано, что для прогноза «статики» можно использовать геоэлектрические модели ВЧР, полученные в ходе инверсии кривых мЗСБ. Применение зависимости Фауста позволяет прогнозировать упругие свойства верхней части разреза на основе данных мЗСБ, таким образом выполнять построение скоростной модели ВЧР. Восстановление акустических моделей производится не только с высокой точностью, но и с высокой пространственной плотностью. Расчет и введение статических поправок на основе данных мЗСБ позволяет получить более информативные временные разрезы и повысить точность структурных построений.

Также необходимо отметить, что разработанная методика позволит снизить уровень неопределенности при решении задачи кинематической инверсии сейсмических данных.

Практическое применение разработанной методики приведет к повышению качества обработки данных МОГТ, т.е. позволит повысить точность геологических моделей месторождений нефти и газа.

Благодарности

За непрерывную поддержку исследований на всех этапах их выполнения авторы выражают искреннюю благодарность генеральному директору АО «ИЭРП» к.т.н. Ю.А. Агафонову, а также ведущему научному сотруднику Института земной коры СО РАН

профессору, д.г.-м.н. А.В. Поспееву. За активное сотрудничество и интерес к данной работе авторы благодарят сотрудников ИТЦ компании ООО «Газпром геологоразведка». За проявленный интерес к работе и ценные советы по развитию методики авторы благодарят ученого секретаря ООО «НОВАТЭК ИТЦ» д.г.-м.н. Долгих Ю.Н.

Литература

1. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Сейсморастведка: Учебник для вузов. Издание второе исправленное и дополненное. В двух томах. Т2. Екатеринбург: Издательство УГГУ, 2011.408 с.
2. Бондарев В.И., Крылатков С.М., Смирнов А.С. Временные разрезы направленного видения в сейсморастведке методом многократных перекрытий // Технологии сейсморастведки. – 2005. – №3. – С.49-55.
3. Долгих Ю.Н. Комплексная адаптивная технология кинематической инверсии данных сейсморастведки в условиях неоднородной верхней части разреза. дисс. док. геол.-минерал. наук. Тюмень, 2017. -306 с.
4. Козырев В.С., Жуков А.П., Коротков И.П., Жуков А.А., Шнеерсон М.Б. Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморастведке. Современные технологии. ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. - 227 с.
5. Рекомендации по комплексованию геофизических методов при мерзлотной съемке/ПНИИИС - м.: Стройиздат, 1987.-88 с.
6. Ризниченко Ю.В. О сейсмической квазианизотропии // Изв. АН СССР. Серия географ. и геофиз., 1949, No 6, с. 518—543
7. А.А. Табаков, В.Н. Ференци, Л.В. Калван, Степченков, А.С. Колосов Проблемы сейсморастведки в зонах вечной мерзлоты и их решение в технологии сейсморастведки высокой четкости. Нефть газ новации, 2, 28-35, 2016, Самара.
8. Шарлов М.В., Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Агафонов Ю.А. Опыт эффективного изучения верхней части разреза методом зондирования становлением поля в ближней зоне с системой Fastsnap. // Приборы и системы разведочной геофизики № 2. Саратов. 2017.

9. Шелохов И. А., Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. Опыт применения малоглубинных электромагнитных зондирований для изучения криолитозоны // Сборник: 13th EAGE Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering Geophysics 2017

10. Brown J., Ferrians O.J., Heginbottom J.A., and Melnikov E.S. Circum-Crctic map of permafrost and ground ice conditions, Circum-pacific map series, 1997

11. Faust, L.Y., 1953. A velocity function including lithologic variation. Geophys., 18, 271–288.

12. G. Mavko, T. Mukerji, and J. Dvorkin. The rock physics handbook, second edition. Cambridge university press, 2009. – 511 с.

13. M.V. Sharlov, I.V. Buddo, N.V. Misyurkeeva, I. A. Shelokhov, Yu. A. Agafonov Transient electromagnetic surveys for high-resolution near-surface exploration: basics and case studies. First break volume 35. September 2017

Подробнее об авторах



Шелохов Иван Антонович.

Геофизик АО ИЭРП

Ведущий инженер Институт земной коры СО РАН



Буддо Игорь Владимирович
канд. геол.-мин. наук,
заместитель главного
геофизика АО ИЭРП,

Ведущий инженер Институт
земной коры СО РАН



Смирнов Александр Сергеевич
канд. геол.-мин. наук, начальник
отдела интегрированного анализа
геологогеофизических данных
Инженерно-технического центра
ООО «Газпром геологоразведка»
доцент кафедры Прикладной
геофизики Тюменский индустриальный университет