

Уточнение скоростной модели верхней части разреза по данным нестационарных электромагнитных зондирований: результаты применения в Восточной и Западной Сибири

И.А. Шелохов^{1,2*}, И.В. Буддо^{1,2,3}, А.С. Смирнов^{4,5}, А.А. Пьянков⁶, Н.В. Татьяна⁷

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

²ООО «СИГМА-ГЕО», Иркутск, Россия

³Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

⁴ООО «Газпром недра», Тюмень, Россия

⁵Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

⁶ООО «ИНГЕОСЕРВИС», Тюмень, Россия

⁷ООО «ТНГ-Групп», Бузульма, Россия

Геологический разрез Восточной Сибири является крайне сложным объектом для изучения сейсморазведкой. Причиной тому высокая изменчивость литологии верхней части разреза (ВЧР), резкопересеченный рельеф, наличие многолетнемерзлых пород (ММП). В Западной Сибири типовой геологический разрез чаще всего осложнен ММП, существенно искажающими данные сейсморазведки. В настоящей работе предлагается альтернативный традиционному подход к прогнозированию скоростной модели верхней части разреза. Подход основывается на оригинальной методике восстановления упруго-скоростных характеристик из данных малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне.

Цель данной работы состояла в тестировании методики расчета скоростной модели ВЧР на основе данных зондирований становлением поля в ближней зоне в малоглубинной модификации (мЗСБ) на ряде месторождений Восточной и Западной Сибири. Задачей исследования являлось повышение точности обработки данных метода общей глубинной точки (МОГТ) и, как следствие, повышение качества геологических моделей месторождений нефти и газа. Полученные результаты математического моделирования и полевых экспериментов подтверждают эффективность предложенной методики, позволяющей повысить точность восстановления геологической модели и достоверность прогноза. В частности, показано, что для условий Восточной Сибири улучшение качества обработки сейсмических данных заключается в существенном повышении динамики и когерентности сейсмической записи. В условиях Западной Сибири удается учесть скоростные аномалии, связанные с распространением многолетнемерзлых пород и зонами перехода от континентальной части территории к транзитной зоне. Использование разработанной методики позволяет при минимальных затратах повысить качество обработки данных сейсморазведки и увеличить точность картирования границ геологического разреза, исходя из характера решаемой задачи.

Ключевые слова: скоростная модель, сейсморазведка, метод отраженных волн, метод общей глубинной точки, зондирование становлением поля, верхняя часть разреза, многолетнемерзлые породы, статические поправки

Для цитирования: Шелохов И.А., Буддо И.В., Смирнов А.С., Пьянков А.А., Татьяна Н.В. (2021). Уточнение скоростной модели верхней части разреза по данным нестационарных электромагнитных зондирований: результаты применения в Восточной и Западной Сибири. *Георесурсы*, 23(3), с. 60–72. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.9>

Введение

При интерпретации материалов сейсморазведочных работ на территориях со сложными поверхностными условиями и неоднородной верхней частью разреза необходимо учитывать их влияние. Источником такого влияния выступают скоростные аномалии, сосредоточенные в относительно тонком, но неоднородном по толщине приповерхностном интервале разреза.

Недоучёт влияния данных аномалий на поведение отражающих горизонтов может привести к значительным ошибкам в структурных построениях, ухудшению понимания природы регистрируемых отраженных волн и других компонент волнового поля (Бондарев и др., 2005,

2013), а также влечет за собой большие неопределенности при решении обратной кинематической задачи сейсморазведки.

В настоящей работе предлагается подход к получению значений упругих характеристик верхней части разреза по данным зондирований становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) в малоглубинной модификации (мЗСБ).

В связи с растущими объемами сейсморазведочных работ 2D и 3D проблема корректного восстановления скоростной модели верхней части разреза (ВЧР) стоит достаточно остро. Существует ряд классических методик для прогноза скоростной модели ВЧР, расчета статических поправок, в том числе уточнения строения многолетнемерзлых пород (ММП) с использованием данных многоволновой сейсморазведки (Кузнецов и др., 2014).

Учет небольших аномалий ВЧР сопряжен с целым рядом трудностей. Как правило, такая задача решается

* Ответственный автор: Иван Антонович Шелохов
e-mail: sia@sigma-geo.ru

© 2021 Коллектив авторов

приближенно (Armstrong, 2001; Armstrong et al., 2001). Геометрия распространения лучей всех отраженных волн в районе аномалии ВЧР искажается. Зона влияния аномалии ВЧР составляет приблизительно половину длины расстановки от каждой границы аномалии. В реальных условиях зона влияния ВЧР распространяется еще дальше за счет зоны Френеля, ведь речь идет скорее о прохождении фронта волны, а не гипотетических лучей. Кроме того, стандартные методы анализа скоростей и обработки данных во временной области обеспечивают обработку всех трасс на сейсмограмме общей глубиной точки/общей средней точки (ОГТ/ОСТ) с использованием одинаковой скоростной функции 1D, следовательно, стандартные методы обработки во временной области не всегда решают задачу учета влияния ВЧР.

В рамках данной проблемы остро стоит необходимость в привлечении сторонних источников информации о ВЧР в районах, где сейсморазведка не способна справиться «своими силами».

Предложенная в работе методика расчета скоростных моделей на основе данных малоглубинной модификации ЗСБ (мЗСБ) позволяет снижать неопределенности сейсмической глубинно-скоростной модели и, как следствие, повышать точность структурных построений, что было подтверждено результатами математического моделирования (Shelokhov et al., 2018a).

Опыт применения электроразведки для восстановления скоростных характеристик ВЧР

Опыт применения данных электроразведки для прогноза скоростной модели ВЧР насчитывает ряд как отечественных, так и зарубежных работ, например, методика, предложенная В.В. Киселевым (Киселев и др., 2009), а также исследования (Каплан и др., 2019): подход с использованием уравнения Фауста был опробован на одной из площадей полуострова Таймыр, выполнен успешный учет скоростной модели, рассчитанной по данным мЗСБ, и получен информативный сейсмический разрез.

К одному из зарубежных примеров можно отнести работу (Colombo et al., 2017). В упомянутом исследовании рассмотрен подход прогнозирования скоростной модели на основе подхода совместной инверсии, выполняемой посредством кросс-градиентной регуляризации.

Материалы и методы

Методика расчета скоростной модели ВЧР

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 (Faust, 1953):

$$v = \alpha(ZR)^{\frac{1}{6}}, \quad (1)$$

где α – константа, Z – глубина залегания, R – удельное сопротивление пласта.

Авторами настоящей работы проанализирована возможность применения данного эмпирического уравнения (1) для восстановления акустических свойств разреза по данным мЗСБ.

Принципиальная схема расчета скоростной модели ВЧР на основе данных мЗСБ через эмпирические зависимости Фауста представлена на рис. 1.

По наблюдаемым в поле (экспериментальным) данным выполняется инверсия (решение обратной задачи геофизики). Количественная инверсия заключается в численном моделировании (решении обратной задачи электроразведки) горизонтально-слоистой среды, параметры которой увязываются с данными геофизических исследований скважин (ГИС), бурения. С целью минимизации влияния принципа эквивалентности, количественная интерпретация материалов ЗСБ проводится в несколько шагов, каждый из которых вносит свой вклад в качество получаемого результата. Первым шагом интерпретации электроразведочных данных является сбор априорной геолого-геофизической информации. На этом шаге анализируется информация по скважинам глубокого бурения, располагающимся на исследуемой площади, изучаются данные ГИС скважин, определяются региональные проводящие и высокоомные маркерные горизонты, осуществляется литолого-стратиграфическая привязка слоев. По сети скважин определяется выдержанность по мощности и простираию опорных горизонтов. Изучаются проявления магматизма и тектонической активности, оказывающие влияние на строение изучаемой территории, характер электромагнитного поля. Определяется гидрогеологическая характеристика района работ. На втором шаге осуществляется построение структурных карт по опорным горизонтам, определяется положение известных геологических структур и разрывных нарушений. Выполняется оценка распределения электрических характеристик разреза участка работ, осуществляется подбор структуры первоначальной геоэлектрической модели в соответствии с построенными структурными картами. Данный этап призван помочь увязать по разрезу основные горизонты, полученные в результате бурения скважин и добиться литолого-стратиграфической привязки геоэлектрических слоев модели.

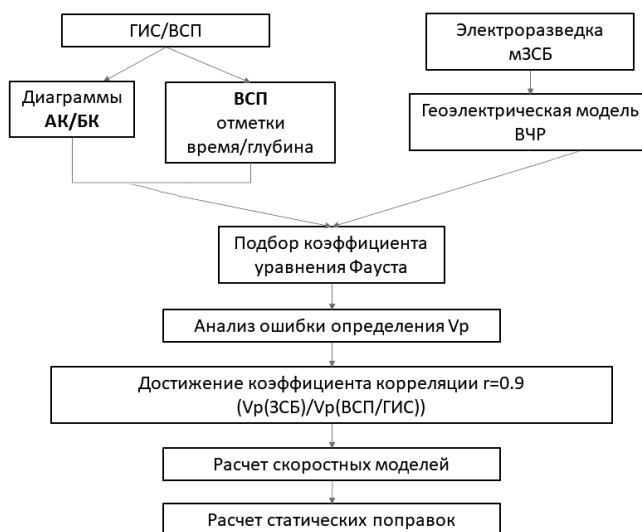


Рис. 1. Принципиальная схема расчета скоростной модели ВЧР на основе данных мЗСБ через эмпирические зависимости Фауста. ГИС – геофизические исследования скважин; ВСП – вертикальное сейсмическое профилирование; АК – акустический каротаж; БК – боковой каротаж; мЗСБ – зондирование становления поля в ближней зоне (малоглубинное); ВЧР – верхняя часть разреза.

Третий шаг включает в себя инверсию сигналов становления и построение геоэлектрических разрезов. На этом шаге геоэлектрические параметры разреза определяются с использованием программы интерпретации Model 3 (Суров и др., 2011).

Чтобы перейти непосредственно к пересчету геоэлектрических моделей в скоростные, необходимо выполнить расчет и калибровку эмпирических коэффициентов уравнения Фауста. Подход был детально рассмотрен в предшествующих работах (Shelokhov et al., 2018b) в связи с чем далее он приведен в сокращённом варианте. Для расчета коэффициентов использовалась опорная скважина. Основное требование для такой скважины – это наличие акустического каротажа в как можно более широком диапазоне глубин, начиная от первых метров. Альтернативным вариантом является применение данных вертикального сейсмического профилирования (ВСП).

Коэффициенты уравнения считаются подобранными в том случае, когда удастся добиться максимальной сходимости наблюдаемых и расчетных значений V_p . Необходимо добиться таких комбинаций коэффициентов, которые бы удовлетворяли условиям выдержанности в рамках одной литологической разности, но при этом обеспечивали бы максимальную сходимость наблюдаемых значений и расчетных V_p по всей глубине модели. Для оценки сходимости в данном случае используется коэффициент корреляции степенной функции (которой, в свою очередь, выступает уравнение Фауста), выступающий в некой функцией невязки.

После настройки уравнения производится массовый пересчет геоэлектрических моделей и формирование куба скоростей ВЧР.

Метод ЗСБ

Метод ЗСБ традиционно применяется в России при решении широкого круга геологических задач: от изучения верхней части разреза до поисков и разведки месторождений углеводородов. Большой вклад в разработку теории метода, методики работ и обработки результатов ЗСБ внесен учеными А.Н. Тихоновым, Л.Л. Ваньяном, С.А. Шейнманном, Б.И. Рабиновичем, G.V. Keller, J.R. Wait, L. Buselli, С.Н. Stoyer и др.

Этот 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 ЗСБ с использованием электроразведочной станции «FastSnap» проводятся с применением индуктивной установки, состоящей из незаземленных квадратных генераторной и приемных петель различного размера. Такая установка бывает двух видов: с вынесенной за пределы генераторной приемной петель ($Q-q$) и соосными приемно-генераторными петлями – «петля в петле» (Qq). На практике рекомендуется использовать комбинированную соосно-разнесенную установку, когда от одной генераторной петли измеряется сигнал на соосной и разнесенной приемных петлях. В ходе проведенных в настоящей статье исследований длина стороны генераторной петли составляла 100 м, приемной – 10 м (рис. 2). Использовались разности, равные 100 м. Сила тока в генераторной петле изменялась от 1 до 40 А. Данная конфигурация установки обеспечивает надежное восстановление геоэлектрического разреза до глубины 700 м. Стартовая глубинность зондирования – 10 м. Кривые ЭДС и кажущегося сопротивления, типичные для геологических условий Восточной и Западной Сибири, показаны на рис. 3 и 4.

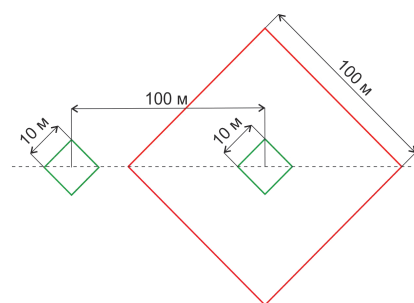


Рис. 2. Соосно-разнесенная установка мЗСБ: красным – генераторная петля, зеленым – приемные петли

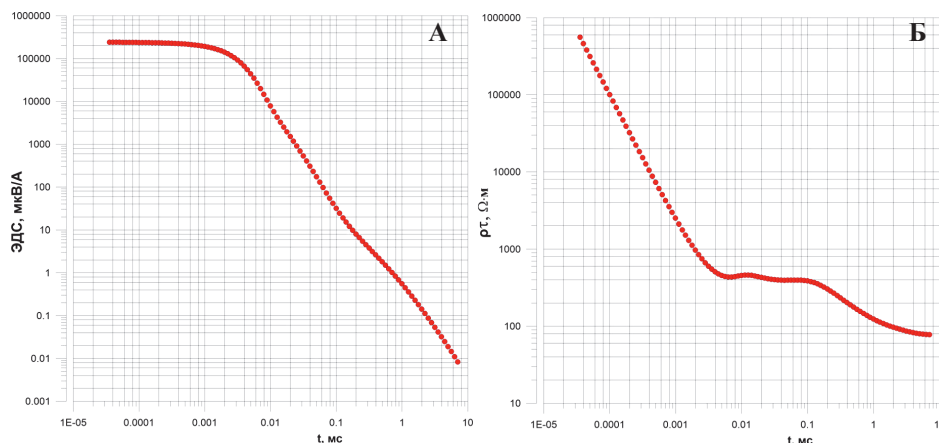


Рис. 3. Кривые мЗСБ, полученные в Западной Сибири: А – ЭДС(t); Б – $\rho_t(t)$

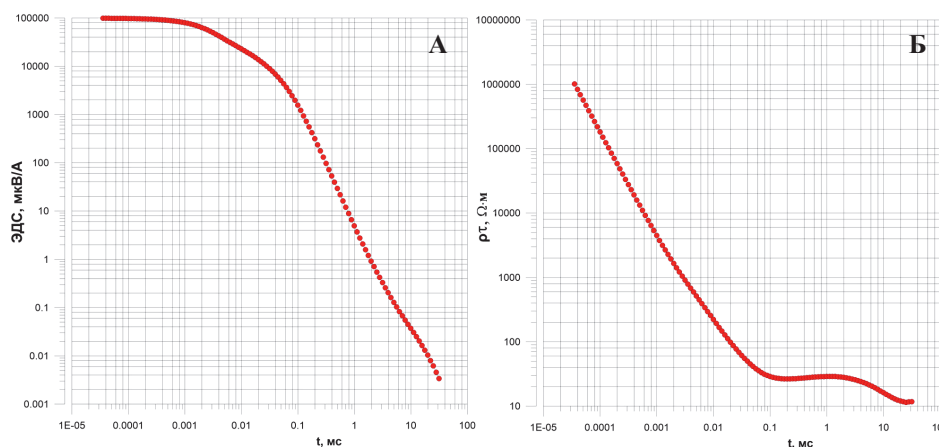


Рис. 4. Кривые мЗСБ, полученные в Восточной Сибири: А – ЭДС(t); Б – $\rho_t(t)$

Разработанная методика протестирована в различных геологических условиях Восточной и Западной Сибири, где были выполнены высокоплотные исследования МЗСБ.

Восточная Сибирь. Ангаро-Ленская ступень

Геологический разрез Восточной Сибири является сложным объектом для изучения основным инструментом разведочной геофизики – сейсморазведкой. Причиной этого является высокая изменчивость литологии ВЧР, резкопересеченный рельеф, наличие ММП, невыдержанных по простиранию водоносных горизонтов, тектонических нарушений и других факторов, сильно осложняющих обработку материалов сейсморазведки (Кочнев и др., 2011; Пьянков, 2016).

В данном контексте актуальна разработка подхода, позволяющего повысить точность скоростной модели ВЧР, а значит и структурных построений целевых горизонтов разреза.

При проведении сейсморазведочных работ методом общей глубинной точки (МОВ ОГТ) 3D в пределах Верхнеленского сводового поднятия (Вахромеев и др., 2019) получены полевые материалы, подтверждающие актуальность вышеперечисленных проблем. Как видно на сейсмическом разрезе (рис. 5), в восточной части профиля имеет место сложная интерференционная волновая картина, объясняющаяся наличием скоростных аномалий в ВЧР. Недоучёт данных факторов в скоростной модели ВЧР неминуемо приведет к ошибкам кинематической обработки.

В настоящей работе предлагается альтернативный подход к прогнозированию скоростной модели верхней части разреза. Подход основывается на оригинальной методике восстановления упругоскоростных характеристик из данных ЗСБ с привлечением материалов геофизических исследований в скважинах (ГИС) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП) (Шелохов и др., 2018a,b; Shelokhov et al., 2018b).

Исследуемая территория находится на юге Сибирской платформы (рис. 6). Разрез характеризуется сложными тектоническими условиями: наличием складчатости и многочисленных разрывных нарушений. Съёмка МОВ ОГТ выполнялась по следующей методике: шаг между линиями приема – 150 м, и шаг между пунктами приема – 25 м. Шаг между линиями возбуждения – 300 м, между пунктами возбуждения – 50 м. Источник колебаний – взрывной, установка – центральная, симметричная, «крест».

Верхняя часть разреза участка исследований сложена породами среднего и верхнего кембрия, отложениями ордовика. К среднему-верхнему отделу кембрия относятся верхленская и илгинская свиты, сложенные красноцветными терригенно-карбонатными отложениями, перекрывающими породы литвинцевской свиты (Деев, 1972).

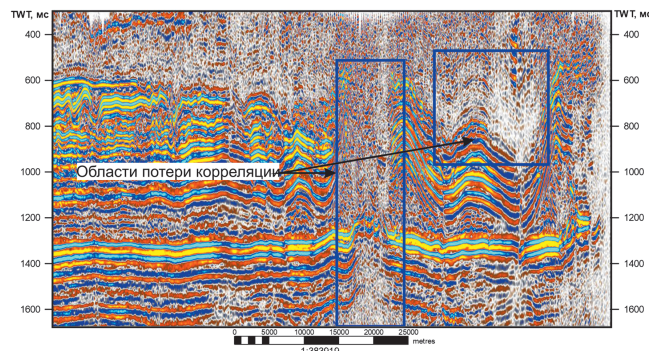


Рис. 5. Пример сейсмического разреза, осложненного влиянием ВЧР

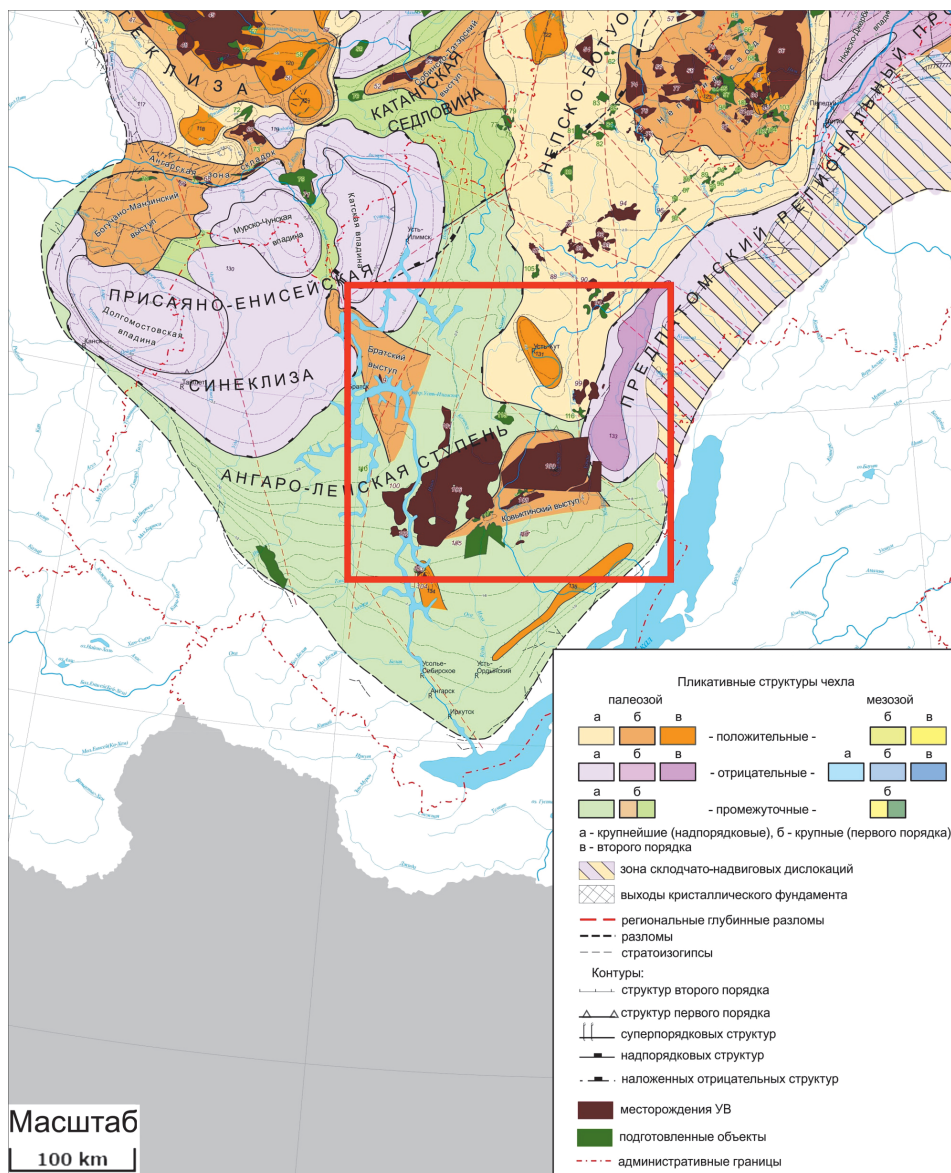


Рис. 6. Схема района работ на структурно-тектонической основе (под ред. В.С. Старосельцева)

Нижний отдел ордовика представлен нерасчлененными усть-кутской и ийской свитами. Отложения согласно залегают на красноцветных породах верхоленской свиты. В нижней части разрез представлен доломитами с прослоями известняков зеленовато-серых, темно-серых, песчаников серых, светло- и желтовато-серых. В верхней части разрез ордовика сложен песчаниками, алевролитами зеленовато-серыми, серыми, редко известняками красновато-коричневыми. Отложения имеют ограниченное распространение, слагая верхние части склонов долин и большинства водоразделов.

Согласно схеме геокриологического районирования, по степени распространения многолетнемерзлых пород выделяются две провинции:

А) островного распространения: острова мерзлых пород приурочены к заболоченным участкам водоразделов, к долинам рек, падам, к подножию северных склонов и занимают до 10–25 % площади;

Б) редкоостровного и спорадического распространения: занимают до 30 % площади и имеют распространение на водораздельных плоских поверхностях, высоких и средних террасах Лены и ее притоков, склонов падей и распадков.

Мощность мерзлой толщи в пределах изучаемой территории изменяется в восточном направлении с 20 до 30 м. Мерзлая толща имеет однослойное строение и представлена многолетнемерзлыми породами различного генезиса, прочными, уплотненными, монолитными и трещиноватыми, покрытыми элювиальными и делювиальными отложениями малой мощности (до 3 м) различной льдистости. Трещины и пустоты заполнены льдом частично или полностью.

В регионе достаточно широко распространены криогенные реликтовые образования среднеголоценовых термокарстовых форм по повторно-жильным льдам, в основном приуроченным к нижним частям склонов и к днищам долин. Сезонное оттаивание на территории исследования не превышает 0,4–1,5 м.

Верхняя часть разреза, сложенная терригенно-карбонатными отложениями верхоленской и илгинской свит среднего-верхнего кембрия, а также отложениями ордовика и четвертичными образованиями, слабо дифференцирована по акустическим свойствам. Ее мощность достигает первых сотен метров. При неглубоком залегании этой толщи в самой верхней ее части наблюдается плавное возрастание скорости от 1800–2000 м/с на глубине 20–30 м, до 4000 м/с на глубине 200–300 м. В целом, средние значения скорости продольных волн в ВЧР достаточно стабильны и изменяются в пределах 3880–4840 м/с (рис. 7).

По геоэлектрическим характеристикам первый от поверхности горизонт характеризуется высоким сопротивлением 500–2000 Ом·м и отождествляется с породами четвертичной системы. Далее по разрезу залегают породы усть-кутской свиты нижнего ордовика со значениями

УЭС от 60 до 500 Ом·м. Отложения верхоленской и илгинской свит характеризуются относительно пониженными значениями УЭС 50–150 Ом·м.

Для условий юга Сибирской платформы характерны несколько основных неоднородностей верхней части разреза (Пьянков, 2016). Основной из них является резко-пересеченный рельеф с каньонообразными долинами рек (гористый, сильно расчлененный), имеющий очень крутые склоны, которые создают неблагоприятные поверхностные сейсмогеологические условия для проведения сейсмических исследований. Для территории исследования характерен перепад абсолютных отметок от 700 до 1350 м, что соответствует крайне резко расчлененному рельефу.

Немаловажную роль играет изменчивость мощности зоны малых скоростей (ЗМС). Достоверно определить ее возможно по микросейсмокаротажу (МСК), области покрытия которого не всегда достаточно для достоверного восстановления ЗМС, в связи с чем ЗМС аппроксимируется неким сглаженным слоем.

Анализируя волновую картину, отмечается, что морфология отражающих горизонтов соответствует границам смены скоростей в скоростной модели, которые, в свою очередь, соответствуют морфологии поверхности рельефа.

Для расчета коэффициентов использовались данные ВСП по опорной скважине. В первую очередь получают значения интервального времени для каждой отметки глубины, во-вторых, выполняется многократный пересчет модели ЗСБ, полученной в точке скважины, в акустическую модель; расчет выполняется до тех пор, пока не будет достигнута максимальная сходимость.

В результате подбора было получено 3 набора коэффициентов – 3 тренда (рис. 8). Тренд №1 (первая группа коэффициентов) соответствует четвертичным отложениям, тренд №2 (вторая группа коэффициентов) соответствует карбонатным отложениям усть-кутской свиты, тренд №3 (третья группа коэффициентов) соответствует карбонатным отложениям верхоленской свиты.

Стабильность полученных трендов оценивалась по верификационной скважине на участке работ. Среднее



Рис. 7. Физико-геологическая модель ВЧР: Восточная Сибирь

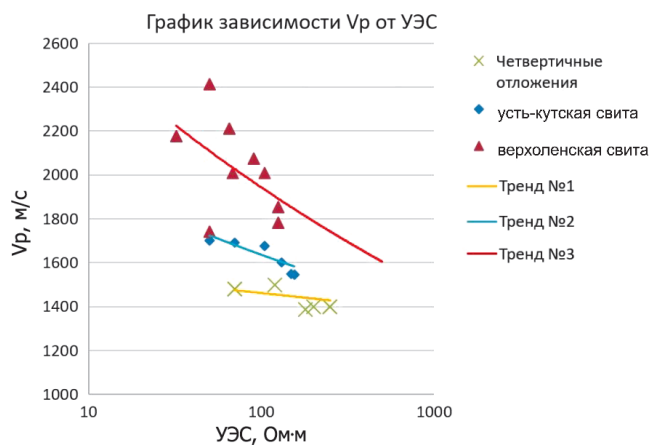


Рис. 8. Тренды для расчета скоростной модели

относительное расхождение V_p , полученного по данным мЗСБ, и V_p по данным ВСП, составило 7 % (рис. 9). Данный факт позволяет сделать вывод, что тренды стабильны, и их можно использовать для расчета скоростной модели ВЧР.

По полученным моделям были рассчитаны статические поправки. Поправки, полученные по данным первых вступлений, изменяются от 10 до 110 мс. В свою очередь поправки, полученные из модели по данным мЗСБ, более дифференцированы и изменяются от 10 до 200 мс. Распределение статических поправок, полученных по обоим методам, по площади весьма различно. Отчетливо видно, что по данным первых вступлений в центральной части площади поправки имеют наибольшее значение, тогда как по данным мЗСБ в центральной части площади они минимальны (рис. 10).

Сравнение скоростных моделей, полученных по различным вариантам обработки, показывает, что модель, полученная по данным мЗСБ, отражает значительно меньшую мощность зоны малых скоростей, также отмечается наличие высокоскоростных аномалий в разрезе, которые не детектируются по модели первых вступлений.

Анализ временных разрезов (рис. 11) показывает, что на этапе учета статики за рельеф и среднепериодных поправок отмечается существенное улучшение прослеживаемости отражающих горизонтов при использовании модели по данным мЗСБ. На разрезе, полученном с использованием модели по данным первых вступлений, отмечается наличие аномалий-теней, проходящих через весь разрез. На разрезе, полученном по данным мЗСБ, такие аномалии удается частично подавить.

Полученные результаты свидетельствуют о повышении качества суммарных разрезов до учета короткопериодной составляющей при использовании скоростной модели по данным мЗСБ.

На графике атрибута RMS (Root mean square – Среднеквадратичное значение) по ОГ Н2 (рис. 12) отчетливо видно улучшение динамики на разрезе по данным мЗСБ.

Для более наглядной визуализации улучшения качества разрезов были построены атрибуты RMS и Variance (дисперсия, аналог когерентности). На разрезах атрибутов

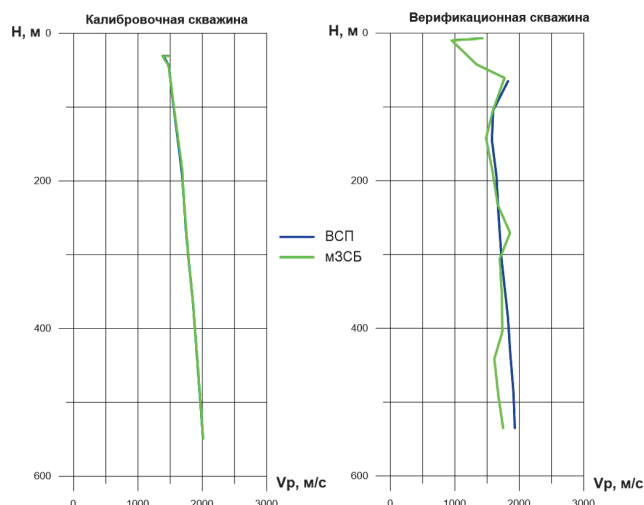


Рис. 9. Верификация полученных коэффициентов

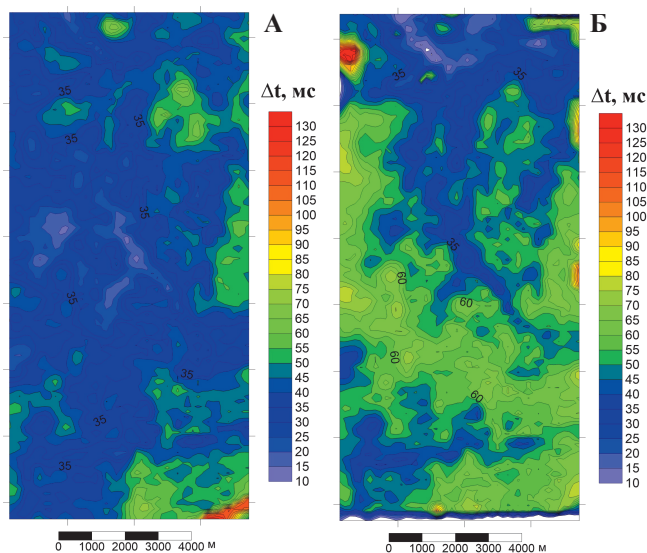


Рис. 10. Сопоставление карт статических поправок: А – по данным первых вступлений; Б – по данным мЗСБ

RMS и Variance видно, что данные, полученные с учетом модели по данным мЗСБ, отличаются более высоким уровнем амплитуды RMS и повышением качества прослеживаемости ОГ по атрибуту Variance, нежели данные, полученные с учетом модели по данным томографии первых вступлений (рис. 13, рис. 14).

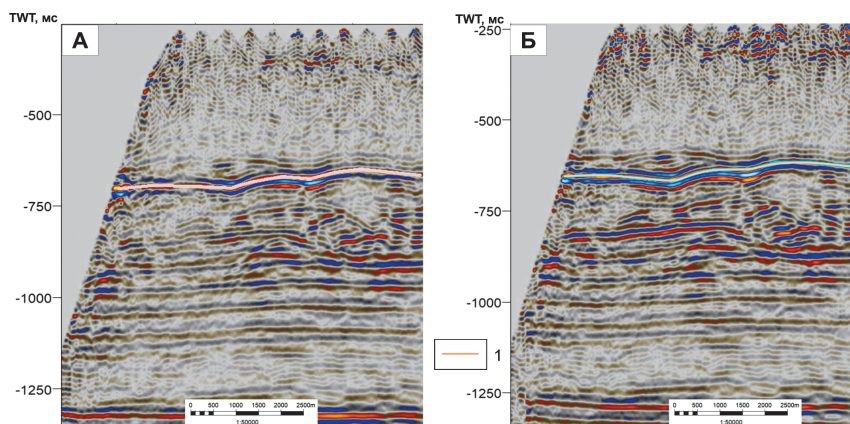


Рис. 11. Сопоставление суммарных временных разрезов с учетом короткопериодной составляющей: А – по данным первых вступлений, Б – по данным мЗСБ. 1 – отражающий горизонт ОГ Н2.

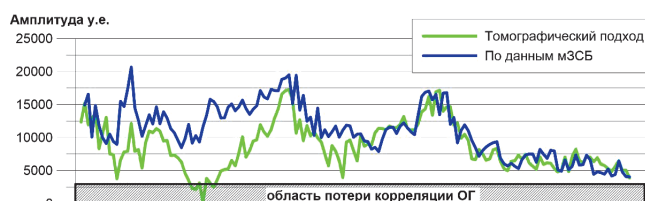


Рис. 12. График атрибута RMS amplitude

Анализируя карты когерентности (рис. 15), можно отметить, что по данным модели мЗСБ выделяются аномалии, отражающие характерную для данного участка шарьяжно-надвиговую тектонику. На левом срезе (рис. 15 А) динамически интервал слабо выражен, отражения осложнены многочисленными интерференционными зонами. В районах развития соляных валов волновая картина меняется на хаотическую, с отдельными, разнонаправленными, изогнутыми, короткими, некоррелируемыми отражениями, что не позволяет дать оценку их морфологии.

На первом срезе (рис. 15 Б) наблюдается улучшение качества прослеживаемости сейсмических отражений. Отражения динамически более выражены за счет наличия

контрастных акустических границ. Ярко выражена морфология валовых структур. Картируются складки гравитационного скольжения.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование мЗСБ при обработке данных 3D МОГТ позволяет улучшить прослеживаемость горизонтов и динамические характеристики сейсмической записи как на этапе до учета высокочастотной составляющей, так и на финальной стадии обработки.

Западная Сибирь. Средне-Ямальский мегавал

Исследования МОВ ОГТ 3D и мЗСБ проводились на площади 726 кв.км по совмещенной сети наблюдений (рис. 16). Съемка МОВ ОГТ 3D выполнялась по следующей методике: шаг между линиями приема – 150 м, между пунктами приема – 25 м. Шаг между линиями возбуждения – 300 м, между пунктами возбуждения – 50 м. Источник колебаний – вибрационный, установка: центральная, симметричная, «крест».

По данным электроразведочных работ мЗСБ отмечается высокая дифференцированность верхней части разреза до глубины около 500 м. До глубины 200–250 м

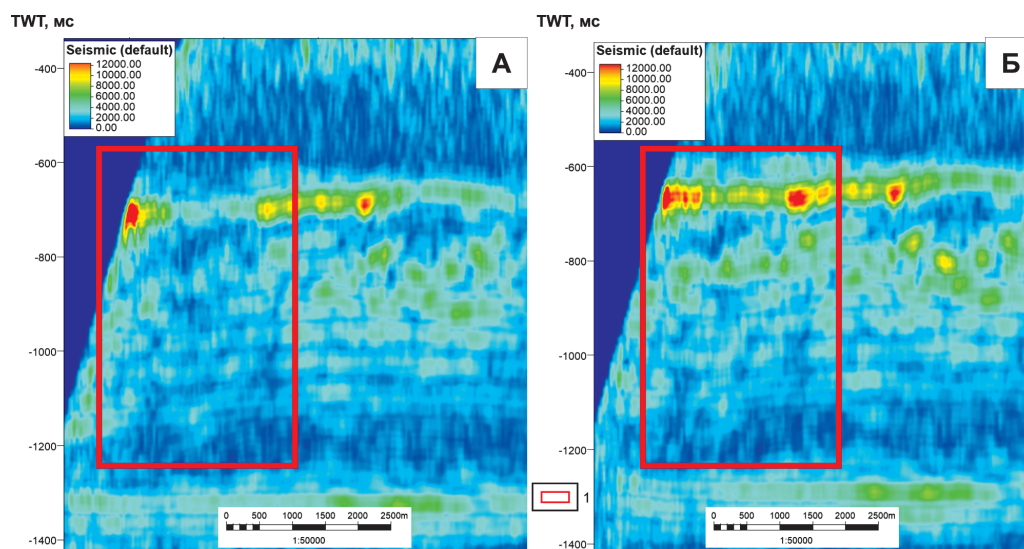


Рис. 13. Сопоставление разрезов атрибута RMS: А – по данным первых вступлений, Б – по данным мЗСБ. 1 – область улучшения сейсмических амплитуд.

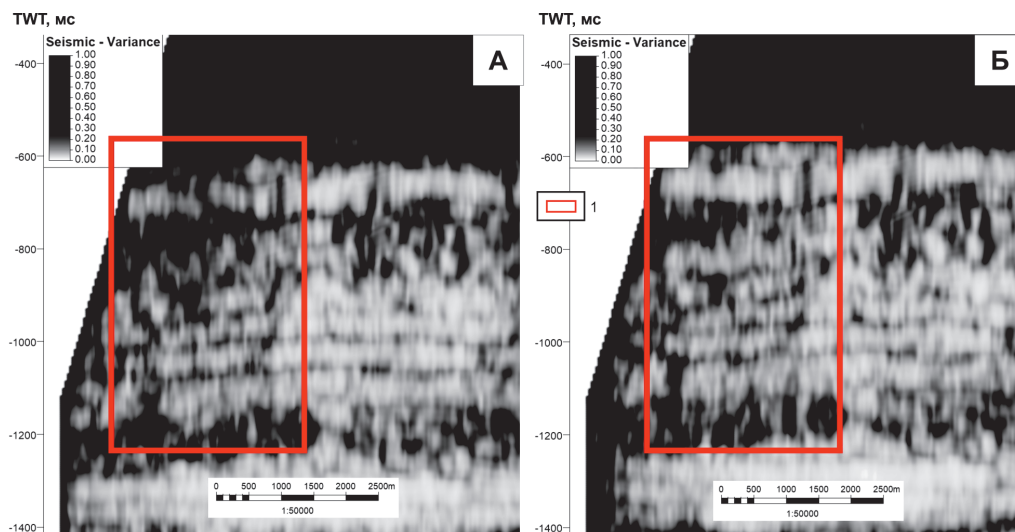


Рис. 14. Сопоставление разрезов атрибута Variance: А – по данным первых вступлений, Б – по данным мЗСБ. 1 – область улучшения когерентности.

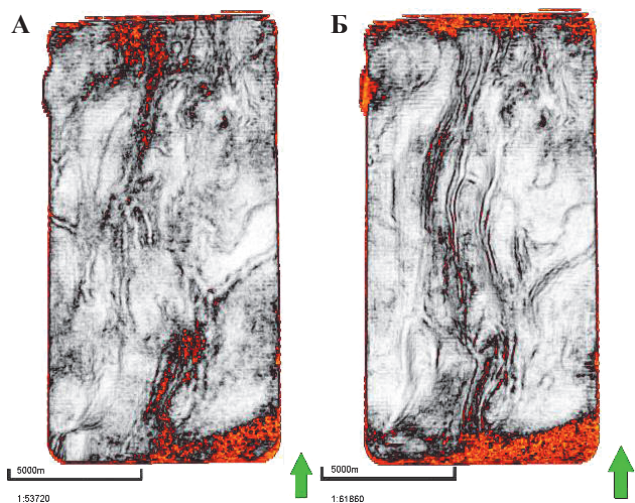


Рис. 15. Срез атрибута «когерентность» в интервале –650 мс (кровля литвинцевской свиты): А – по данным первых вступлений, Б – по данным МЗСБ

отмечается высокоомный слой, связываемый с распространением ММП (рис. 16). Сплошность ММП на территории исследования прерывается таликами, линзами криопэггов. Под руслами рек и озерами отмечаются зоны протайки, характеризующиеся по данным МЗСБ низкими значениями сопротивления. Четко фиксируется граница перехода пород из мерзлого состояния в талое. Отмечается значительное сокращение, вплоть до полного отсутствия ММП, при переходе в транзитную зону (акваторию). В целом отмечается резкая изменчивость подошвы ММП.

Верхняя часть разреза территории исследования осложнена наличием неравномерной толщи многолетне-мерзлых пород высокой степени льдистости. Толща ММП осложнена распространением сквозных и несквозных таликовых зон. Часть территории исследования проходит по транзитной зоне. Немаловажным фактом является наличие в толще ММП линз криопэггов.

Все эти факторы отражаются на временных разрезах областями полной или частичной потери корреляции ОГ, а также искажением тренда структурных поверхностей.

Для построения модели скоростной ВЧР выполняется расчет и калибровка эмпирических коэффициентов уравнения Фауста. Для расчета коэффициентов необходимо наличие акустического каротажа или данных ВСП.

Первым шагом формируется литологически-генерализованная модель, в рамках каждой литологической разности производится многократный перебор эмпирических коэффициентов уравнения. Результатом является уникальная пара коэффициентов для каждой литологической разности. При достижении коэффициента корреляции $r = 0.9$ и более коэффициенты считаются подобранными. На площади работ присутствует 3 скважины ВСП. Первоначально расчет и калибровка коэффициентов производились по одной калибровочной скважине. Однако используя результаты подбора на верификационной скважине, получено существенное расхождение наблюдаемых и расчетных скоростей.

Проанализировав все скважины с ВСП на площади работ, сделан вывод, что они отражают радикально разные условия ВЧР (рис. 18). Исходя из этого решено использовать для калибровки все имеющиеся скважины с ВСП.

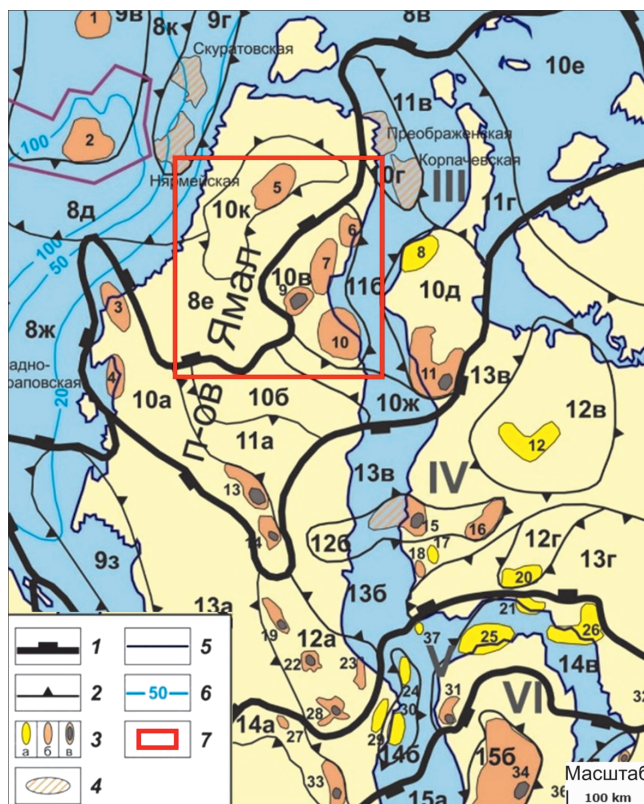


Рис. 16. Схема района работ на структурно-тектонической основе (по данным ФГУП «ВНИГНИ»). 1 – границы крупнейших тектонических элементов (синеклиз и седловин); 2 – границы тектонических элементов I порядка (сводов, валов, прогибов); 3 – месторождения (а – газовые, б – газоконденсатные, в – нефтегазоконденсатные); 4 – некоторые перспективные структуры-ловушки; 5 – береговая линия; 6 – изобаты, м; 7 – границы района исследований. Месторождения: 1 – Русановское; 2 – Ленинградское; 3 – Харасавэйское; 4 – Крузенитернское; 5 – Малыгинское; 6 – Тасийское; 7 – Северо-Тамбейское; 8 – Штормовое; 9 – Западно-Тамбейское; 10 – Южно-Тамбейское; 11 – Утреннее; 12 – Гыданское; 13 – Нейтинское; 14 – Арктическое; 15 – Геофизическое; 16 – Солетско-Ханавэйское; 17 – Трехбугорное; 18 – Восточно-Бугорное; 19 – Средне-Ямальское; 20 – Минховское; 21 – Южно-Тота-Яхинское; 22 – Нурминское; 23 – Хамбатейское; 24 – Северо-Каменномыское; 25 – Адерпаютинское; 26 – Антипаютинское; 27 – Мало-Ямальское; 28 – Ростовцевское; 29 – Каменномыское-суша; 30 – Каменномыское-море; 31 – Парусное; 32 – Западно-Мессояхинское; 33 – Новопортовское; 34 – Ямбургское; 35 – Находкинское; 36 – Юрхаровское. Тектонические элементы: III – Пайхойско-Таймырская седловина (10а – Нурминский вал; 10б – Центральное-Ямальский вал; 10в – Среднеямальский свод; 10г – Преображенский вал; 10д – Юрацкий свод; 10е – Северо-Гыданская ступень; 10ж – Северо-Сеяхинская впадина; 10к – Северо-Ямальский вал; 11а – Большеямальская впадина; 11б – Арктический прогиб; 11в – Белоостровский прогиб; 11г – Восточно-Гыданский прогиб), IV – Ямало-Гыданская синеклиза (9з – Поетаяхинский вал; 12а – Южно-Нурминский вал; 12б – Геофизический вал; 12в – Гыданский свод; 12г – Минховский выступ; 13а – Сеяхинский прогиб; 13б – Тадибеяхинский прогиб; 13в – Торамьяхинский прогиб; 13г – Антипаютинская впадина), V – Южно-Ямальско-Мессояхинская седловина (14а – Южно-Ямальский вал; 14б – Каменномыский вал; 14в – Нижнемессояхинский вал), VI – Надым-Тазовская синеклиза (15а – Парусовый прогиб; 15б – Ямбургский вал; 15в – Находкинско-Юрхаровский вал).

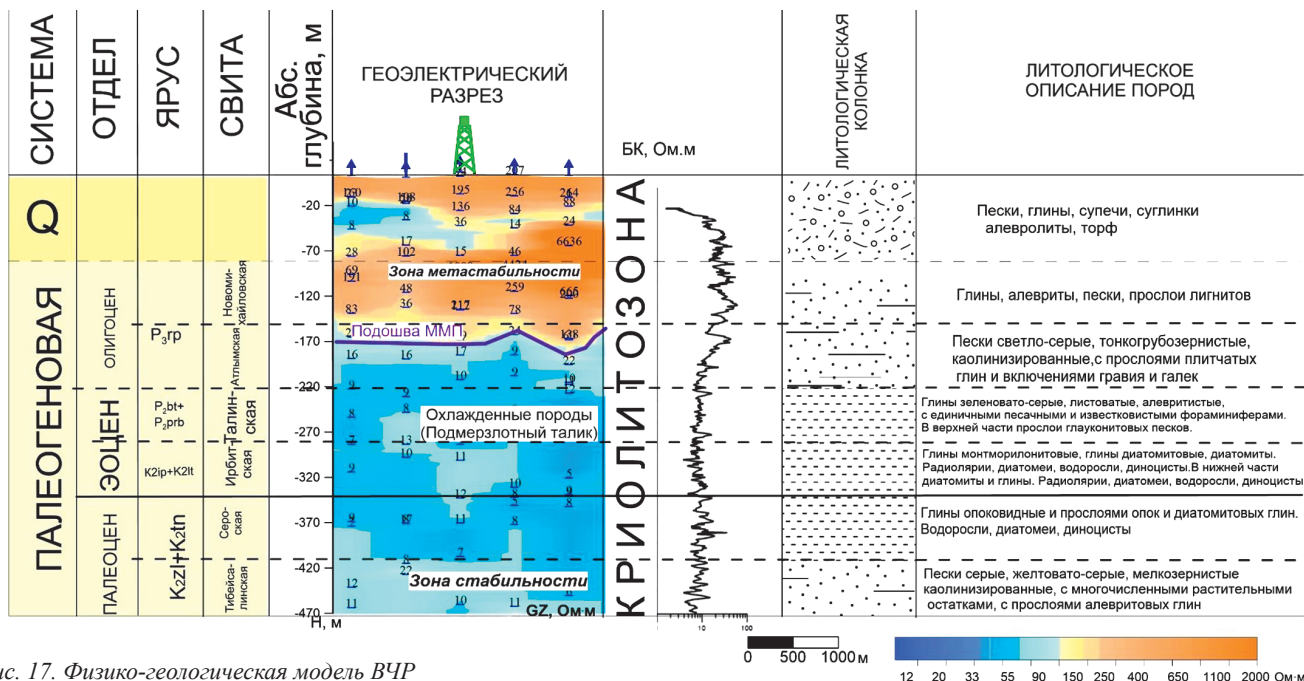


Рис. 17. Физико-геологическая модель ВЧР

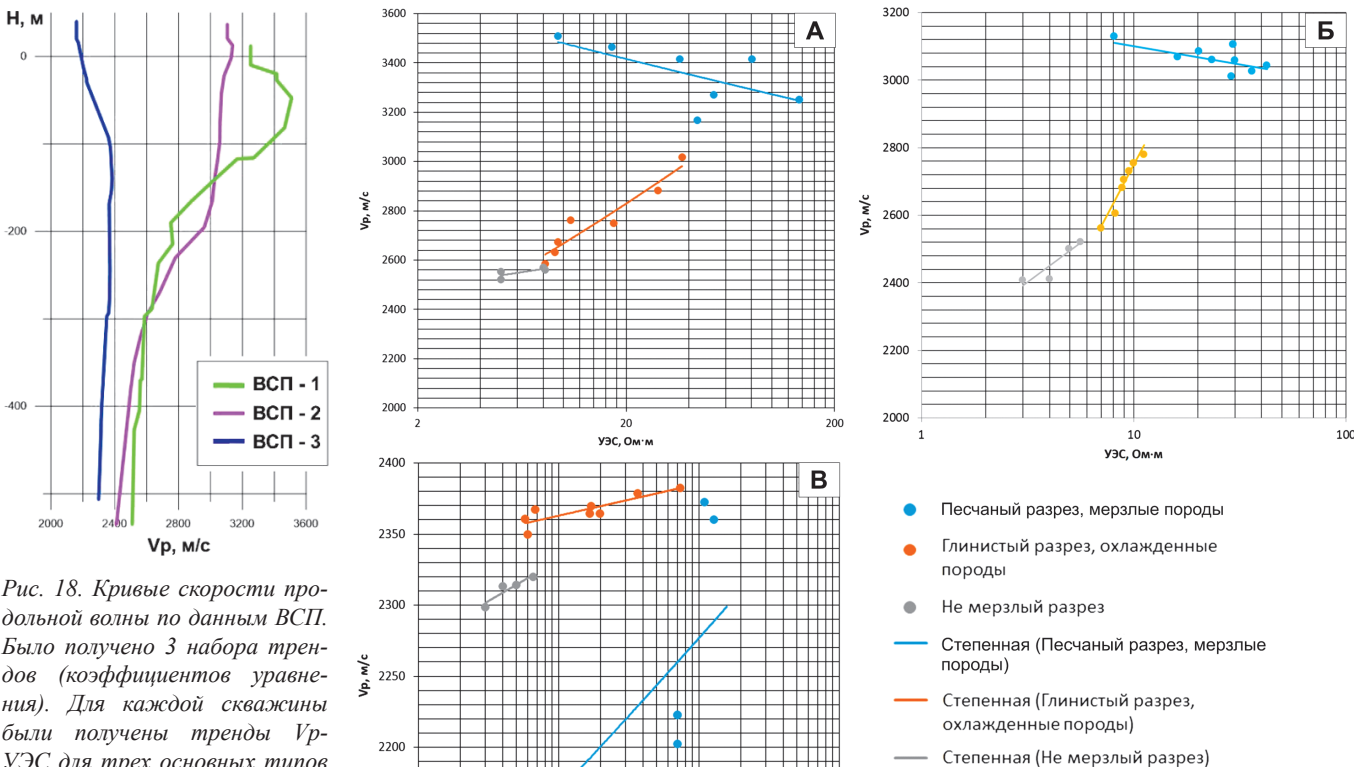


Рис. 18. Кривые скорости продольной волны по данным ВСП. Было получено 3 набора трендов (коэффициентов уравнения). Для каждой скважины были получены тренды V_p -УЭС для трех основных типов разреза: 1 – песчаный разрез, мерзлые породы, 2 – глинистый разрез, охлажденные породы, 3 – не мерзлый разрез.

Рис. 19. Зависимость V_p -УЭС: А – для скважины ВСП-1; Б – для скважины ВСП-2; В – для скважины ВСП-3

Для использования таких скважин было необходимо выполнить районирование площади. При сопоставлении положения скважин с ВСП и картой УЭС ВЧР по данным мЗСБ сделан вывод, что каждая скважина приурочена к отдельной области по УЭС.

Таким образом, площадь исследований была поделена на три зоны (рис. 20): первая зона (красный полигон) – диапазон УЭС более 50 Ом·м, породы с наибольшей льдистостью – область использования скважины ВСП-3 в качестве

эталонной; вторая зона (зеленый полигон) – диапазон УЭС от 50 до 25 Ом·м, менее льдистые породы – область использования скважины ВСП-2 в качестве эталонной; третья зона (синий полигон) – диапазон УЭС менее 25 Ом·м, зоны оттайки – область использования скважины ВСП-1 в качестве эталонной (предполагаемые таликовые зоны).

На основе полученных зависимостей построена 3D скоростная модель ВЧР. По данной скоростной модели рассчитаны статические поправки и произведен ввод

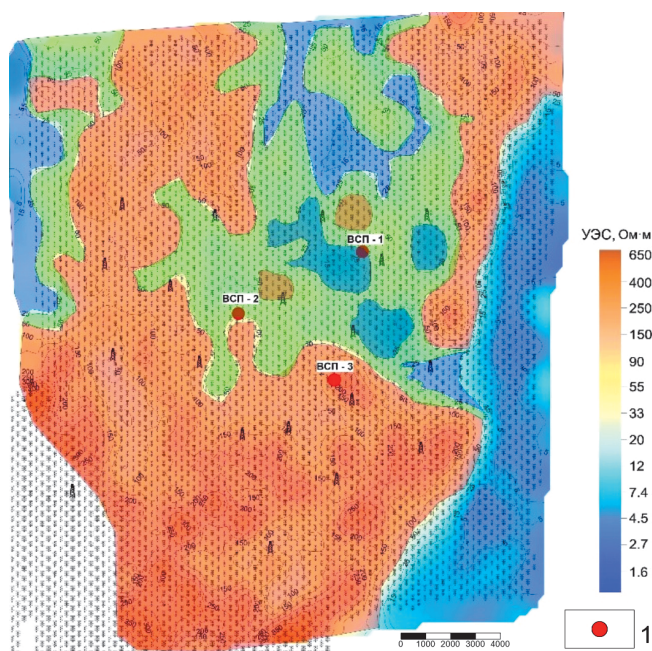


Рис. 20. Районирование площади в зависимости от распределения УЭС. 1 – скважины с ВСП.

полученных поправок в суммарные временные разрезы.

Для сравнения использовались два варианта расчёта поправок: от значений рельефа и по данным мЗСБ (рис. 21).

На разрезах, полученных без учета данных мЗСБ (рис. 22 А, Б), наблюдается нарушение осей синфазности или образование искусственных синклиналей в области перехода из континентальной части к транзитной зоне. При использовании модели мЗСБ данные скоростные аномалии удается учесть (рис. 22 В).

Таким образом, можно сделать вывод, что применение метода мЗСБ для уточнения модели ВЧР позволяет учесть скоростные аномалии, приуроченные к переходу от континентальной части к транзитной зоне.

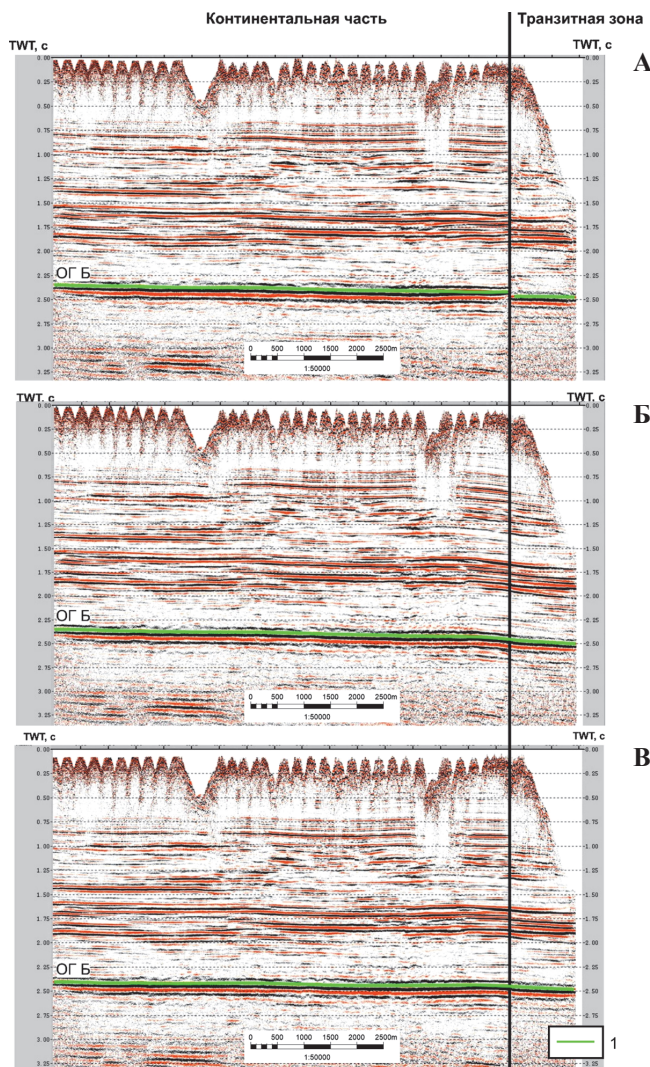


Рис. 22. Результаты ввода статических поправок: А – скоростная модель по первым вступлениям преломленных волн, Б – статические поправки от значений рельефа, В – скоростная модель по данным мЗСБ. 1 – отражающий горизонт ОГ Б.

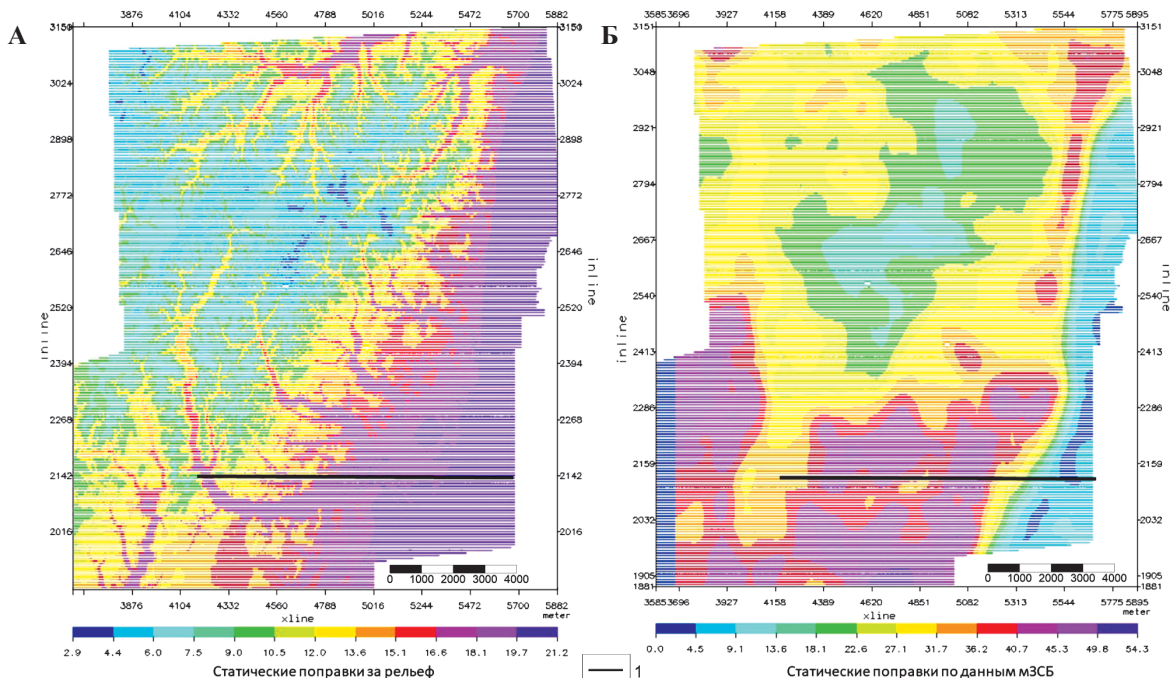


Рис. 21. Карты статических поправок: А – статические поправки от значений рельефа; Б – статические поправки по данным мЗСБ. 1 – линия профиля.

Обсуждение и выводы

Основные результаты проведенных исследований состоят в разработке подхода к использованию нестационарных электромагнитных зондирований для уточнения скоростной модели ВЧР и последующего ее учета при обработке данных сейсморазведки, а также его апробации на ряде месторождений Восточной и Западной Сибири.

Разработан методический подход, применение которого повышает информативность сейсморазведочных данных за счет использования материалов мЗСБ.

Посредством применения указанной методики удалось улучшить динамические характеристики и точность структурных построений и, как следствие, повысить точность построения геологических моделей месторождений нефти и газа.

Для Восточной Сибири разработанная методика позволяет повысить динамические характеристики, уровень когерентности сейсмической записи. Данные факторы способствуют повышению качества итоговой сейсмо-геологической модели.

В Западной Сибири удалось добиться более точных структурных построений за счет учета скоростных неоднородностей ВЧР, связанных с транзитной зоной.

Геологическая эффективность проведенных исследований состоит в повышении точности восстановления геологической модели и достоверности прогноза.

Основные выводы исследования найдут практическое применение в производственных и научных организациях, осуществляющих деятельность в сфере обработки и интерпретации данных сейсморазведки. Использование разработанной методики позволяет при минимальных затратах повысить качество обработки данных сейсморазведки и увеличить точность картирования пород геологического разреза исходя из характера решаемой задачи.

В целом, проведенные исследования позволяют расширить область применения малоуглубинной электроразведки. С учетом результатов проведенной работы намечаются следующие направления использования электроразведочных данных для повышения качества материалов сейсморазведки:

1. Использование скоростной модели ВЧР по данным мЗСБ для минимизации неопределенности ВЧР при кинематической инверсии данных МОВ ОГТ.
2. Построение скоростной модели по данным глубинных ЗСБ и ее последующий учет при глубинной миграции и построении глубинно-скоростной модели.
3. Совместная инверсия скоростной модели по данным мЗСБ и лучевой томографии для комплексного уточнения модели ВЧР.

Благодарности

За непрерывную поддержку исследований авторы выражают искреннюю благодарность генеральному директору ООО «СИГМА-ГЕО» М.В. Шарлову, исполнительному директору ООО «СИГМА-ГЕО» к.т.н. Агафонову Ю.А., ведущему геологу Мисюркеевой Н.В., ведущему научному сотруднику Института земной коры СО РАН проф., д.г.-м.н. А.В. Поспееву. За активное сотрудничество и интерес к данной работе авторы благодарят сотрудников ООО «Газпром недра» д.г.-м.н., проф. А.А. Нежданова, А.В. Погрецкого, А.Д. Авраменко, В.В. Касьянова, А.А. Астаповича.

Литература

- Бондарев В.И., Крылатков С.М., Курашев И.А. (2013). Технология получения скоростных моделей геологических сред на основе использования дифрагированных волн. *Современные проблемы науки и образования*, 1, с. 442.
- Бондарев В.И., Крылатков С.М., Смирнов А.С. (2005). Временные разрезы направленного видения в сейсморазведке методом многократных перекрытий. *Технологии сейсморазведки*, 3, с. 49–55.
- Вахромеев А.Г., Смирнов А.С., Мазукабзов А.М., Горлов И.В., Мисюркеева Н.В., Шутов Г.Я., Огибенин В.В. (2019). Верхнеленское сводовое поднятие – главный объект подготовки ресурсной базы УВ на юге Сибирской платформы. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, 3(39), с. 38–56.
- Деев Ю.П. (1972). Объяснительная записка к геологической карте масштаба 1:200000, серия Восточно-Саянская, лист N-48-XXXIV. М.: Недра, 83 с.
- Каплан С.А., Соколова Е.Ю., Яковлев Д.В., Клокова В.П., Шпекторов А.Л., Слинчук Г.Е. (2019). Построение скоростной модели верхней части разреза в условиях распространения многолетнемерзлых пород с учетом данных наземной электроразведки. *Геофизика*, 4, с. 2–8.
- Киселев В.В., Соколова И.П., Титаренко И.А., Бессонов А.Д. (2009). Способ определения статических поправок. Патент РФ RU2411547.
- Кочнев В.А., Поляков В.С., Гоз И.В., Кульчинский Ю.В. (2011). Проблемы точности сейсморазведки в Восточной Сибири. *Научно-практическая конференция «Сейсмические исследования земной коры» (Пузыревские чтения 2009)*. Новосибирск: ИНГТ СО РАН, с. 87–90.
- Кузнецов В.М., Жуков А.П., Никонов Е.О., Буров Д.И., Гафаров Т.Н., Кусевич А.В. (2014). Изучение верхней части разреза с использованием технологий многоволновой сейсморазведки в применении к зонам развития вечной мерзлоты. *Приборы и системы разведочной геофизики*, 47(1), с. 20–30.
- Пьянков А.А. (2016). Уточнение верхней части разреза на основе применения преломленных волн на территории Восточной Сибири. *Geomodel 2016 – 18th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201602214>
- Суров Л.В., Шарлов М.В., Агафонов Ю.А. (2011). Программа для количественной интерпретации данных ЗСБ Model 3. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011619164 от 25.11.2011 г.
- Шелохов И.А., Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Смирнов А.С., Агафонов Ю.А. (2018a). Подход к восстановлению скоростных характеристик верхней части разреза на основе данных нестационарных электромагнитных зондирований. *Мат. Всерос. науч.-техн. конф. «Гео-науки – 2018: актуальные проблемы изучения недр»*. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, с. 278–284.
- Шелохов И.А., Буддо И.В., Смирнов А.С. (2018b). Подход к восстановлению скоростных характеристик верхней части разреза на основе данных нестационарных электромагнитных зондирований. *Приборы и системы разведочной геофизики*, 1–2, с. 58–68.
- Armstrong T. (2001). Velocity anomalies and depth conversion – drilling success on Nelson Field, Central North Sea. *63rd EAGE Conference & Exhibition, Extended Abstracts*, IV-2. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.15.IV-2>
- Armstrong T.L., McAtter J. and Connolly P. (2001). Removal of overburden velocity anomaly effects for depth conversion. *Geophysical Prospecting*, 49, pp. 79–99. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2001.00238.x>
- Baixas F., Glogovsky V., Langman S. (1997). An Interactively Constrained Approach to Long-Period Static Corrections. *59th EAGE Conference & Exhibition*. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.131.GEN1997_P008
- Brown J., Ferrians O.J., Heginbottom J.A., and Melnikov E.S. (1997). Circum-Arctic map of permafrost and ground ice conditions. <https://doi.org/10.3133/cp45>
- Colombo D., McNeice G., Rovetta D., Turkoglu E., Sandoval-Curiel E., & Sena A. (2017). Seismic-Airborne TEM Joint Inversion and Surface Consistent Refraction Analysis: New Technologies for Complex Near Surface Corrections. *Society of Petroleum Engineers*. <https://doi.org/10.2118/184029-MS>
- Cox M. (1999). Static Corrections for Seismic Reflection Surveys. *Society of Exploration Geophysicists*, 546 p. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801818>
- Faust L.Y. (1953). A velocity function including lithologic variation. *Geophys.*, 18, pp. 271–288. <https://doi.org/10.1190/1.1437869>
- Marsden D (1993). Static corrections – a review, Part I. *The Leading Edge*, 12(1), pp. 43–49. <https://doi.org/10.1190/1.1436912>
- Marsden D (1993). Static corrections – a review, Part II. *The Leading*

- Edge, 12(2), pp. 115–120. <https://doi.org/10.1190/1.1436936>
- Marsden D. (1993). Static corrections – a review, Part III. *The Leading Edge*, 12(3), pp. 210–216. <https://doi.org/10.1190/1.1436944>
- Pyanov A.A., Shelkov I.A., Buddo I.V., Smirnov A.S. (2019). Compensation of Seismic Anomalies in Upper Part of the Section during Integration with the Data of Electrical Exploration on the Example of a Field in Eastern Siberia. *Conference Proceedings, Far East Hydrocarbons 2019*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201951005>
- Sharlov M.V., Buddo I.V., Misurkееva N.V., Shelokhov I.A., Agafonov Yu.A. (2017). Transient electromagnetic surveys for high-resolution near-surface exploration: basics and case studies. *First break*, 35(9). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.35.9.0112>
- Shelokhov I.A., Buddo I.V., Smirnov A.S. (2018a). Reducing Uncertainties in the Elastic-velocity Model of the Upper Part of the Section Construction by Tem Data Applying. *Conference Proceedings, GeoBaikal 2018*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802050>
- Shelokhov I.A., Buddo I.V., Smirnov A.S., Sharlov M.V., Agafonov Yu.A. (2018b). Inversion of TEM responses to create a near surface velocity structure. *First Break*, 36(10), pp. 47–51. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.n0125>

Сведения об авторах

Иван Антонович Шелохов – начальник отдела моделирования и комплексного анализа геолого-геофизических данных, ООО «СИГМА-ГЕО»; ведущий инженер, Институт земной коры СО РАН
Россия, 664039, Иркутск, ул. Звездинская, д. 6, пом. 7

Игорь Владимирович Буддо – кандидат геол.-мин. наук, главный геофизик, ООО «СИГМА-ГЕО»; научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН; доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет

Россия, 664039, Иркутск, ул. Звездинская, д. 6, пом. 7

Александр Сергеевич Смирнов – кандидат геол.-мин. наук, доцент, начальник центра по работе в Восточно-Сибирском регионе, филиал «Газпром недр НТЦ» ООО «Газпром недр»; Тюменский индустриальный университет

Россия, 625000, Тюмень, ул. Герцена, д. 70

Александр Анатольевич Пьянков – заместитель начальника отдела обработки материалов сейсморазведки, ООО «ИНГЕОСЕРВИС»

Россия, 625019, Тюмень, ул. Республики, д. 211

Николай Владимирович Татьяна – главный геофизик Центра «Геоинформ», ООО «ТНГ-Групп»

Россия, 423236, Бугульма, ул. Ворошилова, д. 21

Статья поступила в редакцию 09.06.2020;

Принята к публикации 15.01.2021; Опубликована 30.09.2021

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Shallow velocity model from the transient electromagnetic method data: results of application in Eastern and Western Siberia

I.A. Shelokhov^{1,2*}, I.V. Buddo^{1,2,3}, A.S. Smirnov^{4,5}, A.A. Piyankov⁶, N.V. Tatiyanin⁷

¹Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

²SIGMA-GEO LLC, Irkutsk, Russian Federation

³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

⁴Gazprom neдрa LLC, Tyumen, Russian Federation

⁵Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

⁶INGEOSERVICE LLC, Tyumen, Russian Federation

⁷TNG-Group LLC, Bugulma, Russian Federation

*Corresponding author: Ivan A. Shelokhov, e-mail: sia@sigma-geo.ru

Abstract. The geological section of Eastern and Western Siberia is a complex object for a seismic exploration. The reason for this is the extremely high variability of the upper part of the section lithology, rough terrain, and permafrost rocks. This paper delivers an alternative approach to predicting the velocity model of the upper part of the section. The approach based on the original method of restoring the elastic-velocity characteristics from the data of transient electromagnetic method (TEM) in the near field zone.

Research devoted to test the methodology of the shallow section velocity model calculation based on TEM data in a number of fields in Eastern and Western Siberia. Derived results aimed to improve the accuracy of the geological model building and the reliability of the hydrocarbon plays prediction.

Synthetic modeling and field data confirm the high level of the proposed methodology effectiveness. It was shown that for the Eastern Siberia settings, an improvement in the quality of processing of seismic data consists in a significant increase in the dynamics and coherence of seismic recordings. In Western Siberia, it is possible to take into account the velocity anomalies associated with the permafrost rocks and zones of transit from the onshore part of the survey area to the sea.

Keywords: velocity model, seismic exploration, reflected wave method, common depth point, transient electromagnetic method, upper part of the section, permafrost rocks, static corrections

Acknowledgements

The authors are grateful to the General Director of SIGMA-GEO LLC M.V. Sharlov, Executive Director of LLC SIGMA-GEO LLC Y.A. Agafonov, leading geologist Misurkееva N.V., leading researcher of the Earth crust Institute of SB RAS Prof. A.V. Pospeev for support at all stages of the work implementation.

The authors are grateful to the employees of Gazprom neдрa LLC, Dr. A.A. Nezhdanov, Prof. A.V. Pogretzky, A.D. Avramenko, V.V. Kasyanov, A.A. Astapovich for the useful cooperation.

Recommended citation: Shelokhov I.A., Buddo I.V., Smirnov A.S., Piyankov A.A., Tatiyanin N.V. (2021). Shallow velocity model from the transient electromagnetic method data: results of application in Eastern and Western Siberia. *Georesursy = Georesources*, 23(3), pp. 60–72. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.9>

References

- Armstrong T. (2001). Velocity anomalies and depth conversion – drilling success on Nelson Field, Central North Sea. *63rd EAGE Conference & Exhibition*, Extended Abstracts, IV-2. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.15.IV-2>
- Armstrong T.L., McAteer J. and Connolly P. (2001). Removal of overburden velocity anomaly effects for depth conversion. *Geophysical Prospecting*, 49, pp. 79–99. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2001.00238.x>
- Baixas F., Glogovsky V., Langman S. (1997). An Interactively Constrained Approach to Long-Period Static Corrections. *59th EAGE Conference & Exhibition*. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.131.GEN1997_P008
- Bondarev V.I., Krylatkov S.M., Kurashev I.A. (2013). Technology for obtaining velocity models of geological environments based on the use of diffracted waves. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 1. (In Russ.)
- Bondarev V.I., Krylatkov S.M., Smirnov A.S. (2005). Time-slices of directional vision in multiple overlap seismic. *Tekhnologii seismorazvedki*, 3, pp. 49–55. (In Russ.)
- Brown J., Ferrians O.J., Heginbottom J.A., and Melnikov E.S. (1997). Circum-Arctic map of permafrost and ground ice conditions. <https://doi.org/10.3133/cp45>
- Colombo D., McNeice G., Rovetta D., Turkoglu E., Sandoval-Curiel E., & Sena A. (2017). Seismic-Airborne TEM Joint Inversion and Surface Consistent Refraction Analysis: New Technologies for Complex Near Surface Corrections. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/184029-MS>
- Cox M. (1999). Static Corrections for Seismic Reflection Surveys. Society of Exploration Geophysicists, 546 p. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801818>
- Deev Yu.P. (1972) Explanatory note to a geological map at a scale of 1: 200000, East Sayan series, sheet N-48-XXXIV. Moscow: Nedra, 83 p. (In Russ.)
- Faust L.Y. (1953). A velocity function including lithologic variation. *Geophys.*, 18, pp. 271–288. <https://doi.org/10.1190/1.1437869>
- Kaplan S.A. Sokolova E.Yu. Yakovlev D.V. Klokova V.P. Shpektorov A.L. Slinchuk G.E. (2019). Velocity model construction of the upper section part under the conditions of the permafrost spread, taking into account surface electrical exploration data. *Geofizika*, 4, pp. 2–8. (In Russ.)
- Kiselev V.V., Sokolova I.P., Titarenko I.A., Bessonov A.D. (2009). Method for determining static corrections. Patent RF RU2411547. (In Russ.)
- Kochnev V.A., Polyakov V.S., Goz I.V., Kul'chinskii Yu.V. (2011). Problems of seismic survey accuracy in Eastern Siberia. *Sci. and Pract. conf.: Seismic studies of the Earth's crust (Puzryev readings 2009)*. Novosibirsk: IPGG RAS, pp. 87–90. (In Russ.)
- Kuznetsov V.M., Zhukov A.P., Nikonov E.O., Burov D.I., Gafarov T.N., Kusevich A.V. (2014). Study of the upper part of the section using multiwave seismic technologies as applied to zones of permafrost development. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*, 47(1), pp. 20–30. (In Russ.)
- Marsden D (1993). Static corrections – a review, Part I. *The Leading Edge*, 12(1), pp. 43–49. <https://doi.org/10.1190/1.1436912>
- Marsden D (1993). Static corrections – a review, Part II. *The Leading Edge*, 12(2), pp. 115–120. <https://doi.org/10.1190/1.1436936>
- Marsden D. (1993). Static corrections – a review, Part III. *The Leading Edge*, 12(3), pp. 210–216. <https://doi.org/10.1190/1.1436944>
- Pyankov A.A. (2016). Refinement of the upper part of the section based on the use of refracted waves in the territory of Eastern Siberia. *Conference Proceedings, Geomodel 2016 – 18th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*. (In Russ.). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201602214>
- Pyankov A.A., Shelkov I.A., Buddo I.V., Smirnov A.S. (2019). Compensation of Seismic Anomalies in Upper Part of the Section during Integration with the Data of Electrical Exploration on the Example of a Field in Eastern Siberia. *Conference Proceedings, Far East Hydrocarbons 2019*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201951005>
- Sharlov M.V., Buddo I.V., Misyurkeeva N.V., Shelokhov I. A., Agafonov Yu.A. (2017). Transient electromagnetic surveys for high-resolution near-surface exploration: basics and case studies. *First break*, 35(9). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.35.9.90112>
- Shelokhov I.A., Buddo I.V., Misyurkeeva N.V., Smirnov A.S., Agafonov Yu.A. (2018a). An approach to reconstructing the velocity characteristics of the upper part of the section based on non-stationary electromagnetic sounding data. *Proc. All-Russ. Sci. and Tech. Conf.: Geosciences – 2018: Actual Problems of Subsoil Studies*. Irkutsk: IRNITU Publ., pp. 278–284. (In Russ.)
- Shelokhov I.A., Buddo I.V., Smirnov A.S. (2018b). An approach to reconstructing the velocity characteristics of the upper part of the section based on non-stationary electromagnetic sounding data. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*, 1–2, pp. 58–68. (In Russ.)
- Shelokhov I.A., Buddo I.V., Smirnov A.S. (2018c). Reducing Uncertainties in the Elastic-velocity Model of the Upper Part of the Section Construction by Tem Data Applying. *Conference Proceedings, GeoBaikal 2018*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802050>
- Shelokhov I.A., Buddo I.V., Smirnov A.S., Sharlov M.V., Agafonov Yu.A. (2018d). Inversion of TEM responses to create a near surface velocity structure. *First Break*, 36(10), pp. 47–51. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.n0125>
- Surov L.V., Sharlov M.V., Agafonov Yu.A. (2011). Program for the quantitative interpretation of the ZSB data Model 3. Certificate of official registration of the computer program No. 2011619164, 25.11.2011. (In Russ.)
- Vakhromeev A.G., Smirnov A.S., Mazukabzov A.M., Gorlov I.V., Misyurkeeva N.V., Shutov G.Ya., Ogibenin V.V. (2019). The Upper Lena Arched Uplift Is the Main Object of Preparing a Resource Base of Hydrocarbons in the South of the Siberian Platform. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia], 3(39), pp. 38–56. (In Russ.)

About the Authors

Ivan A. Shelokhov – Head of the Department of Modelling and Complex Analysis of Geological and Geophysical Data, SIGMA-GEO LLC; Leading Engineer, Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

6 Zvezdinskaya St., Irkutsk, 664039, Russian Federation

Igor V. Buddo – PhD (Geology and Mineralogy), Chief Geophysicist, SIGMA-GEO LLC; Researcher, Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University

6 Zvezdinskaya St., Irkutsk, 664039, Russian Federation

Alexander S. Smirnov – PhD (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head of East Siberia Centre, Gazprom nedra LLC; Tyumen Industrial University

70 Herzen St., Tyumen, 625000, Russian Federation

Alexander A. Piyankov – Deputy Head of Seismic Survey Data Processing Department
INGEOSERVIS LLC

211 Republic St., Tyumen, 625019, Russian Federation

Nikolay V. Tatiyanin – Chief Geophysicist of the Center “Geoinform”

TNG-Group LLC

21 Voroshilova St., Bugulma, 423236, Russian Federation

Manuscript received 9 June 2020;

Accepted 15 January 2021; Published 30 September 2021