

При изучении геофизическими методами геологического строения нефтегазоносных площадей всегда необходимо учитывать влияние верхней части разреза (ВЧР), которая, как правило, является его наиболее изменчивой частью. В условиях сложно построенных сред, для изучения ВЧР дополнительно проводятся специальные полевые работы, включающие микросейсмокаротаж скважин и наблюдения методом преломленных волн. Альтернативой этим методам может служить сейсмотомографический способ изучения особенностей скоростной характеристики ВЧР по данным первых вступлений продольных волн. Такой подход является особенно полезным при детальных площадных сейсмических исследованиях в районах, характеризующихся сложным рельефом и быстро изменяющимся строением ВЧР, в том числе, в районах с развитием вечной или островной мерзлоты, наличием трапповой тектоники, на соленосных площадях, в крупных разломных зонах.

В настоящей работе приводятся результаты изучения скоростного строения ВЧР Восточно-Камчатского прогиба с использованием сейсмотомографической обработки материалов, полученных при региональных сейсмических исследованиях (2005-2006 гг.), выполненных совместно ФГУП «СНИИГГиМС» и ОАО «Камчатгеология».

Сейсмотомография верхней части разреза Восточно-Камчатского прогиба

Канарейкин Б.А., Сагайдачная О.М., Дунаева К.А., ФГУП «СНИИГГиМС», г. Новосибирск

Введение

При изучении сейсмическими методами геологического строения нефтегазоносных площадей всегда учитывается влияние верхней части разреза (ВЧР) посредством ввода статических поправок. Как правило, для изучения наиболее сложно построенной ВЧР дополнительно проводятся специальные полевые работы, включающие микросейсмокаротаж скважин и сейсмические наблюдения методом преломленных волн. Однако следует принимать во внимание тесную взаимосвязь полученных скоростей суммирования по додографу ОГТ с рельефом площади работ, особенно для горизонтов вблизи поверхности, и учитывать при применении скоростного закона, определённого по сейсмокаротажу [1].

Вопросы совершенствования способов коррекции влияния ВЧР для модели поверхностно-согласованных поправок достаточно обстоятельно рассмотрены в работах [7 - 8]. Там же подчеркивается актуальность разработки технологии создания скоростной модели ВЧР, включающей основные три вида неоднородностей: дневной рельеф, зону малых скоростей и более глубоко залегающую толщу, характеризующуюся нестабильностью скоростей.

В последнее время появились публикации [9], в которых сейсмотомографический способ обработки первых вступлений продольных волн используется как один из способов определения статических поправок при построении временных разрезов 2D (3D). Однако имеют место и более широкие возможности использования сейсмотомографических разрезов по значениям скоростей продольных волн в первых вступлений, в том числе, для изучения геологических особенностей строения ВЧР [2].

В настоящей работе приводятся результаты сейсмотомографического изучения строения ВЧР в пределах Восточно-Камчатского прогиба (Усть-Камчатская площадь) с использованием материалов, полученных при региональных сейсмических исследованиях на отраженных волнах (2D), выполненных по государственному заказу за счет средств федерального бюджета в период 2005 - 2006 гг. совместно ФГУП «СНИИГГиМС» и ОАО «Камчатгеология» [4]. Отметим, что до 2005 г. сейсмические работы на отраженных волнах на территории Восточной Камчатки не проводились.

Восточная Камчатка и прилегающие районы шельфа входят в состав Притихоокеанской нефтегазоносной провинции. В континентальной части этой провинции выделяется ряд нефтегазоперспективных прогибов, среди них Восточно-Камчатский прогиб. Восточно-Камчатский прогиб характеризуется широким развитием покровно-складчатых дислокаций восточной вергентности и в его пределах установлены многочисленные естественные проявления нефти и газа. К наиболее нефтегазоперспективным площадям относится зона Тюшевского наложенного прогиба, выполненная в различной степени дислоцированными палеоген-неогеновыми вулканоседочными и осадочными отложениями.

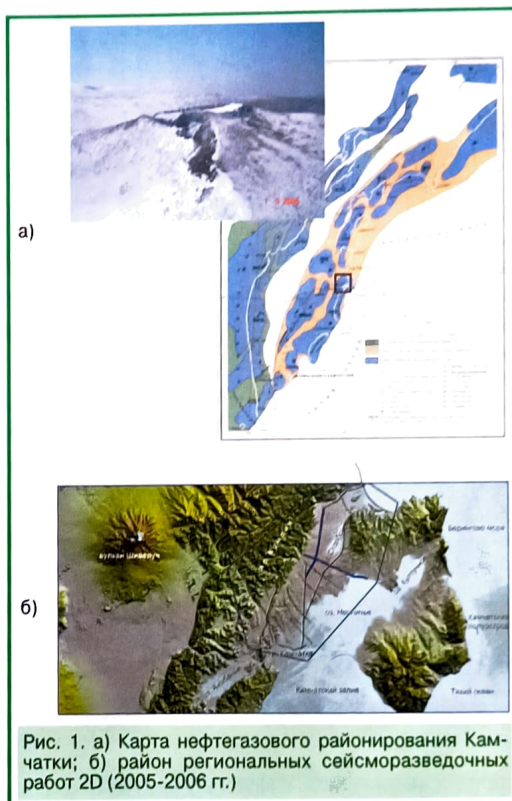


Рис. 1. а) Карта нефтегазового районирования Камчатки; б) район региональных сейсморазведочных работ 2D (2005-2006 гг.)

Площадь региональных сейсмических работ охватывает северную часть Тюшевского наложенного прогиба: на юго-западе территории выходят отроги хр. Кумроч, на востоке - горы Камчатского п-ва, южной границей является нижнее течение р. Камчатки, северной границей - побережье Берингова моря (рис. 1). В сейсмогеологическом отношении район работ достаточно сложный, что обусловлено особенностями геологического строения молодой складчатой области с интенсивной тектоникой и обилием магматизма, а также орографией, представленной сильно расчлененным рельефом, болотами и развитой сетью многочисленных рек.

Площадь региональных сейсмических работ охватывает северную часть Тюшевского наложенного прогиба: на юго-западе территории выходят отроги хр. Кумроч, на востоке - горы Камчатского п-ва, южной границей является нижнее течение р. Камчатки, северной границей - побережье Берингова моря (рис. 1). В сейсмогеологическом отношении район работ достаточно сложный, что обусловлено особенностями геологического строения молодой складчатой области с интенсивной тектоникой и обилием магматизма, а также орографией, представленной сильно расчлененным рельефом, болотами и развитой сетью многочисленных рек.

Особенности волнового поля, наблюдаемого при региональных работах 2D

Сейсмические региональные работы выполнены на 15 профилях в объеме 300 пог. км по методике 2D с кратностью 60 (шаг между пунктами возбуждения (ДПВ) равен 50 м, шаг между пунктами приёма (ДПП) равен 50 м). Применялась центральная система наблюдений, для которой длина рабочей расстановки составляла 6100 м. При этом максимальное удаление от пункта возбуждения (ПВ) до пункта приёма (ПП) имело значение $x_{\max}=3050$ м, минимальное удаление, соответственно, $x_{\min}=50$ м.

Возбуждение сейсмических колебаний на всех отработанных профилях осуществлялось с использованием невзрывных источников импульсного типа «Енисей СЭМ-100М2» (ОАО «Енисейгеофизика», г. Красноярск) [6]. Для увеличения отношения сигнал/помеха при работе с импульсным источником каждое физическое наблюдение выполнялось с накоплением отдельных сеансов возбуждения (от 8 до 16). Для определения относительной мощности импульсного источника один сейсмический профиль 200606 был дополнительно отработан с помощью взрывного источника возбуждения упругих колебаний. Показано, что возбуждение упругих колебаний взрывами в скважинах (вес заряда до 1 кг, глубина 5-8 м) имеет определенные преимущества, основные из них заключаются в следующем: первичные записи сейсмических волн характеризуются более высокочастотным спектром, интенсивность помех на малых временах регистрации меньше в 3-10 раз. Тем не менее, используемые при обработке сейсмических записей одноканальные и многоканальные фильтры позволили получить сопоставимое (равное) качество прослеживания на временных разрезах 2D основных отражающих горизонтов при невзрывном и взрывном способах возбуждения упругих колебаний.

Регистрация сейсмических колебаний проводилась с использованием широкополосной многоканальной телеметрической сеймостанции СТС-24Р (ФГУП «СНИИГГиМС», г. Новосибирск) на открытом канале [5]. Длительность записи составляла 6 с, частота дискретизации была выбрана равной 1 мс. Для регистрации сейсмических волн использовались точечные группы из 5 штук вертикальных геологов GS-20 DX (ООО «ОЙО-ГЕО Импульс Интернэшнл», г. Уфа).

Основная компьютерная обработка сейсмических данных 2D выполнялась совместно со специалистами ООО «Томская геофизическая компания» на сервере SGI ORIGIN 2000 с применением программного комплекса FOCUS (Paradigm Geophysical). Построение временных разрезов было проведено с сохранением динамических характеристик отраженных волн.

В целом, проведенные работы методом 2D позволили изучить структурно-тектоническое строение северной части Восточно-Камчатского прогиба до глубин 8 км. Получены временные и глубинные сейсмические разрезы и построены структурные карты по основным отражающим горизонтам чехла (Ф1, Ф2 и Ф21) и поверхности консолидированного фундамента К0 (рис. 2, 3а). Отложения осадочного

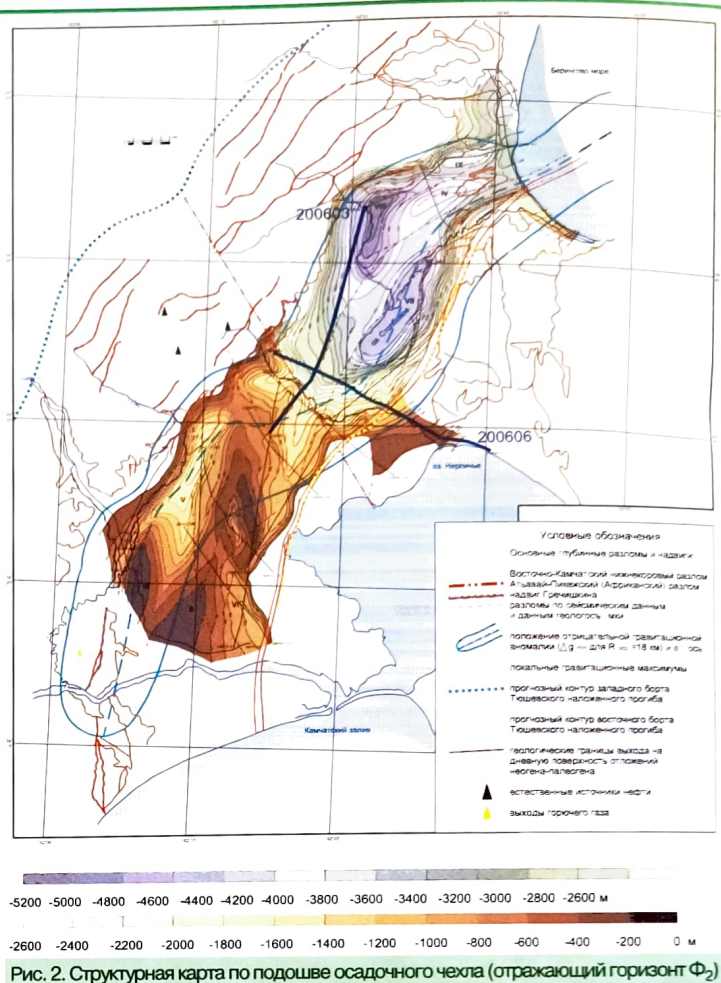


Рис. 2. Структурная карта по подошве осадочного чехла (отражающий горизонт Ф₂)

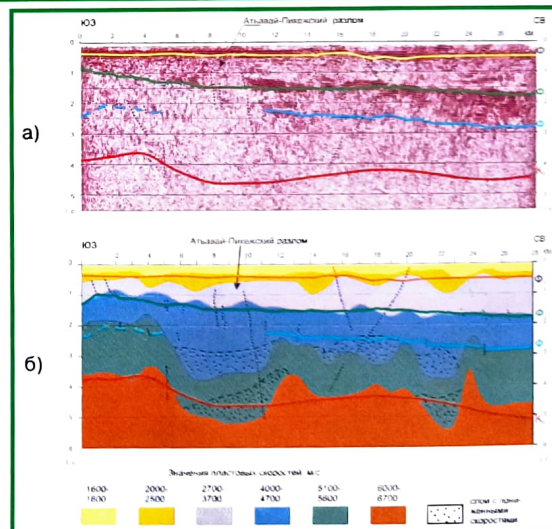


Рис. 3. Сейсмический разрез (а) и пластовая модель среды (б) по профилю 200603. Северная часть Восточно-Камчатского прогиба

чехла сложены преимущественно терригенными слабо дислоцированными олигоцен-четвертичными отложениями мощностью до 3-4 км. Из-за отсутствия скважин глубокого разведочного бурения в основу стратиграфической привязки прослеженных отражающих горизонтов положены значения пластовых скоростей продольных волн отдельных геологических комплексов Восточно-Камчатского прогиба [4]. Однако информация об особенностях строения ВЧР до глубин 500 – 600 м на сейсмиче-

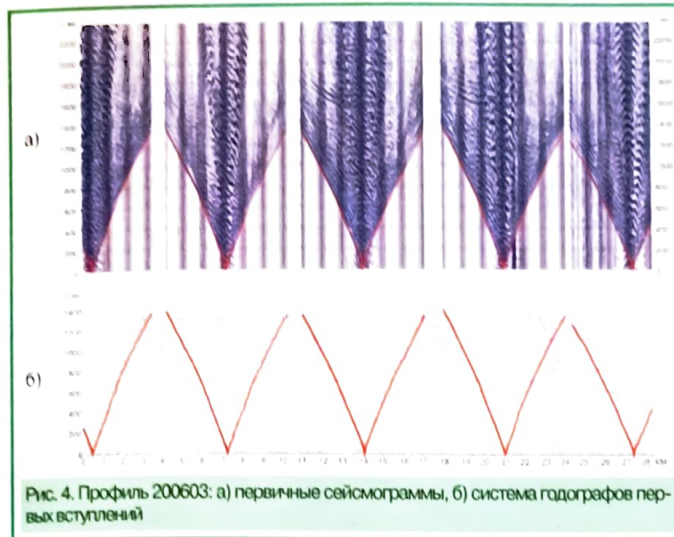


Рис. 4. Профиль 200603: а) первичные сейсмограммы, б) система годографов первых вступлений

ских разрезах 2D требует дополнительного обоснования, поскольку этот интервал может содержать контрастные скоростные неоднородности, неучет которых приводит к искажению глубинных построений. Таким образом, слабая изученность территории Восточно-Камчатского прогиба и особо изменчивые приповерхностные условия предопределяют необходимость восстановления структуры ВЧР с использованием поля скоростей.

Начальное представление об особенностях строения осадочного чехла по скоростям продольных волн V_p было получено по данным энергетического анализа материалов МОГТ-2D (рис. 36). Двумерная модель по скоростям V_p до глубин порядка 4000 м может быть представлена градиентно-слоистой средой. Верхний слой характеризуется плавным увеличением скоростей V_p от 900 до 2000 м/с и соответствует четвертичным отложениям (Q). Второй слой характеризуется нарастанием скорости V_p от 2000 до 2600 м/с и соотносится с отложениями ольховской свиты (N2-QEof). Подошва ольховской свиты – отражающий горизонт Ф1. Для третьего слоя отмечается увеличение скорости V_p от 2700 до 3700 м/с. Этот слой, характеризующийся слабо выраженной слоистостью, соответствует отложениям осадочного чехла олигоцен-миоценового возраста (N3-Mh – N1gr). Подошва третьего слоя – основной отражающий горизонт Ф2. Четвертый слой характеризуется хорошо выраженной расслоенностью среды. В этом слое, отождествляемом с отложениями ветловской свиты (K2M), отмечается плавное увеличение скоростей V_p от 4000 до 4700 м/с.

В полученной по скоростям V_p пластовой модели среды не отражены особенности строения ВЧР. Информацию о детальном строении наиболее изменчивой верхней части разреза можно получить при использовании сейсмотомографического способа обработки первых вступлений продольных волн.

Методика сейсмотомографической обработки

Сейсмотомографическая обработка материалов региональных работ 2D позволяет получить достоверную оценку (модель) скоростного строения ВЧР при обязательном выполнении условия формирования рефрагированной продольной волны, регистрируемой в первых вступлениях. При постоянном и относительно плавном увеличении скорости продольных волн с глубиной данное условие выполняется, но при наличии в ВЧР волноводов (пластов с пониженными скоростями), а также сильных границ раздела, будет получено осредненное представление о скоростных особенностях раз-

реза. В этой ситуации более точный сейсмотомографический разрез по скорости рефрагированной продольной волны может быть получен при его коррекции с использованием материалов микросейсмокаротажа.

Основные элементы используемого сейсмотомографического способа обработки рефрагированных продольных волн, регистрируемых в первых вступлениях, заключаются в следующем:

- подготовка сейсмических данных для томографической обработки и формирование для всех ПВ(и) ПП(у) системы годографов первых вступлений ($T_{\text{наб}}^k$), обеспечивая необходимую увязку встречных годографов (рис. 4);
- формирование начальной модели разреза $V^0(x, z)$;
- определение поля времён $T_{\text{р}}^k$ (прямая задача) и соответствующих

этим временам траекторий лучей $L_{\text{р}}^k$ по скоростной модели $V^0(x, z)$ на основе программно реализованного принципа Гюйгенса;

- вычисление невязки $T_{\text{незв}}^k$ между наблюдаемыми временами прихода волн $T_{\text{наб}}^k$ и расчётными временами $T_{\text{р}}^k$: $T_{\text{незв}}^k = T_{\text{наб}}^k - T_{\text{р}}^k$;
- оценивание сходимости процесса и продолжение вычислительной итерации, если решение устойчиво сходится, но невязка больше допустимой (4 мс на трассу), или выход из цикла, если невязка достигает необходимого минимума. Возможен конфликтный вариант вычислений (прерывание итерации) при несходимости решения и сохранении невязки больше допустимой, например из-за сложного структурного строения участка и (или) низкой плотности наблюдений.

Для восстановления поля скоростей $V(x, z)$ по профилю задаётся расчетная сетка, размер которой ограничен дискретностью пунктов возбуждения (ДПВ) и дискретностью пунктов приёма (ДПП). Принято считать, что шаг по сетке должен быть не менее одного - двух значений ПП (или ПВ). Поэтому, для сохранения детальности восстанавливаемых разрезов скоростей была выбрана сетка с шагом 50 м по горизонтали и 30 м по вертикали, а в пределах одной ячейки расчетной сетки скорость принимается постоянной.

Для обеспечения корректных расчетов задавалось начальное приближение скоростного разреза ВЧР по скоростям продольных волн максимально близкое к действительности, которое было получено по данным энергетического анализа материалов региональных работ 2D. Важно отметить, что в условиях резкой дифференциации скоростей грубое представление начальной модели при томографической обработке может привести к появлению ложных аномалий (артефактов).

Характеризуя вертикальный разрез (его верхнюю часть) линейным нарастанием скорости продольных волн от 900 м/с до 3100 м/с, а также учитывая, что максимальное расстояние между ПВ и ПП равно 3050 м, находим максимальную глубину пронизания луча (до 900 м). Выполненный детальный анализ волнового поля на малых временах позволил априорно предположить трёхслойное строение ВЧР:

- первый слой, мощностью 100 – 200 м, имеет скорость распространения продольных волн $V_p = 900 - 1950$ м/с;
- второй слой имеет мощность, изменяющуюся в пределах профиля от 250 до 600 м, и скорость распространения продольных волн $V_p = 2000 - 2400$ м/с;



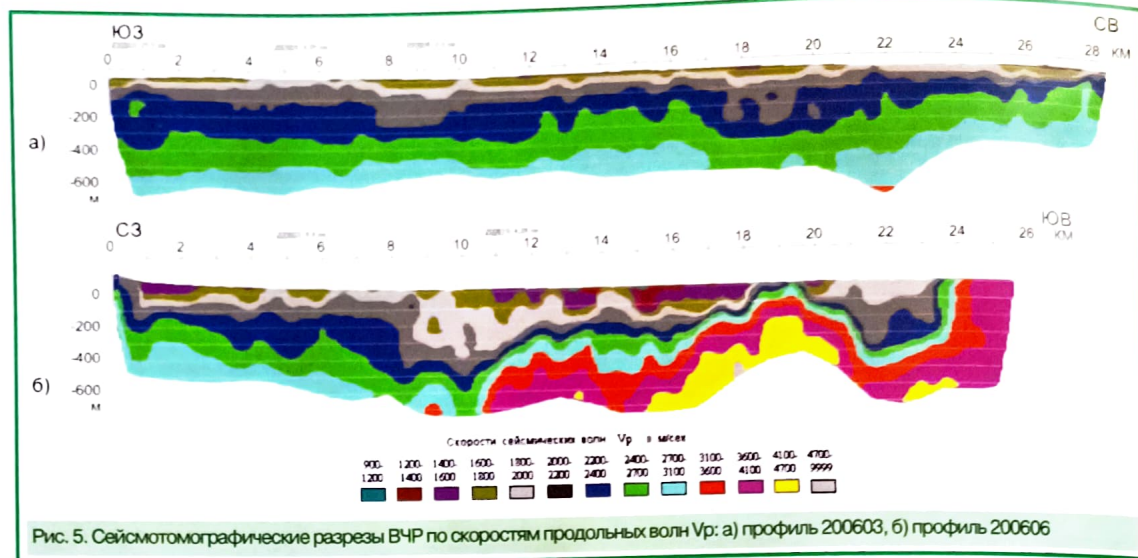


Рис. 5. Сейсмотомографические разрезы ВЧР по скоростям продольных волн V_p : а) профиль 200603, б) профиль 200606

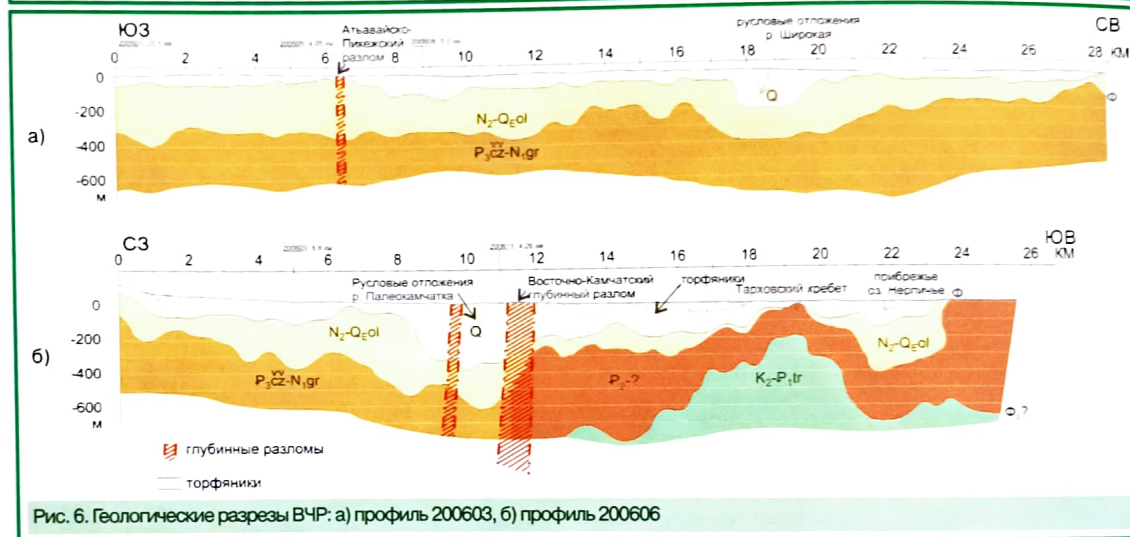


Рис. 6. Геологические разрезы ВЧР: а) профиль 200603, б) профиль 200606

третий слой, подстилающий, прослеживается на глубинах до 800 м и имеет скорость распространения продольных волн $V_p > 2500$ м/с.

С учетом начальной скоростной модели ВЧР матрица скоростей для томографической обработки была сформирована из 9 слоев с различными интервальными значениями, в пределах которых скорости плавно увеличиваются на 200 и 500 м/с.

Результаты сейсмотомографической обработки

Сейсмотомографическая обработка по описанной выше методике проводилась на двух профилях 200603 и 200606, первый из которых располагался вдоль оси Восточно-Камчатского прогиба, второй – перпендикулярно к ней (рис. 2). Построенные по скоростям V_p сейсмотомографические разрезы ВЧР (рис. 5) характеризуются достаточно сложным рельефом выделенных скоростных слоев.

Для профиля 200603 диапазон значений скоростей V_p составляет от 1400 до 3100 м/с с плавным увеличением от глубины. На разрезе выделяется ряд локальных аномалий пониженных скоростей, которые приурочены к речным долинам.

Для профиля 200606 диапазон значений скоростей V_p находится в пределах от 900 до 4100 м/с, что существенно выше диапазона значений скоростей для профиля 200603. На сейсмотомографическом разрезе по данному профилю отмечается существенное различие поля скоростей для северо-западной и юго-восточной частей разреза. Границей раздела этих полей служит Восточно-Камчатский глубинный разлом. Особо контрастная низ-

коскоростная аномалия скоростей V_p выделяется в центральной части профиля 200606. В восточной части этого профиля в приповерхностной части разреза картируется протяженный участок сверхнизких скоростей ($V_p \leq 1400$ м/с). В юго-восточной части разреза выделяется контрастная высокоскоростная зона, в которой максимальные скорости продольных волн достигают 4700 м/с.

Выполнив сопоставление выбранных диапазонов изменения скоростей V_p на сейсмотомографических разрезах с конкретными стратиграфическими подразделениями среды, определим модель геологического строения ВЧР на профилях 200603 и 200606. На полученных геологических моделях ВЧР (рис. 6) можно достаточно уверенно выделить четвертичные отложения средней мощностью около 50 - 70 м ($V_p = 900-2000$ м/с). На отдельных участках выделяются зоны, в которых мощность четвертичных отложений достигает 200 - 300 м. Эти локальные зоны, как правило, приурочены к руслам рек или прибрежному участку оз. Нерпичье. Одна из локальных зон, наиболее контрастная, вероятно соответствует русловым отложениям

р. Палеокамчатка (рис. 6б). Участки сверхнизких скоростей ($V_p \leq 1400$ м/с) обусловлены наблюдаемой в этом районе сильной заболоченностью и развитием торфяников.

Абсолютные отметки кровли ольховской свиты находятся в пределах от +100 до -400 м. Отметим, что отложения ольховской свиты, которые развиты повсеместно и имеют мощность 100 - 250 м ($V_p =$

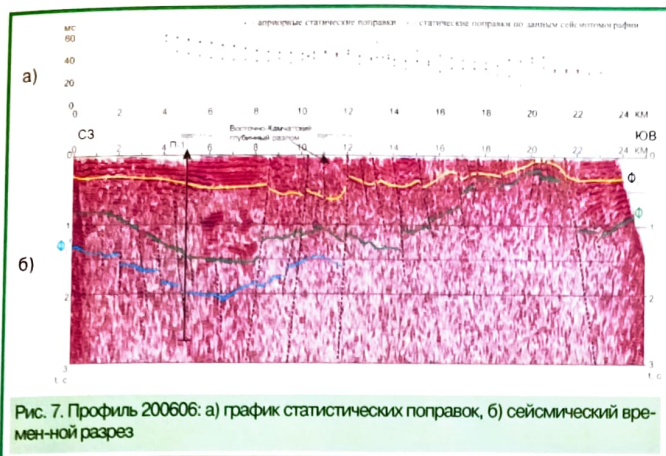


Рис. 7. Профиль 200606: а) график статистических поправок, б) сейсмический временной разрез

2000 – 2400 м/с), к юго-востоку от Восточно-Камчатского глубинного разлома по профилю 200606 резко уменьшаются по мощности до 50 м. В юго-восточной части профиля 200606 картируется крупная антиклинальная складка, в ядре которой находятся отложения промежуточного этажа ($V_p = 3600 - 4700$ м/с). Этот участок связан с захороненными отрогами тарховского хребта (рис. 6б).

Отложения чажминской и горбушинской свит ($V_p = 2600 - 3100$ м/с) освещены не на полную мощность, а в пределах от 200 – 400 м. При этом абсолютные отметки рельефа поверхности этих отложений находятся в интервале от + 50 до – 620 м.

Полученные в результате сейсмотомографической обработки данные о геологическом строении ВЧР согласуются с геологическим строением Тюшевского прогиба. Важно отметить, что локальные особенности геологического строения на восточном участке профиля 200606 более детально отображены на сейсмотомографическом разрезе, чем на сейсмическом разрезе 2D.

Особой отличительной характеристикой полученных сейсмотомографических разрезов по скорости V_p является резко выраженный перепад глубин (до 500 – 600 м) одноименных скоростных горизонтов. Это предопределяет необходимость использования таких разрезов для расчета статических поправок. На рис. 7 показаны два варианта расчета значений статических поправок за линию приведения – 50 м. Один из них (стандартный подход) выполнен при условии, что скорость ВЧР является величиной постоянной, второй – по материалам сейсмотомографии. Отметим, что в ряде случаев значения статических поправок, полученных разными способами, различаются до 30 мс. Среднеквадратичное отклонение t для обоих способов определения статических поправок t за пункт приема и пункт возбуждения составляет ± 16 мс. Преимущество сейсмотомографического варианта учета статических поправок определяется возможностью исключать скоростные неоднородности разреза, расположенные на больших глубинах (до 500 – 700 м) и, следовательно, возможностью учесть не только короткопериодную, но и длиннопериодную статистику.

Выводы

Сейсмотомографическая обработка первых вступлений материалов 2D позволяет построить двумерную модель ВЧР по скоростям распространения продольных волн V_p (сейсмотомографические разрезы) до глубин в несколько сотен метров, рассчитать на её основе статические поправки, включающие короткопериодную и длиннопериодную составляющие, связанные со скоростной неоднородностью среды, в том числе ниже линии приведения, и, следовательно, получить геологическую модель с более достоверными оценками

структурных и скоростных особенностей среды.

Сейсмотомографический способ изучения строения ВЧР Восточно-Камчатского прогиба позволил уточнить общее представление об основных особенностях структурного строения осадочного чехла в сложно-построенной зоне Тюшевского прогиба. В последние годы в нефтяной суперпровинции Тихоокеанского подвижного пояса, включающей Восточно-Камчатский прогиб, открыты неструктурные залежи углеводородов на глубинах от 80 – 200 м до 3000 м, приуроченные к узким дислоцированным междуговым прогибам. В таких сейсмогеологических условиях сейсмотомографический

подход изучения ВЧР может оказаться особо полезным при поисковых и детальных работах (2D, 3D).

Отмеченные принципиальные возможности сейсмотомографической обработки времен первых вступлений позволяют рекомендовать данный способ для включения в основной граф обработки сейсмических материалов (2D, 3D). Сейсмотомографический способ изучения ВЧР может быть полезным при детальных площадных сейсмических исследованиях в районах, характеризующихся сложным и быстро изменяющимся строением ВЧР, в том числе, в районах с развитием вечной или островной мерзлоты, наличием трапповой тектоники, на соленосных площадях, в крупных разломных зонах.

Литература

1. Завьялов В.А. Повышение эффективности сейсмических исследований в пределах Сибирских Увалов // Геофизика, 2009, № 1.
2. Канарейкин Б.А., Прихода А.Г., Сагайдачная О.М., Щербаков В.В. Сейсмотомографические исследования грунтов при инженерно-геологических изысканиях // Геофизика, 2004, № 5.
3. Канарейкин Б.А., Сагайдачная О.М., Попруженко С.В., Декин Г.П., Дунаева К.А. Результаты первых нефтепоисковых сейсмических работ в северной части Восточно-Камчатского прогиба // Геофизические методы поисково-оценочных исследований: Сборник научных трудов «СНИИГ-ГимС», - Новосибирск: Наука, 2007.
4. Канарейкин Б.А., Сагайдачная О.М., Попруженко С.В., Декин Г.П., Аносов Г.И. Структурно-тектоническое строение и оценка углеводородного потенциала Восточно-Камчатского прогиба // Геофизика, 2009, № 1.
5. Сагайдачная О.М., Шмыков А.Н. Отечественные сейсмотелеметрические станции // Разведка и охрана недр, 2003, № 11-12.
6. Смирнов В.П. Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда «Енисей СЭМ, КЭМ» // Приборы и системы разведочной геофизики, 2003, № 2.
7. Сысоев А.П. Технология построения объемных сейсмогеологических моделей по данным разномасштабной сейсморазведки. // Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук. Новосибирск: ОАО «Сиб-нефтегеофизика», 2005.
8. Сысоев А.П. Системный подход к решению проблемы учета неоднородности ВЧР в методе отраженных волн // Геофизика, 2008, № 3.
9. Bridle R., Barsoukov N., Al-Homali M., Ley R., Al-Mustafa A. Comparing state-of the art near-surface models of a seismic test line from Saudi Arabia // Geophysical Prospecting, 2006, № 54.