УДК 550.834.3(571.1)

К ВОПРОСУ О МНОГОВАРИАНТНОСТИ МОДЕЛЕЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Дружинин В.С., Осипов В.Ю. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В порядке дискуссии рассмотрен вопрос, считать ли многовариантность сейсмических разрезов земной коры за достоинство или за недостаток. На конкретных примерах по районам сверхглубокого и глубокого бурения показана несостоятельность разрезов, составленных по упрощенным системам наблюдения, не соответствующим сложным моделям геологической среды. По аналогии рассмотрен пример с определением подошвы земной коры в районе Уральской СГ-4.

Методика, результаты и эффективность глубинных сейсмических исследований.

TO THE QUESTION ON PLENTY OF EARTH'S CRUST MODELS VARIANTS CONSTRUCTED USING SEISMIC RESEARCH DATA

Druzhinin V.S., Osipov V.Y. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. By the way of discussion it had been searched a question: can we accept the plenty amount of seismic sections of the Earth's crust as an advantage or as a failing. It had been shown on concrete examples for the regions with deep and over deep drilling the groundlessness of the sections, which had been constructed by using simplified systems of observation, which do not satisfy the real geological structure. By analogy it is searched an example of determining the bottom of the Earth's crust in the region of the Ural borehole SD-4.

Method, results and effectiveness of deep seismic research.

Оценка достоверности сейсмической информации становится весьма существенной проблемой в связи с усложнением решаемых сейсморазведкой задач, их геологической интерпретации и полученной информацией по результатам сверхглубокого бурения.

В монографии, составленной по результатам комплексных исследований по международному проекту Уралсейс, во вводной главе на странице 11 указано, что многовариантность моделей по одному и тому же объекту – это достоинство, а не недостаток (Глубинное строение ..., 2001). С этим утверждением трудно согласиться. Прежде всего, необходимо отметить, что по современным представлениям (исследования по детальным системам наблюдений, результаты сверхглубокого бурения) земная кора имеет сложное слоисто-блоковое строение. Она характеризуется значительной раздробленностью, наличием глубинных разломов и пространственным характером распределения сейсмических неоднородностей. Возможности сейсмических методов по воссозданию таких моделей пока неясны. Но несомненно, что получаемая для таких сред сейсмическая информация зависит, прежде всего, от технологического фактора. Чем полнее система наблюдений и обработки сейсмического материала, позволяющая правильно определить природу регистрируемых волн и соответственно их интерпретацию, тем ближе создаваемая модель к реальности. Например, ошибки по данным ГСЗ на Кольской СГ-3 и Тюменской СГ-6 обусловлены ошибочным анализом волновых картин. При составлении И.В. Литвиненко прогнозной модели по СГ-3 с использованием имеющейся ограниченной сейсмической информации, волна в первых вступлениях, соответствующая нижерасположенному комплексу, была принята за преломленную вместо подэкранной отраженной волны. Как следствие этого – ошибочное определение скорости для этого комплекса: вместо реальной 6,0–6,2 км/с имеем – 6,5–6,7 км/с и, соответственно, вывод о поднятии так называемого базальтового слоя до 7–8 км, который должна была вскрыть Кольская СГ-3. В

* Публикуется в порядке дискуссии с сохранением стиля и орфографии авторов

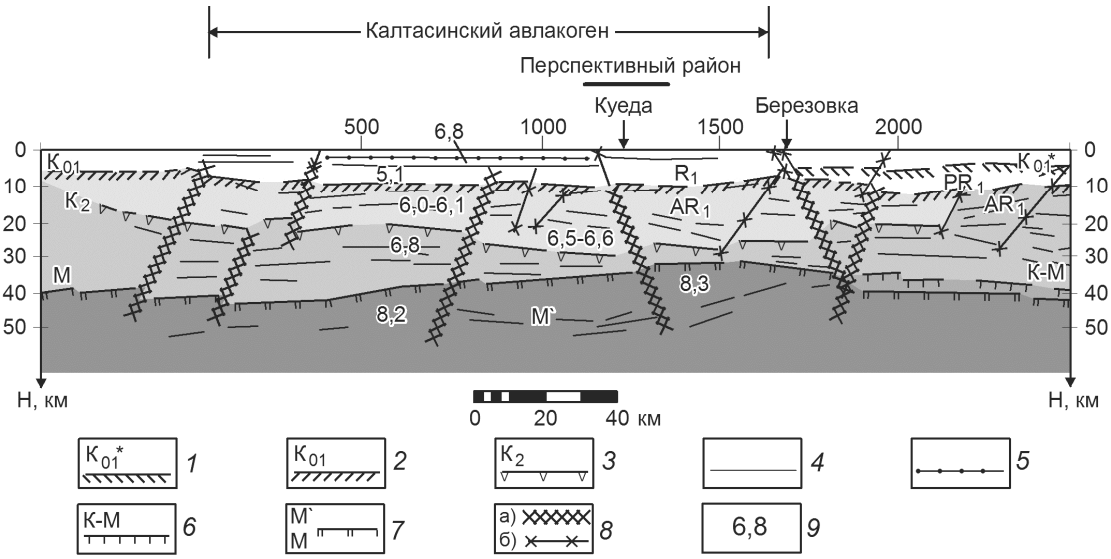

Рис. 1. Сейсмогеологический разрез по Свердловскому профилю ГСЗ по району Калтасинского авлакогена: основные поверхности раздела (1–6): 1 – кровля нижнего мегакомплекса I СГЭ, возможно PR_1-PR_2 возраста; 2 – древний кристаллический фундамент архейского возраста; 3 – кровля III СГЭ, возможно протокоры; 4 – отражающие границы кристаллической коры; 5 – положение древнего фундамента по данным КМПВ; 6 – положение переходного мегакомплекса в низах коры; 7 – основной сейсмогеологический раздел Мохоровичича; 8 – предполагаемые разрывные нарушения: а – разделяющие, преимущественно, блоки земной коры и верхней мантии, б – преимущественно в верхней и средней частях коры; 9 – значение скорости продольных волн *Vp*, км/с

действительности все оказалось не так. Это был первый удар по престижу глубинной сейсморазведки. Случай с Тюменской СГ-6 рассмотрен при анализе сейсмической информации по геотраверсу Рубин-2. Получение более полной сейсмической информации по Уральской СГ-4 и также Тюменской СГ-6 (работы Баженовской геофизической экспедиции) позволило составить прогнозные модели, которые подтвердились последующим сверхглубоким бурением. Это касается и их геологического истолкования. Более подробно данный вопрос рассмотрен в статье (Дружинин и др., 2003). Поэтому ссылка авторов на существование не менее десятка моделей по СГ-4 без упоминания, что существует прогнозная модель, незначительно отличающаяся от полученной в результате бурения, несостоятельна. Наглядным примером неправильного определения из-за неполноты сейсмической информации модели приповерхностной части разреза служит разрез по Калтасинскому авлакогену. По данным КМПВ с ограниченными длинами годографов до 30–40 км, глубина фундамента была определена в этой структуре 2,5 км, а по данным ГСЗ – 10 км (рис. 1). Оказалось, что на уровне 2,5–5,0 км присутствуют Калтасинские доломиты с $V_г$ = 6,8–7,0 км/с, а ниже их расположены преимущественно терригенные отложения значительной мощности со скоростью 5,0–5,2 км/с. Кристаллический фундамент характеризуется скоростью 6,0–6,1 км/с, сопоставимой по значениям для фундамента соседнего Южно-Татарского свода. При наличии подэкранных отраженных волн, определить реальную скорость по фундаменту удалось в результате миграции временного поля первых вступлений на подошву высокоскоростной толщи доломитов. Существование двух принципиально различных скоростных моделей, в данном случае, это не достоинство, а недостаток. Помимо сокращенной мощности осадочных отложений, следуют разные геологические выводы. В первом случае, фундамент авлакогена, судя по высоким значениям скорости, сложен основными породами, соответственно кристаллическая кора близка к океанической, во-втором – обычная континен-

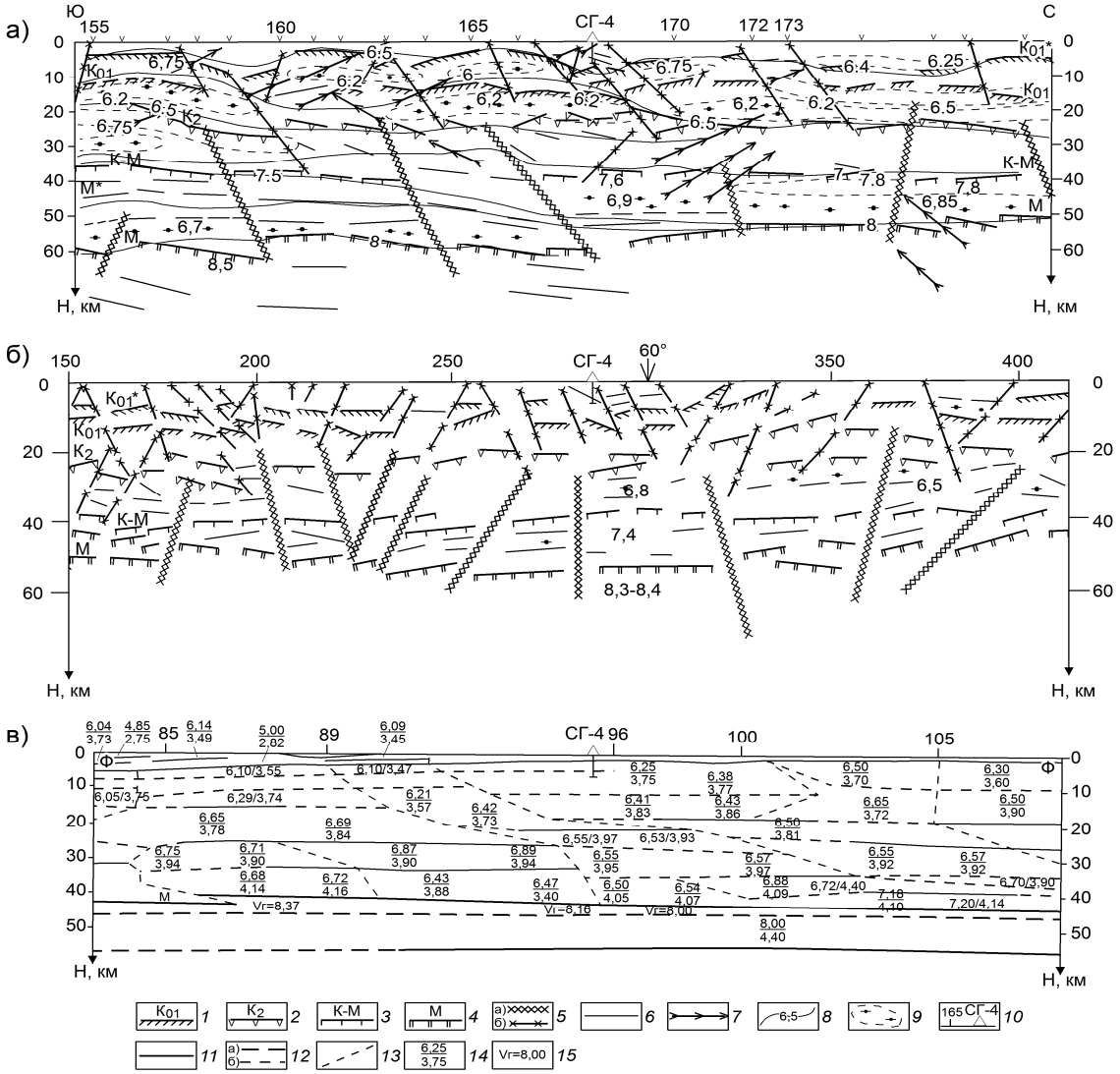

Рис. 2. Сейсмические и сейсмогеологические разрезы по району Уральской СГ-4: а – сейсмический разрез по профилю Вижай-Орск; б – Красноуральский профиль ГСЗ (с учетом детализации на участке СГ-4); в – сейсмический разрез по геотраверсу Рубин-2: 1–4 – поверхности раздела сейсмогеологических этажей (СГЭ), построенные по совокупности сейсмических данных, включая схематический скоростной разрез: 1 – второго СГЭ или древнего кристаллического фундамента; 2 – третьего СГЭ или протокора; 3 – переходного мегакомплекса в низах коры; 4 – основной сейсмогеологический раздел М; 5 – предполагаемые зоны глубинных разломов (а) и глубинные разломы преимущественно в верхней коре; 6 – отражающие элементы в пределах выделенных СГЭ; 7 – отражающие элементы, занимающие секущее положение по отношению к основному структурному плану; 8 – изолинии скоростного разреза, полученного в основном, по данным отраженных докритических волн, км/с; 9 – предполагаемые зоны инверсии скоростей; 10 – линия профиля с пикетами, их номерами и проекцией Уральской сверхглубокой скважины СГ-4; 11 – сейсмические границы в коре и верхней мантии, построенные по двум и более типам волн; 12 – по монотипному волновому полю; 13 – границы блоков с различными скоростными параметрами; 14 – значение скорости продольной (в числителе) и поперечной (в знаменателе) волн, км/с; 15 – граничная скорость по волне $P^{M}_{пр}$

тальная кора. Это уже не взгляд с разных сторон. Полученные данные согласуются с результатами бурения Орьебашевской глубокой скважины и последующими разрезами ОГТ. Не исключено, что подобная «океанизация» существует и в других крупных впадинах при наличии выше фундамента высокоскоростных горизонтов-экранов.

Аналогичная ситуация существует в определении положения основного сейсмогеологического раздела М в Центральной мегазоне Урала. На рис. 2 приведены сейсми-

ческие разрезы по району Уральской СГ-4. Это разрезы по геотраверсу Рубин-2 (работы Центра «Геон»), Красноуральскому профилю, меридиональному профилю Вижай-Орск (работы БГЭ и Института геофизики).

Системы наблюдений в отношении полноты получаемой информации на геотраверсе Рубин-2 существенно отличаются в худшую сторону от ортогонально расположенных профилей ГСЗ. Это обстоятельство, несомненно, оказало влияние на содержательную часть сейсмических разрезов. Разница в мощности земной коры составляет 13–15 км, в первую очередь, за счет обнаружения на профилях ГСЗ сложноустроенного переходного мегакомплекса К-М. В верхней части мегакомплекса, возможно, находится высокоскоростной горизонт ограниченной мощности, со значениями скорости близкими к мантийным. Именно по таким волнам, приуроченным к этому слою ограниченной мощности (3–5 км), и определено на геотраверсе Рубин-2 осредненное положение поверхности М в 40–44 км, которая таковой, вероятно, не является. Геологические выводы при таких различиях моделей будут разными: поддвигание Восточно-Европейской платформы под океаническую кору Центральной мегазоны Урала (Костюченко, Егоркин, Солодилов, 1998) или рифтовая структура континентальной коры полициклического развития, расположенная на стыке двух платформ Евроазиатского континента (Дружинин, Каретин, 1995). Разве это тоже благо? А не подрывают ли эти факты целесообразность сейсмических методов изучения глубинного строения земной коры?

Наглядным примером также служит характер сейсмического разреза по верхней части земной коры геотраверса Рубин-2, составленного уже после достижения скважины глубины более 5 км. На рис. 2 сейсмический фундамент находится на глубине 3–4 км, тогда как скважина на глубине около 5 км только вышла из первого, Имменовского комплекса Тагильского прогиба. Это уже не взгляд с разных сторон, а просто игнорирование уже существующей геологической информации и скудность авторского разреза земной коры.

Или еще другой пример. На сейсмическом разрезе по геотраверсу Рубин-2 на участке Тюменской СГ-6, который составлен после вскрытия скважиной на глубине 6,5 км базальтов триаса, их скорость имеет значение 5,7–5,8 км/с (рис. 3). Эти данные противоречат прогнозной модели, составленной в БГЭ по результатам площадных исследований, где значения скорости для предполагаемых на этих глубинах базальтов триаса, определены в 5,0–5,1 км/с, что и подтвердилось результатами бурения (Дружинин и др., 2003). Согласно прогнозной модели триасовый комплекс на глубине 7,8–8,0 км (бурение СГ-6 закончено на глубине 7,5 км) подстилается вулканогенно-осадочной толщей С-Д возраста со значениями скоростей 5,6–5,8 км/с. Причина такой нестыковки опять связана с неправильным анализом волн в области первых вступлений на геотраверсе Рубин-2: преломленная волна, соответствующая базальтам триаса, следится в последующих вступлениях преломленной волны от горизонта с более высокими значениями скорости. Это наглядный пример «выпадения слоя» из первых вступлений, что удалось установить при анализе более обширной сейсмической информации по площадной съемке с использованием преломленных волн. Вряд ли приведенный пример существования двух моделей можно отнести к достоинству!? Здесь следует также отметить, что обширная информация по ОГТ (работы ОАО «Ямалгеофизика») оказалась неверной: мощность осадочной толщи, согласно расслоенности временного разреза, была определена в 9,0–9,2 км, что более чем на 2,0 км превышает реальное значение.

При изучении сложнопостроенной консолидированной коры необходимо учитывать возможности методов сейсморазведки для их изучения. Наглядным примером является прогнозный разрез по Германской КТБ, составленный по сейсмическим данным ОГТ. При этом не принималась во внимание невозможность выделения по традиционной технологии ОГТ кру-

топадающих разломов, особенно в глубокой части разреза. Немаловажное значение сыграл идеологический фактор: желание выделить листрический разлом. В результате оказались объединены в один тектонический разлом отражающие элементы различной принадлежности. И вновь получился прокол: глубинный разлом крутого падения, зафиксированный в верхней части разреза, сохранил такое поведение на больших глубинах. Поэтому скважина КТБ так и не смогла выйти из зоны этого разлома.

Приведенных примеров достаточно для того, чтобы заключить, что надо стремиться к уменьшению неоднозначности сейсмической информации, к уменьшению числа моделей и не считать многовариантность как достоинство вместо недостатка. Для этого необходимо стремиться к всестороннему анализу волновых картин с использованием различного класса волн, полученных по полноценным системам наблюдений, на различных удалениях от источника, ориентированных на изучение сложно устроенных моделей исследуемой среды. Это относится как к приповерхностной части разреза, так и к земной коре в целом. Нам представляется, что единственным направлением дальнейшего развития глубинных сейсмических исследований является снижение неоднозначности сейсмической информации, предназначенной для решения задач региональной геологии и минерагении. Особое внимание следует уделить созданию на базе сверхглубоких скважин эталонных моделей верхней части земной коры глубиной до 15–18 км на площади 50×50 км каждая. Для этого потребуется постановка специальных сейсмических работ с использованием системы многократных перекрытий в широком диапазоне расстояний и трехкомпонентной регистрацией волнового поля. Это позволит выработать оптимальную технологию применительно к основным элементам геологической среды, выявленным в результате сверхглубокого бурения. Для примера рассмотрим возможность выделения поверхности древнего кристаллического фундамента ($К_{01}$). Он вскрыт Ново-Елховской СГ, а также Мининбаевской глубокой скважиной в интервале глубин от 1,85 до 6,25 км. Специальные площадные сейсмические исследования дадут возможность установить: изменение структурно-тектонических и скоростных параметров с привязкой их к данным по СГ и многочисленным глубоким скважинам, вскрывших древний фундамент на глубину до 0,5 км; определить модель нижележащих отложений, включая подошву древнего фундамента (поверхность нижней коры $К_2$), которая может быть вскрыта при продолжении бурения СГ на глубину 8–10 км. Подобный эталон может быть использован для выделения древнего мегакомплекса в пределах активных структур коры (Уральская и Уренгойская рифтовые системы, соответственно районы СГ-4, СГ-6). Согласно прогнозным моделям, поверхность $К_{01}$ предполагается здесь на глубинах 11–13 км. К ней также может быть приурочена смена структурно-тектонического плана для нижних горизонтов. Проведение в этих районах специальных площадных исследований и последующего сверхглубокого бурения до глубины 13 км позволит подтвердить повсеместное присутствие древнего фундамента континентальной коры или возможное некоторое отклонение его характеристики в активных структурах. Одновременно будет выработана технология выделения и картирования древнего кристаллического фундамента. Особое научно-практическое значение это имеет для осадочных бассейнов с «двойным» основанием, таких как Тимано-Печорский, Западно-Сибирский и частично для восточной окраины ВЕП в пределах Уральского региона.

Районы, в которых расположена Уральская СГ-4, по геологическим данным характеризуются сложным строением консолидированной коры с предполагаемым наличием многочисленных глубинных разломов. Это краевые разломы Тагильского прогиба: Главный Уральский разлом ГУР, Серовско-Маукский, Осевой – а также субширотная дислокация, расположенная в 5–7 км к югу от СГ-4 и диагональные разломы. Сверхглубокая скважина в интервале глубин 5,9–6,2 км

попала в тектоническую зону, с которой связаны многочисленные аварии при бурении, не позволившие продолжать эксперимент. Бурение СГ-6 возможно также закончилось в зоне нарушений (см. рис. 3). Проведение специальных площадных сейсмических работ позволит привязать аномалии объемного волнового поля к основным нарушениям, закартированным по геологической съемке М 1:50 000–1:100 000 и определить их положение в земной коре с учетом выявленных критериев. Тем самым будет решена одна из основных задач глубинного геокартирования и геодинамики – выделение зон глубинных разломов и их положение относительно блоков земной коры.

Таким образом, в результате исследований по трем сверхглубоким скважинам Уральского региона будет выработана технология изучения основных элементов разломно-блоковой модели верхней части (до 18 км) и более глубоких горизонтов с использованием определенных критериев и метода аналогии при сравнении особенностей сейсмических волновых картин с известными моделями по верхней части.

Заключение

Многовариантность сейсмической информации при изучении строения земной коры обусловлена также неоднозначностью решения обратных задач сейсмометрии. Этот вопрос требует специального рассмотрения. В данной заметке обращено внимание на уменьшение степени неоднозначности за счет учета различий технологического плана при оценке достоверности существующих сейсмических разрезов. Нельзя огульно принимать многовариантность за достоинство сейсмики. В чем тогда она отличается от интерпретации потенциальных полей? Бурение сверхглубоких скважин было направлено, в частности, на оценку возможности геофизических методов для изучения глубоких горизонтов коры. Опыт работ в Уральском регионе по созданию прогнозных моделей показал, что сейсмометрия в состоянии решать такие задачи при использовании оп-

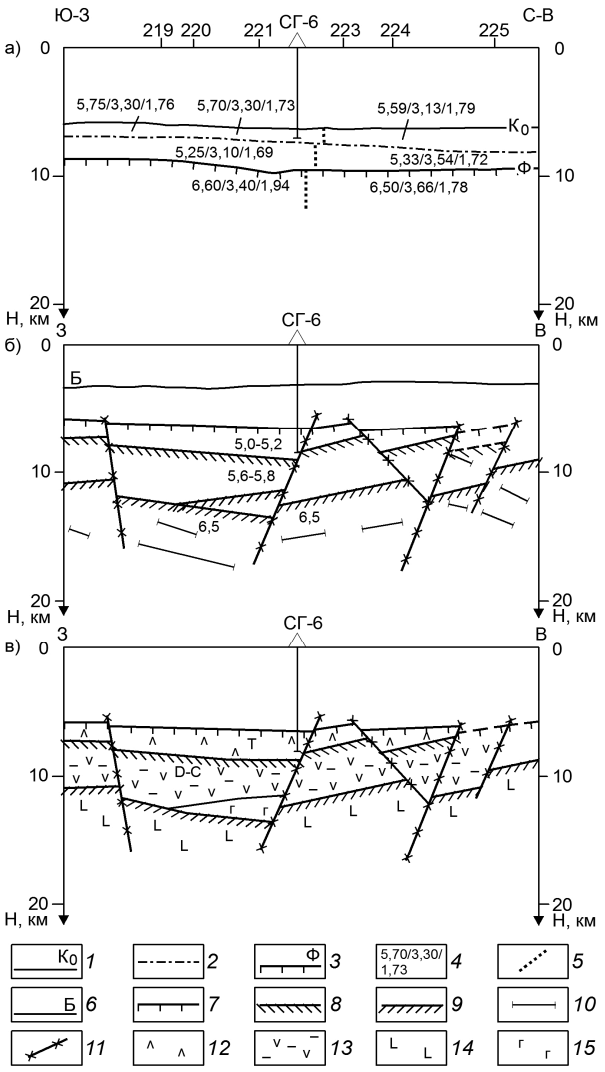

Рис. 3. Сейсмические разрезы верхней части земной коры на участке Тюменской СГ-6:
а – Геотраверс Рубин-2 (Дружинин и др., 2003); б – Уренгойский профиль (Дружинин и др., 2003); в – сейсмогеологический разрез доюрских комплексов по Уренгойскому профилю: *1* – поверхность доюрского фундамента; *2* – расчетная поверхность кровли толщи с пониженной скоростью; 3 – поверхность кристаллического фундамента; 4 – значения скорости продольной (*V*p) и поперечной (*V*s) волн (км/с) и их отношение (*V*p/*V*s); 5 – граница между комплексами, различающимися скоростными параметрами; 6 – отражающий горизонт Б; 7 – поверхность промежуточного комплекса; 8 – поверхность домезозойского фундамента; 9 – поверхность древнего кристаллического фундамента; 10 – отражающие элементы; 11 – предполагаемые разломы; 12 – базальты триаса; 13 – вулканогенные отложения девонско-карбонового возраста; 14 – гнейсы, преимущественно основного состава, амфиболиты возможно архейско-протерозойского фундамента; 15 – интрузивные комплексы ультраосновного состава серпентинизированные

ределенных технологий в комплексе с другими геофизическими методами.

Литература

Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (Проект Уралсейс). Тверь: ГЕРС, 2001. С. 286.

Дружинин В.С., Каретин Ю.С. О глубинном строении и геодинамической обстановке формирования подвижного пояса Урала // Разведка и охрана недр. 1995. № 5. С. 12–15.

Дружинин В.С., Каретин Ю.С., Песковский И.П., Кашубина Т.В., Осипов В.Ю. К вопросу об оценке эффективности наземной геофизической информации по данным бурения сверхглубоких скважин, расположенных в районе геотраверса «Гранит» // Уральский геофизический вестник. 2003. № 5. С. 24–34.

Костюченко С.Л., Егоркин А.В., Солодилов Л.Н. Особенности строения литосферы Урала по результатам многоволнового глубинного сейсмического зондирования // Геотектоника. 1998. № 4. С. 3–18.