

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ КОРЫ В РАЙОНЕ РОМАШКИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ МОГТ-ГСЗ Часть 1

А.М. Кузин
ИПНГ РАН, e-mail: amkouzin@yandex.ru

Введение

Во многих крупных нефтегазоносных провинциях, таких как Волго-Уральская, Западно-Сибирская, отработана сеть региональных профилей МОГТ. В результате были уточнены границы крупных тектонических структур осадочного чехла, по различию в интенсивности сейсмической записи выделены особенности геологического строения нефтегазоносных районов.

Одной из центральных задач, стоящих перед любыми сейсмическими работами МОГТ и, в первую очередь, региональными (совместно с другими геолого-геофизическими методами), является создание модели глубинного строения с целью прогноза месторождений полезных ископаемых. Структурные построения (структурные карты, схемы, глубинные разрезы) составляют каркас глубинной модели. Стандартным результатом обработки служит глубинный мигрированный разрез с сохранением амплитуд, на котором при интерпретации выделяют: 1 – наиболее интенсивные отражения; 2 – области динамически интенсивной и слабоинтенсивной (прозрачной) записи. Наиболее интенсивные отражающие границы в консолидированной коре обычно интерпретируются как разломы. Интервалам между отражающими границами и областями прозрачной или малоинтенсивной записи присваивается литология, не противоречащая данным интерпретации потенциальных полей и электрических методов. Области слабоинтенсивной записи интерпретируются как массивы монолитных пород (нередко гранитоидов, области интенсивной сейсмической записи – как очаги флюидизации и, как правило, бездоказательно. На этом, обычно, сейсмическая интерпретация полученных данных обработки заканчивается. К сожалению, обработка региональных сейсмических данных унаследована от обработки данных из нефтяной сейсморазведки и построена, в большинстве случаев, только на одном из многих других сейсмических образов волнового поля. Отсюда результатом обработки является временной (глубинный) мигрированный разрез с сохранением амплитуд, полученный на преобладающей частоте (образно его можно сравнить с фасадом здания). Такой граф обработки определяет рамки в

направленности «сейсмовиденья». Таким образом, модель глубинного строения формируется в рамках каркаса данных определенного сейсмического метода и определенного графа обработки данных (в прошлом ГСЗ, КМПВ, в настоящее время МОГТ) и, как правило, со всеми его ограничениями.

Необходимо отметить, что исследования по методу ОГТ повлияли на совершенствование методов обработки и интерпретации данных ГСЗ и МОВЗ, и в настоящий момент по геологической информативности многоволновое ГСЗ не уступает, а в ряде случаев и превосходит информативность данных МОГТ (стандартная методика, рассчитанная на обработку докритических отраженных продольных волн) по глубинному строению земной коры. Наиболее очевидно это проявляется при сопоставлении глубинных критериев МОГТ и ГСЗ в прогнозировании полезных ископаемых.

В интерпретации поля отраженных волн детальных и поисково-разведочных работ часто используется подбор волновой модели, синтезируемой по данным скважинных методов. При интерпретации региональных сейсмических исследований такой подход для консолидированной коры нереален. Поэтому часто применяются вероятностно-статистические методы обработки сейсмических параметров и их комплексирование с данными других геофизических методов. Основной задачей является поиск каких-либо связей между сейсмическим полем и литологией. При этом почти не учитываются существенное влияние флюида, процессов фильтрации и инфильтрации флюида его фазового состава, полей напряжений.

О свойствах флюида в геологической среде

В горных породах могут реализоваться два типа влияния влаги на понижение прочности [Траскин, Скворцова, 2006]. В первом случае оно связано с трещинно-пористым пространством, в котором внедрение жидкости создает концентраторы напряжений. Во втором – является универсальным, всегда присутствующим в горных породах, – это воздействие на межзеренные границы. Установлено, что действие активных сред на поликристаллы любой химической природы сопровождается переходом к разрушению их кристаллической решетки [Ребиндер, Щукин, 1972]. Если поверхностная энергия может снизиться до порогового уровня, то границы зерен начнут раскрываться самопроизвольно, без приложенного напряжения. При определенном уровне поверхностной энергии, обеспечивающем образование и термодинамическую устойчивость связанной сети жидких межзеренных прослоек, по ним может реализоваться

массоперенос вещества твердой матрицы. Эксперименты по исследованию форм нахождения свободного флюида в нижней части коры и в верхней мантии в диапазоне температур 950–1150 °С и давлении около 1 Гп показали, что во всех случаях углы смачивания оказывались более 40° – это свидетельствует о невозможности свободного движения CO₂ и воды вдоль межзеренных границ. Образование сетки межзеренных жидких прослоек возможно только для пород кислого состава при тектонических напряжениях и насыщенных солями растворов. Причем для SiO₂ при возрастании Р-Т условий отмечается повышенная смачиваемость зерен.

Однако никогда вся сеть межзеренных границ в поликристалле не смачивается полностью. Относительное число смоченных границ зависит от текстуры, от интенсивности, знака приложенных напряжений, содержания различных примесей. Распределение свободной межзеренной энергии позволяет оценить степень связности жидкой фазы в объеме. Степень связности жидкой фазы при межзеренном смачивании определяет транспортные, механические и реологические свойства. В работе [Волович и др., 2008], была предложена перколяционная модель для ансамбля межзеренных и межфазных границ. Связанность и топологические характеристики сети высокоэнергетических границ зерен определяются соотношением между их количеством и порогом перколяции межфазной энергии, что позволяет предсказать макроскопическую проницаемость.

Следовательно: 1 – вода и газ вне экстремальных условий образуют вместе с твердой фазой устойчивое многофазное образование, которое способно накапливать и передавать упругую энергию; 2 – с ростом температуры и давления влияние флюида на сейсмические свойства в целом не должны уменьшаться; 3 – преимущественно кислый состав верхней части консолидированной коры предопределяет возможность фильтрации воды и газа в зонах разрывных нарушений.

Наклонные и листрические разрывные нарушения (отражающие границы) идентифицируют современную тектоническую активность. Обобщение результатов экспериментальных и теоретических исследований, а также данных полевых геолого-геофизических наблюдений дало основание считать зоны милонитизации основной транспортной сетью флюидных потоков из верхней мантии и нижней части земной коры [Родкин, 1993]. Главная роль зонам милонитизации как каналам послойной миграции мантийных флюидов отводится в работах Ф.А. Летникова, посвященным петрологии

тектонитов. В зонах бластомилонитов вдоль плоскостей расщепления обеспечивается универсальный и интенсивный массоперенос флюидных, петрогенных, рудных компонентов и углеводородов [Летников и др., 1986; Летников, 2006]. Милониты в зонах разрывных нарушений представлены обычно прослоями ультрамелкозернистых пород с проявлениями рекристаллизации и флюидизации. Можно предполагать, что отражающие границы в нижней части коры и верхней мантии (например, секущие поверхность Мохоровичича) в зонах милонитизации содержат воду, которая увеличивает контрастность отражений.

Экраны волн деформаций и напряжений на месторождениях флюидного генезиса, их отображение в сейсмическом поле

Обычно под экраном в геологии полезных ископаемых понимается геологическая структура (тело), служащая преградой для миграции флюидов, с кровли или флангов соприкасающаяся с залежью или находящаяся вблизи нее. Экраны могут быть представлены пластичными или жесткими породами. Экранам – механически жестким геологическим образованиям – уделяется несопоставимо меньшее внимание по сравнению с другими элементами геологического строения при интерпретации сейсмических данных МОГТ. Как показывают многолетние исследования, роль механически жестких экранов, подстилающих месторождения и залежи флюидного генезиса, как прогностического критерия, не менее значительна по сравнению с разрывными нарушениями [Кузин, 1994, 2004].

Из результатов обобщения данных многоволнового ГСЗ, проведенного по крупнейшим месторождениям углеводородов [Булен, Егоркин, 2000], можно сформулировать более общие выводы [Кузин, 1994, 2004, 2011]:

- под месторождениями углеводородов, включая отложения осадочного чехла, залегают механически жесткие тела, представленные аномалиями относительно повышенных значений скорости продольных волн (V_p) и пониженных значений отношения скорости продольных к поперечным волнам (V_p/V_s), причем в ряде случаев распределение значений V_p/V_s составляет единую аномалию для фундамента и осадочного чехла. Это является общим прогностическим критерием для месторождений и залежей флюидного генезиса;

- в земной коре распределения значений V_p/V_s , в целом, характеризуются чередованием пониженных и повышенных значений этого параметра по глубине, в ряде районов это наблюдается и для V_p ;

– распределение скорости в земной коре в нефтегазоносных и рудных районах существенно отличается от стандартной трехслойной модели земной коры.

Процесс накопления-диссипации упругой энергии жестким телом, а также разность вертикальных напряжений между его кровлей и подошвой (рис. 1, а) способствуют активизации физико-химических процессов, образованию термодинамического градиента и, соответственно, миграционного потенциала для флюидных потоков вдоль границы жесткого тела и вмещающей среды [Кузин, 2015]. С уменьшением глубины залегания жесткого тела пропорции между его функциями в геологической среде меняются – все более значительным становится роль демпфирования волн напряжений и деформаций: с одной стороны, поддерживать стационарность геодинамической обстановки, а с другой, – за счет разности вертикальных напряжений удерживать флюиды. Этим как раз и объясняется то, что месторождения углеводородов локализуются над блоками с относительно высокими V_p или низкими V_p/V_s и преимущественно в верхней части земной коры.

Интенсивность и протяженность отражений по профилю свидетельствуют о присутствии живущего (не залеченного) разрывного нарушения. Как для твердых, так и для жидких и газообразных полезных ископаемых флюидного генезиса выход такой границы – разрывного нарушения по восстанию к зоне рыхлых отложений может служить индикатором разубоженной или несформировавшейся залежи. В то же время, такие разрывные нарушения являются зонами разрядки напряжений и тем самым служат демпферами для волн напряжений и деформаций.

В теории поисков месторождений полезных ископаемых ключевое значение отводится: 1 – каналам миграции флюидных потоков; 2 – экранирующим их геологическим образованиям и физико-химическим процессам.

Для геологической среды разрывные нарушения и флюид образуют присущий только геологической среде парагенезис. По своей природе разрывные нарушения гетерогенны (по структуре и составу слагающих их пород, по флюидо- и энергонасыщенности). Анализ картины разрывной тектоники по сейсмическим данным в нефтегазоносных и рудоносных районах дает основание к рассмотрению такой функции разрывных нарушений, как фокусирование и рассеяние вещества и энергии флюидного потока (в качестве аналогии можно привести роль абажура на лампе). В рамках каркаса,

образованного разрывной тектоникой в направлении наибольшего перепада давления в импульсной форме, происходит миграция флюидов.

По данным сейсмических наблюдений во многих случаях нефтяные и рудные месторождения находятся в обрамлении наклонных и листрических разломов – отражающих границ. Иногда область (узел) их пересечения совпадает с зоной вертикального разлома. В целом картина разрывной тектоники по форме схожа с формой цветка, лепестками которого являются отражающие поверхности. Подобная форма разрывной тектоники наблюдается на глубинных сейсмических разрезах на Ромашкинском, Карачаганакском месторождениях углеводородов, на рудных месторождениях Южного Урала, Северного Казахстана. Интересно отметить, что при детальном сейсмическом исследовании на рудных месторождениях фиксируется аналогичная по морфологии структура разрывной тектоники. Такой тип экранирования, когда имеют место сколовые поверхности (поверхности проскальзывания), можно определить как кинематический тип экранирования. Таким может быть одно из объяснений феноменологии залегания залежей полезных ископаемых флюидного генезиса в обрамлении разрывными нарушениями. Экранирующая роль разрывных нарушений неоднократно отмечалась во многих работах по изучению месторождений углеводородов и руд. Представленная ниже сейсмическая модель глубинного строения Ромашкинского месторождения создавалась, учитывая перечисленные особенности отраженных волн в консолидированной коре и необходимость наличия объективной картины распределения отражающих границ в пространстве.

О сейсмической модели зон разрывных нарушений в методе отраженных волн

Регистрируемые в консолидированной коре отражения по методу отраженных волн формируются границами значительного разуплотнения и/или в результате интерференционного сложения колебаний от пачки тонких слоев. В конце 60-х годов прошлого века В.П. Номоконовым была предложена сейсмическая модель разрывного нарушения, как тонкослоистого пласта пониженной скорости волны. В целом, в силу своей природы, разрывные нарушения представляют собой тонкослоистые неоднородные по упругим свойствам и структуре пласты с шероховатыми контактами с вмещающей средой и зональным распределением упругих свойств. Интенсивные отражения, выделяемые по Р-волнам в породах кристаллического фундамента, соответствуют разрывным нарушениям, которые, независимо от петрографического состава

контактирующих пород, представлены зонами дробления, интенсивного выщелачивания и сильной трещиноватости. Коэффициенты отражения для разрывных нарушений, полученные по глубоким и сверхглубоким скважинам, лежат в интервале значений 0,4–0,6, что соответствует сильным отражающим границам.

Широкое представительство на временных разрезах МОГТ наклонных отражений от наклонных и листрических (впервые они по данным МОВ были выделены Н.Е. Галдиным в начале 60-х годов) разрывных нарушений объясняется следующими факторами: 1 – постоянно существующими со времени образования планеты горизонтальными напряжениями и соответственно деформациями, вызванными ее вращением; 2 – воздействием на среду вихревых потоков вещества в твердой, жидкой и газообразной фазе при активизации тектонических процессов; 3 – реологией разрушения горных пород.

Помимо наклонных отражений на временных разрезах широко представлены горизонтальные и субгоризонтальные отражения. Образование горизонтальных границ может быть связано со следующими причинами: 1 – воздействием тектонических волн, их интерференцией; 2 – реологией разрушения горных пород; 3 – колебаниями флюидного режима земной коры, в первую очередь вызванного вертикальными движениями земной коры.

Формирование горизонтального или субгоризонтального отражения, кроме геологических причин, может быть связано с ориентацией профиля вдоль простирания отражающей наклонной поверхности (вплоть до вертикальной), что достаточно часто встречается на практике.

Преломление на границе чехол–фундамент и других резких границ осадочного чехла ведет к уменьшению интенсивности отраженной волны от наклонного контакта [Берзон, 1977], что помимо удаления от источника колебаний способствует фильтрации отраженных волн по амплитуде. Кроме того, верхняя часть разреза является поляризационным фильтром, даже при мощности осадков в десятки метров может почти до нуля уменьшить амплитуду волны.

Подробное описание сейсмических свойств и структуры разрывных нарушений в различных геологических средах было изложено сорок лет назад в монографии [Сейсмические волновые..., 1978]. Многие освещенные в ней вопросы остаются актуальными и в наше время: полевые наблюдения, профильная и площадная корреляция, соотношение длины отражающей границы и регистрируемого на профиле отражения,

внутреннее строение, поглощение и рассеяние упругой энергии, поэтому в данной работе многие разделы исключены.

Детальная сейсмическая модель внутреннего строения разрывного нарушения была разработана в инженерной сейсморазведке [Куринов, Никитин, 1982]. По мере удаления от разлома или мощной трещины наблюдается закономерное увеличение межтрещинного расстояния, которое не зависит от источника возмущения, типа породы и структурно-тектонических условий. При удалении от магистральной крупной трещины V_p (скорость продольной волны) определяется зависимостью: $V_p = a_1 \exp b_1 S$, где a_1 – скорость в элементарном блоке вблизи зоны дробления; b_1 – быстрота возрастания скорости от удаления от разлома; S – удаление от разлома. На основании этой закономерности было предложено определять зону влияния тектонического напряжения как интервал, на котором выполняется экспоненциальная зависимость расстояния между трещинами [Куринов, Никитин, 1982]. Эта зависимость не противоречит результатам моделирования, полученным на основе модели, составленной по данным акустического, плотностного каротажа, ВСП [Гринь, Литвиненко, 1981]. Было установлено, что большинство отражений формируется пачкой тонких слоев с количеством пропластков более 15, только в редких случаях интенсивные отражения формируются от толстых слоев при изменении скорости не менее, чем на 1 км/с и плотности на 0,1–0,2 г/см³. При этом наибольшим коэффициентом отражения обладает модель с экспоненциальной изменением скорости и плотности, соответствующая результатам, полученным из полевых измерений в работе [Куринов, Никитин, 1982].

Некоторые эффекты, объясняющие прерывистый характер корреляции отраженных волн

Отражающие границы могут быть гетерогенными по структуре и упругим свойствам. Помимо этого они могут обладать разной по величине шероховатостью. Шероховатые отражающие границы будут характеризоваться прерывистой корреляцией на временном разрезе МОВ. Чаще всего для таких волн используется групповая корреляция. В алгоритме накопления по ОГТ или общей средней точке (ОСТ) изначально заложены требования на зеркальность границы, ее горизонтальность, и протяженность. Это в конечном итоге ведет к тому, что на временном разрезе будет проявляться «структурная направленность», которая в той или иной мере найдет свое отображение в модели геологической среды, сформированной в рамках данного сейсмического метода. Поэтому при использовании фланговых систем наблюдений

появляется дополнительный фактор направленности в регистрации этих границ. В общем случае, чем больше будет отличаться угол падения волны на границу от нормали, тем «зеркальнее» будет отражение на временном разрезе.

Другим существенным моментом при интерпретации данных МОГТ является неоднозначность определения истинного положения отражающей границы только по одному профилю в случае, если геологический разрез характеризуется негоризонтальным залеганием отражающих границ. Причем, неоднозначность определения элементов залегания нередко сохраняется и при построении отражающей границы по двум пересекающимся профилям, в случае неуверенной идентификации волны на встречном профиле.

В первую очередь, как уже отмечалось выше, это связано с неоднородностью и анизотропией упругих свойств разрывных нарушений и ее проявления во внутреннем строении и на границе с вмещающей средой. Сейсмической моделью для нее является модель гофрированной границы. От такой границы при различном угле падения волны будет формировать зеркальная отраженная (большой угол падения) и/или рассеянная отраженная волна (при углах падения близких к нормали).

Перечисленные факторы приводят к тому, что фазовая корреляция отраженной волны от таких границ невозможна, поэтому, как правило, используется групповая корреляция отражений. Групповая корреляция отражений вызвана не только гетерогенностью упругих свойств в зонах разрывных нарушений, но и нелинейностью самой геологической среды. При ультразвуковом моделировании в среде с одной системой трещин [Урупов, Трушников, 1992] было замечено, что с увеличением базы измерения значения скорости уменьшаются. Аналогичная закономерность уменьшения V_p исследовалась при изучении нелинейных эффектов в рамках перколяционной теории [Челидзе, Черголейшвили, 1985]. Скорость волны V_p измерялась в пачке пластин оргстекла размером 100 x 100 мм при фиксированном давлении. Когда число пластин ($n < 50$) уменьшалось, значения V_p увеличивались, при увеличении числа пластин – уменьшались, а при $n = 30$ V_p становилась постоянной. Объяснение этого эффекта заключается в том, что с ростом числа пластин на пути волны встречается все большее количество «рыхлых» контактов, а начиная с $n = 30$ исчезает сквозной путь из «плотных контактов» и остается только сквозной путь из «рыхлых» контактов. Проявление этого нелинейного эффекта в распространении упругих волн может служить объяснением

появления мерцающих сейсмических границ при незначительных изменениях напряженного состояния массива пород (мерцающими границами называют также границы, которые меняют угол простираения вдоль линии наблюдения [Гальперин, 1977]).

Влияние флюида на параметры и характеристики сейсмического поля

Результаты экспериментов по изменению упруго-деформационных свойств осадочных и кристаллических пород при различном содержании воды, приведенные в книге [Волярович и др., 1979] показали следующее. В насыщенных образцах осадочных пород значения V_p/V_s (V_p - скорость продольной волны, V_s - скорость поперечной волны) сначала уменьшаются, затем возрастают или остаются постоянными. Для отдельных образцов пород наблюдаются отклонения. Общей тенденцией при насыщении для V_s является ее неизменность или уменьшение, V_p может как увеличиваться, так и уменьшаться. Уменьшение V_s при насыщении всегда больше, чем V_p .

Влияние давления на скорость при водонасыщении всегда выше, чем в сухих образцах или остается в пределах ошибки измерения. В кристаллических породах влияние водонасыщения на зависимости скоростей от давления качественно одинаково: величины dV_s/dp и dV_p/dp при каждом данном давлении (p) всегда меньше в водонасыщенных. С позиции интерпретации данных отраженных волн это означает, что водонасыщенная среда становится менее рассеивающей.

На рис. 2, а показаны графики поведения V_p/V_s в зависимости от фазового состава флюида. На рис. 2, б представлены графики изменения процентного соотношения V_p/V_s между сухими и водонасыщенными образцами. Эти данные показывают не только влияние флюида на скорость сейсмических волн, но и его фазовый состав. Значения V_p/V_s между сухими и водонасыщенными образцами (рис. 2, б) лежат в интервале от 0 до 10%, тенденция роста V_p/V_s наблюдается даже и при неупругой деформации. Тогда, как теоретическая зависимость V_p/V_s от SiO_2 из работы [Алейников и др., 1981] между кислыми и основными породами составляет не более 6% [Кузин, 2011]. Следовательно, для верхней части консолидированной коры осадочного бассейна водонасыщенность может оказывать большее влияние на V_p/V_s , чем SiO_2 .

Другим очень важным выводом из графиков поведения V_p/V_s насыщенных пород под нагрузкой является то, что вода не отжимается из породы и при больших давлениях, заполняя трещины, уменьшает рассеяние (рис. 1, в). При больших деформациях значения V_p/V_s пород кристаллического фундамента плавно возрастают за счет роста V_p

[Воларович и др., 1979]. Это означает, что выделившиеся в ходе какой-либо реакции вода остается в породе.

Уменьшение рассеивающих свойств при водонасыщении горных пород подтверждается результатами лабораторных экспериментов по исследованию влияния жидкости на рассеивающие свойства шероховатой границы [Ушаков Г., Ушаков М., 1993]. При смачивании маслом гофрированного контакта двух пластин резко снижается рассеяние, потери упругой энергии на контакте резко уменьшаются (рис. 1, б). Этим можно объяснить появление зон «рефлексивности» в нижней части консолидированной коры.

Методика построения отражающих границ в консолидированной коре в пределах Южно-Татарского свода (Ромашкинское месторождение и его обрамление)

Для получения достоверной картины пространственного положения отражающей границы необходима непрерывная корреляция отраженной волны, желательно по трем взаимно пересекающимся между собой профилям, образующим замкнутый полигон.

В целом интерпретация данных сейсмических наблюдений по консолидированной коре отличается от интерпретации принятой в нефтяной сейсморазведке.

Первое, самое существенное отличие, – это то, что построение глубинных разрезов сейсмических границ возможно только по системе пересекающихся профилей.

Второе отличие заключается в использовании, в основном, групповой корреляции отражений, поскольку преобладающий тип отражающих границ – это тектонические границы, как правило, разрывные нарушения.

Третье отличие состоит в том, что корреляция отражений должна проводиться по комплексу процедур обработки, в первую очередь, набора полосовых фильтров.

Перечисленные отличия, по сути, являются основными методическими положениями при интерпретации данных МОВ-МОГТ в рудных районах.

Впервые для консолидированной коры, залегающей под толщей осадочных пород, по данным региональных наблюдений МОГТ была построена схема пространственного расположения отражающих границ (рис. 3).

Выбор района для построения схемы был продиктован наличием сети региональных профилей МОГТ, с длительностью регистрации более 10 с и хорошим качеством временных разрезов, а также имеющимися на этой территории профилями ГСЗ (рис. 4, 5). Данные ГСЗ необходимы, в первую очередь, для задания обобщенной

скоростной модели и согласования схемы отражающих границ с глубинной моделью ГСЗ, тем самым исключая грубые ошибки при структурных построениях.

Глубинные построения отражающих границ выполнялись с одним осредненным графиком скорости, взятым на интервале пикетов 2350–2450 геотраверса ГРАНИТ, соответствующем центральной части Ромашкинского месторождения [Геотраверс ГРАНИТ..., 2002]. На рис. 6 представлена глубинная скоростная модель, по которой формировался график зависимости скорости V от $T_0/2$ для построения отражающих границ. Выбор отражений и корреляция осуществлялись по временным разрезам, полученным на различных полосовых фильтрациях и различных удалениях. Выбирались наиболее протяженные и интенсивные отражения. Базовым временным разрезом служил разрез по геотраверсу Татсейс (рис. 7). Сводные временные разрезы использовались для межпрофильной корреляции и построения предварительных глубинных разрезов (рис. 8, а). Предварительные глубинные разрезы позволили получить общее представление о параметрах залегания основных структур и сопоставить их с результатами ранее выполненной интерпретации гравитационного поля вдоль геотраверса ГРАНИТ [Готтих и др., 2005]. Узел пересечения отражающих границ совпадает с кровлей плотного тела (рис. 8, б).

Далее в точках пересечения профилей выбирались отражения, для которых значения времени отражения (T_0) с большей вероятностью подходили к одной и той же волне, затем эти отражения прослеживались по замкнутому контуру, образованному пересекающимися профилями. Корреляция отражений велась с двух сторон по каждому профилю в замкнутом контуре. Кроме того, были построены границы, уверенно прослеживаемые на значительных интервалах двух пересекающихся профилей, сопоставимых с длиной используемого для корреляции всей протяженности фрагмента профиля. Построение глубинных границ выполнялось по методике, изложенной в учебнике по сейсморазведке [Гурвич, 1970].

В результате построений оказалось, что количество построенных отражающих границ только 8 (см. рис. 3), что в сопоставлении со всеми прокоррелированными отражениями приводит к выводу о необходимости проектирования в 2–3 раза более плотной сети профилей на предполагаемых участках детализации.

Для отражающих границ истинные углы падения и простираия в отдельных случаях изменились на 90 градусов по сравнению с кажущимися углами падения.

В частности, отражающие границы (А) и (Б) на сейсмическом разрезе (рис. 9) образуют пласт с почти параллельными границами, тогда как на схеме это две поверхности, углы падения которых различаются на 90 градусов (см. рис. 3). Этот пример еще раз доказывает, что нельзя делать выводы о глубинном строении без знания истинных элементов залегания отражающих границ.

Анализ пространственного расположения отражающих поверхностей показывает, что они обтекают фрагмент консолидированной коры, на котором находится Ромашкинское месторождение. Это означает, что наиболее крупные разрывные нарушения – отражающие границы – выходят за контур Ромашкинского месторождения.

Таким образом, восходящая и нисходящая миграция флюида (воды), возможно, осуществляется по вертикальным или субвертикальным каналам в консолидированной коре. Этот вывод значительно сужает рамки гипотез о фильтрации и инфильтрации флюидов для Ромашкинского месторождения. Изложенные в статье результаты необходимо учитывать при изучении консолидированной коры по данным МОГТ, особенно в том случае, когда предметом исследований являются источники и каналы миграции флюидов.

Рекомендации по методике полевых наблюдений, обработке и интерпретации данных региональных исследований МОГТ

Система полевых наблюдений не должна быть фланговой. Желательно, чтобы длина годографа и кратность прослеживания приблизительно в 1,5 раза превосходила расчетные значения по априорной модели. Отдельный региональный профиль не может однозначно решать задачи по изучению глубинного строения. Сеть взаимно пересекающихся профилей проектируется, исходя из оценки средней протяженности отражающего элемента и глубинности исследований, поэтому необходима этапность проведения полевых работ для обоснованного выбора точек пересечения в сети профилей.

В отличие от границ изменений условий осадконакопления в осадочных бассейнах, которые в основном не меняют своих сейсмических свойств, сейсмические свойства некоторых границ в консолидированной коре изменяются, особенно в верхней части коры. Это объясняется разрешенностью по зоне Френеля и более сильным влиянием различных факторов (от геодинамических до климатических).

В графе обработки сейсмических данных необходимо учитывать сложную природу отражающих границ, поэтому граф должен иметь две составляющие поля отраженных волн, зеркальную и рассеянную. В отчетных материалах по исследованиям в осадочных

бассейнах, как правило, представляется один временной и один временной мигрированный разрез, что для волнового поля консолидированной коры недостаточно. Как минимум нужны временные разрезы (в электронном виде), полученные на двух-трех полосовых фильтрациях.

Для проведения глубинных региональных исследований по МОГТ необходима подготовка специалистов, отличная от подготовки для работы в сейсморазведке осадочных бассейнов. В настоящее время таких специалистов практически нет. Решением этой проблемы могли бы послужить сейсмические полигоны на рудных месторождениях. На таких полигонах отрабатывались бы вопросы методики полевых наблюдений, их обработки и интерпретации, осуществлялась подготовка специалистов.

Значительным геологическим результатом построения структурной схемы отражающих границ явилось подтверждение отсутствия выхода отражающих границ под Ромашкинское месторождение. Согласно методике интерпретации данных это означает некорректность гипотетического продолжения отражающей границы по восстанию. Другими словами, в случае прохождения сейсмического профиля неортогонально к простиранию отражающей поверхности, точки пересечения с линией проекции поверхности кристаллического фундамента или какой-либо иной реперной поверхностью может не существовать на линии профиля. Это положение крайне важно, поскольку в абсолютном большинстве случаев кажущиеся элементы залегания наклонных границ фундамента доминируют на глубинных сейсмических разрезах МОГТ.

Особое внимание заслуживает задача отработки методики многоволновых наблюдений по методу многократных перекрытий, которая также должна решаться на полигонах. Без многоволновых сейсмических наблюдений дальнейший прогресс в изучении консолидированной коры невозможен.

Эффективность МОГТ может возрасти в несколько раз при комплексировании с ГСЗ и/или МОВЗ.

Выводы

1. Схема отражающих поверхностей позволила:
 - построить глубинные разрезы отражающих границ с истинными параметрами залегания (что до настоящего времени не было осуществлено) и тем самым исключить ошибки в структурных построениях;

– получить пространственную схему активных и потенциально активных (незалеченных) разрывных нарушений разрывных нарушений;

– пространственно локализовать возможные каналы миграции флюидов в консолидированной коре.

2. Согласно пространственной схеме отражающих границ, Ромашкинское месторождение лежит в обрамлении отражающих поверхностей – разрывных нарушений.

3. Региональные сейсморазведочные исследования в осадочных бассейнах соединяют методики сейсмических исследований осадочного чехла и кристаллического фундамента.

В заключение автор выражает свою глубокую признательность М.В. Минцу, без участия которого эта статья, возможно, не была бы написана, А.В. Николаеву – за плодотворное обсуждение и важные замечания, М.М. Андросовой – за большую помощь в электронном оформлении рисунков и схем.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Энергетика, динамика и дегазация Земли, теоретические и экспериментальные основы инновационных сейсмоакустических технологий исследования геологической среды и контроля за объектами нефтегазодобычи», № АААА-А16-116021510125-7).

ЛИТЕРАТУРА

Алейников А.Л., Немзоров Н.И., Халевин Н.И. Роль поперечных волн в повышении эффективности рудной сейсморазведки // Сейсморазведка при поисках месторождений цветных металлов на Урале: Сб. тр. М.: Геол. фонд РСФСР. 1981. С. 46–56.

Берзон И.С. Сейсмическая разведка вертикально-слоистых сред фундамента. М.: Недра, 1977. 320 с.

Булин Н.К., Егоркин А.В. Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям. М.: Центр ГЕОН, 2000. 194 с.

Волярович М.П., Томашевская И.С., Будников В.А. Механика горных пород при высоких давлениях. М.: Наука, 1979. 152 с.

Волович П.М., Барралье Л., Скворцова З.Н., Траскин В.Ю. Перколяционные модели смачивания границ зерен в поликристаллических материалах // Российский химический журнал. 2008. Т. LII, № 1. С. 13–20.

Гальперин Е.И. Поляризационный метод сейсмических исследований. М.: Недра, 1977. 277 с.

Геотраверс ГРАНИТ: Восточно-Европейская платформа – Урал – Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований) / Под ред. С.Н. Кашубина. Екатеринбург: Главное управление природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Свердловской области, ФГУГП «Баженовская геофизическая экспедиция», 2002. 312 с.

Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 143 с.

Готтих Р.П., Писоцкий Б.И., Нургалеев Д.К. Некоторые генетические аспекты формирования Ромашкинского нефтяного месторождения и его сателлитов // Отечественная геология. 2005. № 3. С. 3–11.

Гринь Н.Е., Литвиненко Е. Р. К методике построения сейсмических моделей разрезов Печенгского района // Записки Ленинградского горного института. 1981. Т. LXXXIX. С. 34–39.

Гурвич И.И. Сейсмическая разведка. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М.: Недра. 1970. 552 с.

Краснопевцева Г.В., Кузин А.М. Новые данные по изучению глубинного строения Южно-Татарского свода и его юго-восточного обрамления по профилю ГСЗ «Черемшан-Мелеуз» // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы: Материалы Всерос. конф. М.: ГЕОС, 2008. С. 233–236.

Кузин А.М. Разработка методики прогноза залежей флюидального генезиса по данным сейсмических методов // Прикладная геофизика, М. Недра, 1994. Вып. 131. С. 396–406.

Кузин А.М. Условия сохранения как поисковый критерий для крупных месторождений флюидального генезиса // Приоритетные направления поисков крупных и уникальных месторождений нефти и газа: Сб. ст. М.: Геоинформмарк, 2004. С. 192–211.

Кузин А.М. Пространственно-фазовая локализация месторождений углеводородов и отображение конвергентности процессов флюидизации в геологической среде по сейсмическим данным // Дегазация Земли и генезис нефтяных месторождений. К 100-летию со дня рождения П.Н. Кропоткина: Сб. тр. М.: ГЕОС, 2011. С. 276–301.

Кузин А.М. Дегазация и методологические аспекты интерпретации данных сейсмического метода. Ч. 1. Методологические положения // Пространство и время. 2015. № 1–2(19–20). С. 302–306.

Кузин А.М. Дегазация и методологические аспекты интерпретации данных сейсмического метода. Ч. 2. Методологические положения // Пространство и время. 2015. № 3(21). С. 270–277.

Куринов М.Б., Никитин В.Н. Распределение трещин и скоростей упругих волн в зонах влияния тектонических нарушений // Инженерная геология. 1982. № 3. С. 17–22.

Летников Ф.А., Савельева В.Б., Балышев С.О. Петрология, геохимия и флюидный режим тектонитов. Новосибирск: Наука, 1986. 223 с.

Летников Ф.А. Флюидный механизм деструкции континентальной земной коры и формирование осадочных нефтеносных бассейнов // Дегазация Земли: геофлюиды, нефть и газ, парагенезисы в системе горючих ископаемых: Тез. докл. Междунар. конф. М.: ГЕОС, 2006. С. 6–9.

Урупов А.К., Трушников Э.Б. Двухмерное ультразвуковое моделирование распространения продольных волн в среде с одной системой трещин // Физика Земли. 1992. № 11. С. 29–53.

Ушаков Г.Д., Ушаков М.Г. Экспериментальное изучение рассеивания упругих волн на шероховатой границе раздела // Геология и геофизика. 1993. № 2. С. 103–111.

Ребиндер П.А., Щукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физ. наук. 1972. Т. 108, № 1. С. 3–42.

Родкин М.В. Роль глубинного флюидного режима в геодинамике и сейсмотектонике. М.: Национальный геофизический центр РАН, 1993. 194 с.

Сейсмические волновые поля в зонах разломов / Под ред. А.В. Николаева. М.: Наука, 1978. 167 с.

Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1986. 254 с.

Траскин В.Ю., Скворцова З.Н. Эффект Ребиндера в геодинамических процессах // Флюиды и геодинамика: Сб. ст. М.: Наука. 2006. С. 147–164.

Трофимов В.А. Глубинные региональные сейсморазведочные исследования МОГТ нефтегазоносных территорий. М.: ГЕОС, 2014. 202 с.

Челидзе Т.Л., Черголейшвили Т.Т. Теория неупорядоченных сред и некоторые проблемы нелинейной сейсмики // Проблемы нелинейной сейсмики: Сб. ст. М.: Наука. 1985. С. 41–50.

ПРИЛОЖЕНИЕ

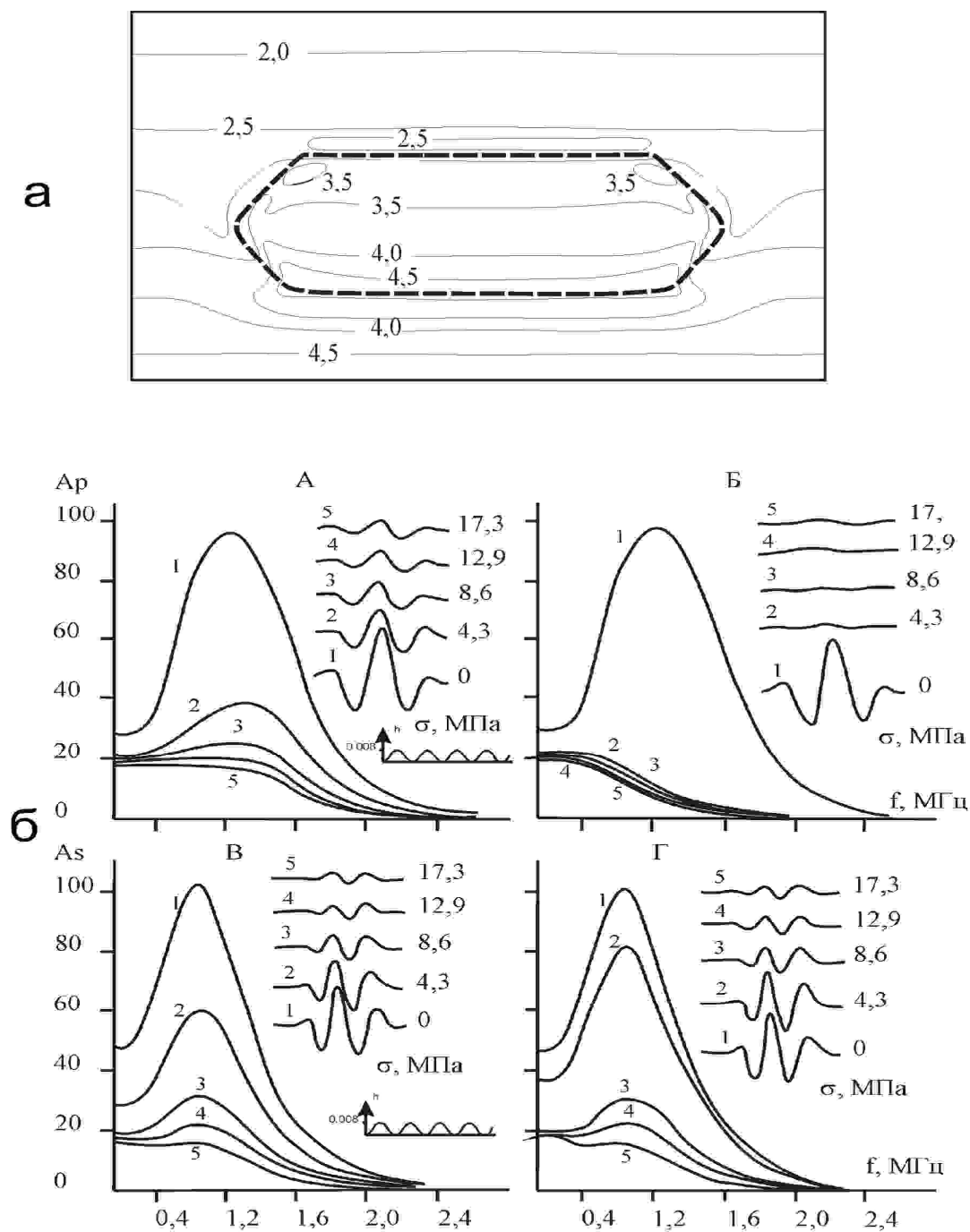


Рис. 1. Результаты геомеханического и сейсмического моделирования:

а – распределение вертикальных напряжений в массиве терригенных пород с включением интрузивного тела. Сплошная линия – изолинии равных напряжений; пунктирная линия – контур интрузивного тела [Теоретические основы..., 1986];

б – временной импульс отраженной Р-волны и ее амплитудно-частотный спектр на границе раздела медь-медь шероховатостью $h = 0,008$ мм при разных давлениях: А – на сухой границе; Б – на смоченной маслом границе; В и Г – для отраженной S-волны [Ушаков Г., Ушаков М., 1993]

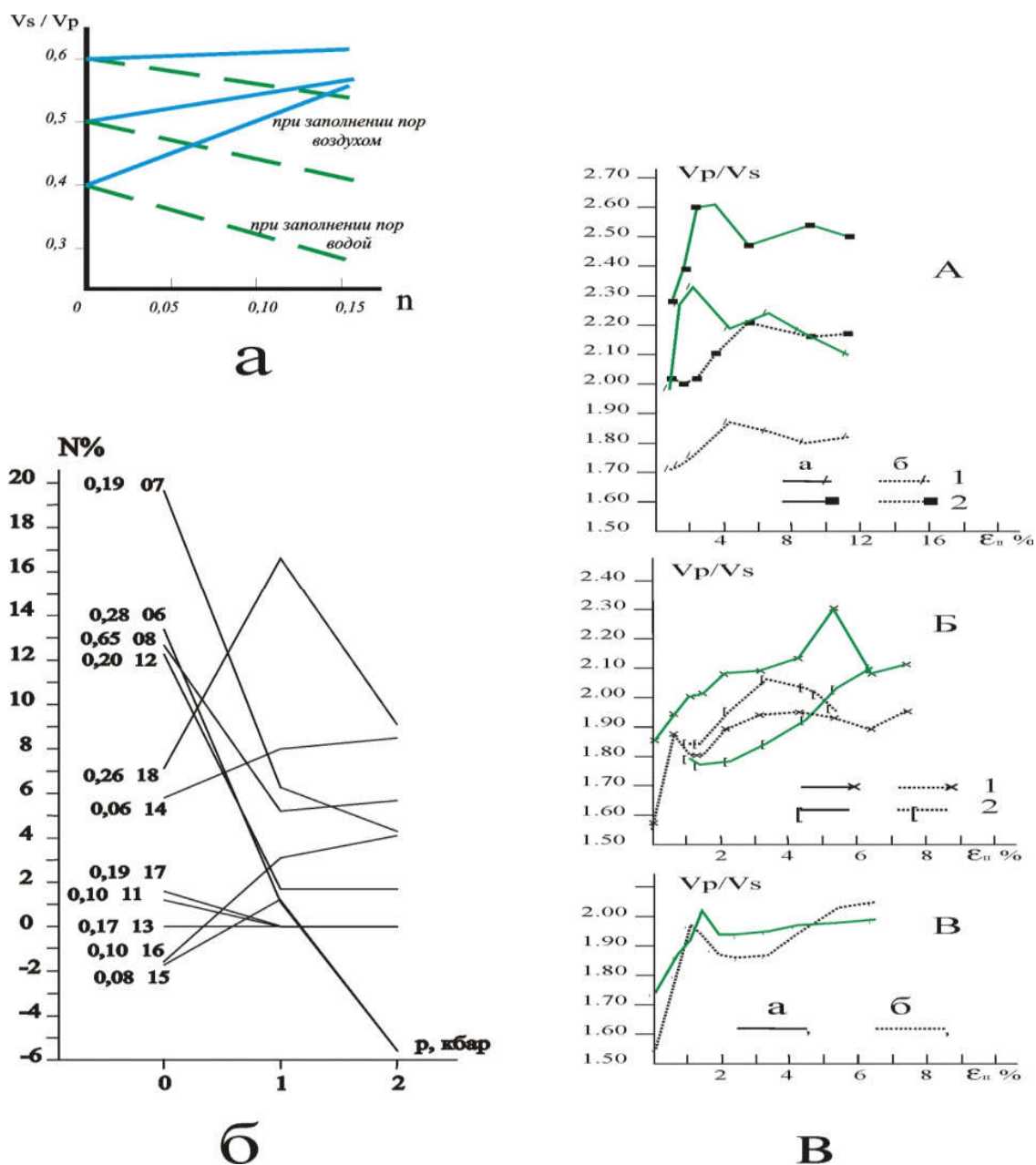


Рис. 2. Теоретические и экспериментальные данные изучения отношения скорости продольной волны к поперечной:

а – зависимость отношения скорости поперечных и продольных волн от пористости при заполнении пор воздухом (сплошная линия) и водой (пунктирная линия) для значений V_s/V_p в твердой фазе породы, равных 0,6; 0,5; 0,4 [Горяинов, Ляховицкий, 1979];

б – графики изменения процентного соотношения значений V_p/V_s между сухими и водонасыщенными образцами, рассчитанными по данным из [Воларович и др., 1979]: первый индекс на графике – открытая пористость, второй – номер образца;

в – влияние пластической деформации пород на отношение скоростей упругих волн V_p/V_s . Графики рассчитаны по данным из [Воларович и др., 1979] для водонасыщенных (а) и сухих (б) образцов. А: 1 – известняк 02; 2 – известняк 03 (02 и 03 – номера образцов); Б: 1 – гранодиорит; 2 – габбро-амфиболит; В: гнейс (06 – номер образца)

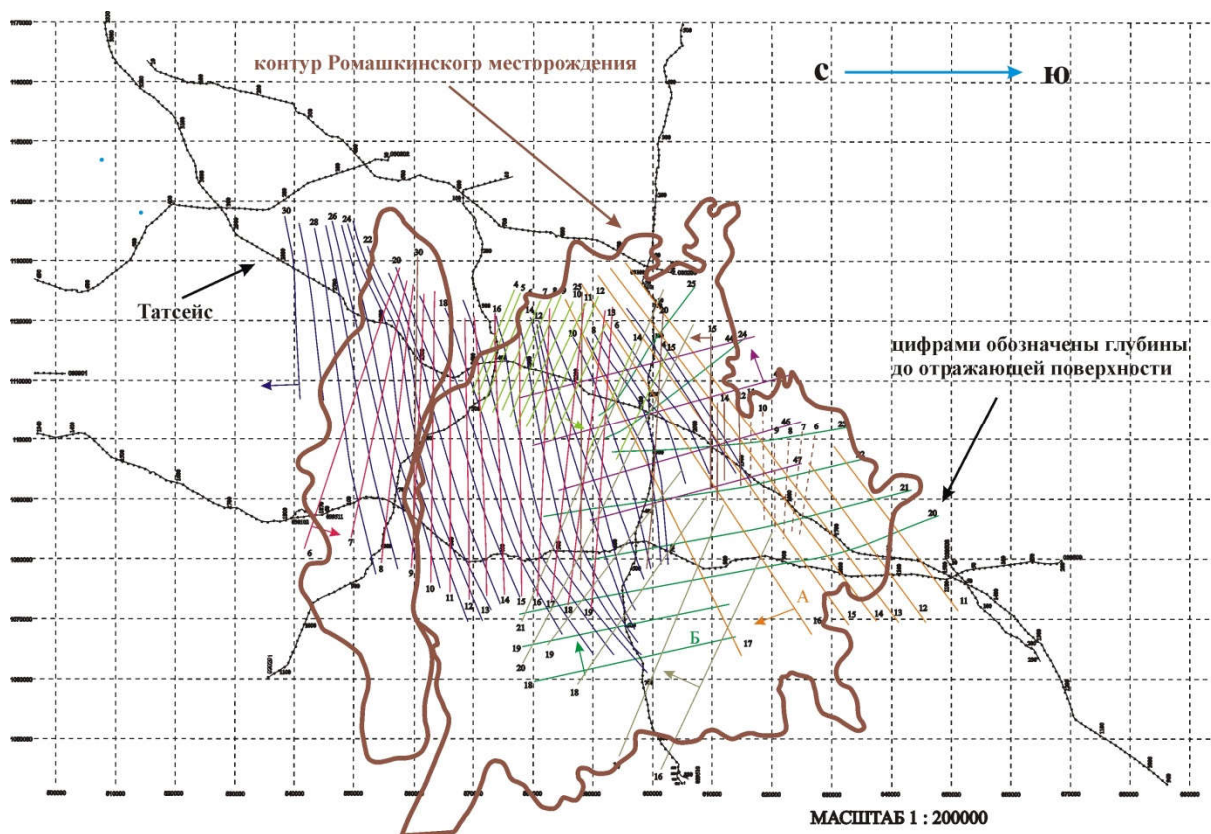


Рис. 3. Схема отражающих поверхностей в консолидированной коре Южно-Татарского свода в районе Ромашкинского месторождения нефти, построенная по данным региональных профилей МОГТ (Татнефтегеофизика), совмещенная с контуром Ромашкинского месторождения нефти

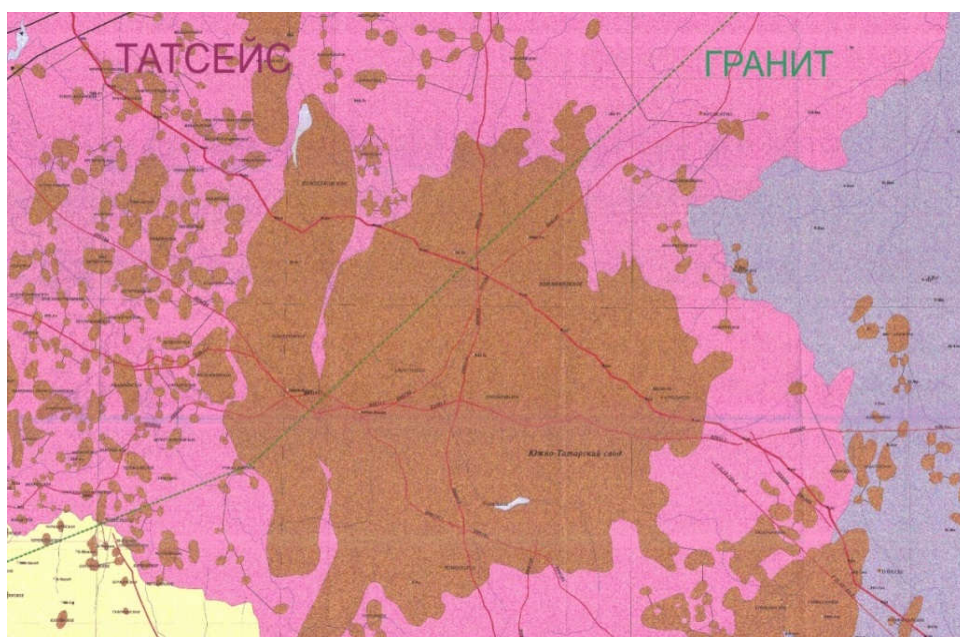


Рис. 4. Фрагмент геологической карты из [Трофимов, 2014]

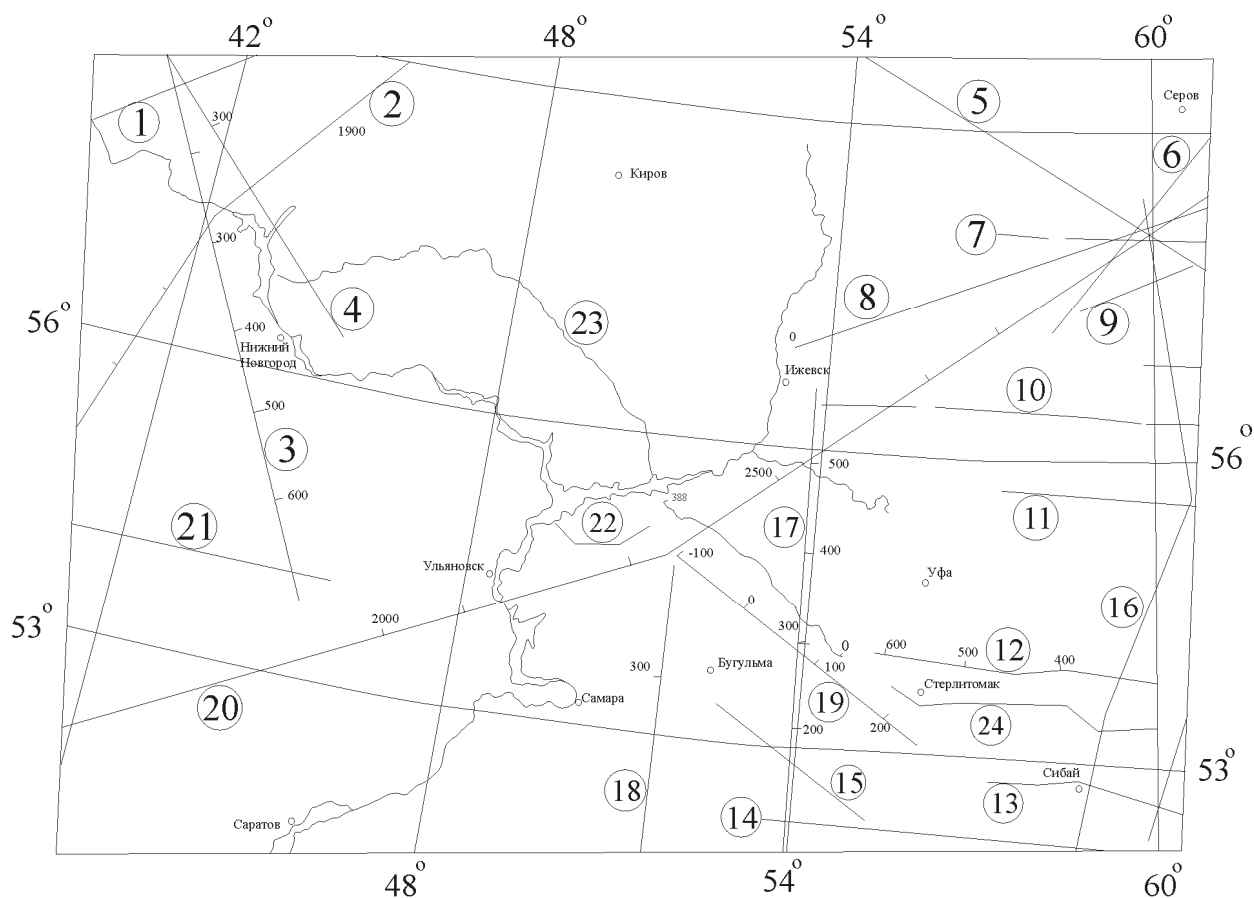


Рис. 5. Обзорная схема расположения профилей [Краснопевцева, Кузин, 2008]:

1 – Рифей IV (Редкино–Кичмонский городок); 2 – Тума–Кинешма–Воркута; 3 – Харовск–Саранск; 4 – Белозерск–Семенов; 5 – Рубин I; 6 – Рубин II; 7 – Красноуральский; 8 – Уральский; 9 – ГСЗ–ОГТ; 10 – Свердловский; 11 – Тараташский; 12 – Троицкий; 13 – Сибайский; 14 – Темиртау–Куйбышев; 15 – Похвистнево–р.Ик; 16 – Нижняя Тура–Орск; 17 – Профиль II (р. Белая–р.Урал); 18 – Профиль VII (Черемшан–Уральск); 19 – Черемшан–Мелеуз; 20 – Гранит; 21 – Тула–Инсар; 22 – МОВЗ; 23 – Татсейс (МОГТ); 24 – Уралсейс

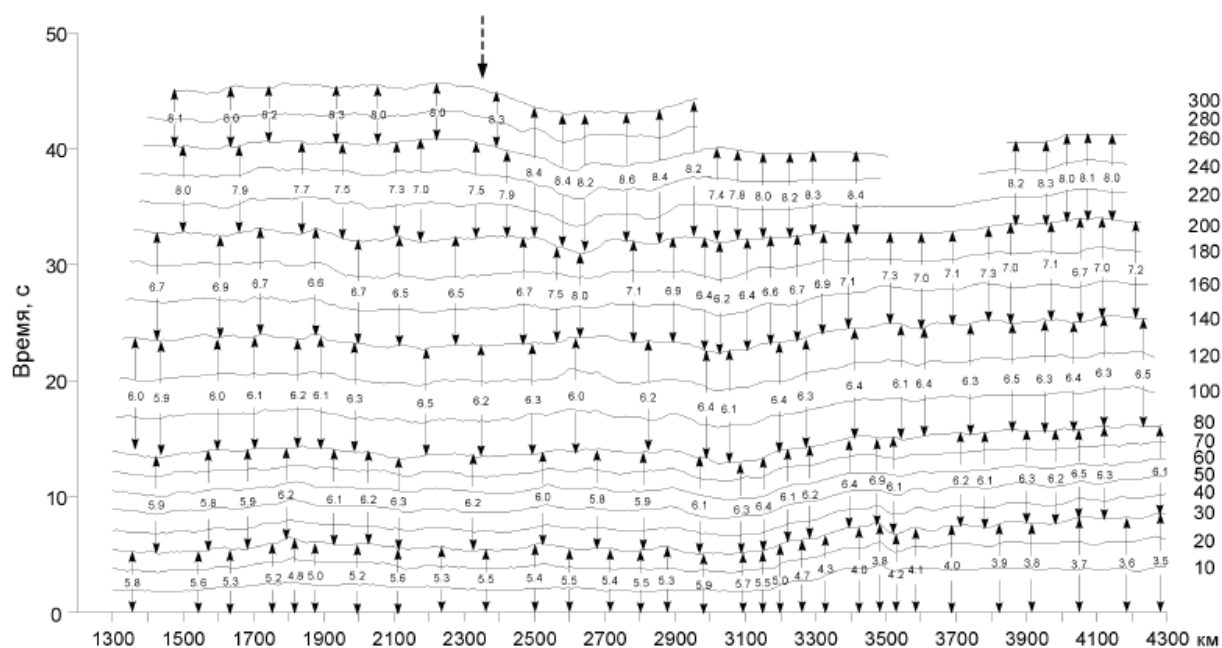


Рис. 6. Поле времен P_0 -волн по геотраверсу ГРАНИТ: цифрами справа (от 10 до 300) обозначены базы изолиний равных удалений в км, цифрами со стрелками – значения скорости в км/с [Геотраверс ГРАНИТ..., 2002]

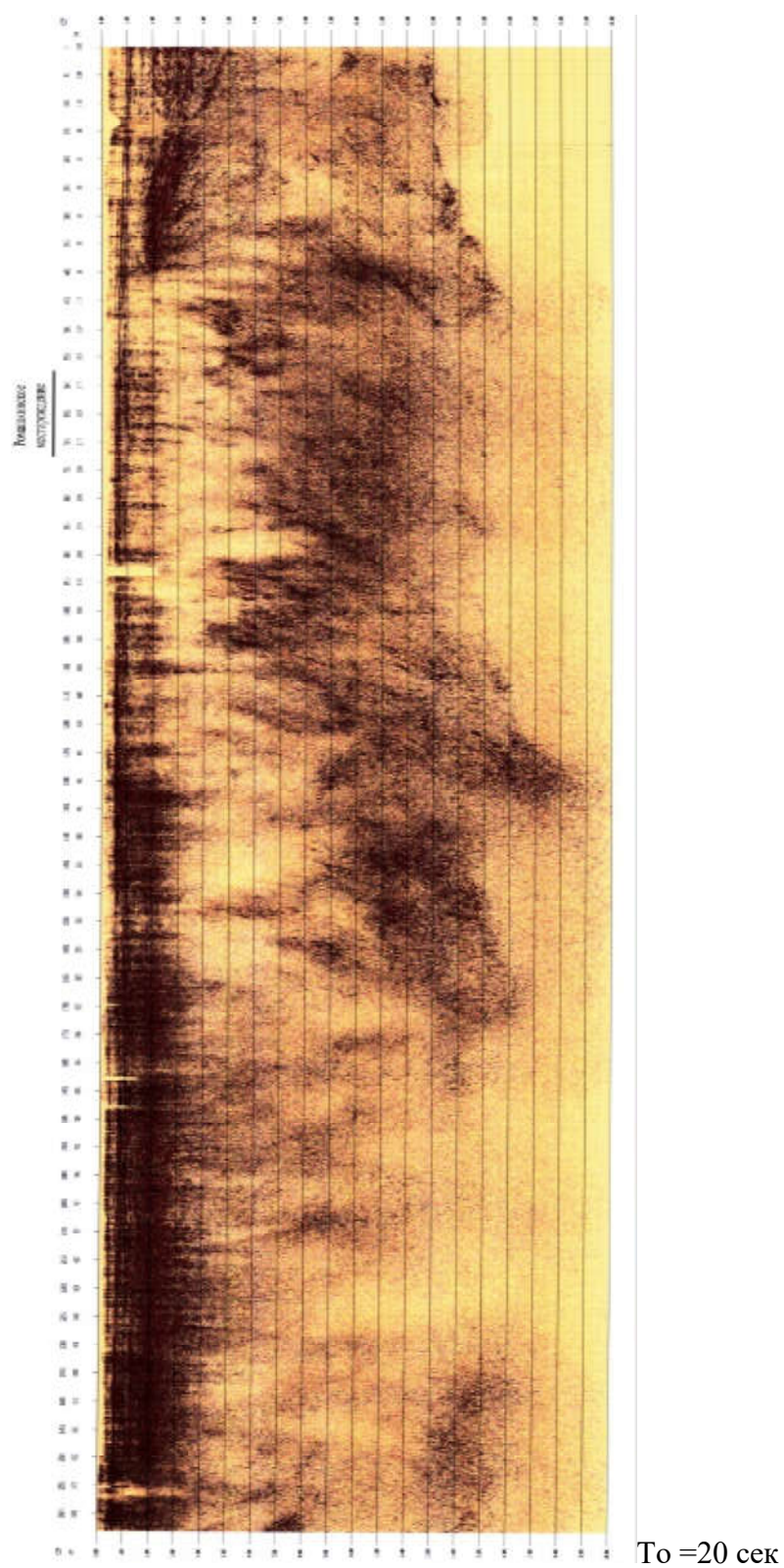


Рис. 7. Временной мигрированный разрез. Фрагмент временного мигрированного разреза по геотраверсу Татсейс [Трофимов, 2014], над разрезом отмечена протяженность Ромашкинского месторождения вдоль профиля

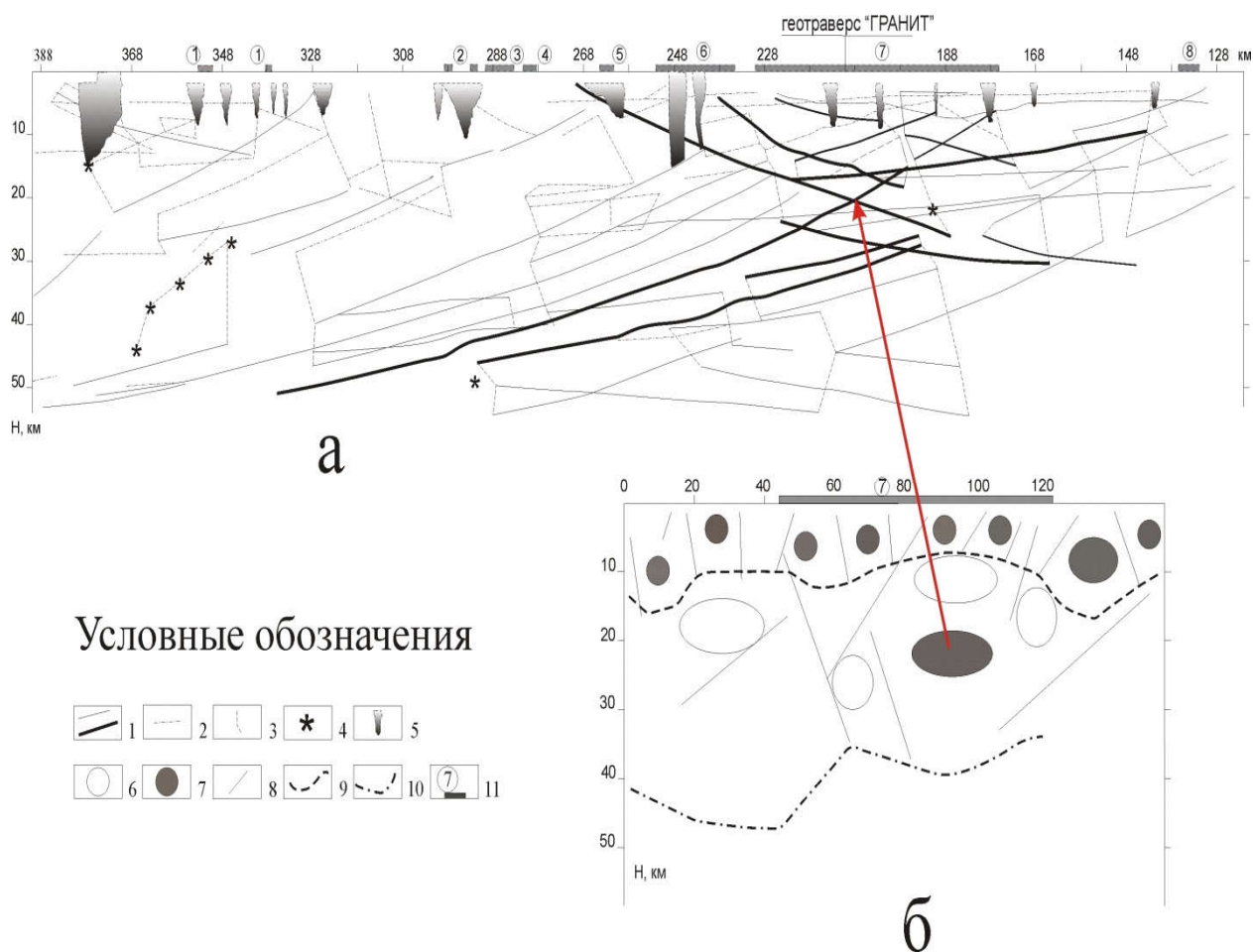


Рис. 8. Результаты интерпретации сейсмических и гравиметрических данных (Ромашкинское месторождение):

а – глубинный сейсмический разрез по фрагменту геотраверса Татсейс [Кузин, 2008];

б – разрез кажущихся плотностей из [Готих и др., 2005] с сокращениями.

Условные обозначения: 1 – отражающие сейсмические границы; 2 – сейсмические границы с неуверенной корреляцией; 3 – возможные разрывные нарушения, выделенные по разрыву в корреляции отражающих границ; 4 – точки дифракции; 5 – области относительно высокой интенсивности сейсмической записи; 6 – вероятные зоны трещиноватости; 7 – области ненарушенных пород; 8 – зоны резкого изменения плотности пород; 9 – положение внутрикоровой границы; 10 – местоположение границы Мохоровичича; 11 – месторождения углеводородов: 1 – Шийское, 2 – Шереметьевское, 3 – Уратьминское, 4 – Нижне-Уратьминское, 5 – Саралалинское, 6 – Новоелховское, 7 – Ромашкинское, 8 – Сабанчинское

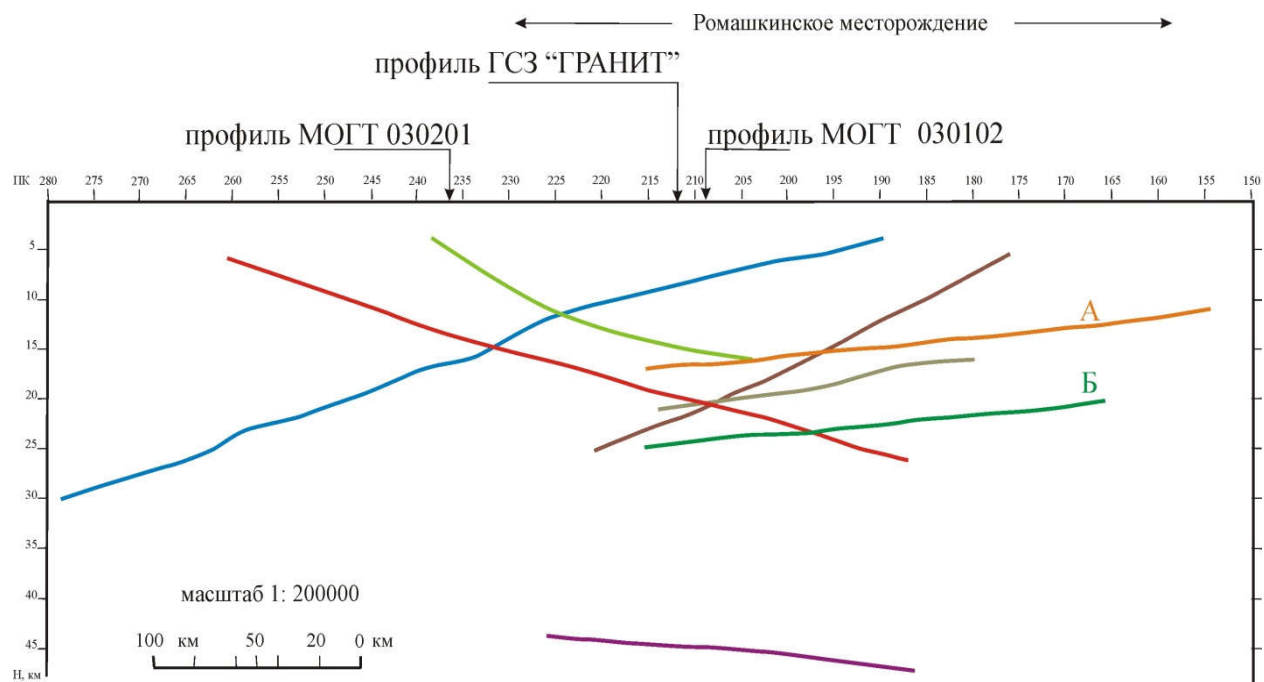


Рис. 9. Глубинный разрез по геотраверсу Татсейс, построенный автором на основе схемы отражающих поверхностей консолидированной коры