Записки Санкт-Петербургского горного института им. Г.В.Плеханова.
1992. Т. 135

УДК 550.834 (571.1.5)

С.В.КРЫЛОВ, З.Р.МИШЕНЬКИНА, В.С.СЕЛЕЗНЕВ

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕТАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЗОНЕ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

И.В.Литвиненко был одним из первых исследователей, осуществивших в процессе исследований Балтийского щита, включая район Кольской сверхглубокой скважины [3, 12], последовательный переход от традиционных малодетальных работ на профилях ГСЗ большой протяженности к высокодетальному изучению земной коры с соответствующей трансформацией методики глубинных сейсмических исследований. Метод ГСЗ в современном его состоянии имеет ряд развивающихся модификаций, предназначенных для исследований разного масштаба и детальности: от экспрессного изучения крупных черт строения литосферы на каркасной сети профилей в пределах обширных территорий до детальных работ на локальных сложно построенных участках. Особую актуальность приобретают детальные сейсмические исследования, результаты которых необходимы для решения новых задач глубинной геологии, планирования поисков глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых, прогноза землетрясений, изучения районов сверхглубинного бурения.

В Байкальском регионе принята двухэтапная стратегия проведения глубинных сейсмических исследований. На первом этапе, уже в основном завершенном, использовалась методика дифференциальных (точечных) зондирований [19], предназначенная для рекогносцировочного изучения труднодоступных территорий. В результате этих работ, с привлечением материалов сейсмологии местных и удаленных землетрясений, выявлены крупные аномальные особенности строения Байкальского рифта, прилегающих районов Сибирской платформы и Монголо-Охотского складчатого пояса [7, 16]. Последующие детальные исследования выполнены за минувшее десятилетие в основном на северо-восточном фланге Байкальской рифтовой зоны (рис.1).

Переход к этапу детальных работ не сводится к простому изменению масштаба исследований. Он требует существенного развития методики полевого эксперимента и его аппаратурного обеспечения, способов обработки и интерпретации волнового поля, расширения качественного состава результативной информации. Ниже в сжатой форме рассмотрены соответствующие методические разработки и примеры их реализации в условиях Байкальского региона. Развитие методики детальных сейсмических исследований кристаллической земной коры выполнено по следующим основным направлениям:

1) построение двух- и трехмерных распределений скорости в среде по данным опорных волн, уверенно прослеживаемых на всем исследуемом участке;

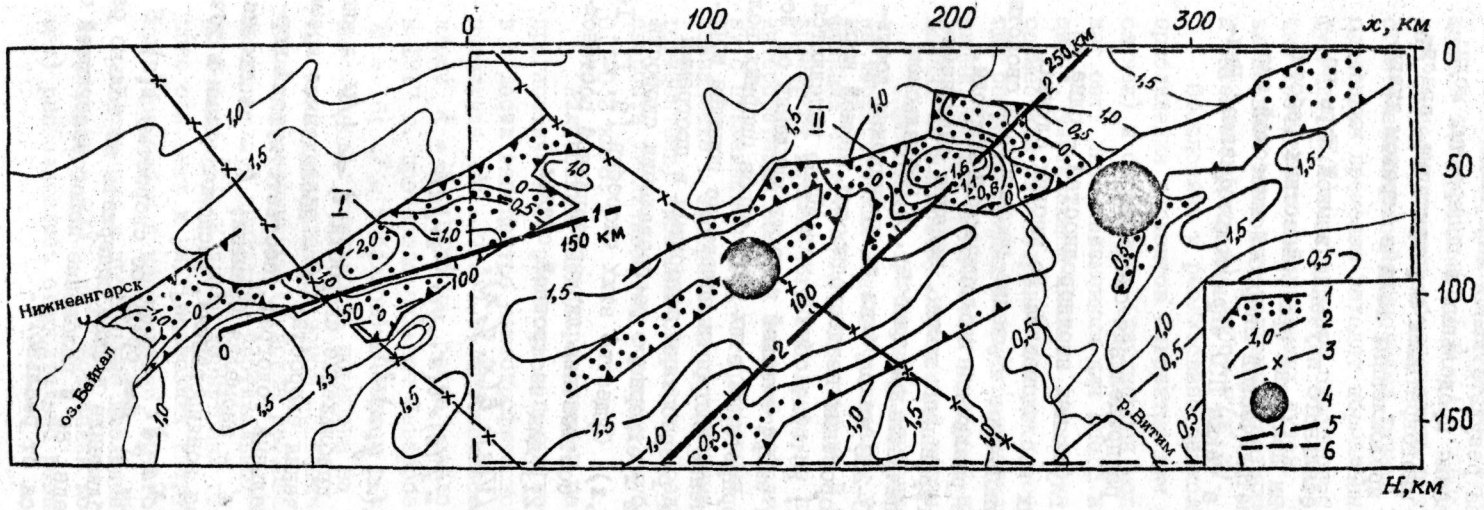


Рис. 1. Обзорная схема района исследований

1 – рифтовые впадины: Верхнеангарская (I), Муйская (II) – и их разломные ограничения; 2 – изолинии суммарных амплитуд неотектонических движений в километрах [5]; 3 – осевая линия сквозной зоны разломов [5]; 4 – эпицентры Муйского (большой круг) и Северобайкальского (малый круг) землетрясений [2]; 5 – сейсмические профили; 6 – контур участка детальных площадных сейсмических работ

2) расширение качественного состава результативной информации о свойствах среды путем совместного использования продольных и поперечных волн;

3) применение систем наблюдений с многократными перекрытиями, ориентированных на регистрацию отраженных и преломленных волн в широком диапазоне удалений от источников колебаний.

Рассматриваемые ниже результаты детального изучения земной коры на северо-востоке Байкальской рифтовой зоны получены при совместных работах Ин-та геофизики Новосибирской опытно-методической вибросейсмической экспедиции Сибирского отделения АН СССР, а также ПГО „Иркутскгеофизика" Мингео СССР [4, 8, 20].

Изучение трехмерного распределения скорости

Выявление объемных (трехмерных) глубинных неоднородностей – одна из важнейших задач детальных сейсмических исследований. Во многих случаях только при таком подходе возможно полноценное изучение геометрии и свойств сложно построенных глубинных объектов различной геологической природы.

В ряде обнаженных районов рефрагированные волны, надежно выделяемые в первых вступлениях, проникают на значительную глубину. В Байкальском регионе при дальности регистрации 170–200 км глубина их проникания достигает 20–25 км [16]. Информацию о скоростных неоднородностях земной коры несут отраженные от ее подошвы волны, которые обычно устойчиво выделяются на сейсмограммах в близкритической и закритической области удалений от источника (70–150 км). Совместная интерпретация этих двух типов опорных волн позволяет охарактеризовать распределение скорости вплоть до подошвы коры.

Для реализации этой возможности разработаны алгоритмы и программы численного определения двухмерного и трехмерного распределения скорости в изучаемой среде: $v(x,z)$ и $v(x,y,z)$. Существо этих способов [9, 11, 14] состоит в следующем. Основой служат соотношения линеаризованной постановки обратной кинематической задачи [21] для изотропной среды:

$$1/v(x,y,z) = 1/V(z) + \xi(x,y,z);$$

$$t(x_1,y_1;\ x_2,y_2) = T(l) + \tau(x_1,y_1;\ x_2,y_2);$$

$$\tau = \int_S \xi(x,y,z)\,dS,$$

где $V(z)$ – начальное (нормальное) приближение скорости; $\xi \ll 1/V$ – аномальная составляющая обратного значения скорости; t – наблюденное время на плоскости $x,\ 0,\ y$; T – нормальный годограф, соответствующий нормальному распределению скорости; τ – аномалия времени; l – расстояние между источником и приемником (база зондирования), расположенными в точках с текущими координатами x_1, y_1 и x_2, y_2.

Интегрирование ведется по лучу S для среды со скоростью $V(z)$. В случае отраженных волн начальное приближение должно содержать не только распределение $V(z)$ в покрывающей среде, но и положение пологозалегающей отражающей границы, мало отличающееся от реального.

Исходными данными являются времена пробега волн, полученные на площадной или профильной ($y = 0$) совокупности источников и приемников. Эта совокупность должна обеспечивать с требуемой равномерностью и детальностью освещение сейсмическими лучами всей изучаемой области среды. По наблюденным временам находят нормальный годограф $T(l)$ и аномалии τ. По функции $T(l)$ определяют одномерное распределение $V(z)$ и соответствующие траектории сейсмических лучей. Эти данные позволяют воспользоваться записанным выше интегральным соотношением для нахождения распределения $\hat{\xi}$, а затем и $v(x,y,z)$ либо $v(x,z)$.

Обосновано и реализовано несколько отличающихся по виду начального приближения вариантов алгоритма для рефрагированных (двух- и трехмерный случаи) и отраженных (двухмерная модель) волн. Начальное приближение может быть либо неизменным для всего изучаемого участка, либо адаптирующимся, учитывающим плавные изменения свойств среды по горизонтали. При совместном рассмотрении данных по обоим типам волн результаты интерпретации рефрагированных волн, характеризующие часть среды над отражающей границей, входят в качестве априорной информации в массив данных, обрабатываемых по алгоритму отраженной волны.

Опробование трехмерного варианта алгоритма для рефрагированных волн на теоретических моделях показало, что он обеспечивает восстановление функции $v(x,y,z)$ с точностью до 3 %, если отклонения исходных значений времен от нормального годографа не превышают 5 %. Сравнение результатов интерпретации полевых записей рефрагированных волн по Байкальскому региону с применением двух- и трехмерных алгоритмов показало их качественное совпадение в отображении протяженных (несколько десятков километров по горизонтали) аномалий скорости. Средние величины расхождений значений скорости увеличиваются с ростом глубины (от 5 до 20 км) и составляют 0,1–0,2 км/с.

Изложенный подход реализован на Муйском участке Байкальского сейсмопрогностического полигона с целью построения объемной модели земной коры в области гипоцентра катастрофического Муйского землетрясения 1957 г. Его магнитуда $M = 7{,}6 \div 7{,}9$, интенсивность $J = 10 \div 12$ баллов, энергетический класс $k = 17$, глубина очага около 15 км. К западу от него (рис.1) в 1917 г. произошло сильное Северобайкальское землетрясение ($M = 6{,}6 \div 6{,}7$; $k = 16$; $J = 9$ баллов) с очагом в средней части земной коры. Современная сейсмическая активность повышена на участках вблизи эпицентров этих землетрясений, разделенных зоной „сейсмического затишья" [2, 24]. Неотектонические морфоструктуры (Муйская рифтовая впадина и прилегающие горные хребты) имеют полную амплитуду вертикальных движений в неоген-четвертичное время до 3–4 км [5]. К числу дорифтовых геологических неоднородностей относится пояс основных и ультраосновных интрузий в древних породах кислого состава, простирающийся в направлении, ортогональном к длинной оси Муйской впадины.

Площадные и профильные наблюдения рефрагированных волн проведены на территории в 60000 км^2. Источники колебаний (взрывы в естественных водоемах) располагались относительно равномерно через 10–20 км, приемники

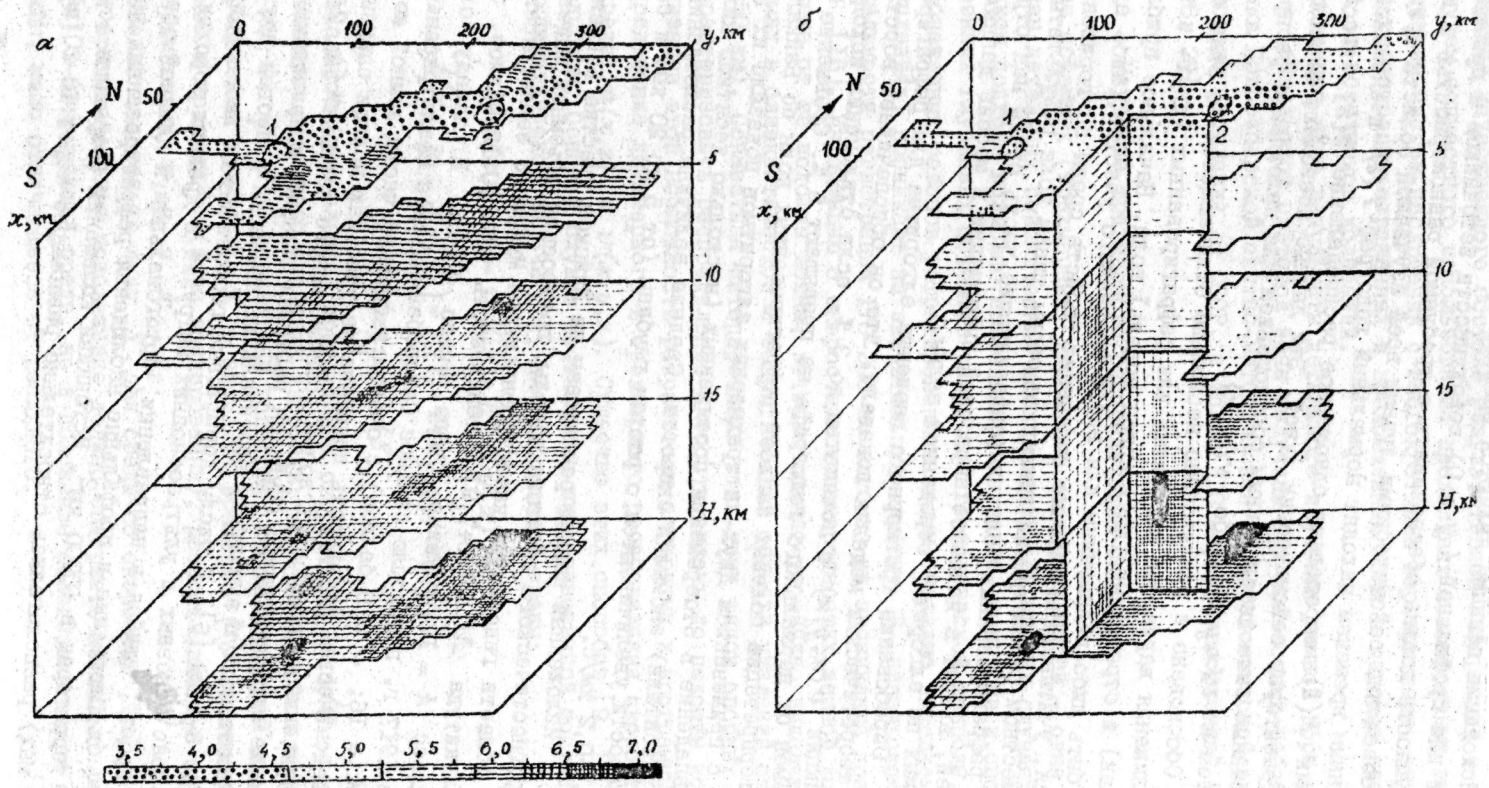


Рис.2. Объемная сейсмическая модель земной коры в районе эпицентров Северобайкальского (1) и Муйского (2) землетрясений

(шестиканальные телеуправляемые регистраторы „Тайга") - через 8-15 км. В обработке использовано около 1600 зондирований с базами 0-200 км. Нормальный годограф протяженностью 200 км был разбит на 10 прямолинейных отрезков. Соответствующий нормальный разрез содержал 10 слоев с мощностью по 2,5 км при скачкообразном нарастании пластовой скорости от 5,5 до 6,7 км/с. Рассчитаны значения скорости в совокупности объемных ячеек, размеры которых по осям x, y и z составляют соответственно 10, 10 и 2,5 км. В итоге без существенных искажений выявляются аномалии скорости, имеющие величину более 0,15-0,2 км/с, горизонтальные размеры не менее 30-40 км и протяженность по вертикали 3-5 км и более.

Объемное распределение скорости продольных волн, полученное на площади 25000 км, представлено в виде пяти карт изолиний скорости на уровнях 0 (уровень моря), 5, 10, 15 и 20 км (рис.2,а). На рис.2,б в этой модели сделаны вертикальные вырезы, несущие информацию об изменении скорости в промежутках между горизонтальными срезами. Доминирующие в пределах каждого уровня значения скорости последовательно растут с глубиной, однако степень неоднородности (размах колебаний скорости для данного среза) с глубиной не уменьшается и составляет около 1 км/с вплоть до уровня 20 км.

На верхних срезах (0 и 5 км) распределение скорости тесно связано с неотектоникой: простирания изолиний скорости и неотектонических морфоструктур совпадают, рифтовым впадинам соответствуют области с низкой скоростью, под горными хребтами преобладают повышенные значения скорости. На уровнях 10 км и глубже выявляется проходящая через всю площадь исследований внутренне неоднородная область повышенной (на десятые доли километра в секунду) скорости с горизонтальными размерами около 50 х 200 км, вытянутая в северо-восточном направлении. Повышенные значения скорости, судя по оценкам, полученным при совместной интерпретации рефрагированных и отраженных волн, распространяются и в нижнюю часть разреза земной коры вплоть до ее подошвы.

Рассматриваемая область неоднородна, особенно вблизи глубинного уровня 20 км. Здесь у ее границ выделяются два локальных участка повышенной неоднородности с резкими изменениями скорости на величину до 1 км/с. Один из участков располагается под эпицентром Муйского землетрясения, второй - в районе Северобайкальского землетрясения (см. рис.1 и 2). Область высокой скорости включает в себя отмеченную выше зону сейсмического затишья. С дорифтовыми геологическими неоднородностями и неотектоническими структурами она не коррелируется ни по местоположению, ни по направлению простирания.

Отмеченные особенности: пониженная современная сейсмическая активность над погребенной областью высокой скорости, совпадение ее резких краевых неоднородностей с гипоцентрами сильных землетрясений, отсутствие четкой связи с неоднородностями предшествующих этапов геологического развития района,- позволяют рассматривать выявленную область как объект, по-видимому, тесно связанный с современными глубинными процессами, порождающими крупные землетрясения. Предположительно эта область может рассмат-

риваться как сложенный высокопрочными породами накопитель упругой энергии, разрядка которых в виде сильных землетрясений происходит на прилегающих участках повышенной неоднородности. Необходимо дальнейшее изучение этого объекта с привлечением данных по сдвиговым сейсмическим волнам.

Совместное использование продольных и поперечных волн

Использование всего комплекса сейсмических волн разной поляризации существенно расширяет качественный состав результативной информации [18]. По записям только продольных волн в принципе нельзя получить полной характеристики среды даже в рамках относительно простой изотропной упругой модели. Совокупность данных о волнах разной поляризации позволяет практически решить этот вопрос, кроме того, появляется возможность более определенно судить о параметрах сейсмической анизотропии среды, связанных с тонкой слоистостью, микроструктурой, напряженным состоянием глубинных горных пород.

В качестве примера многоволнового подхода при детальных глубинных сейсмических исследованиях рассмотрим результаты по одному из профилей (см. рис.I, профиль 2), пересекающему Муйскую впадину, Кодарский и Южно-Муйский хребты. Здесь реализована достаточно плотная система трехкомпонентных наблюдений опорных P- и S-волн. Для сдвиговых волн не обнаружено существенного эффекта их расщепления на Sv- и SH-составляющие, что позволяет в первом приближении считать среду изотропной. С применением одних и тех же способов кинематической интерпретации были построены разрезы земной коры раздельно по данным продольных и поперечных волн (рис.3).

Разрезы верхней половины земной коры получены по записям рефрагированных волн. Поверхность мантии построена по преломленным волнам и близкритическим отражениям. Разрезы имеют практически одинаковую степень достоверности и детальности. В отображении крупных черт глубинного строения земной коры оба разреза близки. Однако в существенных деталях, особенно для верхней половины земной коры, они значимо различаются.

Этот пример иллюстрирует принципиальную особенность совместного использования P- и S-волн. Дело в том, что результатом таких исследований является не один, а два различных сейсмических образа изучаемой среды. Исходные образы могут быть трансформированы в ряд вторичных образов на основе функциональных и корреляционных связей скоростей P- и S-волн с искомыми параметрами среды. Функциональными параметрами являются отношения скоростей распространения этих волн, коэффициент Пуассона, отношение модуля объемного сжатия к плотности; корреляционными параметрами – плотность, упругие модули, показатели напряженного состояния, химического и минерального состава, флюидонасыщенности горных пород и др. Такой подход к получению качественно новой дополнительной информации о глубинных геологических объектах уже используется в многоволновых сейсмических исследованиях [I, 8, I5] и нуждается в дальнейшем обосновании и развитии.

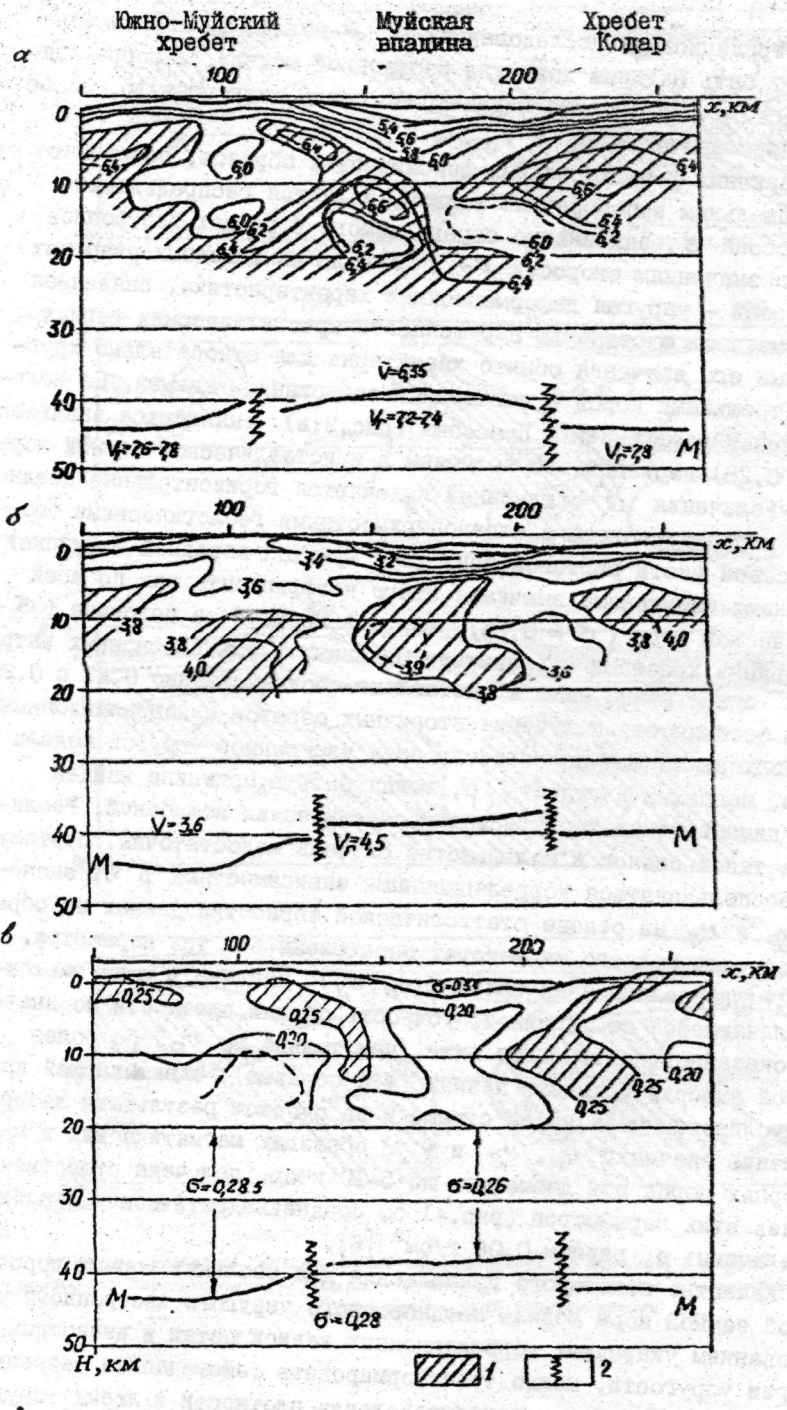


Рис.3. Сейсмические разрезы по профилю 2 (см. рис.1): а и б – по скорости продольных и поперечных волн, км/с; в – распределение коэффициента Пуассона

1 – область аномально повышенных значений соответствующих физических параметров; 2 – предполагаемые глубинные разломы

Отметим, что при традиционных исследованиях на P-волнах функциональные параметры не могут быть найдены даже для изотропной модели, а корреляционные связи скорости v_P с другими параметрами среды, как правило, менее тесные, чем для пары значений v_P и v_S.

Одним из вторичных функциональных сейсмических образов, объединяющих данные по продольным и поперечным волнам, является распределение коэффициента Пуассона σ, однозначно определяемого в рамках изотропной упругой модели по значениям скорости P- и S-волн на исходных разрезах. Коэффициент Пуассона - упругая деформационная характеристика, связанная с вещественным составом и степенью нарушенности кристаллических горных пород. Минимальные его значения обычно характерны для относительно хрупких, нарушенных трещинами пород с повышенным содержанием кварца. На полученном распределении коэффициента Пуассона (рис.3,в) выявляются значительные (от 0,20 до 0,28) вариации его величины в кристаллической земной коре. На фоне общего увеличения σ с глубиной выделяются горизонтальные неоднородности, тесно коррелирующиеся с близповерхностными геологическими особенностями. В осевой части рифтовой зоны (под Муйской впадиной и Муйской глыбой) преобладают пониженные значения этого коэффициента как по всей толще кристаллической коры (σ = 0,25), так и в верхней ее половине (σ = = 0,20). Под горными хребтами с развитием основных и ультраосновных интрузий значения σ существенно выше и составляют соответственно 0,27 и 0,25.

Рассмотрим особенности получения вторичных образов с корреляционными параметрами. Необходимый для полного описания изотропной упругой модели третий параметр, например плотность ρ, может быть в принципе найден с привлечением динамических характеристик сейсмических колебаний. Реализуемая точность таких оценок в большинстве случаев недостаточна. Поэтому целесообразно воспользоваться корреляционными зависимостями ρ от значений скорости v_P и v_S на основе статистической обработки данных по образцам горных пород, для каждого из которых определены эти три параметра. В работах [I, I7] корреляционная связь $\rho(v_P, v_S)$ найдена в виде зависимости, мало отличающейся от линейной; точность оценки плотности по значениям v_P и v_S оказалась почти вдвое выше, чем только по v_P. По более представительной выборке исходных данных (464 образца), охватывающей практически все опубликованные в нашей стране и за рубежом результаты лабораторных определений значений v_P, v_S и ρ в образцах магматических и метаморфических горных пород при давлениях до 5-I0 кбар, получена существенно нелинейная связь этих параметров (рис.4) со среднеквадратическим отклонением оценки величины ρ, равным 0,06 г/см^3 [6].

Приняв в качестве некоторого приближения для реальных горных пород кристаллической земной коры модель неоднородного упругого изотропного тела, с использованием указанных корреляционных зависимостей и известных соотношений теории упругости, можно трансформировать сейсмические разрезы, построенные по P- и S-волнам, в распределения плотности и любых упругих характеристик (модулей сдвига, всестороннего сжатия, показателей упругой энергоемкости), требуемых для физически содержательного анализа в связи

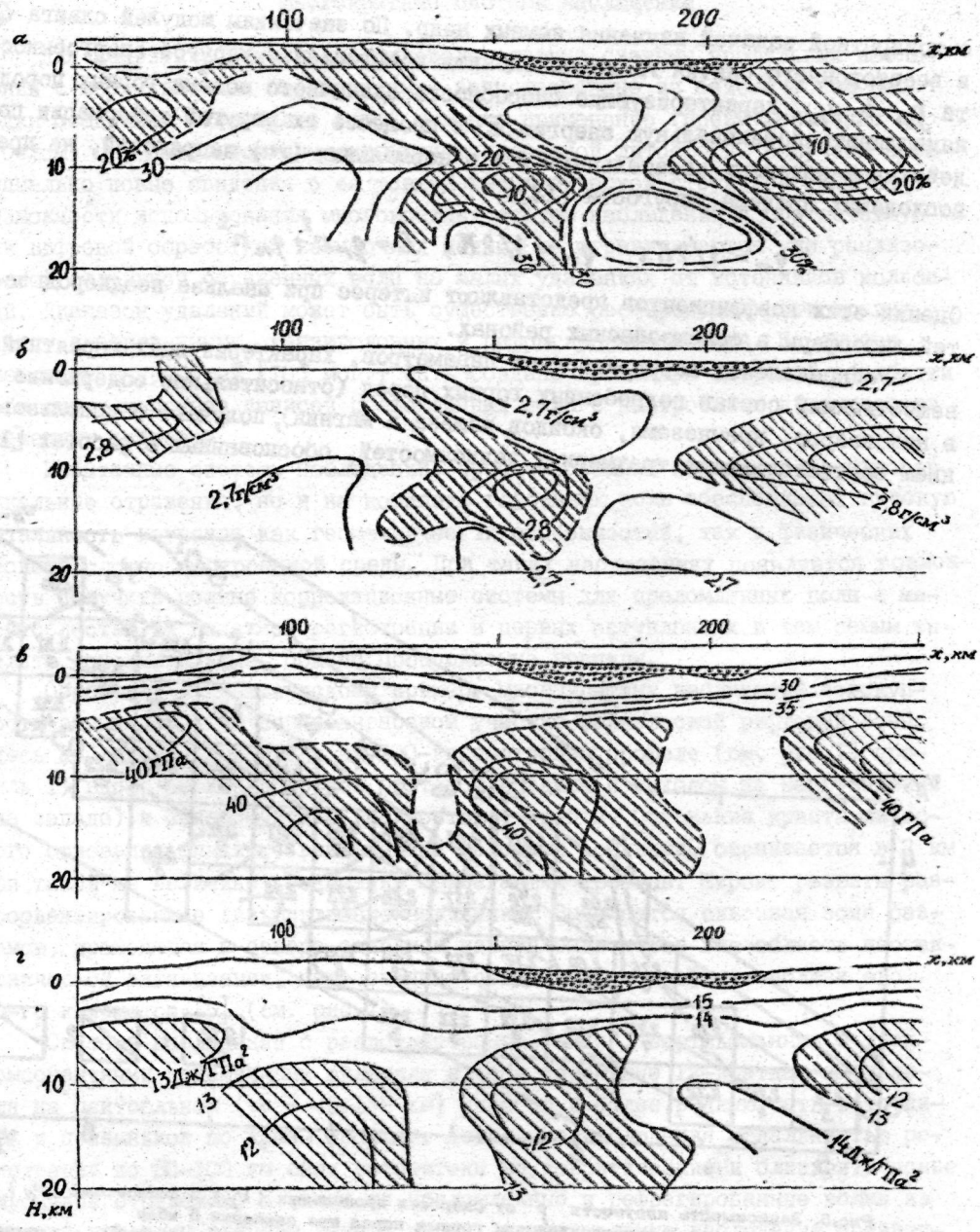


Рис.4. Вторичные сейсмические образы среды по профилю 2 с распределением корреляционных параметров: а – содержание кварца; б – плотность; в – модуль сдвига G; г – коэффициент упругой энергоемкости q_r

с конкретной задачей изучения земных недр. По значениям модулей сдвига G и всестороннего сжатия K можно оценить коэффициенты упругой энергоемкости q_τ и q_n, характеризующие способность единичного объема горных пород накапливать потенциальную энергию E в процессе их упругой деформации под действием заданных касательных (τ) и нормальных (n) напряжений, не превосходящих предела упругости [13]:

$$q_\tau = 1/2G; \quad q_n = 1/2K; \quad E = q_\tau \tau^2 + q_n n^2.$$

Оценки этих коэффициентов представляют интерес при анализе неоднородностей литосферы в сейсмоопасных районах.

Распределения корреляционных параметров, характеризующих вероятный вещественный состав погребенных горных пород (относительное содержание в них кварца, кремнезема, оксидов железа и магния), получают с использованием соответствующих трехмерных зависимостей, обоснованных в работах [1, 6].

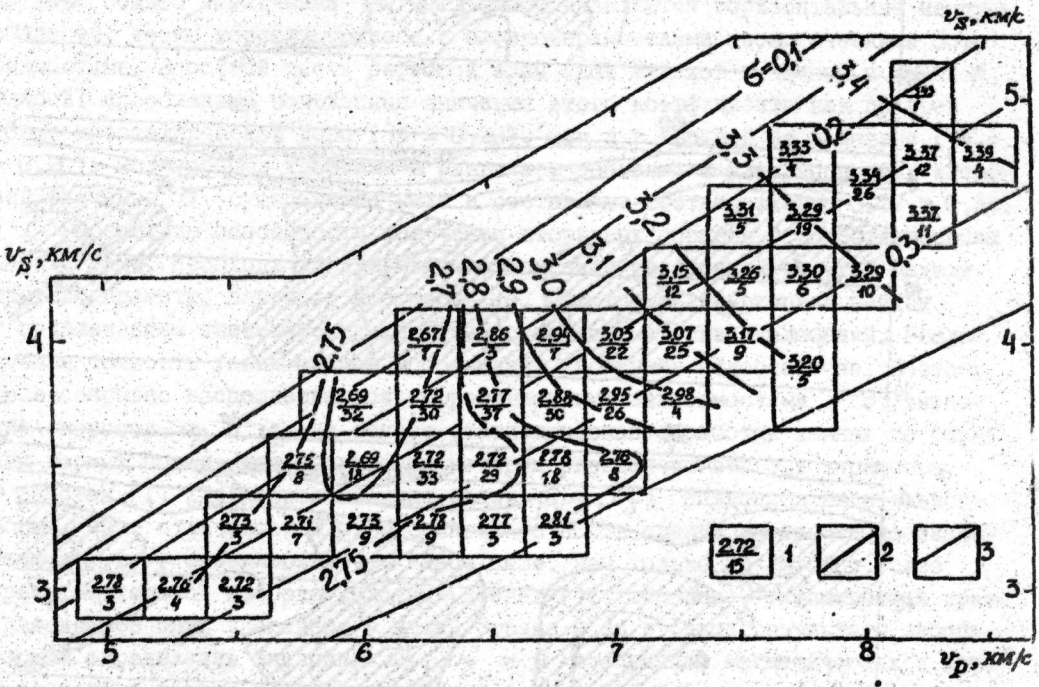


Рис.5. Зависимость плотности ρ от скорости продольных (v_p) и поперечных (v_s) волн для кристаллических горных пород при давлении 5 кбар
1 – в числителе осредненное в пределах ячейки значение плотности (г/см³), в знаменателе – число образцов; 2 – изолинии плотности; 3 – изолинии коэффициента Пуассона σ

Примеры построения вторичных корреляционных сейсмических образов для верхней половины разреза земной коры по рассматриваемому профилю ГСЗ через Японскую впадину приведены на рис.5.

Для докритических отраженных волн плотные системы профильных наблюдений с многократными перекрытиями, заимствованные из сейсмической разведки осадочных бассейнов, нашли широкое применение (преимущественно за рубежом) при детальном изучении кристаллической литосферы. Получены принципиально новые сведения о ее тонкой геометрической структуре [22, 23]. Возможности использования многократных систем наблюдений с соответствующей цифровой обработкой избыточных данных не ограничиваются уже реализованной селекцией отраженных волн на малых удалениях от источников колебаний. Диапазон удалений может быть существенно расширен для регистрации, наряду с отраженными, квазиголовных и рефрагированных волн. На основе имеющихся разработок [10] могут быть созданы процедуры цифровой обработки избыточных массивов записей преломленных волн с построением динамических временны́х разрезов.

Избыточные системы наблюдений, ориентированные не только на близвертикальные отражения, но и на комплекс глубинных волн обеспечивают высокую детальность изучения как геометрических особенностей, так и физических свойств сложно построенной среды. При таких наблюдениях появляется возможность получить полные корреляционные системы для преломленных волн с малой областью их надежной регистрации в первых вступлениях и тем самым выделять дополнительные, обычно пропускаемые границы.

Обратимся к практическому примеру многократных наблюдений совокупности разных волн на Верхнеангарском участке Байкальской рифтовой зоны. Здесь наблюдения выполнены на 200-километровом профиле (см. рис.I, профиль I) вдоль Верхнеангарской рифтовой впадины с выходом на Баргузинский (на западе) и Северомуйский (на востоке) хребты. Опускание кристаллического основания впадины, выполненной молодыми осадками, оценивается в 2 км при такой же величине воздымания прилегающих хребтов. Широко развиты разноориентированные дизъюнктивные нарушения. Выделяется сквозная зона разломов, проходящая в северо-западном направлении через всю область неотектонической активизации, пересеченная сейсмическим профилем вблизи его 50-го километра [5] (см. рис.I).

Система наблюдений с регистраторами „Тайга", вертикальными и трехкомпонентными приемниками включала в себя детальные I2-кратные наблюдения на центральном (x = 45÷I35 км) участке и более редкую сеть источников и приемников по краям профиля. Детальные наблюдения с дальностью регистрации до 80–I00 км были рассчитаны на докритические и близкритические глубинные отражения, а также на преломленные и рефрагированные волны из верхней половины разреза земной коры. Дополнительные наблюдения ориентировались на преломленные и отраженные (близкритические и закритические) мантийные волны. На участке детальных наблюдений источники (взрывы в неглубоких водоемах) располагались в среднем через 5 км, а сейсмические приемники – через 300 м.

Многократные системы наблюдений

Для докритических отраженных волн плотные системы профильных наблюдений с многократными перекрытиями, заимствованные из сейсмической разведки осадочных бассейнов, нашли широкое применение (преимущественно за рубежом) при детальном изучении кристаллической литосферы. Получены принципиально новые сведения о ее тонкой геометрической структуре [22, 23]. Возможности использования многократных систем наблюдений с соответствующей цифровой обработкой избыточных данных не ограничиваются уже реализованной селекцией отраженных волн на малых удалениях от источников колебаний. Диапазон удалений может быть существенно расширен для регистрации, наряду с отраженными, квазиголовных и рефрагированных волн. На основе имеющихся разработок [10] могут быть созданы процедуры цифровой обработки избыточных массивов записей преломленных волн с построением динамических временных разрезов.

Избыточные системы наблюдений, ориентированные не только на близвертикальные отражения, но и на комплекс глубинных волн обеспечивают высокую детальность изучения как геометрических особенностей, так и физических свойств сложно построенной среды. При таких наблюдениях появляется возможность получить полные корреляционные системы для преломленных волн с малой областью их надежной регистрации в первых вступлениях и тем самым выделять дополнительные, обычно пропускаемые границы.

Обратимся к практическому примеру многократных наблюдений совокупности разных волн на Верхнеангарском участке Байкальской рифтовой зоны. Здесь наблюдения выполнены на 200-километровом профиле (см. рис.I, профиль I) вдоль Верхнеангарской рифтовой впадины с выходом на Баргузинский (на западе) и Северомуйский (на востоке) хребты. Опускание кристаллического основания впадины, выполненной молодыми осадками, оценивается в 2 км при такой же величине воздымания прилегающих хребтов. Широко развиты разноориентированные дизъюнктивные нарушения. Выделяется сквозная зона разломов, проходящая в северо-западном направлении через всю область неотектонической активизации, пересеченная сейсмическим профилем вблизи его 50-го километра [5] (см. рис.I).

Система наблюдений с регистраторами „Тайга", вертикальными и трехкомпонентными приемниками включала в себя детальные I2-кратные наблюдения на центральном (x = 45÷I35 км) участке и более редкую сеть источников и приемников по краям профиля. Детальные наблюдения с дальностью регистрации до 80-I00 км были рассчитаны на докритические и близкритические глубинные отражения, а также на преломленные и рефрагированные волны из верхней половины разреза земной коры. Дополнительные наблюдения ориентировались на преломленные и отраженные (близкритические и закритические) мантийные волны. На участке детальных наблюдений источники (взрывы в неглубоких водоемах) располагались в среднем через 5 км, а сейсмические приемники – через 300 м.

По оцифрованным сейсмическим записям с применением частотной и поляризационной фильтрации выделены и корреляционно прослежены преломленные волны от поверхности дочетвертичного фундамента Ф рифтовой впадины и от границы К внутри этого фундамента, преломленные и отраженные волны от поверхности мантии М и внутримантийной границы, а также рефрагированная волна из верхней части кристаллической земной коры. От всех границ получены как P-, так и S-волны. Кинематическая интерпретация преломленных волн для верхней части разреза осуществлена по сводным встречным годографам и полям времен. Для рефрагированных P-волн использованы алгоритмы линеаризованной интерпретации.

Суммирование сейсмограмм многократных наблюдений способом общей глубинной точки выполнено с использованием комплекса программ СДС-3, применяемого в сейсмической разведке, с пятикратным сжатием исходных записей

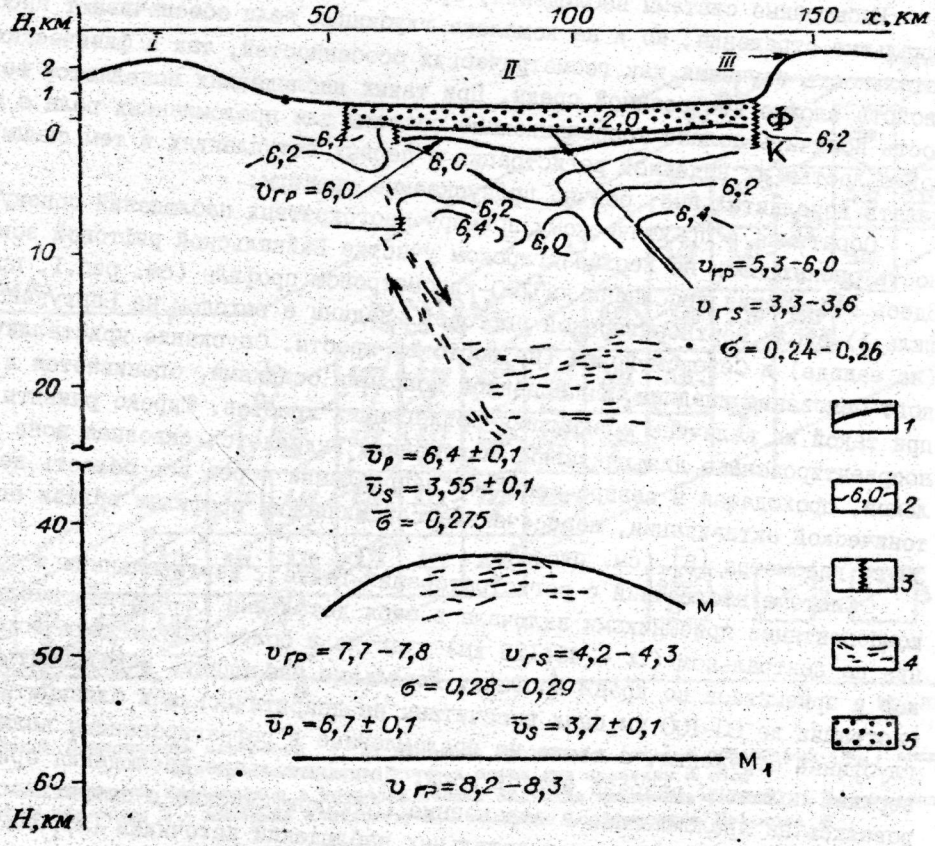


Рис.6. *Сейсмический разрез земной коры и верхов мантии по профилю 1 (см. рис.1) через Баргузинский хребет (I), Верхнеангарскую впадину (II) и Северомуйский хребет (III)*

1 – сейсмические границы; 2 – изолинии скорости продольных волн в километрах в секунду; 3 – дизъюнктивы; 4 – отражающие площадки; 5 – кайнозойские осадочные породы; $v_{гр}$ и $v_{гS}$ – граничные скорости продольных и поперечных волн, км/с; $\bar{v}_p$ и $\bar{v}_S$ – средние скорости в покрывающей среде; σ – коэффициент Пуассона

и введением априорных статических и кинематических поправок. Распределение скорости в среде взято по результатам интерпретации опорных волн. Реальность выделения коротких отражающих площадок контролировалась по исходным сейсмограммам для ряда фиксированных источников. Временные разрезы строились как по всей совокупности записей, так и по выборкам для разных диапазонов расстояний источник – приемник. По выборке записей на расстояниях 0–45 км получено более четкое и детальное расчленение коровой части разреза. Верхнемантийные отражающие площадки наиболее надежно проявились на временном разрезе, построенном по записям в интервале 45–90 км от источников колебаний.

На глубинном сейсмическом разрезе (рис.6), построенном по всей совокупности полученных данных, отмечены характерные для рифтовых впадин Байкальской зоны особенности: сокращение мощности кристаллической коры с подъемом границы М, наличие верхнемантийного слоя с аномально низкими значениями скорости и повышенной величиной коэффициента Пуассона. Выявлена сейсмическая расслоенность среды у контакта кора – мантия, проявляющаяся в виде пачки коротких отражающих площадок с небольшими углами наклона. Повышенная почти горизонтальная расслоенность установлена и в средней части разреза земной коры на глубинах 18–22 км, близи интервала концентрации большинства очагов байкальских землетрясений [24].

По результатам детальных работ выявляются существенные различия глубинного строения под пересеченными неотектоническими структурами: рифтовой впадиной и горными хребтами. Слой кайнозойских осадков, подстилаемый границей Ф, в пределах впадины имеет мощность 0,5–1,6 км с резкими разломными ограничениями при переходе к хребтам. Между преломляющими границами Ф и К заключен слой переменной толщины, не превышающей 2 км. Он развит только под рифтовой впадиной и, по-видимому, сложен нижнекембрийскими преимущественно карбонатными породами, вскрытыми буровыми скважинами. В поле изолиний скорости, по данным многократных наблюдений продольных рефрагированных волн, под впадиной обособляется область пониженных значений. На горных участках скорости на 0,2–0,4 км/с выше на том же уровне глубин.

Совокупность данных по отраженным и рефрагированным волнам позволяет судить о глубинном сочленении и относительных перемещениях Баргузинского и Верхнеангарского блоков земной коры. Это сочленение происходит по падающему под впадину разлому, проявляющемуся как серия упорядоченных отражающих площадок со средним углом наклона 38–40° в интервале глубин 5–25 км. Выше по разрезу разлом отображается в конфигурации изолиний скорости, а у дневной поверхности выходит на уже упоминавшуюся осевую линию сквозной серии разломов, секущих всю рифтовую зону вкрест ее простирания. Вероятная величина вертикального смещения блоков по разлому определяется по особенностям поля скорости. Со стороны Баргузинского хребта изолинии 6,2 и 6,4 км/с находятся на уровне 2–4 км, а под впадиной – на глубинах 5–7 км. Следовательно, вертикальное смещение составляет 3–4 км, что совпадает с независимой оценкой полной амплитуды неотектонических движений

на данном участке в олигоцен-плейстоценовое время [5]. Похожие особенности намечаются и для значительно менее полно изученного участка сочленения рифтовой впадины с Северомуйским хребтом.

Главный вывод из рассмотренных исследований по развитию метода ГСЗ для детального изучения сложно построенных участков земной коры в условиях Байкальской рифтовой зоны сводится к следующему. Переход к изучению трехмерных глубинных неоднородностей, совместное использование волн разной поляризации, применение систем наблюдений с многократными перекрытиями для отраженных и преломленных волн в широком диапазоне удалений от источников колебаний – все это позволит получать качественно новые сведения, необходимые для решения современных задач глубинной геологии и выяснения условий возникновения разрушительных землетрясений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алейников А.Л., Немзоров Н.И., Халевин Н.И. Многоволновая сейсмика при изучении недр рудных районов. М.: Наука, 1986. 111 с.

2. *Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмичность* / Отв. ред. С.Л.Соловьев. Новосибирск: Наука, 1985. 192 с.

3. Глубинный разрез Имандра-Варзугской синклинорной зоны / И.В.Литвиненко, Л.Н.Платоненкова, Ю.А.Сипарова, С.А.Анкудинов // Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1968. С.96-103.

4. Детальные глубинные сейсмические исследования в Верхнеангарском районе Байкальской рифтовой зоны / С.В.Крылов, М.М.Мандельбаум, В.С.Селезнев и др. // Геология и геофизика. 1990. № 7. С.17-27.

5. Карта новейшей тектоники юга Восточной Сибири. Масштаб 1:1 500 000 / А.Г.Золотарев, Г.М.Хренов; ВостСибНИИГГиМС, ИГУ. Иркутск, 1982.

6. Крылов С.В., Брыксин А.В., Тен Е.Н. Упругие свойства силикатных минералов и кристаллических горных пород для изотропной модели // Геология и геофизика. 1990. № 12. С.101-113.

7. Крылов С.В., Крылова А.Л. Телесейсмическое просвечивание мантии Земли в Байкальском регионе // Геофизические методы в региональной геологии. Новосибирск: Наука, 1982. С.42-50.

8. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Брыксин А.В. Глубинное строение зоны Байкальского рифта по данным многоволновых сейсмических исследований // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей. Новосибирск: Наука, 1990. С.162-169.

9. Крылов С.В., Мишенькина З.Р., Тен Е.Н. Определение трехмерного распределения скорости по данным рефрагированных волн // Геология и геофизика. 1989. № 6. С.121-128.

10. Крылов С.В., Сергеев В.Н. Свойства головных волн и новые возможности их обработки // Геология и геофизика. 1985. № 4. С.92-102.

11. Крылов С.В., Шелудько И.Ф. Основы способа линеаризованной интерпретации временного поля отраженной сейсмической волны // Геология и геофизика. 1987. № 7. С.110-120.

12. Литвиненко И.В., Некрасова К.А. Особенности глубинного сейсмического зондирования на Балтийском щите // Глубинное сейсмическое зондирование земной коры в СССР. Л.: Гостоптехиздат, 1962. С.187-206.

13. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 379 с.

14. Мишенькина З.Р., Шелудько И.Ф., Крылов С.В. Использование линеаризованной постановки обратной кинематической задачи для двухмерных полей времен $t(x,l)$ рефрагированных волн // Численные методы в сейсмических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1983. С.140-152.

15. Многоволновые сейсмические исследования / Под ред. Н.Н.Пузырева. Новосибирск: Наука, 1987. 214 с.

16. Недра Байкала (по сейсмическим данным) / С.В.Крылов, М.М.Мандельбаум, Б.П.Мишенькин и др. Новосибирск: Наука, 1981. 105 с.

17. Опыт глубинных сейсмических зондирований на Урале / В.С.Дружинин, С.Н.Кашубин, Л.В.Сивкова / НТО Горное. Свердловск, 1982. 126 с.

18. Пузырев Н.Н. Развитие методов поперечных и обменных волн в сейсморазведке // Развитие идей Г.А.Гамбурцева в геофизике. М.: Наука, 1982. С.132-177.

19. Пузырев Н.Н., Крылов С.В., Мишенькин Б.П. Методика рекогносцировочных глубинных сейсмических исследований. Новосибирск: Наука, 1975. 158 с.

20. Трехмерная сейсмическая модель земной коры и верхов мантии на северо-востоке Байкальской рифтовой зоны / Б.П.Мишенькин, З.Р.Мишенькина, Е.Н.Тен и др. // Геология и геофизика. 1989. № 2. С.115-123.

21. Численный метод решения трехмерной обратной задачи сейсмики / А.С.Алексеев, М.М.Лаврентьев, Р.Г.Мухометов, В.Г.Романов; ВЦ Сибирского отделения АН СССР. Новосибирск, 1969. Вып.1. С.137-159.

22. Barazangi M., Brown L. Reflection seismology: global perspective // American Geophysical Union Geodynamics Series. 1986. V. 14. 339 p.

23. Geophysical framework of the continental United States / Edited by L. C. Pakiser, W.D. Mooney // Geological Society of America. 1989, Metoir. 172 p.

24. Golenetsky S. I. Problems of the seismicity of the Baikal rift zone // Journal of geodynamics. 1990. N 11. P. 293-307.