

Упругие свойства и широтная зональность литосферы Среднеуральской области повышенной сейсмичности по данным многоволновых глубинных сейсмических зондирований

В. В. Колмогорова, Г. И. Парыгин, А. Ю. Осипова, В. Ю. Осипов

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100,
e-mail: vvkolmogorova@mail.ru

Поступила в редакцию 05.08.2024 г., принята к печати 29.09.2024 г.

Объект исследования. Литосфера Среднеуральской области повышенной сейсмичности. **Цель исследования.** Изучение упругих свойств и широтной зональности земной коры и верхней мантии этой области по данным многоволновых глубинных сейсмических зондирований и сопоставление выявленных особенностей глубинного строения с расположением тектонических землетрясений. **Материал и методы исследования.** По результатам переинтерпретации уральских материалов глубинных сейсмических зондирований методом двумерной сейсмической томографии построены градиентные скоростные разрезы земной коры и верхов верхней мантии по меридиональному профилю Вижай–Нижняя Тура–Орск и фрагментам двух геотраверсов: Костомукша–Нижний Тагил–Семипалатинск (Рубин-1) и Нижний Тагил–Уренгой (Рубин-2). Разрезы в изолиниях равных скоростей, построенные по первым вступлениям продольных и поперечных волн независимо друг от друга, пересчитаны на основе известных функциональных и корреляционных зависимостей в разрезы, отражающие распределение в земной коре ряда упругих параметров: плотности, коэффициента Пуассона, отношения скоростей распространения продольных и поперечных волн, модуля объемного сжатия и модуля сдвига. **Результаты.** Получены новые данные о глубинном строении Среднеуральской области. По материалам меридионального профиля Вижай–Нижняя Тура–Орск установлено, что Тагильский прогиб, по сравнению с Магнитогорским, характеризуется менее мощной и более высокоскоростной корой по распространению как продольных волн V_p , так и поперечных волн V_s , при этом отношение скоростей V_p/V_s в ней пониженное по сравнению с корой Магнитогорского прогиба, что свидетельствует о большей тектонической нарушенности. В средней части земной коры выделен ослабленный, разупрочненный слой, отличающийся пониженной скоростью продольных волн V_p и пониженными значениями параметра V_p/V_s и коэффициента Пуассона. К этому слою приурочено большинство очагов местных землетрясений. Выделены и физически охарактеризованы контрастные по плотности и упругим параметрам блоки в земной коре, в том числе широтные зоны повышенной трещиноватости. Эти зоны соответствуют в основном широтным дислокациям, выделенным ранее по другим критериям, уточняют их расположение и упругие свойства. Выявлен один из признаков подобных, секущих уральские структуры, трещиноватых зон – повышенная скорость распространения поперечных волн при пониженной скорости продольных. Показана приуроченность эпицентров уральских землетрясений к местам пересечения двух субмеридиональных зон, пограничных между орогеном и обрамляющими его прогибами, с выделенными широтными зонами повышенной трещиноватости. **Выводы.** Совместная интерпретация продольных и поперечных волн позволила получить новую информацию о глубинном строении Среднеуральской области повышенной сейсмичности и объяснить закономерность локализации эпицентров уральских землетрясений в этой области ее повышенной тектонической нарушенностью. Результаты исследования подтверждают геологическую информативность многоволновой сейсмичности и могут быть использованы в дальнейшем для оценки вещественного состава земной коры, ее напряженно-деформированного состояния, истории развития, а также для сейсмического и минерагенического прогнозирования.

Ключевые слова: Средний Урал, сейсмичность, глубинное строение, многоволновые глубинные сейсмические зондирования, упругие свойства

Для цитирования: Колмогорова В.В., Парыгин Г.И., Осипова А.Ю., Осипов В.Ю. (2025) Упругие свойства и широтная зональность литосферы Среднеуральской области повышенной сейсмичности по данным многоволновых глубинных сейсмических зондирований. *Литосфера*, 25(1), 24-43. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-1-24-43>. EDN: ARSSKS

For citation: Kolmogorova V.V., Parygin G.I., Osipova A.Yu., Osipov V.Yu. (2025) Elastic properties and latitudinal zoning of the lithosphere of the Middle Ural region with increased seismicity according to multiwave deep seismic sounding data. *Lithosphere (Russia)*, 25(1), 24-43. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-1-24-43>. EDN: ARSSKS

Elastic properties and latitudinal zoning of the lithosphere of the Middle Ural region with increased seismicity according to multiwave deep seismic sounding data

Vera V. Kolmogorova, Gennady I. Parygin, Anastasia Yu. Osipova, Vyacheslav Yu. Osipov

*Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, UB RAS, 100 Amundsena st., Ekaterinburg 620016, Russia,
e-mail: vvkolmogorova@mail.ru*

Received 05.08.2024, accepted 29.09.2024

Research subject. Lithosphere of the Middle Urals region with increased seismicity. *Aim.* Study of the elastic properties and latitudinal zoning of the earth's crust and upper mantle in the region based on multiwave deep seismic sounding data and the comparison of the identified features of the deep structure with the location of tectonic earthquakes. *Materials and Methods.* The gradient velocity sections of the earth's crust and upper mantle were constructed along the Vizhay–Nizhnyaya Tura–Orsk meridional profile and the fragments of two geotraverses: Kostomuksha–Nizhniy Tagil–Semipalatinsk (Rubin-1) and Nizhniy Tagil–Urengoy (Rubin-2) based on the results of reinterpretation of the Ural deep seismic sounding (DSS) materials using two-dimensional seismic tomography. Sections in isolines of equal velocities were constructed from the first arrivals of compression and shear seismic waves independently of each other and recalculated on the basis of known functional and correlation dependencies into sections reflecting the distribution of a number of elastic parameters in the earth's crust: density, Poisson's ratio, V_p/V_s values, bulk and shear modulus. *Results.* New data about the deep structure of the Middle Urals region is obtained. Based on materials from the meridional Vizhay–Nizhnyaya Tura–Orsk profile it has been established that the Tagil trough as compared to the Magnitogorsk trough, is characterized by a less thick and higher-speed crust, both in the V_p speed of propagation of compression waves and in the V_s speed of shear waves. At the same time, the V_p/V_s velocity ratio in it is reduced as compared to the Magnitogorsk trough, which indicates greater tectonic disturbance. In the middle part of the earth's crust a weakened, softened layer is identified, characterized by a reduced V_p velocity of compression waves and reduced V_p/V_s values and Poisson's ratio. The hypocenters of local earthquakes are mainly confined to this layer. Blocks in the earth's crust with contrasting density and elastic properties, including latitudinal zones of increased fracturing, have been identified and physically characterized. These zones correspond mainly to latitudinal dislocations, identified earlier according to other criteria, and clarify their location and elastic properties. One of the signs of similar fractured zones cutting across the Ural structures has been identified, namely an increased speed of propagation of shear waves at a reduced speed of compression. The epicenters of Ural earthquakes are confined to the intersection of high-velocity blocks of the earth's crust of the Tagil–Magnitogorsk trough and Cis-Ural foredeep with identified latitudinal zones of increased fracturing. *Conclusion.* The combined interpretation of compression and shear seismic waves made it possible to obtain new data on the deep structure of the Middle Ural region of increased seismicity and to explain the pattern of localization of the epicenters of the Ural earthquakes in this region by its increased tectonic disturbance. The results of the study confirm the geological informational content of multiwave seismicity and can be used in the future to assess the material composition of the earth's crust, its stress-strain state, development history, as well as for seismic and mineragenic forecasting.

Keywords: Middle Ural, seismicity, deep structure, multiwave deep seismic sounding, elastic properties

ВВЕДЕНИЕ

При изучении глубинного строения эпицентральных зон уральских землетрясений ранее выполнен анализ материалов глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) на профилях, пересекающих Урал: Красноуральском, Свердловском, Рубин-1, Рубин-2, и Артинском профиле МОВЗ. Сделан вывод о приуроченности эпицентров землетрясений к скоростным и структурным неоднородностям земной коры и верхней мантии, а также к крупным (региональным) разломам и их пересечениям (Кашубин и др., 2001; Дружинин и др., 2004).

Следующий этап исследований заключался в переходе к оценке упругих свойств изучаемой среды на основе совместной интерпретации продольных и поперечных волн. Многоволновые сейсмические исследования и данные о скоростях не только продольных, но и поперечных волн существенно расширили возможности метода при изучении физических характеристик земной коры, ее динамического состояния и вещественного состава. Развитию многоволновой сейсмологии и исследованиям, доказавшим перспективность метода, посвящены работы (Хавелин и др., 1980; Кашубин, 1984; Дружинин и др., 1985; Пузырев и др., 1985; Алейни-

ков и др., 1986; Халевин и др., 1987; Avtonev et al., 1992; Крылов и др., 1993; Кашубин, 1994; Крылов, Тен, 1995; Егоркин, 1996; Carbonell et al., 1996; Кашубин, Дружинин, 1999; Егоркин, 2000; Brown et al., 2003; Кашубин и др., 2022).

На этом этапе проанализированы градиентные скоростные разрезы земной коры, построенные по профилям ГСЗ до глубины 30 км по первым вступлениям продольных (P) и поперечных (S) волн, и рассчитанные по ним разрезы в изолиниях упругих модулей. По результатам анализа установлено, что земная кора Западно-Уральской зоны складчатости и Центрально-Уральского поднятия отличается пониженными упругими и прочностными свойствами, а кора обрамляющих прогибов, Предуральского и Приуральского (Тагильско-Магнитогорского) – повышенными. Выделены две субмеридиональные зоны концентрации эпицентров уральских землетрясений в этих прогибах (Колмогорова и др., 2004, 2005; Дружинин и др., 2007; Землетрясения и микросейсмичность..., 2007). Также сделан вывод о приуроченности большинства землетрясений к местам пересечения двух указанных субмеридиональных пограничных зон со скрытыми поперечными дислокациями.

Вопросами выделения и картирования геофизическими методами поперечной зональности глубинного строения Урала занимались многие исследователи (Червяковский и др., 1966; Алейников и др., 1978; Берлянд, 1982; Дружинин и др., 2015; Дружинин, Осипов, 2016). Основными геофизическими критериями ее выделения были морфологические особенности потенциальных полей, гравитационного и магнитного, и наличие широтных блоков в сейсмических разрезах земной коры на меридиональных и субмеридиональных профилях ГСЗ. При выделении блоков учитывались структурные особенности разрезов (перепады в глубине основных границ, характер расслоенности и др.), мощность земной коры и распределение скорости продольных волн V_p в коре и верхней мантии. При первичной интерпретации материалов меридионального профиля Вижай–Нижняя Тура–Орск привлекались также данные о скорости поперечных волн V_s в верхней части коры, до глубины 5–7 км (Дружинин и др., 1985). Рассматривались три направления поперечной по отношению к уральским структурам зональности: северо-западное, широтное и менее выраженное северо-восточное. Показано, что на Среднем Урале преобладает северо-западная поперечная зональность глубинного строения, на которую накладываются местами “достаточно узкие” субширотные поперечные зоны (Геология и полезные ископаемые..., 2011).

К тектоническим структурам, имеющим различную пространственную ориентировку и проявляющим активность на современном этапе, приурочены зоны возможных очагов землетрясений

(ВОЗ), выделенные авторами работ (Кашубин и др., 2001; Гуляев, Осипова, 2019). В настоящей работе рассматриваются структуры субширотного направления, так как в основе данного исследования лежит интерпретация материалов сейсмических зондирований по меридиональному профилю Вижай–Нижняя Тура–Орск. *Цель работы* – дальнейшее изучение упругих свойств земной коры и верхней мантии Среднего и северной части Южного Урала, так называемой Среднеуральской области повышенной сейсмичности, на основе анализа результатов многоволновых глубинных сейсмических зондирований и сопоставление выявленных особенностей глубинного строения данной области с пространственным распределением в ней эпицентров тектонических землетрясений.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При обобщении и частичной переинтерпретации уральских материалов ГСЗ на продольных и поперечных волнах построены методом двумерной сейсмической томографии (Пузырев и др., 1975; Мишенькина и др., 1983) градиентные скоростные разрезы земной коры и верхов мантии до глубины 40–80 км по ряду профилей, в том числе по меридиональному профилю Вижай–Нижняя Тура–Орск и фрагментам двух геотраверсов – Рубин-1 и Рубин-2 (рис. 1).

Специальные двумерные поля времен и соответствующие им скоростные разрезы по уральским фрагментам геотраверсов Рубин-1 и Рубин-2 построены по фондовым материалам “Центра региональных геофизических и геоэкологических исследований ГЕОН”, а именно по данным о временах первых вступлений P- и S-волн (P – до удалений 300 км от источника колебаний, S – до 200–220 км).

Поля времен и скоростные разрезы по профилю ГСЗ Вижай–Нижняя Тура–Орск построены по материалам Института геофизики УрО РАН, принимавшего участие в работе Баженовской геофизической экспедиции (БГЭ) на данном профиле. Использование в этих исследованиях низкочастотной трехкомпонентной сейсмологической аппаратуры позволило выделить первые вступления не только продольных, но и поперечных волн до удалений 300 км от пунктов взрыва и построить по ним специальные поля времен. Скоростной разрез земной коры и верхов верхней мантии, построенный в изолиниях скорости поперечных волн V_s до глубины 60–80 км – новый результат исследований на профиле Вижай–Нижняя Тура–Орск, полученный при повторной обработке исходных данных.

Уточненные варианты однотипно построенных скоростных V_p и V_s разрезов земной коры по всем названным профилям и новый разрез V_s по про-

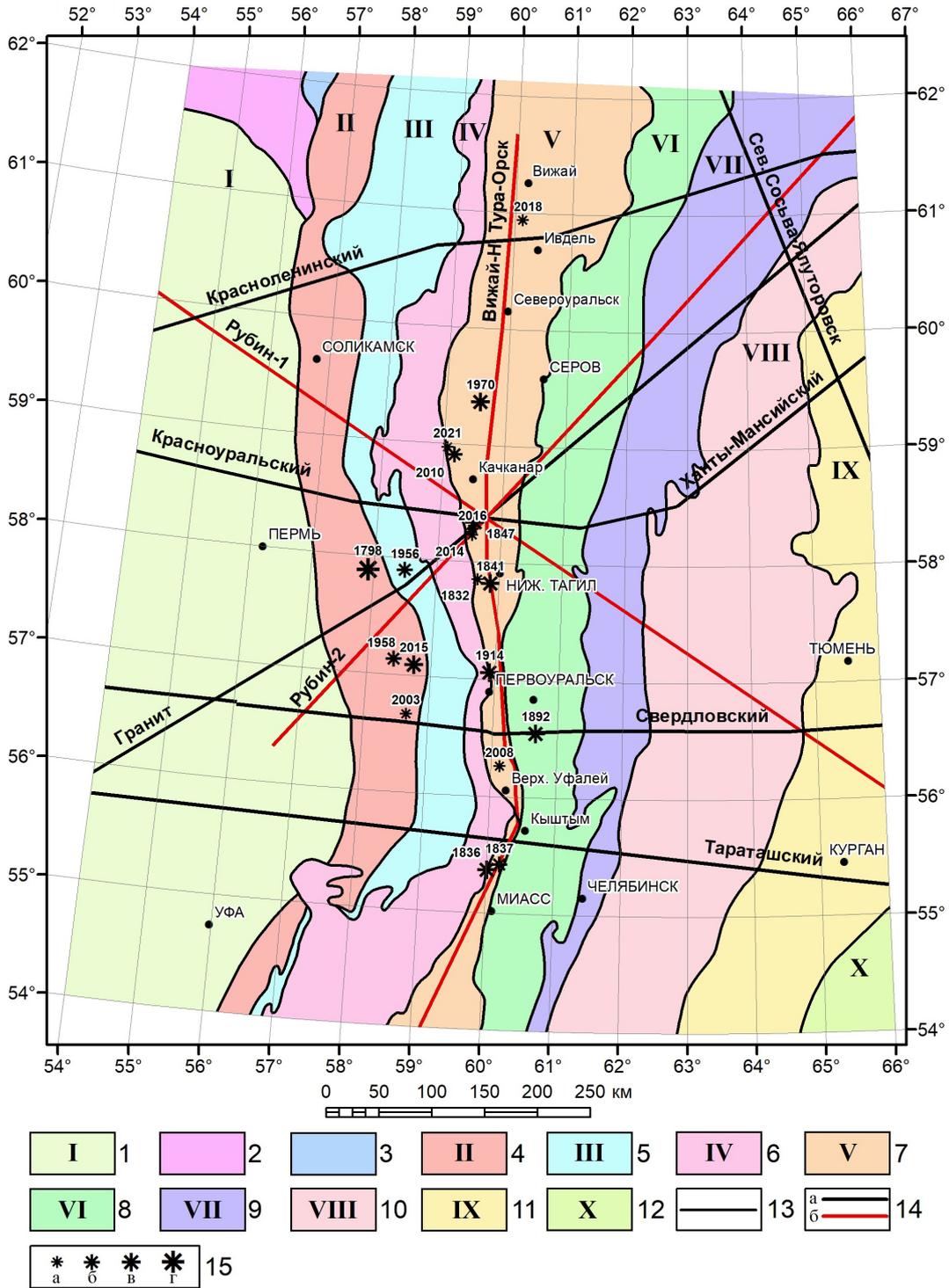


Рис. 1. Положение профилей ГСЗ и эпицентров местных землетрясений на схеме тектонического районирования, по И.Д. Соболеву (1986 г.).

Структуры I порядка (1–12): 1 – Волго-Уральская антеклиза, 2 – Тиманская антеклиза, 3 – Печорская синеклиза, 4 – Предуральский краевой прогиб, 5 – Западно-Уральская внешняя зона складчатости, 6 – Центрально-Уральское поднятие, 7 – Тагильско-Магнитогорский прогиб, 8 – Восточно-Уральское поднятие, 9 – Восточно-Уральский прогиб, 10 – Зауральское поднятие, 11 – Тюменско-Кустанайский прогиб, 12 – Тобольско-Убаганское поднятие; 13 – границы структур I порядка; 14 – профили ГСЗ и их названия (а), профили ГСЗ, по которым выделена широтная зональность исследуемой площади (б); 15 – эпицентры землетрясений Среднеуральской области повышенной сейсмичности и их год, магнитудой: ≤ 3 (а), ≤ 4 (б), ≤ 5 (в), ≤ 6 (г).

Fig. 1. Position of DSS profiles and epicenters of local earthquakes on the tectonic zoning scheme, according to I.D. Sobolev (1986).

Structures of the first order (1–12): 1 – Volga-Ural anticline, 2 – Timan anticline, 3 – Pechora syncline, 4 – Preural foredeep, 5 – Western Ural external folding zone, 6 – Central Ural uplift, 7 – Tagil-Magnitogorsk trough, 8 – East Ural uplift, 9 – East Ural trough, 10 – Transural uplift, 11 – Tyumen-Kustanay trough, 12 – Tobolsk-Ubagan uplift; 13 – boundaries of first order structures; 14 – DSS profiles and their names (a), DSS profiles, according to which the latitudinal zonation of the study area is identified (б); 15 – epicenters of earthquakes in the Middle Ural region of increased seismicity and their year, magnitude: ≤ 3 (a), ≤ 4 (б), ≤ 5 (в), ≤ 6 (г).

филю Вижай–Нижняя Тура–Орск пересчитаны по известным формулам (1)–(3) в разрезы, отражающие распределение ряда упругих параметров: коэффициента Пуассона σ , модуля всестороннего сжатия K и модуля сдвига G , а также отношения скоростей V_p/V_s :

$$\sigma = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}, \quad (1)$$

$$K = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right), \quad (2)$$

$$G = \rho V_s^2. \quad (3)$$

Плотность ρ при расчете модулей K и G оценивалась по двухпараметрической корреляционной зависимости (4) (Кашубин, 1984):

$$\rho = 0.18V_p + 0.40 \frac{V_p}{V_s} + 1.02. \quad (4)$$

Кроме модулей K и G , рассчитано также отношение этих модулей к плотности – K/ρ и G/ρ . Эти два функциональных параметра, при расчете которых не требуется использовать корреляционную зависимость *скорость–плотность*, так же как и сами модули K и G , характеризуют упругие и прочностные свойства среды. Разрезы в изолиниях K/ρ и G/ρ в точности повторяют рисунок разрезов, отражающих распределение самих модулей K и G , различаются только численные значения параметров. Для большей наглядности построены также разрезы в изолиниях аномалий отношения скоростей $\Delta(V_p/V_s)$, модуля всестороннего сжатия ΔK , модуля сдвига ΔG и аномалий отношения этих модулей и плотности – $\Delta(K/\rho)$ и $\Delta(G/\rho)$. Данные разрезы отражают отклонение конкретных значений указанных параметров от значений, осредненных на каждом гипсометрическом уровне по всему профилю. На плоскость всех разрезов вынесены по данным Сводного каталога землетрясений территории Восточно-Европейской платформы за период с древнейших времен до 2005 г. (Землетрясения и микросейсмичность..., 2007) и каталога ФИЦ ЕГС РАН с 2005 г. по 2021 г. (База данных..., 2024) проекции гипоцентров ближайших к профилям уральских землетрясений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Скоростные разрезы земной коры в изолиниях V_p , V_s и аномалий ΔV_p и ΔV_s по профилю Вижай–

Нижняя Тура–Орск приведены на рис. 2. В этих разрезах хорошо проявляются поперечная зональность и различия в глубинном строении Магнитогорского и Тагильского прогибов, а также переходной зоны между ними. В южной части (от Магнитогорска до Кыштыма) профиль проходит по Магнитогорскому прогибу, немного западнее его осевой линии, в переходной зоне (от Кыштыма до Первоуральска) – ближе к восточной границе прогиба, в северной (от Первоуральска до Североуральска) – по центру Тагильского прогиба, пересекает район сверхглубокой скважины СГ-4 и на участке от Североуральска до Ивделя отклоняется к западу, в сторону Платиноносного пояса.

Мощность земной коры уменьшается от 43–53 до 38–48 км в северном направлении. Тагильский прогиб, по сравнению с Магнитогорским, характеризуется более высокоскоростной корой как по распространению V_p , что подтверждает результаты предыдущих исследований (Дружинин и др., 1985), так и по распространению V_s . При этом скорость распространения поперечных волн увеличивается в Тагильском прогибе больше, чем скорость продольных и, соответственно, отношение скоростей V_p/V_s , наоборот, уменьшается по сравнению с Магнитогорским прогибом. На рис. 2 приведены графики изменения вдоль профиля средних скоростей $V_p(cp)$ и $V_s(cp)$, а также их отношения. Средняя скорость распространения Р- и S-волн в земной коре рассчитывалась с шагом 10 км вдоль профиля от скоростных уровней, соответствующих поверхностям консолидированного фундамента ($V_p = 5.6–6.2$, $V_s = 3.2–3.5$ км/с), до границы Мохо ($V_p = 7.7–8.0$, $V_s = 4.2–4.4$ км/с) по функции $V(h)$ как средневзвешенная по мощности h_i отдельных интервалов разреза, характеризующихся скоростью V_i (5):

$$V_{cp} = \frac{\sum h_i}{\sum \frac{h_i}{V_i}}. \quad (5)$$

Видно, что средняя скорость продольных волн растет от значений 6.4 км/с в Магнитогорском прогибе до 6.72 км/с в северной части Тагильского, скорость поперечных – от 3.65 до 3.93 км/с соответственно, а отношение $V_p(cp)/V_s(cp)$ при этом уменьшается с юга на север от 1.76 до 1.69. Этот факт свидетельствует о большей тектонической нарушенности земной коры Тагильского прогиба по сравнению с Магнитогорским.

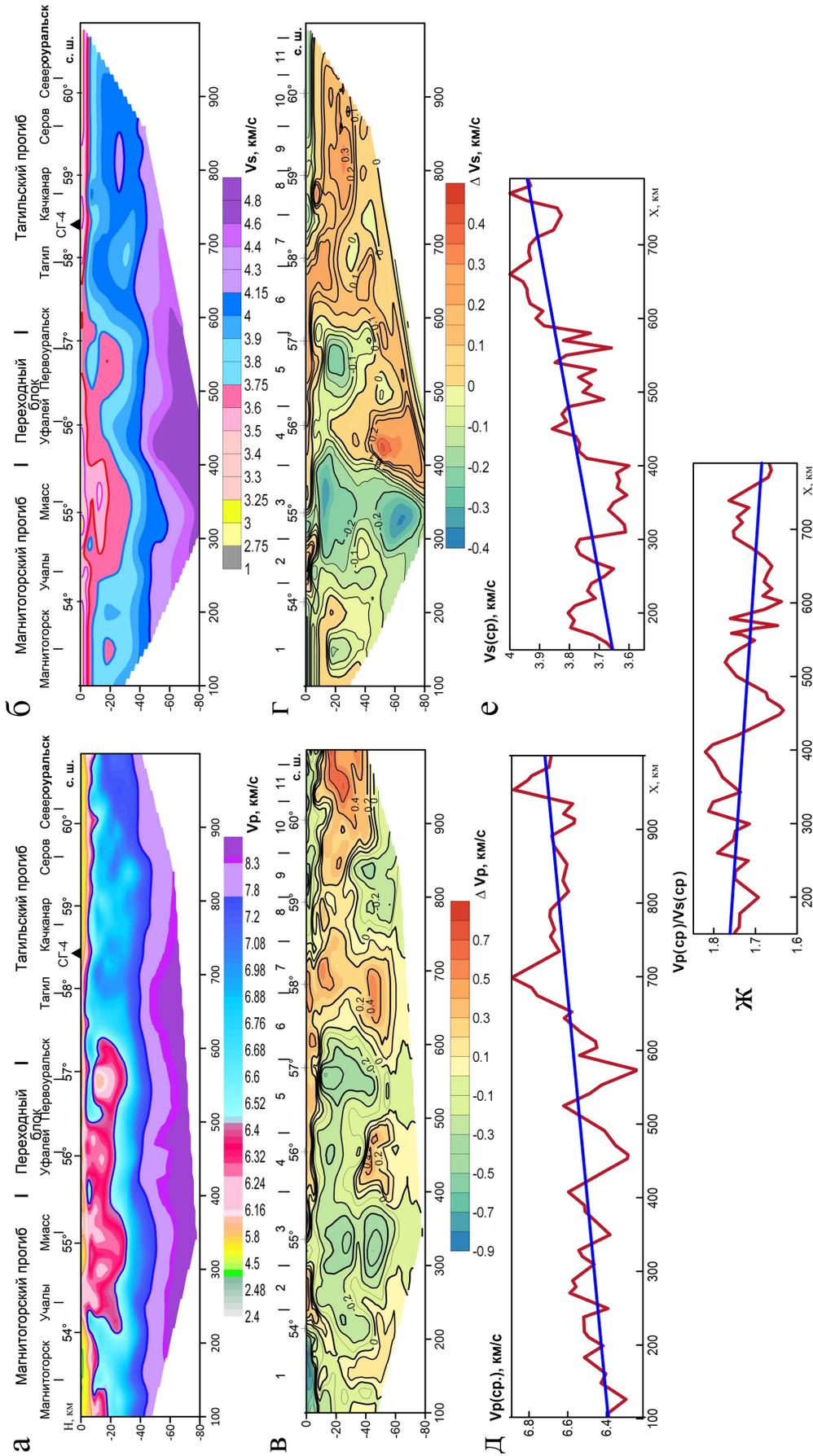


Рис. 2. Распределение скоростных параметров вдоль профиля Вижай–Нижняя Тура–Орск. Разрезы в изолиниях скоростей V_p (а), V_s (б) и их аномалий ΔV_p (в), ΔV_s (г). Графики изменения вдоль профиля средних коровых скоростей с линиями тренда V_p (сп) (д), V_s (сп) (е) и отношения V_p (сп)/ V_s (сп) (ж). Над разрезами показано положение Тагильского и Магнитогорского прогибов и менее крупных блоков, выделенных по скоростным параметрам: 1 – Магнитогорский, 2 – Учалинский, 3 – Миасский, 4 – Уфалейский, 5 – Первоуральский, 6 – Тагильский, 7 – Кушвинский, 8 – Качканарский, 9 – Серовский, 10 – Североуральский, 11 – Ивдельский.

Fig. 2. Distribution of speed parameters along the Vizhay–Nizhnyaya Tura–Orsk profile. Sections in velocity isolines V_p (a), V_s (b) and their anomalies ΔV_p (v), ΔV_s (g). Graphs of changes along the profile of average crustal velocities with trend lines V_p (average) (d), V_s (average) (e) and ratios V_p (average)/ V_s (average) (z). Above the sections the position of the Tagil and Magnitogorsk troughs and smaller blocks identified by speed parameters is shown: 1 – Magnitogorskiy, 2 – Uchalinskiy, 3 – Miasskiy, 4 – Ufaleyskiy, 5 – Pervouralskiy, 6 – Tagilskiy, 7 – Kushvinskiy, 8 – Kachkanarskiy, 9 – Serovskiy, 10 – Severouralskiy, 11 – Ivdel'skiy.

Кроме основных широтных блоков, соответствующих двум прогибам и переходной зоне между ними, по скоростным параметрам выделяются более мелкие блоки: три в Магнитогорском прогибе (Магнитогорский, Учалинский и Миасский), два переходных блока (Уфалейский и Первоуральский) и шесть в Тагильском прогибе (Нижнетагильский, Кушвинский, Качканарский, Серовский, Североуральский и Ивдельский). На рис. 2 над разрезами ΔV_p (в) и ΔV_s (г) показаны границы этих блоков. Самая высокоскоростная кора по V_p (ср) – в Нижнетагильском и Ивдельском блоках, самая низкоскоростная – в Уфалейском, скорость V_s в котором, наоборот, повышена, и в Первоуральском. Самые высокие скорости поперечных волн в коре наблюдаются в Уфалейском, Нижнетагильском, Качканарском и Серовском блоках, самые низкие – в Миасском, причем отношение средних скоростей в коре этого блока самое большое (1.78) в пределах профиля. Пониженные значения параметра V_p/V_s наблюдаются в коре Уфалейского, Первоуральского и Нижнетагильского блоков.

В распределении скоростных параметров по глубине также проявляются свои закономерности. На рис. 3 приведены графики изменения с глубиной скоростей V_p , V_s и отношения V_p/V_s , а также разрезы в изолиниях параметров V_p , V_s и V_p/V_s . При общем нарастании скорости распространения продольных и поперечных волн с глубиной наблюдается их понижение, особенно продольных, в средней части коры.

Так, скорость V_p в консолидированной коре Магнитогорского прогиба увеличивается от 5.6–6.2 до 6.3–6.5 км/с на глубине 6–8 км (с последующим понижением до 6.0–6.3 км/с в средней коре) и до 6.9–7.2 км/с в нижней. В Тагильском прогибе V_p увеличивается от 5.9–6.25 до 6.8–7.0 км/с на глубине 8–10 км, понижается до 6.2–6.5 км/с в средней коре и растет до 6.8–7.1 км/с в нижней. В верхней мантии обоих прогибов скорость V_p растет с глубиной от 7.7–8.0 до 8.3–8.4 км/с, при этом более низкие ее значения наблюдаются в Тагильском прогибе. Скорость V_s в коре Магнитогорского прогиба увеличивается от 3.0–3.5 до 3.6–3.9 км/с на глубине 6–8 км, понижается до 3.5–3.6 км/с в средней коре и снова увеличивается до 3.7–3.9 км/с в нижней. В Тагильском прогибе V_s увеличивается от 3.1–3.5 до 3.85–4.0 км/с на глубине 8–10 км (местами с понижением до 3.8–3.9 км/с в средней коре) и растет до 3.90–4.0 км/с в нижней. В верхней мантии скорость V_s от 4.1–4.2 до 4.4–4.6 км/с, минимальные значения – в Магнитогорском прогибе. Мощность низкоскоростного верхнемантийного слоя на данном профиле в среднем около 10–15 км, на глубине 50–65 км скорости увеличиваются до значений 8.3–8.4 и 4.4–4.6 км/с, характерных для Восточно-Европейской платформы (ВЕП). По материалам широтных профилей, ман-

тийный слой со скоростями 8.3–8.4 и 4.4–4.6 км/с, подстилающий низкоскоростной верхнемантийный слой, прослеживается от ВЕП до Восточно-Уральской и местами до Зауральской мегазон, для которых, как и для западносибирских структур, характерна низкоскоростная мантия. В трехмерной скоростной модели верхней мантии, приведенной в работе (Павленкова, 2011), показано именно такое распределение скорости V_p – 8.3 км/с в пределах ВЕП и 8.0 км/с в Западной Сибири.

Характер распределения по глубине отношения V_p/V_s повторяет основные особенности распределения скоростей V_p и V_s . Отношение скоростей связано непосредственно с коэффициентом Пуассона σ , который определяется составом и степенью нарушения кристаллических горных пород. Для них наиболее характерны значения $V_p/V_s = 1.7$ –1.85. Повышенные значения отмечаются в основном в верхней части коры, что может быть объяснено повышенной флюидонасыщенностью, и в нижней коре, глубже 30 км, где повышается основность и возрастают скорости V_p и V_s . В верхней мантии значения V_p/V_s убывают вдоль профиля от 1.9 в Магнитогорском прогибе до 1.8 в Тагильском, с глубиной растут до 1.9–2.0 и местами снова убывают. Выявлена следующая особенность: в средней коре на большей части профиля отношение $V_p/V_s \leq 1.7$, при этом волновод, который на скоростных разрезах не всегда четко проявляется, в распределении отношения V_p/V_s выглядит очень выразительно. Следует отметить, что и при первичной интерпретации материалов меридионального профиля по скорости V_p выделялись местами волновод в средней коре, точнее – несколько волноводов, чередующихся с высокоскоростными слоями, но не было обоснованных оценок упругих свойств этих волноводов по скорости поперечных волн (Дружинин и др., 1985). В настоящей работе такие оценки получены и позволяют говорить о нарушенном, ослабленном среднечорном слое с характерным понижением коэффициента Пуассона и отношения V_p/V_s . Иногда в нем выделяются два интервала пониженных упругих параметров: на глубине 8–12 и 15–25 км. Именно к этому слою приурочены в основном очаги (гипоцентры) местных землетрясений. В работе (Осипова и др., 2024) показано, что очаги большей части уральских землетрясений локализованы в интервале глубин 10–25 км.

На фоне описанной выше общей закономерности изменения отношения V_p/V_s с глубиной выделяются отдельные субвертикальные аномальные зоны пониженных до 1.6 значений отношения V_p/V_s (см. рис. 3д, е) и до 0.19–0.2 – коэффициента Пуассона (рис. 4а). На рис. 4а, б представлены результаты многоволновых исследований по профилю Вижай–Нижняя Тура–Орск. На рис. 4а показаны рассчитанные по V_p и по V_s модели распределе-

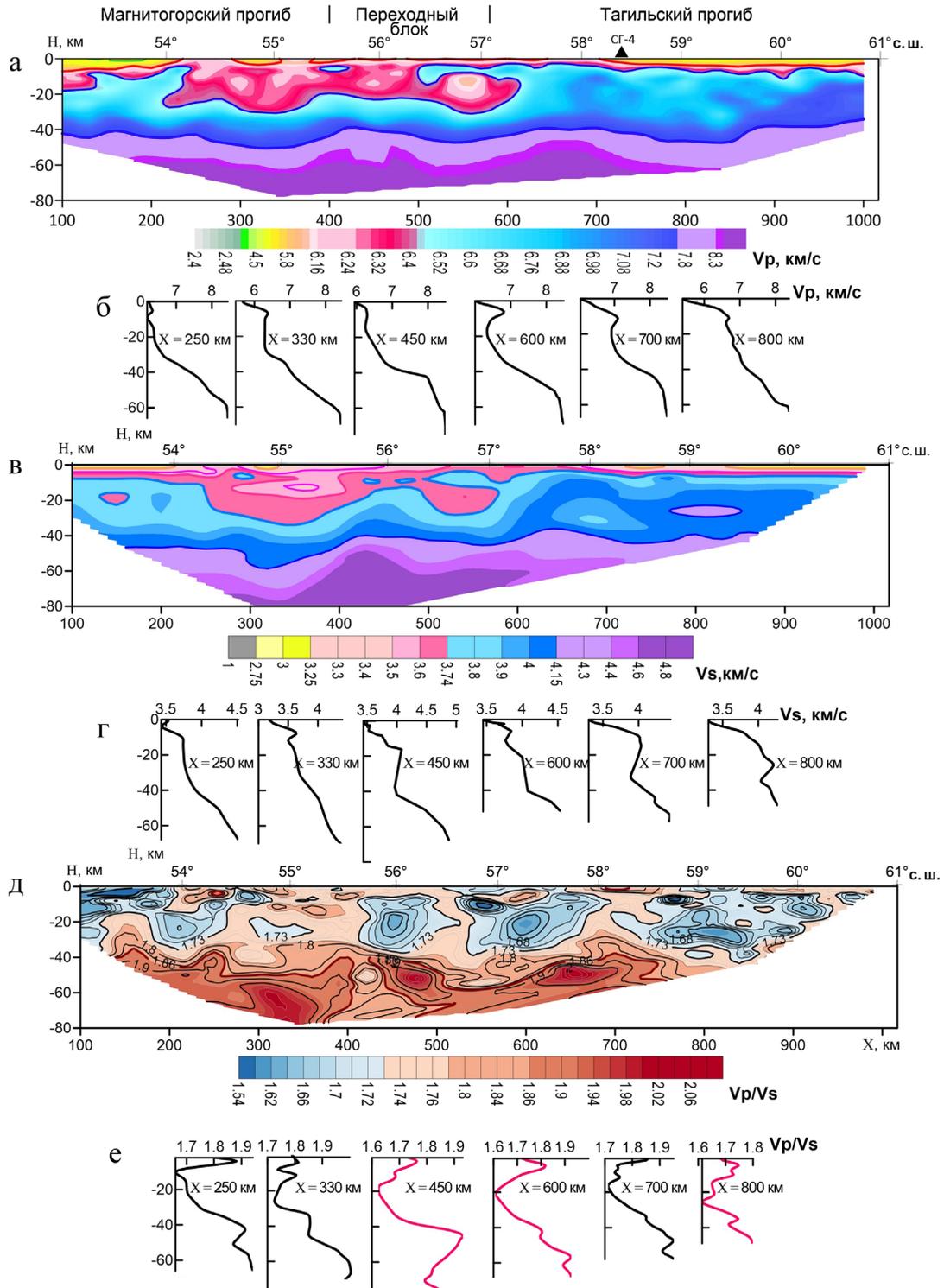


Рис. 3. Распределение скоростных параметров по глубине на профиле Вижай–Нижняя Тура–Орск.

Разрезы в изолиниях скоростей V_p (а), V_s (в), отношения V_p/V_s (д). Графики изменения с глубиной V_p (б), V_s (г) и V_p/V_s (е). Графики V_p/V_s , демонстрирующие аномальное понижение данного параметра до значений 1.6 в средней коре, отмечены красным цветом.

Fig. 3. Distribution of velocity parameters along the depth on the Vizhay–Nizhnyaya Tura–Orsk profile

Sections in isolines of velocities V_p (a), V_s (b), ratio V_p/V_s (d). Graphs of changes with depth V_p (б), V_s (г) and V_p/V_s (e). V_p/V_s graphs demonstrating an anomalous decrease in this parameter to values of 1.6 in the middle crust are marked in red.

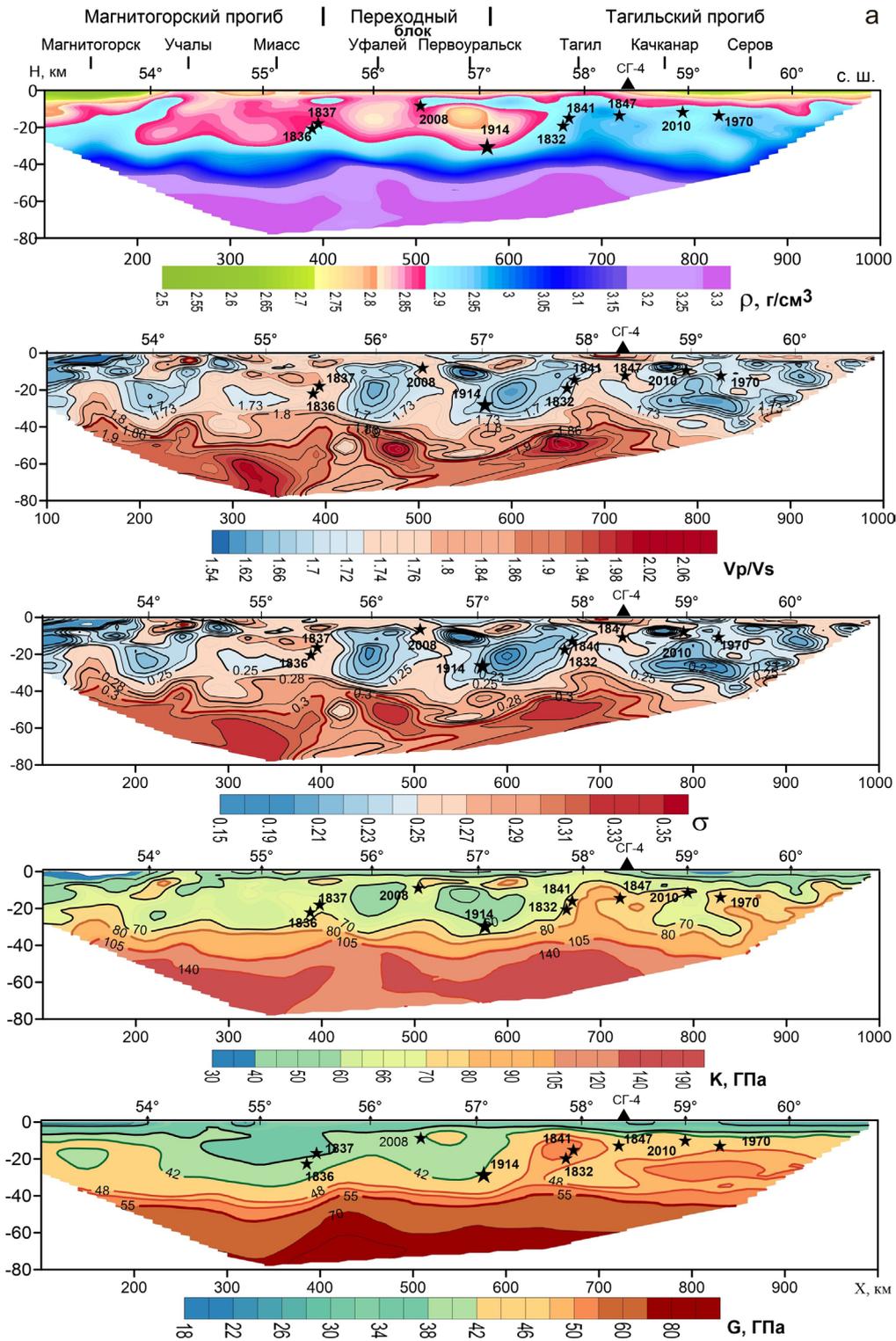


Рис. 4. Результаты многоволновых исследований по профилю Вижай–Нижняя Тура–Орск.

а. Рассчитанные по V_p - и V_s -модели распределения в земной коре и верхней мантии упругих параметров: плотности ρ , отношения скоростей V_p/V_s , коэффициента Пуассона σ , модуля объемного сжатия K и модуля сдвига G , с проекциями гипоцентров местных землетрясений.

a. Calculated V_p and V_s models of distribution in the earth's crust and upper mantle of elastic parameters: density ρ , velocity ratio V_p/V_s , Poisson's ratio σ , bulk compression modulus K and shear modulus G , with projections of hypocenters of local earthquakes.

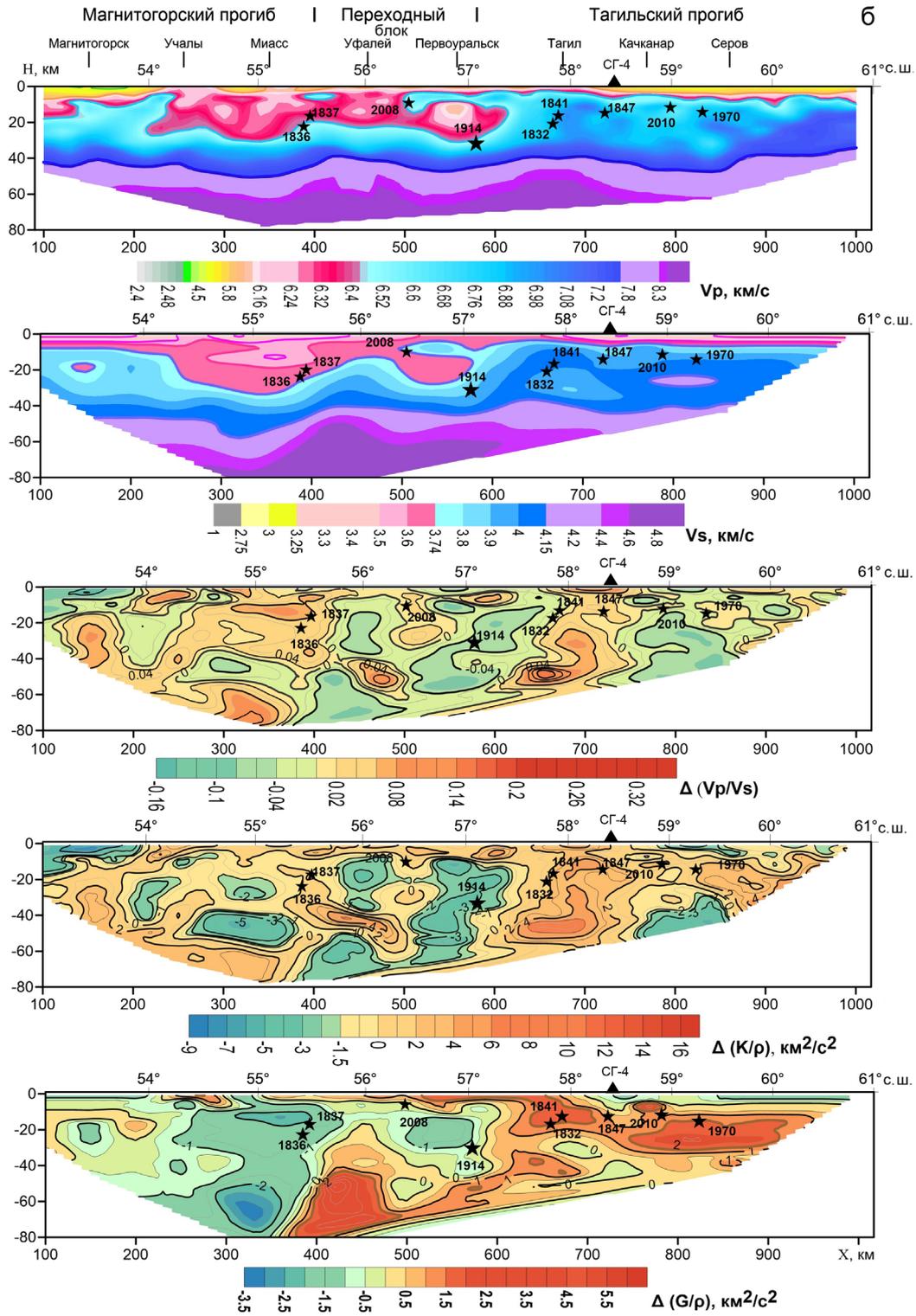


Fig. 4. Results of multiwave studies along the Vizhay–Nizhnyaya Tura–Orsk profile.

б. Скоростные разрезы V_p , V_s и рассчитанные по ним модели распределения аномалий отношения скоростей $\Delta(V_p/V_s)$, отношения модуля объемного сжатия к плотности $\Delta(K/\rho)$, отношения модуля сдвига к плотности $\Delta(G/\rho)$ с проекциями гипоцентров местных землетрясений.
 б. Velocity sections V_p , V_s and the models of distribution of anomalies of the velocity ratio $\Delta(V_p/V_s)$, the ratio of the bulk compression modulus to the density $\Delta(K/\rho)$, the ratio of the shear modulus to the density $\Delta(G/\rho)$ calculated from them – with projections of hypocenters of local earthquakes.

ния в земной коре и верхней мантии упругих параметров: плотности ρ , отношения скоростей V_p/V_s , коэффициента Пуассона σ , модуля объемного сжатия K и модуля сдвига G . При сопоставлении моделей отношения скоростей и коэффициента Пуассона видно, что распределение в них параметров V_p/V_s и σ полностью идентично.

На рис. 4б приведены скоростные разрезы V_p , V_s и рассчитанные по ним модели распределения аномалий отношения скоростей $\Delta(V_p/V_s)$, отношения модуля объемного сжатия к плотности $\Delta(K/\rho)$, отношения модуля сдвига к плотности $\Delta(G/\rho)$. На все разрезы вынесены проекции гипоцентров ближайших к линии профиля землетрясений.

Известно, что низкие значения коэффициента Пуассона и отношения V_p/V_s могут быть связаны либо с повышенным содержанием кремнезема, либо с повышенной нарушенностью, трещиноватостью пород. Поскольку указанные зоны пересекают всю кору и уходят в мантию, что хорошо видно на разрезе в изолиниях аномалий отношения скоростей (см. рис. 4б), объяснять их существование только повышенным содержанием кремнезема, особенно на мантийных глубинах, вряд ли имеет смысл. По-видимому, это области нарушенных, трещиноватых пород с пониженными упругими свойствами и плотностью, которые можно отождествлять с широтными глубинными дислокациями. Выделяются три такие зоны повышенной трещиноватости на меридиональном профиле: в районе 56° с. ш. (г. Уфалей), $57\text{--}58^\circ$ с. ш. (г. Первоуральск–г. Нижний Тагил) и 59° с. ш. (г. Качканар). На профилях Рубин-2 и Рубин-1, в отличие от меридионального профиля, между 57° и 58° с. ш. выявлена не одна, а две подобные зоны. Еще одна зона повышенной трещиноватости выделяется на профиле Рубин-2 между 60° и 61° с. ш. (г. Ивдель). Положение всех выявленных по упругим параметрам широтных зон повышенной трещиноватости в сопоставлении с положением эпицентров землетрясений показано на схеме тектонического районирования И.Д. Соболева (рис. 5).

Самая южная в пределах исследуемой площади зона пониженных упругих свойств, Уфалейская (56° с. ш.), расположена в районе Тараташского выступа ВЕП. Она хорошо прослеживается от верхней коры до глубины 80 км на всех разрезах по профилю Вижай–Нижняя Тура–Орск, отражающих распределение аномалий отношения скоростей $\Delta(V_p/V_s)$, модуля объемного сжатия к плотности $\Delta(K/\rho)$ и модуля сдвига к плотности $\Delta(G/\rho)$. Отношение V_p/V_s в этой зоне понижено до значений 1.6–1.65, ширина зоны около 50 км. В аномалиях $\Delta(G/\rho)$ ей соответствует хорошо выраженная область повышенных значений, а в аномалиях $\Delta(K/\rho)$ – пониженных. В скоростных разрезах коры по P- и S-волнам здесь отмечается понижение скорости V_p при аномальном повышении скорости

V_s . В центре зоны ($X = 450$) значение средней скорости в коре $V_p(cp) - 6.25$ км/с, а $V_s(cp) - 3.88$ км/с (см. рис. 2). Пониженные упругие параметры верхней мантии в пределах данной зоны хорошо видны на плотностном разрезе и в моделях распределения коэффициента Пуассона и модуля всестороннего сжатия. Модуль сдвига в верхней мантии здесь, как и в коре, повышен (см. рис. 4а). У южной границы зоны, в районе Тараташского профиля ГСЗ, выявлен резкий подъем поверхности Мохо с 50 до 40 км.

Положение южной границы выделенной нами Уфалейской зоны с аномально пониженными упругими свойствами, пограничной между Магнитогорским и Тагильским прогибами, соответствует, по Н.Г. Берлянд (Геология и полезные ископаемые..., 2011), положению “Главного поперечного трансрегионального разлома” Урала. Поскольку скоростные разрезы, построенные по профилям Рубин-1, Рубин-2, начинаются севернее 56° с. ш., сопоставить с ними особенности глубинного строения аномальной Уфалейской широтной зоны, выделенной на меридиональном профиле, нет возможности. Однако есть опубликованные сейсмические и геолого-геофизический разрезы земной коры по профилю Гранит, на которых на той же широте (56° с. ш. и 54° в. д.) показана зона “повышенной трещиноватости” (Геотраверс “ГРАНИТ”..., 2002). Южнее широтной Уфалейской зоны в разрезах по меридиональному профилю выделяется Миасский блок более плотных, ненарушенных пород с повышенными коэффициентом Пуассона, отношением скоростей V_p/V_s и значительно пониженным модулем сдвига G . К краевой зоне этого Миасского блока, вблизи его контакта с Уфалейской зоной, приурочены очаги Миасско-Златоустовских землетрясений 1836 и 1837 гг. Эпицентры этих землетрясений расположены в западном борту Тагильско-Магнитогорского прогиба, отличающегося повышенными упругими параметрами земной коры, контрастными по отношению к аналогичным параметрам Центрально-Уральского поднятия, в месте пересечения с выделенной широтной зоной повышенной трещиноватости.

Следующая подобная зона, Первоуральская, выявлена в районе 57° с. ш. на профилях Рубин-1 и Рубин-2 и отличается теми же характерными чертами упругой модели: пониженным отношением V_p/V_s при повышенных значениях скорости поперечных волн, пониженным модулем всестороннего сжатия и повышенным модулем сдвига (рис. 6, 7). На профиле Вижай–Нижняя Тура–Орск Первоуральская зона почти сливается с Нижнетагильской, так как коровая часть аномалии $\Delta(V_p/V_s)$ сдвинута по отношению к мантийной в сторону г. Н. Тагила, т. е. на север. Характеризуется также пониженным отношением V_p/V_s и значительно пониженным модулем всестороннего сжатия.

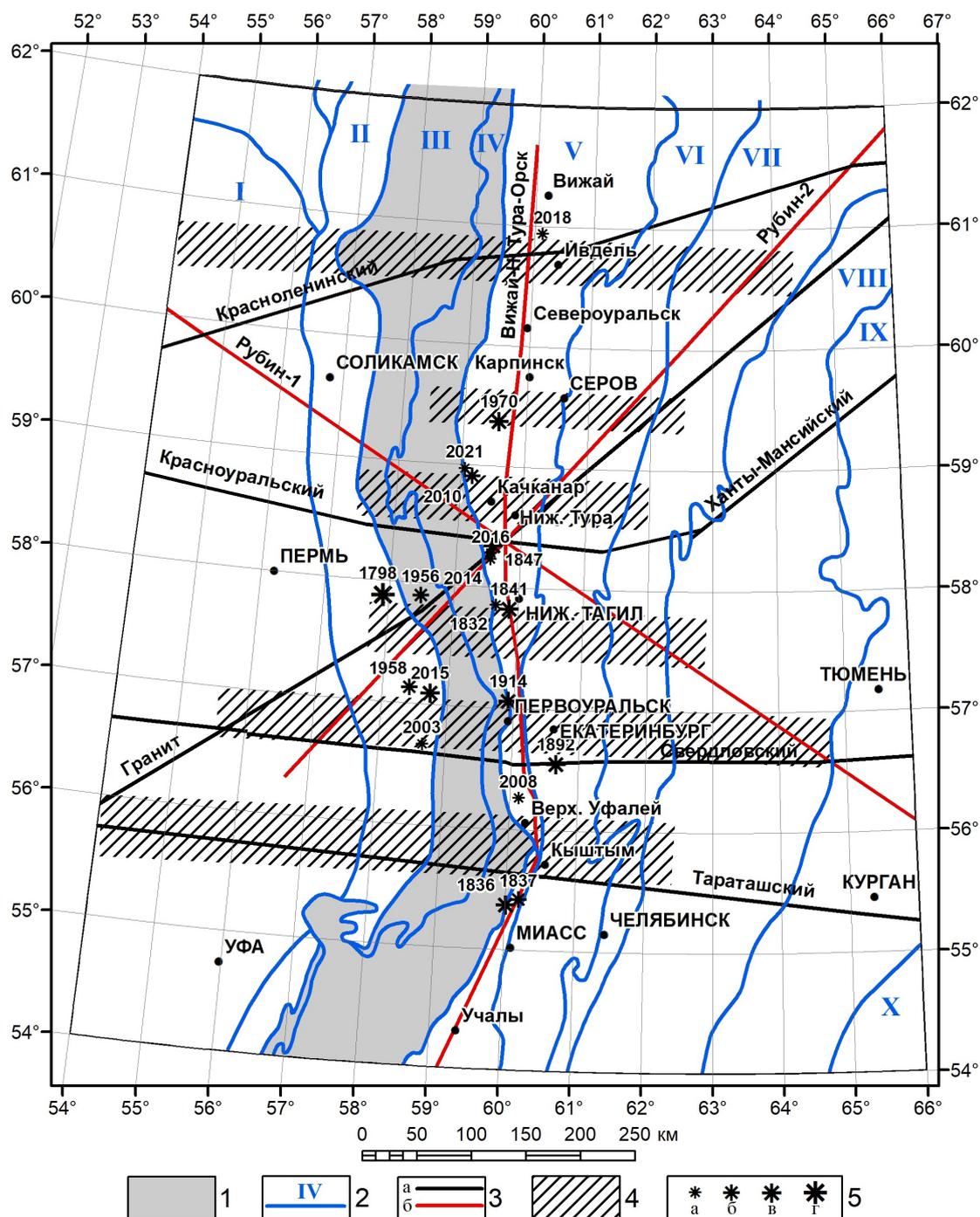


Рис. 5. Схема расположения широтных зон повышенной трещиноватости, выделенных по распределению упругих параметров в земной коре, и эпицентров тектонических землетрясений.

1 – область орогена (Западной зоны складчатости и Центрально-Уральского поднятия); 2 – границы структур I порядка и их номера (см. рис. 1); 3 – профили ГСЗ (а), профили ГСЗ, по которым выделена широтная зональность исследуемой площади (б); 4 – широтные зоны повышенной трещиноватости; 5 – эпицентры землетрясений Среднеуральской области повышенной сейсмичности и их год, магнитудой: ≤ 3 (а), ≤ 4 (б), ≤ 5 (в), < 6 (г).

Fig. 5. Scheme of the location of latitudinal zones of increased fracturing, identified by the distribution of elastic parameters in the earth's crust, and the epicenters of tectonic earthquakes.

1 – area of the orogen (Western fold zone and Central Ural uplift); 2 – boundaries of structures of the first order and their numbers (see on Fig. 1); 3 – DSS profiles (a), DSS profiles, which identify the latitudinal zonation of the study area (б); 4 – latitudinal zones of increased fracturing; 5 – epicenters of earthquakes in the Middle Urals region with increased seismicity and their year, magnitude: ≤ 3 (a), ≤ 4 (б), ≤ 5 (в), < 6 (г).

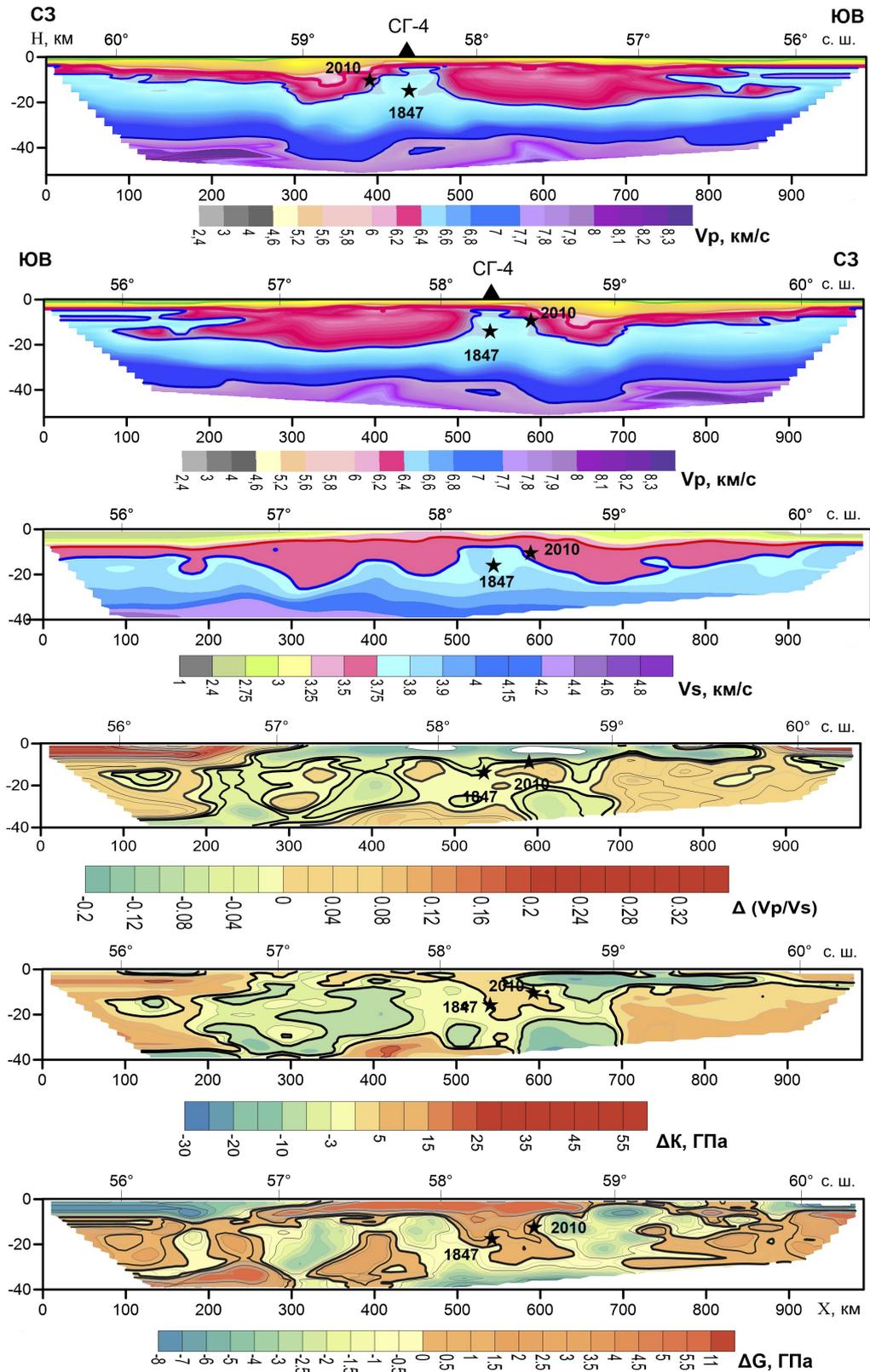


Рис. 6. Результаты многоволновых исследований по профилю Рубин-1.

Разрезы в изолиниях скоростей V_p , V_s , аномалий отношения скоростей $\Delta(V_p/V_s)$, модуля объемного сжатия ΔK , модуля сдвига ΔG с проекциями гипоцентров местных землетрясений. Разрез V_p показан в двух вариантах: традиционно – с северо-запада на юго-восток (Атлас..., 2013) и с юго-востока на северо-запад, как и разрезы V_s , $\Delta(V_p/V_s)$, ΔK и ΔG , – для сопоставления с разрезами по профилям Рубин-2 и Вижай–Нижняя Тура–Орск.

Fig. 6. Results of multiwave studies on the Rubin-1 profile.

Sections in isolines of velocities V_p , V_s , velocity ratio anomalies $\Delta(V_p/V_s)$, bulk compression modulus ΔK , shear modulus ΔG with projections of hypocenters of local earthquakes. Section V_p is shown in two versions: traditionally – from northwest to southeast (Atlas..., 2013) and from southeast to northwest, as well as sections V_s , $\Delta(V_p/V_s)$, ΔK and ΔG – for comparisons with sections along the Rubin-2 and Vizhay–Nizhnyaya Tura–Orsk profiles.

Распределение модуля сдвига в данной зоне сложное. В отличие от Уфалейской зоны в Первоуральской он повышен только в нижней коре и мантии, в верхней коре значение данного параметра повышается ближе к 58° с. ш., уже в пределах Тагильской зоны. Первоуральская зона вместе с Уфалейской являются пограничными между Магнитогорским прогибом и высокоскоростным Тагильским, отличающимся большей тектонической нарушенностью, при этом по своим упругим свойствам они ближе именно к Тагильскому прогибу. Ширина Первоуральской зоны около 50 км.

К данной зоне повышенной нарушенности, в месте ее пережима (сдвига) и вблизи пересечения с меридиональной зоной пониженных упругих свойств, соответствующей Уральскому орогену, приурочено известное Билимбаевское землетрясение 1914 г., эпицентр которого расположен в пограничной зоне между Центрально-Уральским поднятием и Тагильским прогибом, резко суженным в этом месте. Эпицентры Шалинского землетрясения 1958 г. и Среднеуральского 2015 г. также приурочены к Первоуральской широтной зоне. Расположены они на одной широте с Билимбаевским землетрясением, но не в Тагильском, а в Предуральском прогибе, обрамляющем Уральский ороген с запада. Здесь же, в восточном борту Предуральского прогиба, в районе южной границы Первоуральской зоны, находится эпицентр Сабарского землетрясения 2003 г. Вероятно, данная широтная зона существует и западнее уральских структур, в пределах Калтасинского авлакогена. На геолого-геофизическом разрезе земной коры по профилю Гранит на широте Первоуральской зоны (57° с. ш.) показана зона “высокой степени тектонической проработки” (Геотраверс “ГРАНИТ”..., 2002). На построенном нами по фондовым материалам БГЭ скоростном разрезе V_p по профилю Гранит в этом месте выявлено резкое нарушение (провал) границы Мохо.

Следует отметить, что в сейсмических разрезах по меридиональному профилю рассмотренные выше две зоны глубинной нарушенности – Уфалейская и Первоуральская, разделяющие Магнитогорский и Тагильский прогибы, являются самыми аномальными по своим пониженным упругим свойствам и плотности и могут считаться, вероятно, тектоническими зонами. По результатам измерений напряженного состояния среды, выполненных в горных выработках Урала, показано, что вкрест простирания уральских структур действу-

ют сжимающие напряжения, а по простиранию, т. е. в меридиональном направлении, породы испытывают как сжатие, так и растяжение. При этом максимальные сжимающие и растягивающие напряжения наблюдаются на участке $55.5\text{--}57.0^\circ$ с. ш., между г. Екатеринбург и г. Челябинском (Алейников, 1989; Кашубин и др., 2001), т. е. в пределах Уфалейской и Первоуральской зон. По результатам моделирования вероятной причиной такого распределения напряжений является динамическое влияние клиновидного Уфимского выступа Восточно-Европейской платформы (Алейников, 1989; Филатов, 1990). В этой же области наблюдается уменьшение скорости современных вертикальных движений дневной поверхности вплоть до отрицательных значений, а также уменьшение высоты Уральских гор, т. е. амплитуды неоген-четвертичных поднятий. Первоуральская зона, ранее выделенная по результатам интерпретации материалов меридионального профиля (Дружинин и др., 1985), совпадает, по мнению авторов указанной работы, с Курско-Красноуфимской мегазоной субширотных дислокаций Восточно-Европейской платформы. Тектоническая широтная зона, аналогичная нашей Уфалейской, в работе 1985 г. также была выделена, но несколько южнее – на широте г. Миасс (55° с. ш.).

Третья, выделенная по Р- и S-волнам, широтная зона повышенной трещиноватости, Тагильская, прослеживается в районе 58° с. ш. На разрезах в изолиниях коэффициента Пуассона, отношения скоростей V_p/V_s и аномалий этого отношения $\Delta(V_p/V_s)$ по профилю Вижай–Нижняя Тура–Орск две зоны, Первоуральская и Тагильская, почти сливаются, как уже отмечено выше, но на всех сейсмических разрезах по профилям Рубин-1 и Рубин-2 они разделены и характеризуются повышенными значениями скорости поперечных волн и модуля сдвига. Северной этой зоны выделяется высокоскоростной, по данным продольных волн, Кушвинский блок с повышенными значениями модуля всестороннего сжатия K и отношения V_p/V_s . К границе этого блока повышенных прочностных свойств с Тагильской зоной повышенной нарушенности приурочены Тагильские землетрясения 1832, 1841 гг. и Кушвинское 1847 г., эпицентры которых находятся в Тагильском прогибе, а также два землетрясения вблизи восточного борта Предуральского прогиба – 1956 г. в районе п. Кын и 1798 г. в районе г. Пермь (самое сильное землетрясение доинструментального периода).

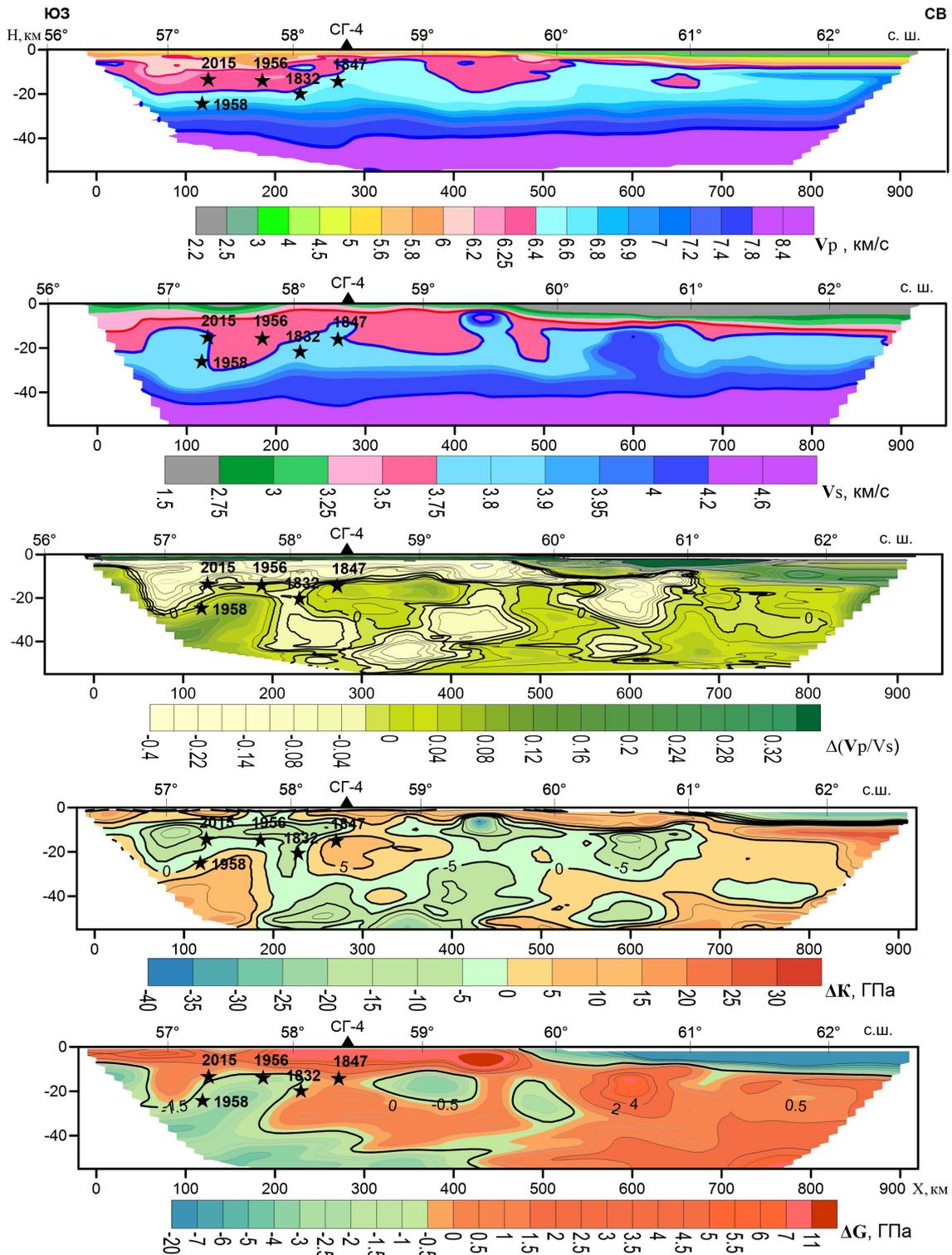


Рис. 7. Результаты многоволновых исследований по профилю Рубин-2.

Разрезы в изолиниях скоростей V_p , V_s и аномалий отношения скоростей $\Delta(V_p/V_s)$, модуля объемного сжатия ΔK , модуля сдвига ΔG с проекциями гипоцентров местных землетрясений.

Fig. 7. Results of multiwave studies on the Rubini-2 profile.

Sections in isolines of velocities V_p , V_s and anomalies of the velocity ratio $\Delta(V_p/V_s)$, bulk compression modulus ΔK , shear modulus ΔG with projections of hypocenters of local earthquakes.

Зона повышенной нарушенности в районе 59° с. ш., Качканарская, проявляется в разрезах по меридиональному профилю Вижай–Нижняя Тура–Орск от г. Н. Туры почти до г. Карпинска как область пониженных значений отношения V_p/V_s и модуля объемного сжатия при повышенной скорости поперечных волн. На профиле Рубин-2 зона с подобными параметрами проявляется в верхней коре на широте Серова–Карпинска, а в нижней – на широте г. Н. Туры–г. Качканара, т. е. имеет место выраженное южное падение зоны (или сдвиг?). С учетом этого обстоятельства, а также того факта, что на профиле Рубин-1 область повышенной нарушенности выделяется только на широте г. Качканара, всю аномальную зону в районе 59° с. ш. разделили на Качканарскую и Серовскую. Следует отметить, что на профиле Рубин-1 Качканарская широтная зона повышенной нарушенности пересекает в данном месте меридиональную зону пониженных упругих параметров, соответствующую Центрально-Уральскому поднятию, и отличается от других широтных трещиноватых зон пониженным модулем сдвига. На уровне северной границы зоны, на широте г. Карпинска, на меридиональном профиле наблюдается резкий подъем границы Мохо. В месте пересечения Тагильского прогиба и двух широтных зон, Качканарской и Серовской, расположены эпицентры Качканарских землетрясений 2010 и 2021 гг. и Серовского землетрясения 1970 г. На карте поперечной зональности глубинного строения земной коры Урала, составленной Н.Г. Берлянд (Геология и полезные ископаемые..., 2011), в районе 59 с. ш. показан трансрегиональный секущий разлом.

Еще одна широтная зона с пониженными упругими свойствами выделена на широте г. Ивделя по материалам исследований на профиле Рубин-2. Как и другие рассмотренные широтные зоны повышенной нарушенности, Ивдельская зона в параметрических сейсмических разрезах отличается повышенными значениями скорости V_s и модуля сдвига G , а также отрицательными аномалиями параметра V_p/V_s и модуля всестороннего сжатия K . На меридиональном профиле разрезы, отражающие распределение скорости V_s и всех упругих параметров, построены до широты г. Североуральска, т. е. до 60° с. ш., как и на профиле Рубин-1. Поэтому для прослеживания Ивдельской широтной зоны западнее профиля Рубин-2 рассмотрен фрагмент сейсмического разреза А.В. Егоркина по профилю Рубин-1 (Атлас..., 2013). Повышенные на соответствующей широте скорости V_s и пониженные значения параметра V_p/V_s на этом разрезе позволили протянуть Ивдельскую зону повышенной нарушенности от профиля Рубин-2 до профиля Рубин-1. В работе (Мартышко и др., 2024) по зонам погружения намагниченного нижнекорового слоя, выделенного при построении трехмерной магнит-

ной модели земной коры Среднеуральского региона и сопоставленного со скоростным разрезом V_p по профилю Гранит (Геотраверс “ГРАНИТ”..., 2002), прослежены субширотные зоны пониженных магнитных свойств и пониженных скоростей. Эти зоны, в том числе на широте г. Ивделя, соответствуют в основном зонам повышенной трещиноватости, выделенным в данной работе по результатам совместной интерпретации P- и S-волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам повторной интерпретации материалов уральских профилей ГСЗ методом двумерной сейсмической томографии построены градиентные скоростные разрезы в изолиниях V_p и V_s , не зависящие друг от друга, и на их основе выполнена оценка ряда параметров упругой модели земной коры и верхов мантии Среднеуральской области повышенной сейсмичности. Получены новые данные о глубинном строении этой области.

На основе материалов меридионального профиля Вижай–Нижняя Тура–Орск показано, что Тагильский прогиб, по сравнению с Магнитогорским, характеризуется менее мощной и более высокоскоростной по распространению как продольных, так и поперечных волн корой и более низкоскоростной по распространению продольных волн (при повышенной скорости поперечных) верхней мантией. Отношение скоростей V_p/V_s и в коре, и в верхней мантии Тагильского прогиба значительно понижено, что свидетельствует о тектонической нарушенности и характерно для районов повышенной сейсмичности.

В средней части земной коры вдоль всего профиля выделен разупрочненный, ослабленный слой, отличающийся пониженной скоростью продольных волн V_p и пониженными значениями параметра V_p/V_s и коэффициента Пуассона. К этому слою приурочено большинство очагов местных землетрясений.

Выделены и физически охарактеризованы контрастные по плотности и упругим свойствам блоки в земной коре, границы между которыми являются участками концентрации глубинных внутрикоровых напряжений и могут рассматриваться как потенциально неустойчивые объекты, в том числе широтные зоны повышенной трещиноватости. Эти зоны соответствуют в основном широтным дислокациям, выделенным ранее по другим критериям (Дружинин и др., 1985, 2015; Дружинин, Осипов, 2016; Геология и полезные ископаемые..., 2011), и уточняют их расположение и упругие свойства. Две из выделенных широтных зон, Уфалейская и Первоуральская, разделяющие Магнитогорский и Тагильский прогибы, являются самыми аномальными по своим пониженным упругим свойствам (особенно Уфалейская) и прослеже-

ны не только в земной коре, но и в мантии, до глубины 80 км.

Выявлен один из характерных сейсмических признаков широтных, секущих уральские структуры, дислокаций – повышенная скорость распространения поперечных волн при пониженной скорости продольных.

Показана приуроченность эпицентров большинства уральских землетрясений к пограничным зонам между Уральским орогеном и двумя обрамляющими его прогибами, Тагильско-Магнитогорским и Предуральским, отличающимися повышенными упругими параметрами земной коры, контрастными по отношению к структурам орогена, в местах пересечения этих субмеридиональных зон с выделенными широтными зонами повышенной трещиноватости.

Таким образом, совместная интерпретация продольных и поперечных волн позволила получить новую информацию о глубинном строении Среднеуральской области повышенной сейсмичности и объяснить закономерность локализации уральских землетрясений в этой области ее повышенной тектонической нарушенностью. Полученные результаты по определению упругих свойств изучаемой среды, особенно скорости V_s , параметра V_p/V_s и коэффициента Пуассона, свидетельствуют о геологической информативности такой интерпретации и могут быть использованы в дальнейшем для оценки вещественного состава земной коры, ее напряженно-деформированного состояния, истории развития, а также для сейсмического и минерагенического прогнозирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алейников А.Л. (1989) Исследование состава и динамических условий формирования земной коры Среднего Урала на основе геофизических моделей. Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Свердловск: СГИ, 290 с.
- Алейников А.Л., Беллавин О.В., Халевин Н.И. (1978) Система линеаментов и особенности размещения полезных ископаемых в Уральском регионе. *Упругие волны промышленных взрывов и исследование земной коры Урала*. Сб. ст. Свердловск: УНЦ АН СССР, 30-36.
- Алейников А.Л., Немзоров Н.И., Халевин Н.И. (1986) Многоволновая сейсмика при изучении недр рудных районов. М.: Наука, 112 с.
- Атлас "Опорные геолого-геофизические профили России. Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год". (2013) СПб: электронное издание Роснедра ВСЕГЕИ. <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/seismic/>
- База данных "Землетрясения России". [Электронный ресурс]. URL: <http://eqru.gsras.ru> (дата обращения 12.05.2024).
- Берлянд Н.Г. (1982) Районирование Урала по типу строения земной коры. *Сов. геол.*, **11**, 78-87.
- Геология и полезные ископаемые России. (2011) В 6 т. Т. 1. Запад России и Урал. Кн. 2. Урал. Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 584 с.
- Геотраверс "ГРАНИТ": Восточно-Европейская платформа – Урал – Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований). (Под ред. С.Н. Кашубина). (2002) Екатеринбург: Гл. упр-е природных ресурсов и охраны окр. среды МПР России по Свердл. обл., Баженовская геофизическая экспедиция, 312 с.
- Гуляев А.Н., Осипова А.Ю. (2019) Зоны возможного возникновения очагов ощутимых землетрясений на Урале. *Изв. вузов. Горн. журн.*, **8**, 68-80.
- Дружинин В.С., Гуляев А.Н., Колмогорова В.В., Парыгин Г.И., Уткин В.И., Кашубин С.Н. (2004) О тектонической природе уральских землетрясений. *Геофизика*, **3**, 56-65.
- Дружинин В.С., Кашубин С.Н., Вальчак В.И., Кашубина Т.В., Рыбалка А.В. (1985) Глубинное строение Урала по меридиональному профилю ГСЗ Нижняя Тура–Орск. *Сов. геол.*, **1**, 74-86.
- Дружинин В.С., Колмогорова В.В., Кусонский О.А., Парыгин Г.И., Пустовалов Н.А., Силина И.К. (2007) Сведения о сейсмичности Среднего Урала по инструментальным данным. *Геофизика XXI столетия: 2006 г.* Сб. тр. Восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. Тверь, 169-178.
- Дружинин В.С., Осипов В.Ю. (2016) Субширотные дислокации земной коры Уральского региона – звенья системы линеаментов Евразийского континента. *Уральск. геофиз. вестн.*, **2**(28), 33-47.
- Дружинин В.С., Осипов В.Ю., Начапкин Н.И. (2015) Субширотные дислокации в модели земной коры Приуральской области Западно-Сибирской геосинеклизы. *Уральск. геофиз. вестн.*, **2**(26), 13-23.
- Егоркин А.В. (1996) Многоволновые глубинные сейсмические исследования. *Геофизика*, **4**, 25-30.
- Егоркин А.В. (2000) Геологическая информативность многоволнового ГСЗ на примере изучения севера европейской части России. *Регион. геол. и металлогения*, **10**, 85-93.
- Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики ВосточноЕвропейской платформы. (2007) (Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина). Кн. 1: Землетрясения. Петрозаводск: Карельск. НЦ РАН., 381 с.
- Кашубин С.Н. (1984) Методика анализа физических свойств горных пород при региональных сейсмических исследованиях (на примере Тагильско-Магнитогорского прогиба). *Геофизические методы поисков и разведки рудных и нерудных месторождений*. Свердловск, 83-91.
- Кашубин С.Н. (1994) Многоволновая сейсмометрия при изучении структуры, состава и динамического состояния земной коры Урала. Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Свердловск: ИГ УрО РАН, 43 с.
- Кашубин С.Н., Дружинин В.С. (1999) Развитие метода ГСЗ на Урале. *Физика Земли*, **7-8**, 30-43.
- Кашубин С.Н., Дружинин В.С., Гуляев А.Н., Кусонский О.А., Ломакин В.С., Маловичко А.А., Никитин С.Н., Парыгин Г.Н., Рыжий Б.П., Уткин В.И. (2001) Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона. Екатеринбург: УрО РАН, 124 с. ISBN: 5-7691-1212-3
- Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Вино-

- куров И.Ю., Вяткина Д.В., Кашубина Т.В., Крупнова Н.А., Кудрявцев И.В., Сакулина Т.С., Татаринцов В.Ю., Яварова Т.М. (2022) Опыт многоволновой сейсморазведки при изучении земной коры континентов и океанов. СПб., ВСЕГЕИ, 112 с. (*Тр. ВСЕГЕИ. Нов. сер.* Т. 361). ISBN 978-5-00193-246-8
- Колмогорова В.В., Дружинин В.С., Алиевский М.Я., Парыгин Г.И. (2005) Сейсмичность и упругие свойства литосферы в зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Урала. *Глубинное строение. Геодинамика. Мониторинг. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей.* Мат-лы третьих научных чтений памяти Ю.П. Булашевича. Екатеринбург, 34-35.
- Колмогорова В.В., Дружинин В.С., Парыгин Г.И., Алиевский М.Я. (2004) Сейсмичность и упругие свойства земной коры Среднего Урала в районе Уральской сверхглубокой скважины. *Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов.* Мат-лы Всеросс. конф. с междунар. участием: Т. 1. Архангельск, 424-427.
- Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Сергеев В.Н., Шелудько И.Ф., Тен Е.Н., Кульчинский Ю.В., Мандельбаум М.М., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Суворов В.Д. (1993) Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S- волнах. Новосибирск: Наука. Сибирск. издат. фирма, 199 с.
- Крылов С.В., Тен Е.Н. (1995) Прочностные и упругие свойства очаговых зон сильных землетрясений на участках Байкальского и Северо-Тянь-Шаньского районов. *Геология и геофизика*, **2**, 137-150.
- Мартышко П.С., Федорова Н.В., Рублев А.Л. (2024). Об источниках магнитных аномалий в земной коре Среднего Урала. *Геодинамика и тектонофизика*, **15**(3), 0763. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-3-0763>. EDN: JSSZJC
- Мишенькина З.Р., Шелудько И.Ф., Крылов С.В. (1983) Использование линеаризованной обратной кинематической задачи для двумерных полей рефрагированных волн. *Численные методы в сейсмических исследованиях.* Новосибирск: Наука, 140-152.
- Осипова А.Ю., Осипов В.Ю., Бызов Д.Д. (2024) Сейсмичность и сейсмический режим территории Свердловской области. *Геозология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, **1**, 42-51. DOI: 10.31857/S0869780924010052
- Павленкова Н.И. (2011) Реологические свойства верхней мантии северной Евразии и природа региональных границ по данным сверхдлинных сейсмических профилей. *Геология и геофизика*, **52**(9), 1287-1301.
- Пузырев Н.Н., Крылов С.В., Мишенькин Б.П. (1975) Методика рекогносцировочных глубинных сейсмических исследований. Новосибирск: Наука, 160 с.
- Пузырев Н.Н., Тригубов А.В., Бродов Л.Ю., Ведерников Г.В., Лебедев К.А., Оболенцева И.Р., Лебедева Г.Н. (1985) Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн. М.: Недра, 277 с.
- Филатов В.В. (1990) Теория и практика геодинамического анализа гравитационного поля (на примере рудных районов Урала). Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Свердловск: СГИ, 376 с.
- Халевин Н.И., Алейников А.Л., Колмогорова В.В., Немзоров Н.И., Парыгин Г.И., Постникова А.М. (1980) Совместное использование продольных и поперечных волн промышленных взрывов. *Росс. геол. и геофиз.*, **4**, 87-96. (In Eng.)
- Халевин Н.И., Колмогорова В.В., Юнусов Ф.Ф. (1987) Земная кора и верхняя мантия осевой зоны Урала по данным многоволновой сейсмоки. *Физика Земли*, **3**, 3-13.
- Червяковский Г.Ф., Таврин И.Ф., Ярош А.Я., Ананьева Е.М., Дорофеев Б.В., Родионов П.Ф. (1966) Широтные и субширотные структуры Урала. *Сов. геол.*, **11**, 34-43.
- Avtoneyev S.V., Anan'yeva Y.M., Bashta K.G., Bel-lavin O.V., Bulashevich Y.P., Druzhinin V.S., D'yakonova A.G., Zoloyev K.K., Kolmogorova V.V., Koroteyev V.A., Nikonova F.I., Popov B.A., Puchkov V.N., Rapoport M.S., Rybalko V.M., Ryzhiy B.P., Semenov B.G., Tavrinn I.F., Tiunova A.M.N., Fedorova N.V., Kachray Y.V., Chursin A.V., Shapiro V.A., Shchapov V.A. (1992) Deep structure of the Urals from geophysical data. *Int. Geol. Rev.*, **34**(3), 263-279. <https://doi.org/10.1080/00206819209465602>
- Brown D., Carbonell R., Kukkonen I., Ayala C., Golovanova I. (2003) Composition of the Uralidecrust from seismic velocity (Vp, Vs), heat flow, gravity, and magnetic data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **210**, 333-349.
- Carbonell R., Perez-Estaun A., Gallart J., Diaz J., Kashubin S., Mechie J., Stadlander R., Schulze A., Knapp J.H., Morozov A. (1996) A crustal root beneath the Urals: wide-angle seismic evidence. *Science*, **274**, 222-224.

REFERENCES

- Aleinikov A.L. (1989) Study of the composition and dynamic conditions of the formation of the Earth's crust of the Middle Ural based on geophysical models. Doc. geol. and min. sci. diss. Sverdlovsk, SGI, 290 p. (In Russ.)
- Aleinikov A.L., Bellavin O.V., Khalevin N.I. (1978) System of lineaments and features of the distribution of minerals in the Ural region. *Elastic waves of industrial explosions and study of the earth's crust of the Ural.* Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 30-36. (In Russ.)
- Aleinikov A.L., Nemzorov N.I., Khalevin N.I. (1986) Multiwave seismic for studying the subsoil of ore regions. Moscow, Nauka Publ., 112 p. (In Russ.)
- Atlas "Reference geological and geophysical profiles of Russia. Deep seismic sections along DSS profiles developed in the period from 1972 to 1995". (2013) St.Petersburg, electr. ed. Rosnedra, VSEGEI. URL: <https://karpinsky-institute.ru/ru/info/seismic/> (In Russ.)
- Avtoneyev S.V., Anan'yeva Y.M., Bashta K.G., Bel-lavin O.V., Bulashevich Y.P., Druzhinin V.S., D'yakonova A.G., Zoloyev K.K., Kolmogorova V.V., Koroteyev V.A., Nikonova F.I., Popov B.A., Puchkov V.N., Rapoport M.S., Rybalko V.M., Ryzhiy B.P., Semenov B.G., Tavrinn I.F., Tiunova A.M.N., Fedorova N.V., Kachray Y.V., Chursin A.V., Shapiro V.A., Shchapov V.A. (1992) Deep structure of the Ural from geophysical data. *Int. Geol. Rev.*, **34**(3), 263-279. <https://doi.org/10.1080/00206819209465602>
- Berlyand N.G. (1982) Zoning of the Urals according to the type of structure of the earth's crust. *Sov. Geol.*, **11**, 78-87.
- Brown D., Carbonell R., Kukkonen I., Ayala C., Golovanova I. (2003) Composition of the Uralidecrust from seismic velocity (Vp, Vs), heat flow, gravity, and magnetic data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **210**, 333-349.

- va I. (2003) Composition of the Uralidecrust from seismic velocity (Vp, Vs), heat flow, gravity, and magnetic data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **210**, 333-349.
- Carbonell R., Perez-Estaun A., Gallart J., Diaz J., Kashubin S., Mechie J., Stadlander R., Schulze A., Knapp J.H., Morozov A. (1996) A crustal root beneath the Urals: wide-angle seismic evidence. *Science*, **274**, 222-224.
- Chervyakovskii G.F., Tavrín I.F., Yarosh A.Ya., Anan'eva Ye.M., Dorofeev B.V., Rodionov P.F. (1966) Latitudinal and sublatitudinal structures of the Urals. *Sov. Geol.*, **11**, 34-43. (In Russ.)
- Database "Earthquakes in Russia". [Electronic resource]. URL: <http://eqru.gsr.ru> (data obrashcheniya 12.05.2024). (In Russ.)
- Druzhinin V.S., Gulyaev A.N., Kolmogorova V.V., Parygin G.I., Utkin V.I., Kashubin S.N. (2004) On the tectonic nature of the Ural earthquakes. *Geofizika*, **3**, 56-65. (In Russ.)
- Druzhinin V.S., Kashubin S.N., Val'chak V.I., Kashubina T.V., Rybalka A.V. (1985) The deep structure of the Urals along the meridional profile of the Nizhnaya Tura-Orsk DSS. *Sov. Geol.*, **1**, 74-86. (In Russ.)
- Druzhinin V.S., Kolmogorova V.V., Kusonskii O.A., Parygin G.I., Pustovalov N.A., Silina I.K. (2007) Information on seismicity of the Middle Ural based on instrumental data. *Geophysics of the XXI century: 2006*. Proceedings of the Eighth Geophysical Readings named after V.V. Fedynsky. Tver', 169-178. (In Russ.)
- Druzhinin V.S., Osipov V.Yu. (2016) Sublatitudinal dislocations of the earth's crust in the Ural region – links in the lineament system of the Eurasian continent. *Ural'skii Geofiz. Vestnik*, **2**(28), 33-47. (In Russ.)
- Druzhinin V.S., Osipov V.Yu., Nachapkin N.I. (2015) Sublatitudinal dislocations in the crustal model of the Preural region of the West Siberian geosyncline. *Ural'skii Geofiz. Vestnik*, **2**(26), 13-23. (In Russ.)
- Earthquakes and microseismicity in problems of modern geodynamics of the East European Platform. (2007) (Ed. N.V. Sharov, A.A. Malovichko, Yu.K. Shchukin). B. 1: Earthquakes, Petrozavodsk, Karel'skii nauchnyi tsentr RAN Publ., 381 p. (In Russ.)
- Egor'kin A.V. (2000) Geological information content of multiwave DSS using the example of studying the north of the European part of Russia. *Regional'naya Geologiya i Metallogeniya*, **10**, 85-93. (In Russ.)
- Egor'kin A.V. (1996) Multiwave deep seismic research. *Geofizika*, **4**, 25-30. (In Russ.)
- Filatov V.V. (1990) Theory and practice of geodynamic analysis of the gravitational field (using the example of ore regions of the Urals). Doc. ... geol. and min. sci. diss. Sverdlovsk, SGI, 376 p. (In Russ.)
- Geology and minerals of Russia. (2011) In 6 v. V. 1. The West of Russia and the Urals. B. 2. The Urals. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 584 p. (In Russ.)
- Geotraverse "GRANITE": East European Platform – Ural – Western Siberia (structure of the earth's crust based on the results of comprehensive geological and geophysical studies). (2002) (Ed. S.N. Kashubina). Ekaterinburg, Glavnoe upravlenie vneshnimi resursami i okhranoi okruzhayushchei sredy MPR Rossii po Sverdl. oblasti, Bazhenovskaya geofizicheskaya ekspeditsiya, 312 p. (In Russ.)
- Gulyayev A.N., Osipova A.YU. (2019) Zones of possible occurrence of foci of noticeable earthquakes in the Urals. *Izv. vuzov. Gornyi Zhurnal*, **8**, 68-80. (In Russ.)
- Kashubin S.N. (1984) Methodology for analyzing the physical properties of rocks during regional seismic studies (using the example of the Tagil-Magnitogorsk trough). *Geophysical methods of prospecting and exploration of ore and non-metallic deposits*. Sverdlovsk, 83-91. (In Russ.)
- Kashubin S.N. (1994) Multiwave seismometry in the study of the structure, composition and dynamic state of the earth's crust of the Urals. Doc. ... geol. and min. sci. diss. Sverdlovsk, IG UrO RAN Publ., 43 p. (In Russ.)
- Kashubin S.N., Druzhinin V.S. (1999) Development of the DSS method in the Urals. *Fizika Zemli*, **7-8**, 30-43.
- Kashubin S.N., Druzhinin V.S., Gulyaev A.N., Kusonskii O.A., Lomakin V.S., Malovichko A.A., Nikitin S.N., Parygin G.N., Ryzhii B.P., Utkin V.I. (2001) Seismicity and seismic zoning of the Ural region. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 124 p. ISBN: 5-7691-1212-3 (In Russ.)
- Kashubin S.N., Petrov O.V., Mil'shtein Ye.D., Vinokurov I. Yu., Vyatkina D.V., Kashubina T.V., Krupnova N.A., Kudryavtsev I.V., Sakulina T.S., Tatarinov V.Yu., Yavarova T.M. (2022) Experience of multiwave seismic exploration in the study of the earth's crust of continents and oceans. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 112 p. (*Tr. VSEGEI. Nov. Seriya*. T. 361). ISBN 978-5-00193-246-8 (In Russ.)
- Khalevin N.I., Aleinikov A.L., Kolmogorova V.V., Nemzov N.I., Parygin G.I., Postnikova A.M. (1980) Combined usage of P- and S-waves from industrial explosions. *Russ. Geol. Geophys.*, **4**, 87-96.
- Khalevin N.I., Kolmogorova V.V., Yunusov F.F. (1987) The earth's crust and upper mantle of the axial zone of the Urals according to multiwave seismic data. *Fizika Zemli*, **3**, 3-13. (In Russ.)
- Kolmogorova V.V., Druzhinin V.S., Alievskii M.Ya., Parygin G.I. (2005) Seismicity and elastic properties of the lithosphere in the junction zone of the East European Platform and the Ural. The deep structure. Geodynamics. Monitoring. *The Earth's thermal field. Interpretation of geophysical fields*. Materials of the third scientific readings in memory of Y.P. Bulashevich. Ekaterinburg, 34-35. (In Russ.)
- Kolmogorova V.V., Druzhinin V.S., Parygin G.I., Alievskii M.Ya. (2004) Seismicity and elastic properties of the earth's crust of the Middle Urals in the area of the Ural superdeep well. *Geodynamics and geological changes in the environment of the northern regions*. Materials of the All-Russian Conference with the international with participation: V. I. Arkhangel'sk, 424-427. (In Russ.)
- Krylov S.V., Mishen'kin B.P., Mishen'kina Z.R., Petrik G.V., Sergeev V.N., Shelud'ko I.F., Ten Ye.N., Kul'chinskii Yu.V., Mandel'baum M.M., Seleznev V.S., Solov'ev V.M., Suvorov V.D. (1993) Detailed seismic studies of the lithosphere on P- and S-waves. Novosibirsk, Nauka. Sibirskaya izdatel'skaya firma, 199 p. (In Russ.)
- Krylov S.V., Ten N. (1995) Strength and elastic properties of focal zones of strong earthquakes in areas of the Baikal and North Tien Shan regions. *Geol. Geofiz.*, **2**, 137-150. (In Russ.)
- Martyshko P.S., Fedorova N.V., Rublev A.L. (2024) On the Crustal Sources of Magnetic Anomalies in the Middle Urals. *Geodynam. Tectonophys.*, **15**(3), 0763. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-3-0763>. EDN:

JSSZJC

- Mishen'kina Z.R., Shelud'ko I.F., Krylov S.V. (1983) Using a linearized inverse kinematic problem for two-dimensional fields of refracted waves. *Numerical methods in seismic research*. Novosibirsk, Nauka Publ., 140-152. (In Russ.)
- Osipova A.Yu., Osipov V.Yu., Byzov D.D. (2024) Seismicity and seismic regime of the territory of the Sverdlovsk region. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*, **1**, 42-51. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0869780924010052
- Pavlenkova N.I. (2011) Rheological properties of the upper mantle of northern Eurasia and the nature of regional boundaries according to ultra-long seismic profiles. *Geol. Geofiz.*, **52**(9), 1287-1301. (In Russ.)
- Puzyrev N.N., Krylov S.V., Mishen'kin B.P. (1975) Methodology for reconnaissance deep seismic studies. Novosibirsk, Nauka Publ., 160 p. (In Russ.)
- Puzyrev N.N., Trigubov A.V., Brodov L.Yu., Vedernikov G.V., Lebedev K.A., Obolentseva I.R., Lebedeva G.N. (1985) Seismic exploration using shear and converted waves. Moscow, Nedra Publ., 277 p. (In Russ.)