

Основные сечения земной коры и верхней мантии Большого Кавказа по новым технологиям.

2. Сейсмотомография по профилям глубинного сейсмического зондирования

© С. А. Гонгадзе, Т. А. Челидзе, П. Ш. Миндели, Н. Я. Глonti, Д. К. Кириа,
О. В. Яволовская, 2016

Институт геофизики им. М. Нодия, Тбилиси, Грузия

Поступила 10 марта 2016 г.

Представлено членом редколлегии Т. П. Егоровой

Розглянуто можливість застосування методу сейсмічної томографії для обробки матеріалів глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ). Наведено порівняльні результати різних програмних забезпечень GeoGiga Seismic PRO 7.0 (Канада) і XТomo-LM (Санкт-Петербург). Показано можливість застосування томографії в комплексі з даними методу мікросейсмічних зондувань (МЗ). Виявлено подібність швидкісної картини, отриманої в результаті сейсмічної томографії, з побудованими раніше швидкісними моделями профілів ГСЗ Бакуріані—Степове і Нахичевань—Волгоград у переінтерпретації Г. О. Павленкової. Виділено основні перерізи земної кори і верхньої мантиї за томографічними розрізами. Встановлено, що покривля фундаменту є дуже порізаною, тому що весь фундамент розбитий на блоки, які обмежені мережею розломних порушень, визначених за градієнтними зонам швидкостей і роздробленості швидкісних неоднорідностей на томографічному розрізі. Потужність кори збільшується під Великим Кавказом до 60—70 км. За допомогою методів ГСЗ і МЗ проведено кореляційний аналіз профілю Цхінвалі—Ардон. Це дало змогу зробити висновок, що обидва методи доповнюють один одного.

Ключові слова: Великий Кавказ, земна кора, глибинне сейсмічне зондування, сейсмотомографія, мікросейсмічне зондування.

Введение. Изучение верхних частей разреза земной коры — одна из наиболее актуальных и достаточно сложных задач в геологии. Известно, что верхняя часть разреза имеет довольно сложное геологическое строение, характеризующееся резкой вертикальной и горизонтальной изменчивостью физико-механических свойств пород. В предыдущей статье [Гонгадзе, 2016] решались задачи выделения скоростных и плотностных неоднородностей и их связи с геологическим строением Большого Кавказа (БК). В настоящей статье на основе метода сейсмотомографии профилей ГСЗ Бакуріані—Степове, Нахичевань—Волгоград и Гали—Сафаралиев с использованием новейших компьютерных технологий рассмотрены такие геологические задачи: выделение основных слоев земной коры и верхней мантии, предполагаемых разрывных нарушений, установление корреляционной связи моделей земной коры БК в результате интерпретации работ, выполненных в разные

годы методами ГСЗ и микросейсмического зондирования (МЗ).

В современной складчатой структуре земной коры в пределах территории Грузии выделяют следующие структурно-морфологические единицы первого порядка: I — складчатая (складчато-покровная) система БК, II — Закавказская межгорная область, III — складчатая (складчато-надвиговая) система Малого Кавказа, которые, в свою очередь, состоят из геотектонических зон и подзон (рис. 1) [Гамкредидзе и др., 1977].

Метод ГСЗ (региональное изучение строения земной коры и верхней мантии) основан на регистрации на поверхности Земли искусственно возбуждаемых сейсмических волн. Применяется для тектонического районирования континентов и дна океанов с учетом особенностей строения земной коры и верхней мантии, для изучения строения и мощности осадочной толщи и структуры фундамента, а также для выявления структурных особенно-

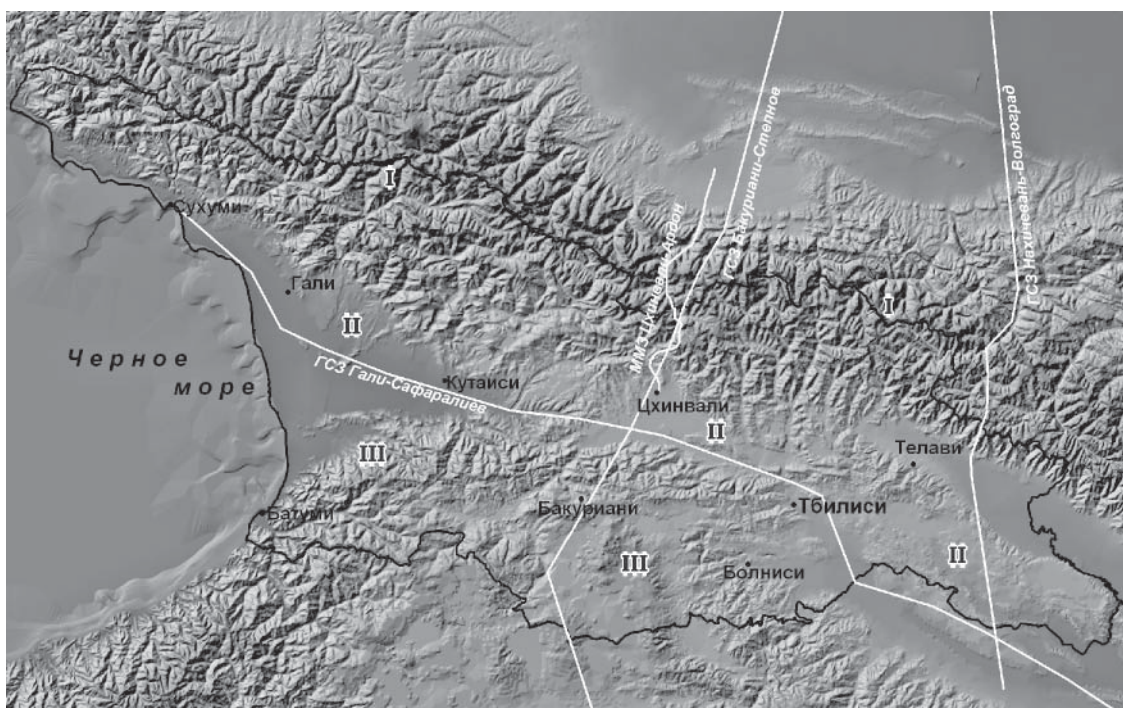


Рис. 1. Схема профилей ГСЗ и МЗ на рельефе земной поверхности.

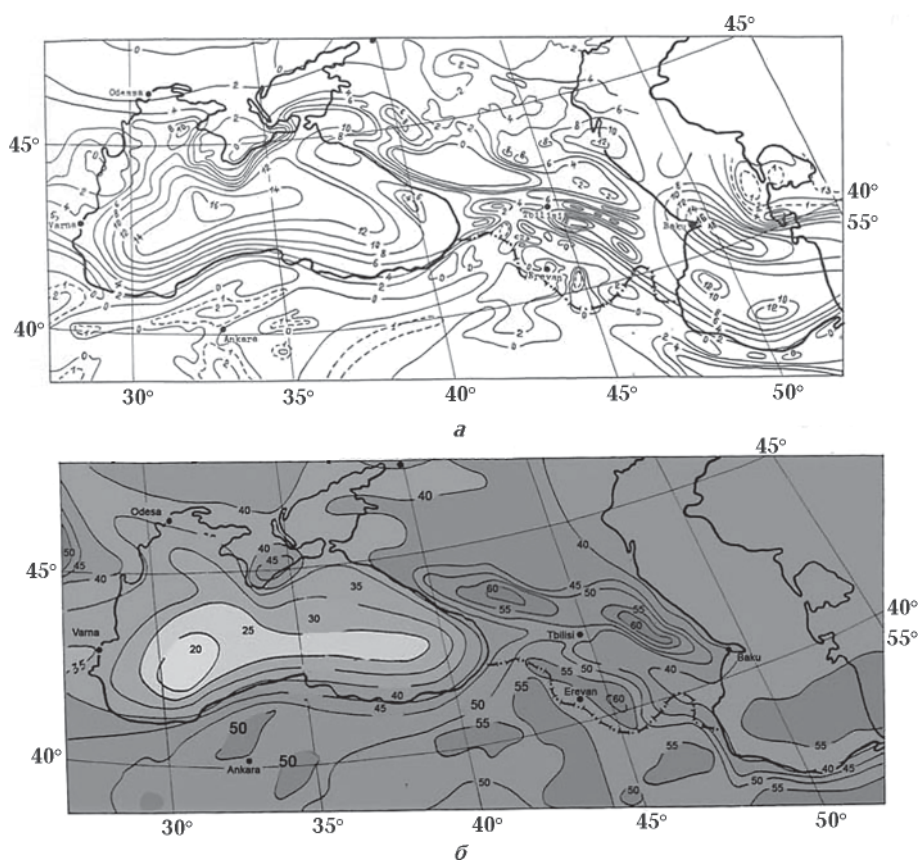


Рис. 2. Карты глубин поверхностей фундамента (а) и Мохо (б), км, по работе [Балавадзе, Шенгелая, 1961].

стей, благоприятных для образования месторождений полезных ископаемых. Профили ГСЗ Бакуриани—Степное, Нахичевань—Волгоград, Гали—Сафаралиев (его еще называют профиль «Море—Море») были отработаны организациями Министерства геологии СССР в 1960-х годах [Юров, 1963; Краснопевцева и др., 1970]. Профили Бакуриани—Степное и Нахичевань—Волгоград пересекают БК (см. рис. 1) и до сих пор остаются единственными профилями ГСЗ, секущими вкрест простирания эту крупную горную систему. Продольный профиль Гали—Сафаралиев проходит по Рионско-Куринской депрессии. Участок профиля ГСЗ по маршруту Цхинвали—Ардон фактически совпадает с профилем МЗ. Это обстоятельство предоставляет возможность провести детальное сопоставление результатов профилирования по обоим методам.

Сейсмоплотностная модель литосферы Кавказа [Балавадзе, Шенгелая, 1961] была построена для основных слоев литосферы гранитного слоя и поверхности раздела Мохо, где учитывались данные гравиметрии и интерпретации профиля ГСЗ Бакуриани—Степное (рис. 2).

Основы метода лучевой сейсмотомографии. Математической основой лучевой сейсмотомографии служит закон, сформулированный Радоном в 1917 г., который гласит, что любая непрерывная двумерная функция может быть восстановлена по ее одномерным проекциям, если число этих проекций бесконечно.

Проекции представляют собой некоторые функционалы физических характеристик среды исследований. В сейсмической томографии характеристиками обычно являются скорости сейсмических волн, поглощающие свойства среды, а проекции — это либо времена пробега, либо данные о затухании волн за счет неупругого поглощения, получаемые из наблюдений.

Рассмотрим принцип решения задачи сейсмотомографии. Параметры сейсмических волн (время прохождения, амплитуда волны), прошедших через среду, содержат информацию об этой среде. В частности, время прохождения луча по той или иной траектории равно сумме времен прохождения через элементарные интервалы (ΔS) вдоль этого луча. Если элементарные отрезки равны по длине, то время прохождения луча будет равно

$$t = \sum_i \frac{1}{V_i} \Delta S,$$

где V_i — скорость сейсмической волны вдоль луча.

Однако по $V(r)$ функции сферической модели Земли Джеффриса—Буллена возможно предсказать времена пробега с высокой точностью (0,005 %). Если длины отрезков сделать бесконечно малыми, то время распространения по i -му лучу будет равно

$$t_i = \int_{L_i} \frac{1}{V(r)} dS,$$

где $\frac{1}{V(r)}$ — медленность распространения вол-

ны на расстоянии r от начала L_i -го луча. Задержка времени определяется формулой

$$\begin{aligned} \Delta T_i &= T_i - T_i^0 = \int_{S_i} \frac{dS}{V} - \int_{S_i^0} \frac{dS}{V_0} = \\ &= \int_{S_i^0} \left(\frac{1}{V} - \frac{1}{V_0} \right) dS = - \int_{S_i^0} \frac{\Delta V(\bar{r}_i)}{V_0(\bar{r})} dS, \end{aligned}$$

где $\Delta V = V - V_0$.

Для решения томографической задачи данное выражение удобнее записывать в форме интеграла по пространственной области Ω :

$$t_i = \int_{\Omega} G_i(r) \frac{1}{V(r)} dr,$$

где $G_i(r)$ сингулярно на луче L_i и равно нулю во всей остальной части области. Приведенные формулы являются основными при решении обратных задач томографии.

Обработка и методика сейсмотомографических исследований по профилям ГСЗ. Один из важных методических вопросов при проведении итерационной томографической обработки — критерий останова, поскольку одна итерация выполняется в предположении малости возмущения ΔV . Нельзя далеко уйти от начальной скорости, но можно принять уточненную скорость (ΔV) за новое начальное приближение [Винник, 2006]. Критерием целесообразности итерирования является уменьшение невязок времени в пределах эффективной точности измерений, поскольку излишние итерации приводят к ухудшению качества получаемого решения. Основным показателем необходимости продолжения итерационного процесса служит соотношение между текущей среднеквадратичной невязкой времен пробега и погрешностью измерения первых вступлений. Если обе эти величины становятся примерно одного порядка, то некоторая слу-

чайная величина ошибки исходных данных будет интерпретироваться как регулярная невязка между теоретическими и наблюдаемыми временами пробега, что, в свою очередь, как правило, приводит к появлению хаотически расположенных ложных мелкомасштабных аномалий.

Надежность получаемого при сейсмотомографии решения данным методом во многом зависит от корректности модели первого приближения. На практике очень часто в качестве первого приближения выбирается результат решения обратной томографической задачи для случая однородной среды, рассчитанной по средней для данного разреза скорости упругих волн.

На основе имеющихся у нас материалов ГСЗ, используя программное обеспечение GeoGiga Seismic PRO 7.0 (Канада) [Geogiga..., 2009] и XТomo-LM (Санкт-Петербург) [Винник, 2006], была сделана попытка получить информацию о границах основных сечений земной коры и верхней мантии.

Годографы профилей ГСЗ были обработаны в ПО GeoGiga модулем DW Томо. В алгоритм программы заложен метод кинематической томографии нелинейного преломления волн для первых вступлений. Данная разработка включает в себя расчет кратчайшего пути трассировки лучей, используется регуляризатор Тихонова и метод Монте-Карло — нелинейный анализ неопределенностей [Zhang, Toksoz, 1998]. Решается обратная кинематическая задача томографии.

Годографы преломленных волн вводятся в программное обеспечение в виде цифровых таблиц, содержащих априорные геологические данные модели: глубины, минимальные и максимальные средние скорости среды. Количество итераций, при которых теоретическая модель, полученная методом наименьших квадратов, приближается к практической, не больше пяти. Невязка в среднем составляет до 100 мс по профилям ГСЗ.

В современной практике решения томографических задач успешное применение нашли методы улучшения заданного начального приближения. Суть заключается в следующем: выбирается опорная модель как начальное приближение. Далее производится расчет нескольких последовательных итераций, когда улучшенная модель после предыдущих итераций используется как опорная на следующей. В классе слоистых моделей, используемых в XТomo-LM, решается прямая кинематическая

задача, геометрия модели задается формой опорных линий: кровли и подошвы модели и сейсмических горизонтов [Рослов и др., 2007]. Алгоритм, используемый в XТomo-LM, основан на интегральных законах лучевой теории — принципе Гюйгенса и принципе Ферма. Адекватной сейсмической моделью для ГСЗ служит слоистая модель, волновое поле ГСЗ освещает всю толщу коры волнами разной природы. Томография на первых вступлениях дает только скоростной разрез в рамках непрерывно градиентной модели.

Особенно важно определение реальных характеристик (величин) физических свойств, в том числе скоростных параметров топографических масс, в частности центрального воздымания Главного хребта как основы фундамента осадочного покрова главного горноскладчатого сооружения Кавказского сегмента альпийского складчатого пояса. Скоростные параметры определялись в течение 50 лет прошлого века в лабораториях «Грузнефтегеофизики» на образцах, доставленных в основном из глубоких поисково-разведочных скважин, и в «Грузгеологии» на образцах, отобранных из естественных обнажений. В Институте геофизики скорости на образцах, отобранных из обнажений, определялись в ограниченном объеме.

Строение коры и верхней мантии БК по основным профилям ГСЗ. Строение коры и верхов мантии на исследованном участке региона БК по основным профилям в целом, за исключением выступающих на поверхность массивов, соответствует трехслойной стандартной модели континентального типа коры [Миндели, 1999].

Исходя из этого, тектоническая зона Главного хребта, сложенная древними магматогенно-метаморфическими породами, выделена как петроскоростная зона с максимальной скоростью 5,8—6,2 км/с, хотя данных фактического опробования мало.

При обработке годографов профиля ГСЗ Гали—Сафаралиев установлена скоростная модель Рионско-Куриной депрессии, за исключением Дзирульского массива. Осадочный слой низкоскоростной: $V_{пл.} = 3,0 \div 4,5$ км/с. Гранитный слой под осадочным чехлом в скоростном отношении относительно слабоградиентный и однородный с $V_{пл.} = 5,8 \div 6,2$ км/с. Третий, базальтовый, слой $V_{пл.} = 6,8 \div 7,5$ км/с характеризуется интенсивным нарастающим градиентом скорости. Для поверхности раздела Мохо скорость взята априори 8,0—8,2 км/с. Все эти

данные по расчету и составлению скоростных моделей приведены в монографии [Гамкрелидзе и др., 2012].

На полученных томографических разрезах ГСЗ, опираясь на скоростную модель для территории Грузии, можно провести условные границы для выделения так называемых гранитного, базальтового слоев и поверхности раздела Мохо. На рис. 3 приведена интерпретация томографии профиля Бакуриани—Степное. Томография, реализованная в ПО GeoGiga (рис. 3, б), имеет более детальный характер и позволяет провести границы более четко и выделить разломные нарушения. На модели условно выделены вышеуказанные горизонты и дополнительно горизонт в земной коре со скоростью 6,2—6,5 км/с. По нарушению целостности скоростных неоднородностей проведено несколько разломов. Томографический разрез XТомо-LM2 более сглаженный (рис. 3, а), но на обоих разделах наблюдается сходство скоростных горизонтов. По перегибам скоростных границ можно условно провести линии разрывных нарушений, которые соответствуют разломам, выделенным на томографическом разрезе ПО GeoGiga.

Сравнительный анализ проведен со скоростной моделью по профилю Бакуриани—Степное, построенной Г. А. Павленковой (2012) в новом варианте, с помощью программы лучевого моделирования Зельда. В этой программе, в отличие от используемой нами, решается прямая задача.

Анализируя профиль Бакуриани—Степное, с юга на север можно проследить следующие особенности строения земной коры и верхов мантии Кавказа. По кровле фундамента выделяются три впадины глубиной до 20 км: Куринский прогиб, впадина в центре БК и Предкавказский прогиб. Впадины на краях профиля можно не учитывать — ввиду неполной системы наблюдений распределение скоростей на краях профиля можно рассматривать как интерполяцию скорости, заложенную в программе. Кажущиеся скорости по поверхности фундамента соответствуют 6,0—6,2 км/с. В Куринской впадине выделяется блок воздымания фундамента, что, возможно, связано с кристаллическим фундаментом Дзирульского массива. На скоростном разрезе Г. А. Павленковой это также отмечается. В центральной части хребта БК наблюдается выход фундамента на поверхность, что вполне может соответствовать древнему кристаллическому ядру БК, сложенному докембрийскими и нижнесреднепалео-

зойскими метаморфическими интрузивными образованиями. Кровля фундамента имеет сильно изрезанный характер с нарушением сплошности поверхности, так как весь фундамент разбит на блоки, ограниченные сетью разломных нарушений, определенных по градиентным зонам скоростей и раздробленности скоростных неоднородностей на томографическом разрезе. Линия кровли слоя со скоростью $V_k=6,5\div 7,0$ км/с по конфигурации повторяет рельеф поверхности фундамента. Граница раздела Мохо со скоростью $V_k=8,1$ км/с несколько приподнята в южной части профиля, под БК прогибается ниже 60 км и в Предкавказском прогибе опять поднимается до глубины 30 км.

Корреляционная связь моделей на рис. 3, б, в присутствует, есть некоторое расхождение по скорости и в рисовке ограничивающих разломов, но в целом обе картины соответствуют друг другу.

При интерпретации томографии ГСЗ по профилю Нахичевань—Волгоград (рис. 4, б), как и на профиле Бакуриани—Степное, определяются те же три условных слоя. Гранитный слой на обоих профилях разбит на блоки. На профиле Нахичевань—Волгоград прослеживаются две впадины: Куринская с высокоскоростным блоком Иорского плато и Предкавказский прогиб. БК выделяется зоной повышенной расслоенности с чередованием высокоскоростных и низкоскоростных неоднородностей. Восточная зона погружения зоны Главного хребта сложена в основном граувакко-сланцевой (аспидной) толщей нижней юры и характеризуется веерообразным расположением сильно сжатых, часто изоклинальных складок, осложненных многочисленными взбросами.

Мощность земной коры на профиле Бакуриани—Степное под горами достигает 60 км, а на профиле Нахичевань—Волгоград — до 70 км. Полученный в результате лучевого моделирования скоростной разрез земной коры и верхов мантии (рис. 4, в) по профилю Волгоград—Нахичевань в интерпретации Г. А. Павленковой (2012) во многом похож на наш томографический разрез (см. рис. 4, б), наблюдается сходство скоростных границ и блоков. Разрезы по профилям, секущим горную часть Кавказа, сходны по главным особенностям строения земной коры и верхов мантии, но для них отмечаются и некоторые различия. Выделенные предполагаемые разломные зоны вполне возможно соответствуют зональному разделению БК.

Следует обратить внимание на отчетливую корреляцию форм рельефа местности с форма-

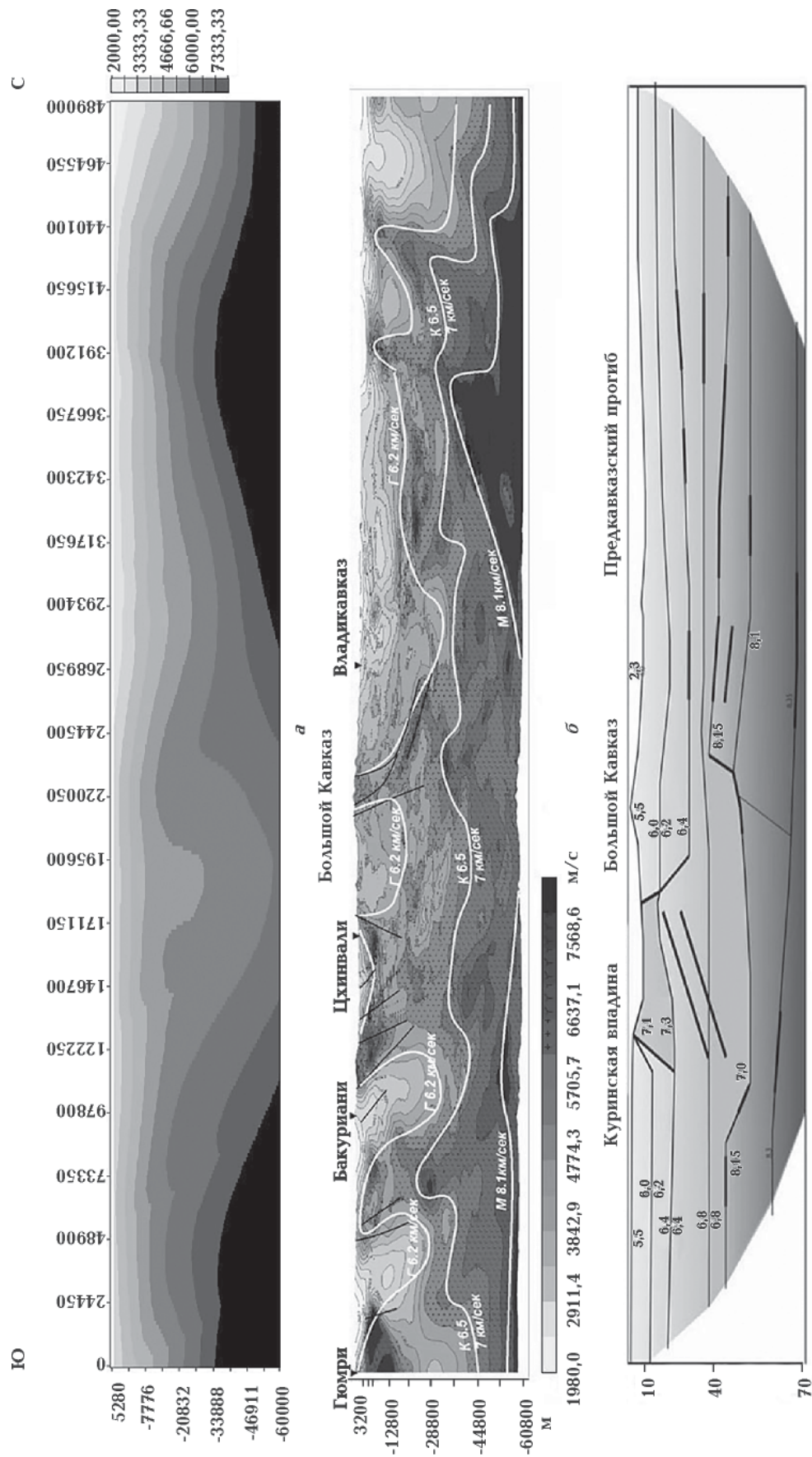


Рис. 3. Интерпретация сейсмотомографии профиля ГСЗ Бакуриани—Степное: *а* — томография XТomo-LM2, *б* — томография GeoSiga, *в* — скоростная модель Г. А. Павленковой, построенная с помощью SeisWide4.6.4.

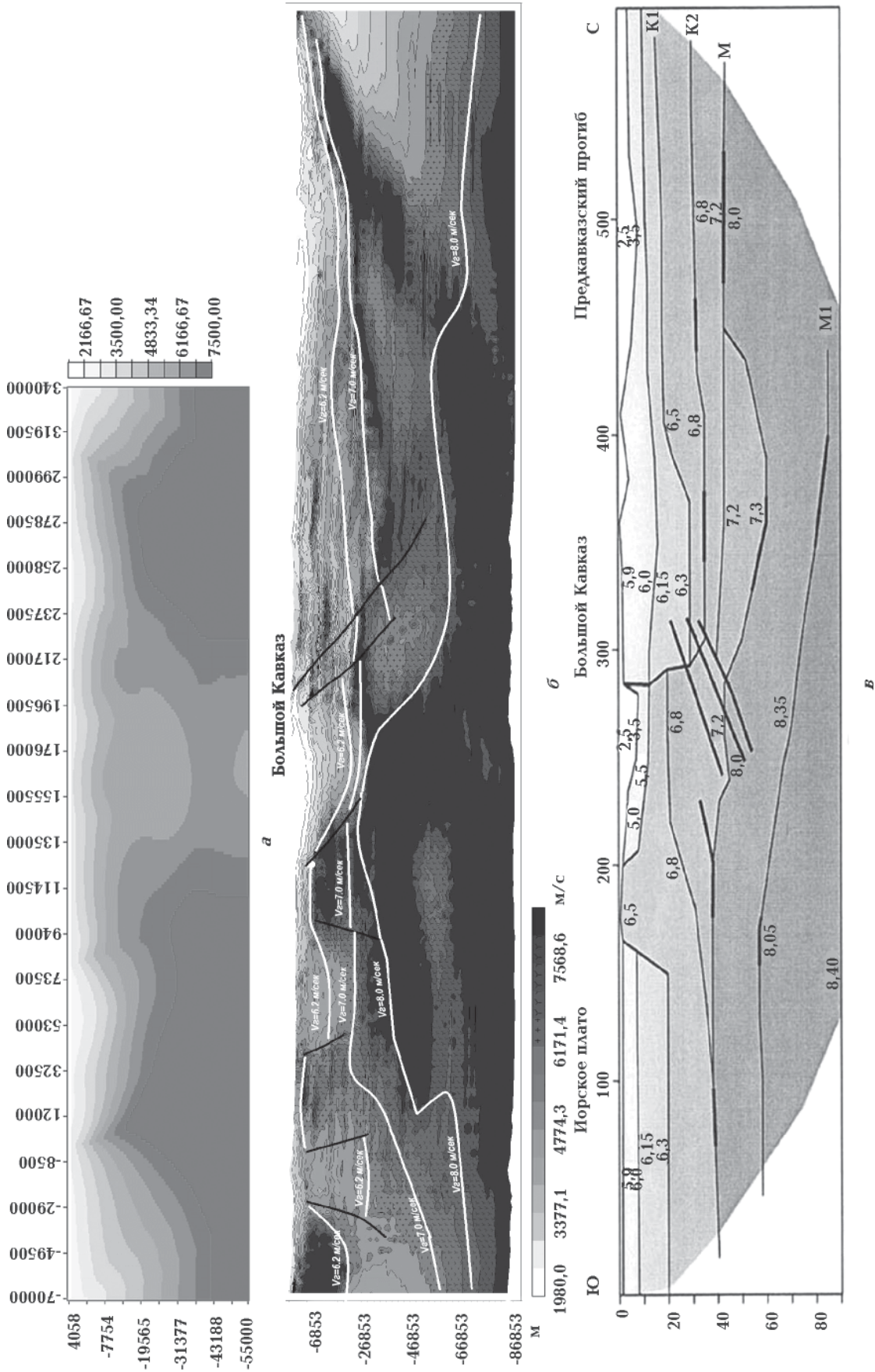


Рис. 4. Интерпретация сейсмотомографии профиля ГСЗ Нахичевань—Волгоград—Волгоград: а — томография XТomo-LM2, б — томография SeoSiga, в — скоростная модель Г. А. Павленковой.

ми рельефа кристаллического фундамента по всем профилям ГСЗ. Подобная связь наряду с результатами интерпретации тектоники может указывать на значительную унаследованность рельефа местности от рельефа кристаллического фундамента [Chelidze et al., 2012].

Для установления корреляции основных сечений земной коры и верхней мантии с поперечными профилями ГСЗ Нахичевань—

Волгоград и Бакуриани—Степное проведена интерпретация продольного профиля Гали—Сафаралиев (см. рис. 1), но имеющиеся у нас данные относятся к части профилю длиной 512 км (рис. 5).

Здесь также выделены три границы — гранитный слой ($V_k=6,2$ км/с), базальтовый ($V_k=7,0$ км/с) и поверхность раздела Мохо ($V_k=8,2$ км/с).

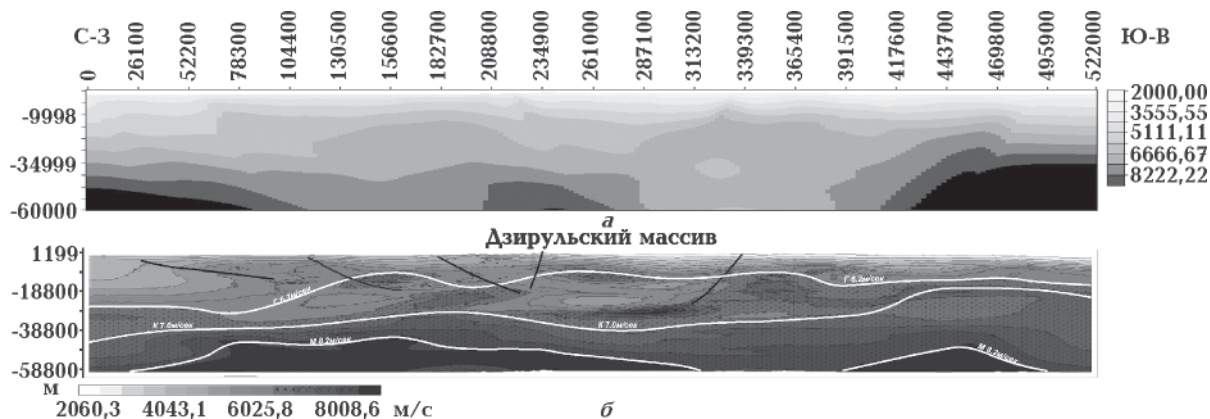


Рис. 5. Сейсмотомография ГСЗ профиля Гали—Сафаралиев: а — томография XТото-LM2, б — томография GeoGiga.

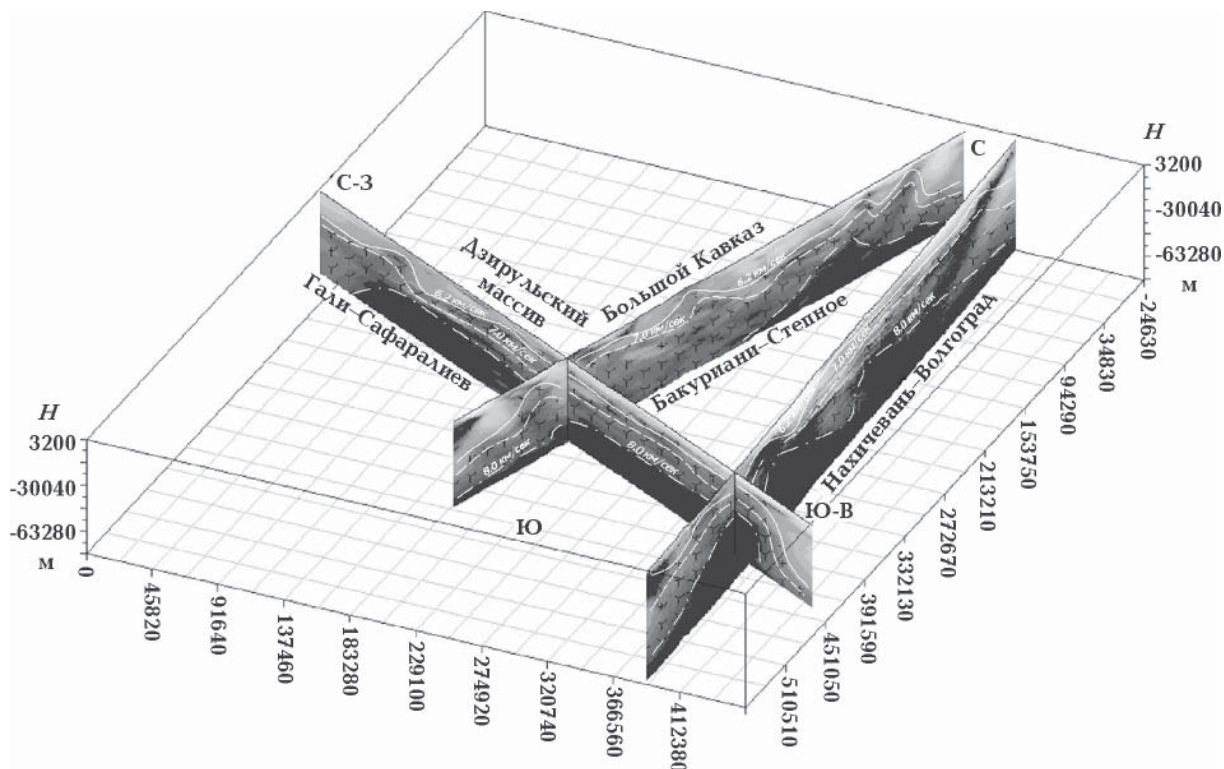


Рис. 6. Пространственное расположение профилей ГСЗ. Сплошная линия — поверхность фундамента ($V_k=6,2$ км/с); пунктирная — кровля слоя ($V_k=7,0$ км/с); штрихпунктирная — поверхность раздела Мохо ($V_k=8,0$ км/с).

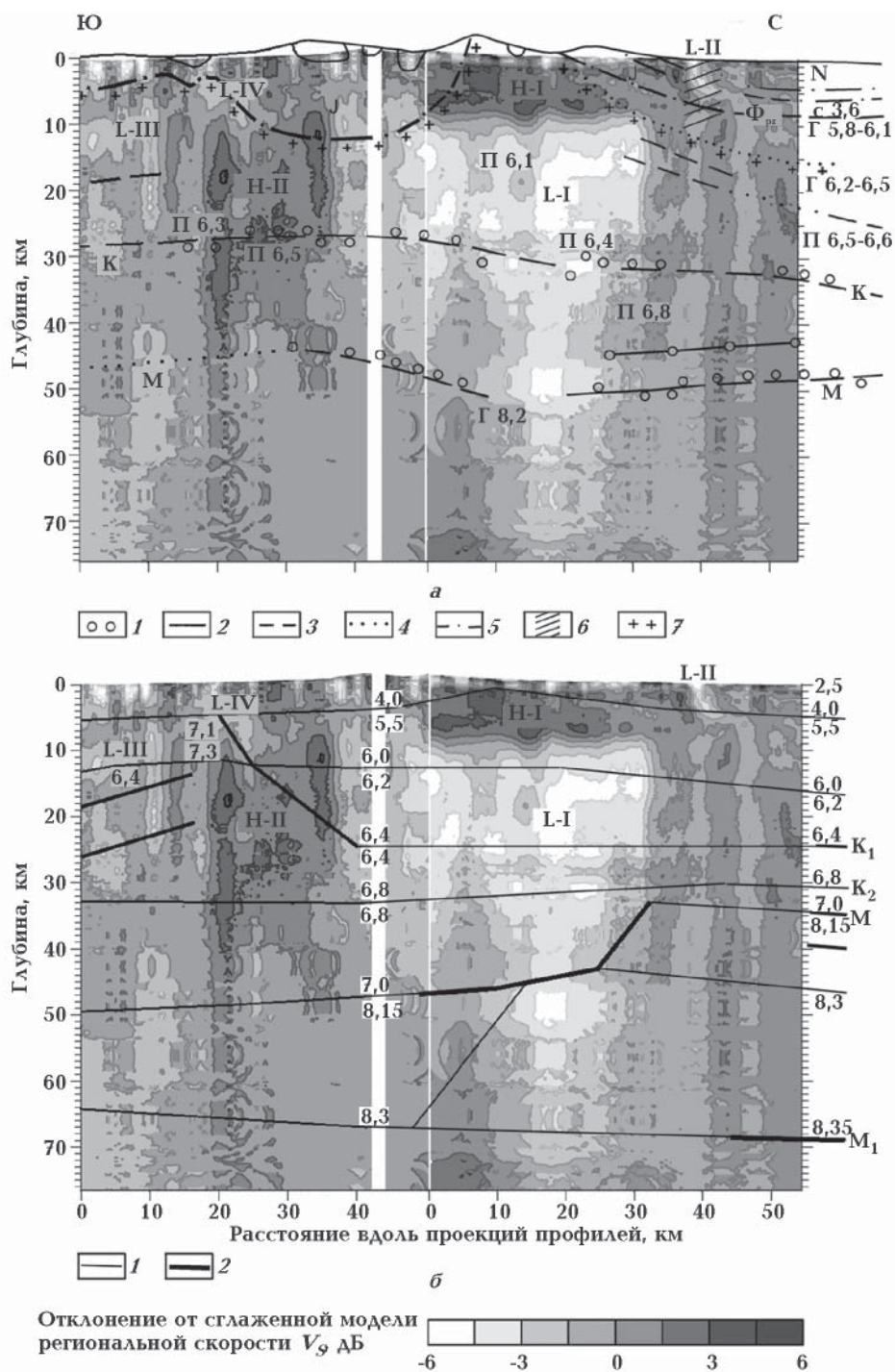


Рис. 7. Микросейсмическое зондирование по профилю Цхинвали—Ардон и результаты интерпретация центральной части профиля ГСЗ Бакуриани—Степное в интерпретации Г. В. Краснопецовой и Г. А. Павленковой: *а* — сейсмогеологический разрез в интерпретации [Краснопецова и др., 1970] (1 — значения глубин отражающих горизонтов с разных пунктов взрыва; 2, 3 — участки границ, построенные по уверенным сейсмическим данным (2), по менее уверенным (3); 4 — участки интерполяции границ; 5 — границы, построенные по геологическим данным; *б* — зоны нарушения корреляции сейсмических волн; 7 — поверхность «гранитного» слоя по сейсмическим данным). Скорости сейсмических волн, км/с: г — граничная, п — пластовая, с — средняя для осадочной (мезозойско-кайнозойской) толщи Предкавказского прогиба. Ф_{пз} — поверхность палеозойского фундамента; К — граница, связанная с «базальтовым» слоем или его аналогами; М — граница Мохоровичича; N, J — обобщенный возраст слоев отложений (неоген-четвертичный и юрский соответственно); *б* — скоростной разрез в интерпретации [Павленкова, 2012] (1 — границы между слоями с разными сейсмическими скоростями; 2 — отражающие площадки; K1 и K2 — внутрикоровые границы; M — граница Мохоровичича, M1 — внутримантийная граница. Ссылки на зоны с индексами Н и Л см. в тексте.

На рис. 6 представлено пространственное расположение профилей ГСЗ для установления корреляции выделенных условных границ. При пересечении поперечных профилей с продольным выделенные горизонты взаимно увязывались.

При анализе наших томографических построений по профилям ГСЗ (с обобщением [Балавадзе, Шенгелая, 1961] и построением ими структурных карт для поверхности гранитного слоя и поверхности раздела Мохо (см. рис. 2), где учитывались данные гравиметрии и результаты интерпретации по профилю ГСЗ Бакуриани—Степное), отмечается корреляционная связь: поднятию гранитного слоя в зоне БК соответствует прогибание поверхности раздела Мохо.

Совместный анализ методов микросейсмического зондирования и ГСЗ. На рис. 7 представлены результаты сопоставления разреза по микросейсмическому зондированию с результатами интерпретации профиля ГСЗ Бакуриани—Степное Г. В. Краснопевцевой [Краснопевцева и др., 1970] и Г. А. Павленковой [Павленкова, 2012].

Сравнение результатов МЗ и ГСЗ в интерпретации Г. В. Краснопевцевой (ГСЗ-К) показано на рис. 7, а, в интерпретации Г. А. Павленковой (ГСЗ-П) — на рис. 7, б. Видно хорошее соответствие ряда фрагментов МЗ с независимыми интерпретациями по ГСЗ [Горбатиков и др., 2015].

Так, низкоскоростное субвертикальное тело, которое на рис. 7, а отмечено индексом L-I, на разрезе ГСЗ-К определяется в виде разрыва границ К и М в районе 15—20 км северного фрагмента профиля МЗ.

Что касается формы высокоскоростной зоны Н-I, то ее верхняя граница хорошо коррелирует с границей гранитного слоя на разрезе ГСЗ-К (см. рис. 7, а), а также со скоростной границей 4,0—5,5 км/с на разрезе ГСЗ-П (см. рис. 7, б). При этом подошва высокоскоростного тела Н-I соотносится со скоростной границей 6,0—6,2 км/с разреза ГСЗ-П.

Обращает на себя внимание и ряд других совпадений. Так, крутопадающая отражающая граница (см. рис. 7, б) — продолжение границы К1 на разрезе ГСЗ-П — на участке 20—40 км южного фрагмента разреза МЗ располагается почти точно в границах высокоскоростного тела Н-II. Причем в пределах тела Н-II данная граница также коррелирует с положением фундамента в интерпретации Г. В. Краснопевцевой (см. рис. 7, а). Наконец, наклон от-

ражающей границы на глубине 15—20 км в южной оконечности разреза МЗ совпадает с наклоном низкоскоростной зоны L-III. Дополнительно можно отметить, что на фоне низкоскоростного тела L-I на глубине около 30 км намечается горизонтальная граница в виде нарушения сплошности изображения, которая ассоциируется с границами К1 и К2 на рис. 7, б и границей К на рис. 7, а.

На рис. 8 приведена интерпретация методом МЗ скоростной модели Г. В. Краснопевцевой и сейсмотомографии программы GeoGiga. В верхней части разреза граница гранитного слоя хорошо коррелируется с моделью Краснопевцевой и сейсмотомографией. В нижней части отмечается несоответствие границ Конрада и Мохо, расхождение достигает 10—15 км. Высокоскоростная неоднородность в центральной приповерхностной части БК на разрезе МЗ совпадает с поднятием фундамента на томографическом разрезе. Разломные структуры, выделенные по сейсмотомографии в южной части БК, совпадают с градиентными зонами МЗ, в северной части есть расхождение порядка 10 км.

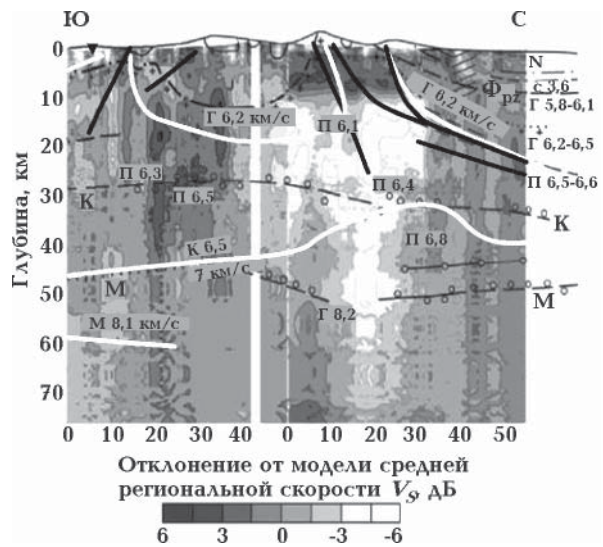


Рис. 8. Результаты ГСЗ в интерпретации Г. В. Краснопевцевой и сейсмотомографии ПО GeoGiga на разрезе МЗ. Условные обозначения для модели Краснопевцевой приведены выше на рис. 7. Белыми утолщенными линиями выделены поверхности раздела Конрада, Мохо и гранитного слоя по сейсмотомографии со значениями кажущихся скоростей. Черные утолщенные линии — разломы, выделенные по сейсмотомографии.

Имея в виду высокую чувствительность метода МЗ относительно субвертикальных скоростных границ и низкую относительно горизонтальных границ [Горбатиков, Цуканов, 2011], можно констатировать хорошее совпаде-

ние результатов МЗ и ГСЗ, причем необходимо отметить, что оба метода в определенной мере дополняют друг друга.

Заключение. На разрезах сейсмотомографии профилей ГСЗ и МЗ под БК наблюдается поднятие кровли гранитного слоя (фундамента) и его прогибание в Куринской впадине и Предкавказском прогибе до 20 км. Граница поверхности раздела Мохо опускается под БК ниже 60 км. Наблюдается зона надвига в районе северной части БК, представленная серией разломов с падением на север; на профилях ГСЗ это отчетливо видно по нарушению скоростных неоднородностей. Условно проведенные границы гранитного, базальтового слоев и поверхности раздела Мохо на

томографических изображениях ГСЗ сильно варьируют, что, возможно, связано с блоковым строением БК и разделением его на зоны. Выделенные границы основных сечений земной коры по всем методам хорошо коррелируются. Совместная интерпретация методов ГСЗ и ММЗ позволяет сделать вывод, что оба метода дополняют друг друга и позволяют внести коррективы в построение геолого-геофизической модели Большого Кавказа.

Благодарности. Выражаем глубокую признательность и благодарность члену редколлегии «Геофизического журнала», сотруднику Института геофизики НАН Украины, д-ру геол. наук Т. П. Егоровой за содействие и помощь в анализе результатов исследований.

Список литературы

- Балавадзе Б. К., Шенгелая Г. Ш. Основные черты структуры земной коры Большого Кавказа по гравиметрическим данным. Докл. АН СССР. 1961. Т. 136. № 6. С. 131—140.
- Винник А. А. XТомо-LM: Система сейсмической томографии Geo, Geo Ltd, 2006—2010.
- Гамкрелидзе П. Д., Гамкрелидзе И. П. Тектонические покровы Южного склона Большого Кавказа. Тбилиси: Мецниереба, 1977. 81 с.
- Гамкрелидзе Н. П., Гонгадзе С. А., Миндели П. Ш., Кириа Д. К., Яволовская О. В. Физика земной коры Грузии. Тбилиси: Изд. Ин-та геофизики АН Грузии, 2012. 221 с.
- Горбатилов А. В., Рогожин Е. А., Степанова М. Ю., Харазова Ю. В., Андреева Н. В., Перегдерин Ф. В., Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Дзеранов Б. В., Дзедобоев Б. А., Габараев А. Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в осетинском секторе по комплексу геофизических данных. Физика Земли. 2015. Т. 51. № 1. С. 26—37.
- Горбатилов А. В., Цуканов А. А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования. Физика Земли. 2011. № 4. С. 96—112.
- Гонгадзе С. А. Сравнительный анализ глубинного строения Большого Кавказа на основе геофизических данных по новым технологиям. Ч. 1. Гравиметрия, магнитометрия, локальная сейсмотомография и микросейсмозондирование. Геофиз. журн. 2016. Т. 38. № 3. С. 145—154.
- Миндели П. Ш. Гравитационная модель литосферы Кавказа и Восточного Средиземноморья. Тбилиси: Изд. ГСУ, 1999. С. 3—54.
- Краснопевцева Г. В., Матушкин Б. А., Шевченко В. И. Новая интерпретация данных ГСЗ по профилю Степное-Бакуриани на Кавказе. Сов. геология. 1970. № 8. С. 113—120.
- Павленкова Г. А. Строение земной коры Кавказа по профилям ГСЗ Степное-Бакуриани и Волгоград-Нахичевань (результаты переинтерпретации первичных данных). Физика Земли. 2012. № 5. С. 16—25.
- Рослов Ю. В., Винник А. А., Копылова А. В. Восстановление сложнопостроенных скоростных моделей на основе интегрирования сейсмической томографии и кинематической миграции. Модели Земной коры и верхней мантии: Материалы Междунар. научн.-практ. семинара 18—20 сентября 2007 г. Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007, С. 177—180.
- Юров Ю. Г. Строение земной коры на Кавказе и изостазия. Сов. геол. 1963. № 9. С. 42—47.
- Chelidze T., Gugunava G., Gamkrelidze N., Mindeli P., Kiria J., Ghonghadze S., Yavolovskaya O., 2012. The Deep Structure and 3D Thermo-geodynamics of the Caucasus by Geophysical Data. EGU General Assembly 22—27 April 2012, Vienna, Austria, P. 8242.
- Geogiga Seismic Pro 6.0 New Features, Geogiga Technology Corp., 2009.
- Zhang J., Toksoz M. N., 1998. Nonlinear refraction travel-time tomography. Geophysics. 63(5), 1726—1737.

Main Sections of the Earth Crust and Upper Mantle of the Greater Caucasus by New Technologies. 2. Deep Seismic Sounding, Micro Seismic Sounding

© *S. A. Ghonghadze, T. L. Chelidze, P. Sh. Mindeli, N. I. Ghlonti,
J. K. Kiria, O. V. Yavolovskaya, 2016*

The work reviews the possibility of application of the seismic tomography method for processing the materials of deep seismic sounding (DSS). It presents comparative results by various softwares as GeoGiga Seismic PRO 7.0 (Canada), XTomolm (St. Petersburg). The work shows the possibility of using tomography together with the data of the micro seismic sounding (MSS) method. The basic section of the Earth's crust and upper mantle by tomographic sections. It is determined that the cover of the foundation is strongly indented, i.e., all the foundation is fragmented into blocks, which are enclosed by the net of faults formed according to the gradient zones of speeds and fragmentation of speed inhomogeneity in the tomography section. The thickness of the earth crust under the Greater Caucasus increases to 60–70 km. It reveals the speed image obtained as a result of seismic tomography, earlier constructed speed models of the DSS profiles of Bakuriani-Stepnoye and Nakhchivan—Volgograd reinterpreted by Pavlenkova G.A, also correlative analysis of the method of deep seismic sounding (DSS) and the method of micro seismic sounding (MSS) of the profile of Tskhinval—Ardon.

Key words: the Greater Caucasus, Earth's crust, deep seismic sounding, seismic tomography, micro seismic sounding.

References

- Balavadze B. K., Shengelaya G. Sh.*, 1961. Main features the structure of the crust of the Greater Caucasus from gravity data. *Doklady AN SSSR* 136(6), 131—140 (in Russian).
- Vinnik A. A.*, 2006. XTomolm: seismic tomography system Geo, Geo Ltd, 2006—2010 (in Russian).
- Gamkrelidze A. A., Gamkrelidze I. P.*, 1977. Tectonic covers southern slope of the Greater Caucasus. Tbilisi: Metsniereba, 81 p. (in Russian).
- Gamkrelidze N. P., Gongadze S. A., Mindeli P. Sh., Kiria D. K., Yavolovskaya O. V.*, 2012. Physics of the Earth's crust Georgia. Tbilisi: The Institute of Geophysics of the Academy of Sciences of Georgia Publ., 221 p. (in Russian).
- Gorbatikov A. V., Rogozhin E. A., Stepanova M. Yu., Kharazova Yu. V., Andreeva N. V., Perederin F. V., Zaalishvili V. B., Mel'kov D. A., Dzeranov B. V., Dzeboev B. A., Gabaraev A. F.*, 2015. The pattern of deep structure and recent tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. *Fizika Zemli* 51(1), 26—37 (in Russian).
- Gorbatikov A. V., Tsukanov A. A.*, 2011. Modeling of Rayleigh waves near the scattering velocity heterogeneities. Research opportunities microseismic sensing method. *Fizika Zemli* (4), 96—112 (in Russian).
- Gongadze S. A.*, 2004. The deep structure of the Greater Caucasus on the basis of geophysical data according to new technologies. 1. Gravimetry, magnetometry, local seismic tomography and micro seismic sounding. *Geofizicheskiy zhurnal* 38(3), 145—154 (in Russian).
- Mindeli P. Sh.*, 1999. Gravity model of the lithosphere of the Caucasus and the Eastern Mediterranean. Tbilisi: GCY. (in Russian).
- Krasnopevtseva G. V., Matushkin B. A., Shevchenko V. I.*, 1970. New NHS interpretation of the data on the profile of the Steppe-Bakuriani in the Caucasus. *Sovetskaya geologiya* (8), 113—120 (in Russian).
- Pavlenkova G. A.*, 2012. Structure of the crust of the Caucasus on profiles NHS Steppe-Bakuriani and Volgograd-Nakhichevan (reinterpretation of the primary data). *Fizika Zemli* (5), 16—25 (in Russian).
- Roslov Yu. V., Vinnik A. A., Kopylov A. V.*, 2007. Restoration of complex velocity models based on the integration of seismic tomography and kinematic migration. Models of the Earth's crust and upper mantle: Proc. of the International scientific-practical seminar on 18—20 September 2007. St. Petersburg: Publ. VSEGEI, P. 177—180. (in Russian).
- Yurov Yu. G.*, 1963. Structure of the Earth's crust in the Caucasus and isostasy *Sovetskaya geologiya* (9), 42—47 (in Russian).

- Chelidze T., Gugunava G., Gamkrelidze N., Mindeli P., Kiria J., Ghonghadze S., Yavolovskaya O.*, 2012. The Deep Structure and 3D Thermo-geodynamics of the Caucasus by Geophysical Data. EGU General Assembly 22—27 April 2012, Vienna, Austria, P. 8242.
- Geogiga Seismic Pro 6.0 New Features*, Geogiga Technology Corp., 2009.
- Zhang J., Toksoz M. N.*, 1998. Nonlinear refraction travel-time tomography. *Geophysics*. 63(5), 1726—1737.