

УДК: 551.14(234.9)

А. Х. БАГРАМЯН, К. А. ЗАКАРЯН

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СКОРОСТНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ КАВКАЗА

Представлена новая карта горизонтальных скоростных вариаций в верхней мантии Кавказа. Карта построена графоаналитическим методом картирования исправленных за кору невязок времени пробега продольных волн 31 сейсмической станции на глубину 150 км и сглаживания полученного числового поля в скользящем квадрате со стороной 50 км. Выявлены крупные литосферные неоднородности субмеридионального направления. Обнаруженные горизонтальные вариации скоростей сопоставлены с гравитационным полем, сейсмичностью на Кавказе и с новейшей тектоникой Кавказа.

Вопросу изучения строения верхней мантии Кавказа посвящен ряд работ [1, 3—5, 7, 10, 11].

В данной статье, являющейся продолжением работы [4], построена карта скоростных литосферных неоднородностей, обнаруженных по данным о невязках—отклонениям времен пробега телесеismicческих продольных волн от стандартного годографа [12].

Для решения поставленной задачи необходимо, чтобы сейсмические лучи многократно и с разных направлений пронизывали среду под данной группой станций. Но в данном случае возможности определения скоростных аномалий верхней мантии изучаемого региона несколько ограничиваются в связи с неполным интервалом прихода сейсмических волн, плотности распределения сейсмических станций и разнотипности регистрирующей аппаратуры.

Проанализировано около 450 землетрясений для каждой сейсмической станции за период 1971—1977 гг., количество участвующих сейсмических станций 31.

В результате полученная карта сопоставлена с другими геолого-геофизическими данными—с сейсмичностью, со схемой изостатических аномалий, с картой новейшей тектоники Кавказа.

Методика построения карты горизонтальных скоростных неоднородностей

Графоаналитический метод картирования подробно описан в [4, 6]: укажем наиболее важные моменты применяемой методики.

Исходными данными для картирования являются отклонения времен пробега продольных волн от стандартного годографа [12].

Продольные волны, распространяющиеся от очага к станции по пути наименьшего времени, регистрируются на сейсмограммах относительно в неискаженном виде, и их первые вступления идентифицируются со значительно большей точностью при хорошо налаженной аппаратуре.

Следовательно, невязки являются информативными в аспекте изучения глубинных структур.

Эффективность выявления и картирования неоднородностей по кинематическим данным существенным образом зависит:

1) от точности измерений моментов вступлений продольной волны; 2) от систематических ошибок определений параметров очага; 3) от трансверсальных неоднородностей строения и свойств среды использованных в работе эпицентральных зон; 4) от горизонтальных изменений мощности и скоростного разреза коры; 5) от влияния горизонтальных скоростных вариаций подстилающих слоев и нижней мантии; 6) от разнотипности и погрешностей задания параметров аппаратуры.

Сейсмическая сеть Кавказа оснащена, в основном, аппаратурой типа СКМ с увеличением, превосходящим 10^4 , период которых близок 0,3 сек. Ошибки же при коррелировании фаз, по всей вероятности, не будут превосходить $1/3$ периода регистрации сейсмических волн, т. е. 0,1 сек. При методике, использованной в работе, влияние ошибок определения параметров очага полностью устраняется, о чем будет подробно сказано в следующем разделе.

Причина 3 практически одинакова для рассматриваемых в работе азимутальных секторов, которая устраняется введением оценки постоянной составляющей невязок для каждого из азимутальных секторов, не связанной с вариациями скоростей под станциями и определяемой следующим образом:

$$\bar{\Delta t}_j = \sum_i \Delta t_{ij} / N,$$

где Δt_{ij} — средняя невязка для i -той станции и j -того азимутального сектора; N — число станций.

Влияние фактора 4 оценивается введением станционных поправок за кору при известных схемах мощности и скоростного разреза коры [1, 11].

Обозначим через δt_{ij} значение Δt_{ij} , исправленные за влияние 3 и 4 пунктов

$$\delta t_{ij} = \Delta t_{ij} - \bar{\Delta t}_j - \delta t_{ij}^{(k)},$$

где $\delta t_{ij}^{(k)}$ — станционная поправка за кору.

Таким образом, получаем непрерывную функцию $\delta t(x, y)$, исправленную за вышперечисленные эффекты, которая легко преобразовывается в горизонтальные скоростные вариации $\delta V(x, y)$ при задании слоя конечной мощности

$$\delta t(x, y) / t_0 = -\delta V(x, y) / V_0,$$

где t_0 и V_0 — время пробега и среднелучевая скорость в исходной модели слоя [12].

Экспериментальные данные

Для построения карты горизонтальных скоростных вариаций в верхней мантии Кавказа проанализированы наблюдения 31 сейсмической станции, расположение которых показано на рис. 1, за период 1971—1977 гг., отобрано около 450 землетрясений из *JSC* с магнитудой $M \geq 5,5$, с эпицентральным расстоянием $30^\circ \leq \Delta \leq 100^\circ$ из таких сейсмоактивных районов мира, как Курило-Алеутский, Филиппинский, Индонезийский, координаты эпицентров которых определялись при наличии данных более, чем 100 сейсмических станций мира.

Считывание времен вступлений продольных волн проводилось одним из авторов непосредственно с сейсмограмм.

Невязка вычислялась для каждого землетрясения и каждой сейсмической станции относительно опорной станции «Горис» по формуле:

$$\delta t_n = t_n - t_0 - \frac{dt}{d\Delta} (\Delta_n - \Delta_0),$$

где t_n и t_0 —времена вступлений продольной волны на данную и опорную станции, $dt/d\Delta$ —производная стандартного годографа при $\Delta = (\Delta_n + \Delta_0)/2$, не возмущенная горизонтальными неоднородностями в верхней мантии, Δ_n и Δ_0 —соответствующие эпицентральные расстояния для данной станции и опорной. Весь азимутальный сектор составляет 120° , остальная же часть была статически не представительной.

Таблица 1

Азимут в градусах	0—20	21—40	41—60	61—80	81—100	101—120
Δ°	83,15	75,0	70,4	67,7	88,7	77,5
Значения сноса в км	62,6	71,8	77,4	80,7	57,0	69,0

После вычисления δt_n для каждого азимутального сектора шириной в 20° определена $\overline{\delta t_n}$, исправленное среднее квадратическое отклонение которой равняется 0,15 сек (см. табл. 2).

Для введения поправок за вариации скоростных разрезов коры использованы схемы мощностей, предложенные в [1, 7, 11], согласно которым мощность земной коры на Кавказе варьирует от 40—60 км. На основе анализа сейсмических волн, [10] зарегистрированных от мощных взрывов, и интерпретации материалов ГСЗ [11], скорости распространения продольных волн в осадочном комплексе равны 4,4 км/сек, в «гранитном» слое—5,8 км/сек, «базальтовом»—6,9 км/сек.

При построении карты невязки приводились к постоянной мощности земной коры—50 км, которая для большинства станций оказалась одинаковой.

Глубина проецирования была выбрана из следующих соображений. Предварительно были закартированы неоднородности в верхней мантии для глубин 100, 150, 200 км.

Осредненные значения $\delta l(x, y)$, приписываемые узлам решетки, лучше согласовывались со значениями, попавшими в квадрат сглажи-

Таблица 2

Таблица значений $\overline{\delta l_n}$ [1]

С/станции	Азимут в градусах					
	0—20	21—40	41—60	61—80	81—100	101—120
Нахичеван	0,31	0,17	0,04	-0,04	-0,3	-0,27
Кировабад	-1,33	-0,8	-1,05	-0,84	-0,59	-0,37
Баку		0,37	0,67	0,76	0,89	0,89
Грозный	-0,01	-0,15	-0,7	-0,72	-0,65	-0,59
Пятигорск	1,02	0,95	0,5	0,31	0,31	-0,51
Махачкала	1,05	0,73	0,38	-0,12	-0,5	-0,49
Шемаха	-0,22	-0,26	-0,44	-0,16	-0,1	0,12
Гегечкори		0	0,22	0,07	0,22	0,57
Гори	-0,71	-0,48	-0,19	0,36	0,49	0,67
Душети	0,41	0,41	0,45	0,22	0,29	-0,19
Они	0,02	-0,04	0,13	0,17	0,29	0,61
Лагодехи	-0,76	-1,05	-0,77	-0,57	0,0	0,7
Тбилиси	-0,72	-0,74	-0,92	-0,78	-0,77	-0,67
Зугдиди		-0,09	-0,66	-0,89	-0,38	-0,38
Цебельда		0,36	0,71	0,15	-0,46	-0,68
Ткибули	-0,45	0,1	0,28	0,69	0,36	0,21
Ленинакан	-0,04	-0,43	-0,31	0,01	0,26	0,49
Ереван	0,79	0,8	0,84	0,54	0,21	-0,02
Ахалкалаки	0,43	0,4	0,32	0,21	0,26	0,29
Абастумани	-0,61	-0,72	-0,69	-0,71	-0,26	-0,17
Бакуриани	-0,07	-0,04	0,2	0,31	0,56	0,73
Богдановка	0,97	0,7	0,58	0,25	0,24	-0,34
Степанаван		0,79	0,4	0,35	0,08	-0,17
Варденис		0,38	0,13	-0,29	-0,03	-0,14
Каджаран		0,78	0,93	0,55	0,37	0,26
Кариракар		-0,13	0,61	0,65	0,18	0,18
Сочи		-0,97	-0,96	-0,99	-0,89	-0,86
Шеки		0,44	0,34	0,56	0,24	-0,17
Саберно		-0,81	-0,51		-0,17	
Ханши		-0,61	-0,56		-0,17	-0,22
Горис	-0,08	-0,06	0,03	-0,05	0,02	-0,08

вания для глубины 150 км. При наличии же большого разброса на данном участке исследуемого региона проходит нулевая изолиния, разделяющая низкоскоростной блок от высокоскоростного или наоборот.

Для расчета сноса лучей [2, 6] определены средние эпицентральные расстояния для вышеуказанных азимутов.

Используя скоростной разрез [12], где время пробега продольной волны в слое 150 км составляет 31,6 сек, получаем, что изменение средней скорости в данном слое на 1% создает невязку времени пробега величиной $t_p = 0,32$ сек. Карта построена методом сглаживания с

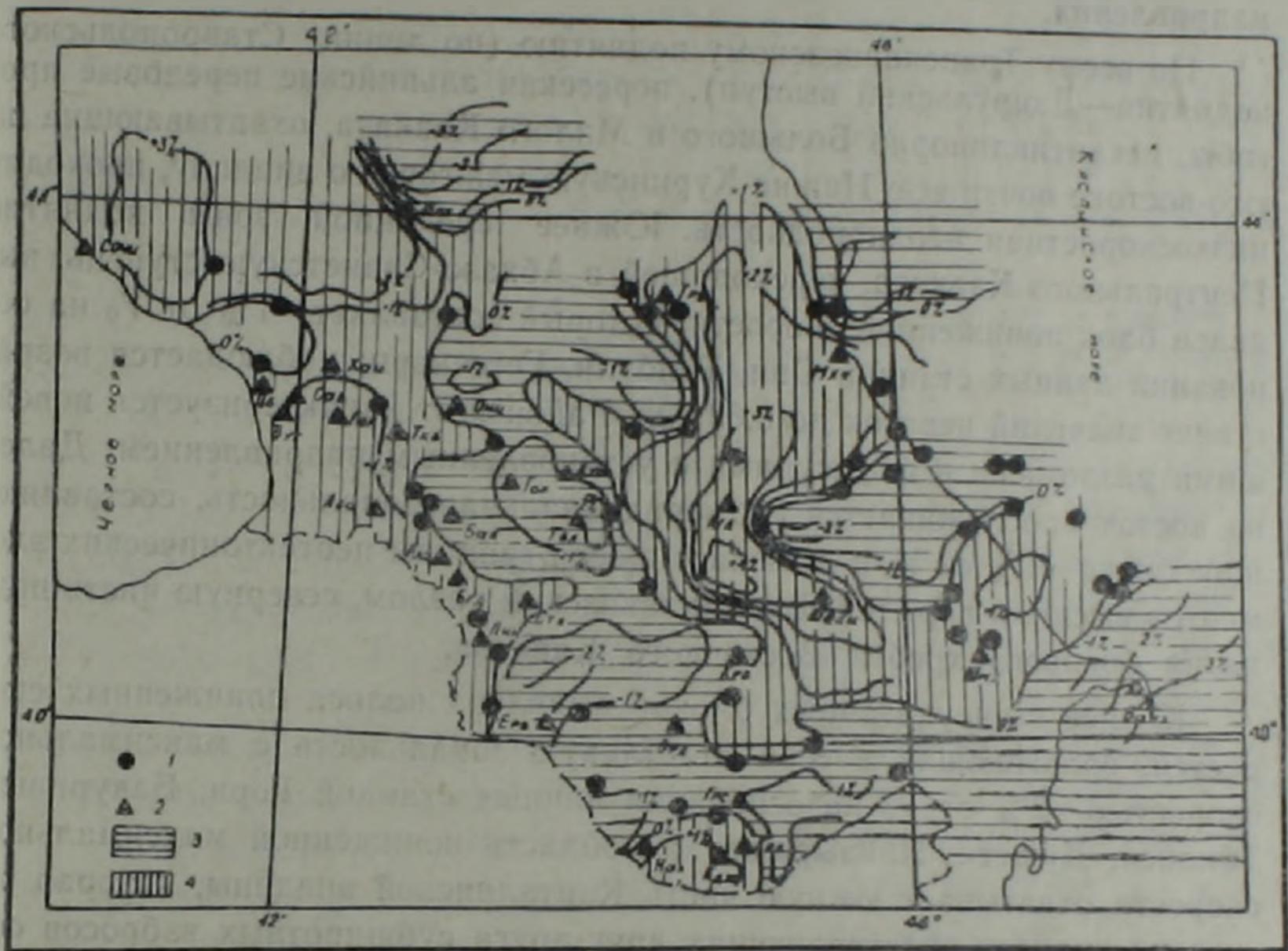


Рис. 1. Карта скоростных горизонтальных вариаций верхней мантии Кавказа. 1—эпицентры землетрясений; 2—сейсмические станции; 3—зона низких скоростей; 4—зона высоких скоростей.

подвижным квадратом со стороной 50 км при шаге сглаживания 25 км. При построении карты одно значение $\delta t(x, y)$ определяется путем осреднения нескольких значений δt_{ij} , попадающих в квадрат. Среднеквадратичная погрешность δt_{ij} составляет 0,2 сек и меньше t_p , что дает возможность построить карту горизонтальных скоростных вариаций с шагом проведения изолиний в 1%. Полученная карта горизонтальных скоростных вариаций в верхней мантии Кавказа для глубины проецирования 150 км представлена на рис. 1.

Обсуждение карты скоростных вариаций

По Кавказу, представленному сложно построенной системой альпийских складчатых сооружений, проходят следующие продольные тектонические зоны: 1) эпигерцинская (Скифская) плита Предкавказья; 2) альпийские краевые передовые прогибы—Индоло-Кубанский и Тер-

ско-Каспийский; 3) внешний мегантиклинорий альпийской области—Большой Кавказ; 4) закавказские межгорные прогибы—Рионский и Куринский; 5) внутренний мегантиклинорий альпийской области—Малый Кавказ [8].

В исследуемой территории выделяются несколько крупномасштабных литосферно-астеносферных неоднородностей субмеридионального направления.

По всему Транскавказскому поднятию (по линии Ставропольского поднятия—Дзиркульский выступ), пересекая альпийские передовые прогибы, мегантиклинории Большого и Малого Кавказа, охватывающие на юго-востоке почти всю Нижне-Куринскую межгорную впадину, проходит низкоскоростная неоднородность. Южнее срединной зоны поднятия Центрального Кавказа, переходящей в Абхазо-Сванетскую ступень, выявлен блок пониженной скорости, который составляет—1% от V_0 на основании данных станций Они, Ткибули, Гегечкори; наблюдается возрастание значений невязок до 0,69 сек. Район этот характеризуется новейшими разломами и флексурами с установленным направлением. Далее на восток прослеживается субмеридиональная зональность, составляющая также—1% от V_0 и включает в себя границы неотектонических элементов высшего порядка: Владикавказский разлом, северную часть поднятия бокового хребта Восточного Кавказа.

Южнее вышеуказанных блоков выявлена полоса пониженных скоростей, включающая в себя отчетливую зональность с максимальной скоростью—2% от V_0 на основании данных станций Гори, Бакуриани, Тбилиси, Душети. Наиболее выраженная область пониженной максимальной скорости охватывает южную часть Карталинской впадины, которая в системе кулисно подставляющих друг друга субширотных взбросов соотносится с восточной частью Аджаро-Триалетского поднятия Малого Кавказа.

При наличии относительно большого количества станций можно говорить о надежности карты в этом районе.

В западном направлении от охарактеризованных блоков на карте намечена нулевая изолиния, являющаяся границей перехода зон низкой скорости в высокую. Полоса тех же пониженных скоростей выявлена по направлению на юг. Она охватывает район от Лениакана до Кировабада и Еревана. Выделены 2 подобных «языка» с максимальной пониженной скоростью—2% от V_0 . Эта зональность почти целиком приурочена к мегантиклинорию Малого Кавказа, отчетливо представленному в новейшей тектонике сводово-глыбовыми сооружениями. На карте изолинией в—1% от V_0 оконтуривается центральная часть Среднеараксинского межгорного прогиба. Далее вся эта низкоскоростная субмеридиональная неоднородность в южной своей части имеет простираение на восток, становясь уже субширотной, с выявлением опять полосы пониженной скорости (—1% от V_0). Такая зональность приурочена к Нижнеараксинскому поперечному межгорному прогибу по данным станций Горис, Кармакар, Каджаран.

Примечательно, что охарактеризованная низкоокоростная неоднородность оконтурена высокоскоростными неоднородностями, вытянутыми вдоль побережий Черного и Каспийского морей.

Южнее Пятигорска по направлению к Черному морю выявлена зональность относительно повышенной скорости $+2\%$ от V_0 . Ей соответствует восточная часть Лабино-Малкинской моноклинали. Растягиваясь на юг, высокоскоростная неоднородность проявляет особенность повышения скорости в районе Рионской межгорной впадины, Гурийской краевой зоны (данные станций Цебельда, Саберно, Зугдиди, Гегечкори). Она пересекает западную часть Аджаро-Триалетской зоны поднятий, Цалко-Ахалцихокую зону впадин, район крупнейших вулканов и новейшего вулканизма—Ахалкалакскую вулканическую зону до Верхнеахурянской впадины (данные с/станций Абастумани, Ахалкалаки, Богдановка, Леникан).

Вдоль побережья Каспийского моря протягивается высокоскоростная неоднородность, которую рассмотрим также по ее растяжению в субмеридиональном направлении.

Район Грозного находится на стыке альпийских передовых прогибов и мегантиклинория Большого Кавказа; с запада он оконтурен нулевой изолинией, отделяющей высокоскоростную неоднородность от низкоскоростной. В северо-восточной части проходит полоса относительно повышенной скорости ($+2\%$ от V_0), выше которой отмечена зональность, составляющая $+1\%$ от V_0 . В восточной части Кавказа наблюдаются самые высокие скорости. В восточной части мегантиклинория Большого Кавказа, где проходит зона новейших разломов, выявлен блок повышенной скорости $+3\%$, оконтуриваемый изолинией в $+2\%$ от V_0 . Отличительной особенностью этого участка является самая высокая скорость $+4\%$ от V_0 , охватывающая Ширакоко-Аджиноурскую складчатую систему. В центральную часть этой высокоскоростной структуры вклинивается зона низких скоростей в субширотном направлении, соответствующая Самурской поперечной структуре с выделенной полосой пониженной скорости -2% от V_0 .

На Апшеронском полуострове прослеживается дифференциация скоростей от -1% до -3% от V_0 , которая приурочена к Южно-Каспийскому геосинклинальному прогибу. Подобная дифференциация скоростей наблюдается севернее Пятигорска, соответствующая Ставропольскому поперечному поднятию. Севернее Махачкалы, где расположены Терско-Каспийская впадина и Терско-Дагестанский межгорный прогиб, отмечена зона пониженных скоростей -1% от V_0 .

В районе северо-западного поднятия Кавказа отмечена высокая скорость $+3\%$ от V_0 , переходящая по простиранию на восток соответственно в $+2\%$ и $+1\%$ от V_0 , приуроченная к Лабино-Малкинской моноклинали.

Аномальное поле силы тяжести на Кавказе сильно дифференцировано [7].

В северо-восточной части Черного моря выделяются две вытянутые вдоль берега интенсивные аномалии: отрицательная, ближе к береговой полосе, соответствующая высокоскоростной зоне мантии, и положитель-

ная, оконтурированная по нашей схеме нулевой изолинией, предполагающей переход от высокоскоростной зоны в низкоскоростную. Обширные области гравитационного минимума отмечены на Армянском нагорье, а также над центральной и восточной (Дагестанской) частями Большого Кавказа, которые постепенно уменьшаются в сторону Дзирульского массива. Низкоскоростная зона, соответствующая Транскавказскому поднятию, в редукции Буге характеризуется большими отрицательными значениями, а высокоскоростная зона, приуроченная к восточной части сводово-глыбового поднятия Кавказа, отмечена положительными значениями.

Кавказ принадлежит к числу территорий с довольно высокой, но не глубокой сейсмической активностью с преобладанием ее в восточной половине по сравнению с западной. На карте показано положение эпицентров больших землетрясений с $M \geq 6$, взятых из [9]. Наблюдается большая приуроченность (около 70%) положения эпицентров сильных землетрясений к нулевой изолинии, т. е. контактам высокоскоростных и низкоскоростных аномалий. Результаты дальнейших детальных сейсмических исследований глубинных структур помогут выяснить механизм возникновения землетрясений и особенности строения неоднородностей верхней мантии.

Данная работа выполнялась под руководством Л. П. Винниба, за что авторы выражают ему глубокую благодарность.

Институт геофизики и инженерной
сейсмологии АН Армянской ССР

Поступила 26 XI 1981.

Ա. Խ. ԲԱՂՐԱՄՅԱՆ, Կ. Ա. ԶԱՔԱՐՅԱՆ

ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՀՈՐԻՉՈՆԱԿԱՆ ԱՆՀԱՄԱՍԵՌՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԿՈՎԿԱՍԻ
ՎԵՐԻՆ ԹԻԿՆՈՑՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Ներկայացված է Կովկասի բնատարածքի վերին թիկնոցում սեյսմիկ ալիքների արագությունների հորիզոնական վարիացիաների նոր քարտեզը՝ կազմված գրաֆոանալիտիկ մեթոդով 150 կմ խորության համար: Օգտագործված են 31 սեյսմիկ կայանների տվյալները: Հայտնաբերված են լիթոսֆերայի խոշոր անհամասեռություններ, որոնք ի տարբերություն տեկտոնական գոտիների, օժնեն մերձմիջօրեական ձգվածություն: Արագությունների հայտնաբերված վարիացիաները համադրված են Կովկասի նորագույն տեկտոնիկայի, գրավիտացիոն դաշտի և սեյսմիկության հետ:

HORIZONTAL VELOCITY HETEROGENEITIES IN THE UPPER MANTLE OF THE CAUCASUS

Abstract

A new map of horizontal velocity changes in the upper mantle of the Caucasus is presented. The map is compiled by the grapho-analytical method of mapping of corrected for the crust longitudinal wave travel time anomalies for a depth of 150 km from 31 seismic stations. The method of smoothing out the obtained numerical field in a sliding square with a side of 50 km has been also used. Large lithosphere heterogeneities of submeridional trend are revealed. The discovered velocity changes are compared with the gravitational field and seismicity as well as with the latest tectonics of the Caucasus.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балавадзе Б. К., Твалтвадзе Г. К., Шенгелая Г. Ш., Сихарулидзе Д. И., Картвелишвили К. М. Геофизическое исследование земной коры и верхней мантии в области Кавказа. Геотектоника, № 3, 1966.
2. Буллен К. Введение в теоретическую сейсмологию. «Наука», М., 1967.
3. Винник Л. П. Исследования мантии Земли сейсмическими методами. «Наука», М., 1976.
4. Винник Л. П., Годзиковская А. Л., Сихарулидзе Д. И., Патарая Е. И., Баграмян А. Х. Скоростные аномалии верхней мантии Кавказа. Физика Земли, № 7, 1978.
5. Винник Л. П., Ленартович Э. Структура верхней мантии Кавказа и Карпат по сейсмическим данным. Известия АН СССР, Физика Земли, № 3, 1976.
6. Винник Л. П., Лукк А. А., Мирзокурбачов М. Количественный анализ скоростных неоднородностей мантии Памиро-Гиндукуша. Известия АН СССР, Физика Земли, № 5, 1978.
7. Гравитационная модель коры и верхней мантии Земли. «Наукова Думка», Киев, 1979.
8. Милановский Е. Е. Новейшая тектоника Кавказа. «Недра», М., 1968.
9. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. «Наука», М., 1977.
10. Сихарулидзе Д. И. Стросние Земли по поверхностным волнам. «Мецинереба», Тбилиси, 1978.
11. Структура земной коры Центральной и Восточной Европы по данным геофизических исследований. «Наукова думка», Киев, 1980.
12. Herrin E. Seismological tables forp-waves. Bull. Seismol. Soc. America, 4, 58, 1968.