

Э. М. ЕВСЕЕВА, О. И. ЮРКЕВИЧ

ИЗОСТАЗИЯ И СЕЙСМИЧНОСТЬ  
ПЬЕНИНСКОГО ГЛУБИННОГО РАЗЛОМА

Наиболее опасной сейсмоактивной зоной западных областей Украины является Закарпатье, на территории которого расположена часть Пьенинского глубинного разлома. Он начинается в районе Вены (Австрия), простирается вдоль Западных Карпат по территории ЧССР, продолжается вдоль Восточных Карпат в СССР и затем на границе УССР и СРР уходит под Марморощинские Массивы.

Весь Пьенинский разлом проявляется на поверхности узкой зоной утесов, порой изолированных и разобщенных [5]. Вдоль зоны утесов сочленяются блоки, отличающиеся по своему тектоническому развитию и процессам складкообразования [2, 6]. Пьенинская утесовая зона разделяет горную систему Карпат на внешнюю и внутреннюю, которым свойственны разные типы осадконакопления [9]. К разлому вдоль линии сопряжения с Выгорлат-Гутинской грядой в Закарпатье приурочен также многофазовый вулканизм [3]. То, что Пьенинская зона утесов является глубинным разломом, подтверждается данными глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ): зону пересекают международные профили ГСЗ III, V, VI [12].

С Пьенинским глубинным разломом связаны самые сильные землетрясения Закарпатья, что заставляет с особым вниманием относиться к изучению сейсмичности этой территории. Учитывая, что зона разлома пересекает различные по своему геологическому строению, тектонике и динамике блоки коры, необходимо также изучение их закономерностей и возможной корреляции с проявлениями сейсмичности. Это поможет сделать более углубленные выводы относительно внутренних процессов, приводящих к современному сейсмическому режиму этой зоны.

Проявление сейсмичности — результаты освобождения внутренних напряжений, накопившихся в коре и мантии Земли. Причины роста этих напряжений — вопрос и поныне дискуссионный, но не вызывает сомнения тот факт, что накопление их связано с процессами, протекающими в недрах Земли, которые могут вызывать перераспределение масс, что приводит к нарушению изостатического равновесия земной коры. А неизбежное стремление последней к равновесию приводит к накоплению напряжений. В восточной части Пьенинского глубинного разлома, по данным ГСЗ, наблюдается значительный скачок мощности земной коры: по одну сторону разлома под Складчатými Карпатами граница Мохо-ричча расположена на глубине 55 км, а по другую, под Закарпатем, — на глубине 25...30 км [12]. Такой перепад мощности коры тоже не может не вызывать напряженного ее состояния. А поскольку это явление — явное нарушение изостатического равно-

весия, то следует ожидать прямой корреляции между проявлениями сейсмичности и нарушениями изостатического равновесия. Целью настоящей статьи и является сопоставление сейсмических данных на территории Пьенинского разлома с характеристиками изостатического состояния этой зоны. В качестве последними были вычислены изостатические аномалии силы тяжести в редукции Эри с параметрами  $T_0 = 30$  км,  $\delta\kappa = 2,67$  г/см<sup>3</sup>,  $\delta m = 3,27$  г/см<sup>3</sup>, которые в среднем хорошо представляют реальное распределение плотностей изучаемой территории.

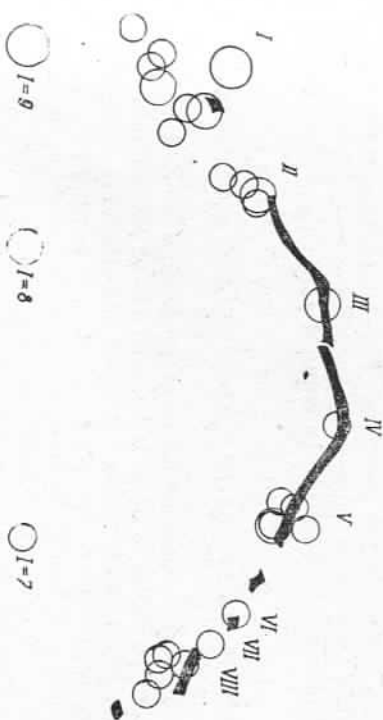


Рис. 1. Распределение землетрясений разлом Пьенинского глубинного разлома (темным цветом обозначена зона утесов).

Остановимся сначала на сейсмической характеристике разлома. Как уже отмечалось, здесь расположены эпицентры самых сильных закарпатских землетрясений, которые вместе с землетрясениями всего Пьенинского разлома дают информацию о выделяющихся напряжениях и, следовательно, о сейсмической опасности зоны. В 1950 г. в окрестности Санкт-Пельтен—Вена (Австрия) произошло землетрясение силой  $I = 9$  баллов. Далее на восток в районе Пьельтен—Трнава (на границе Австрии с ЧССР) имели место землетрясения силой  $I = 8-7$  баллов, затем на территории разлома в городах Мартин, Милкулош (ЧССР) их сила достигала  $I = 8-7$  баллов. Группа землетрясений в районе Гуменне (ЧССР) имела  $I = 8-6$  баллов [13]. Далее расположены эпицентры одиночных закарпатских землетрясений с  $I = 7$  баллов в городах Свалява, Долгое. К юго-востоку сосредоточена группа эпицентров землетрясений на границе УССР и СРР [7].

Местоположение сильных землетрясений позволяет объединить их в восемь групп: I—VIII (рис. 1). Причем отдельно выделяются одиночные землетрясения в районе Западных Карпат (города Милкулош, Мартин) и Советского Закарпатья (города Свалява, Долгое), так как по размерам очаговых зон их нельзя причислить ни к одной из выделенных соседних групп землетрясений. Сейсмичность VIII зоны некоторые исследователи связывают с Припятинским глубинным разломом. Но, учитывая размеры зон подго-

товки землетрясений с силой  $I=7-8$  баллов  $\sim 17 \dots 25$  км соответственно и близость Припанионского разлома к Пьенинскому можно считать, что сильныи землетрясения этой зоны вызваны процессами, происходящими на Пьенинском разломе.

Для оценки сброса напряжений при землетрясении принимаются известная формула [11]

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{R^3}, \quad (1)$$

где  $\Delta\sigma$  — падение напряжений;  $M_0$  — сейсмический момент;  $R$  — средний радиус очаговой области. Значения сброса напряжений в очаговых зонах I—VIII (в дин/см<sup>2</sup>) представлены ниже:

|                |                   |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |
|----------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Зона           | I                 | II               | III              | IV               | V                | VI               | VII              | VIII              |
| $\Delta\sigma$ | $0,81 \cdot 10^8$ | $0,5 \cdot 10^8$ | $0,7 \cdot 10^7$ | $0,5 \cdot 10^7$ | $0,5 \cdot 10^6$ | $0,6 \cdot 10^6$ | $1,0 \cdot 10^7$ | $0,76 \cdot 10^7$ |

Как видим, самые большие напряжения освободились в западной части разлома в зоне I и почти такие же напряжения освободились в восточной части разлома в зоне VIII, но за счет большого количества более слабых землетрясений  $I=7-6$  баллов. Меньшие напряжения освободились в зонах II и V, в остальных зонах сброшены напряжения существенно меньшие.

Зона Пьенинского разлома характеризуется положительным полем изостатических аномалий. Профиль этих аномалий вдоль рассматриваемой части разлома показан на рис. 2. Максимальные значения ( $\sim +50 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>) соответствуют западной и восточной частям разлома. Положительная изостатическая аномалия — свидетельство того, что подошва коры расположена выше, чем следует для достижения изостатического равновесия видимых масс рельефа.

Данные ГСЗ на этой территории [12] также показывают завышенное положение подошвы коры (раздел М на рис. 2) по сравнению с ее равновесным положением, соответствующим видимому рельефу  $M_h$  и удовлетворяющим вычисленным изостатическим аномалиям  $M_g$ .

Положение границ  $M_h$  и  $M_g$  вычислены по выражениям

$$M_h = T_0 + \frac{\delta_K}{\delta_M - \delta_K} \cdot h; \quad (2)$$

$$M_g = T_0 + \frac{\delta_K}{\delta_M - \delta_K} \cdot h + \frac{1}{2\pi f (\delta_M - \delta_K)} \Delta g_i, \quad (3)$$

где  $T_0$ ,  $\delta_K$ ,  $\delta_M$  — параметры изостатической редукции;  $h$  — высота рельефа;  $\Delta g_i$  — изостатическая аномалия. Как видно из рис. 2, все три границы  $M$ ,  $M_h$ ,  $M_g$  наиболее сближены в средней части Пьенинского разлома и максимально расходятся в западной и восточной его частях.

Данные о современных вертикальных движениях земной коры свидетельствуют о стойком поднятии территории: восточная и за-

падная его части поднимаются со скоростью 2—3 мм/год, центральная часть — со скоростью 1 мм/год. Следовательно, данная территория тектонически активна и на ней преобладают антиизостатические движения. В противном случае скорость современных вертикальных движений здесь были бы отрицательными. Таким образом, анализируемые характеристики — сейсмическая, динамическая и гравитационные — качественно согласуются между собой на всей изучаемой части Пьенинского разлома.

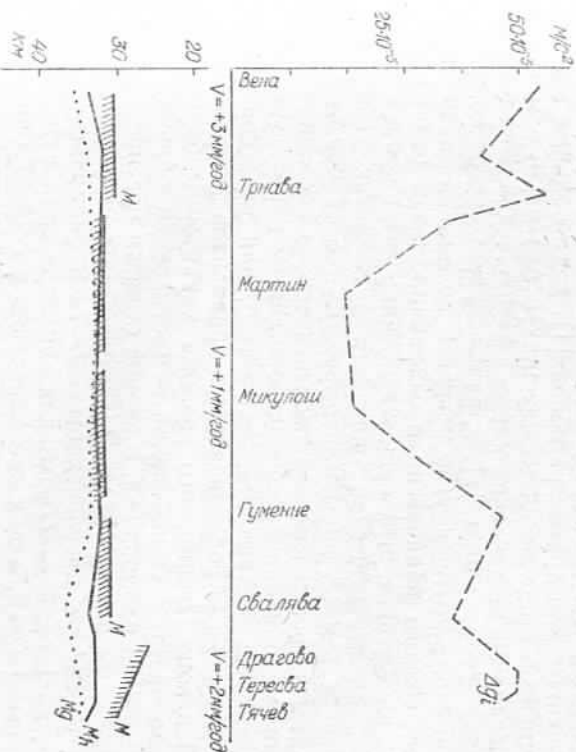


Рис. 2. Изменение изостатических аномалий и глубин поверхности Мохоровичича в зоне Пьенинского глубинного разлома ( $\Delta g_i$  — профиль изостатических аномалий;  $M$  — граница Мохо по данным ГСЗ;  $M_h$  — положение границы Мохо для уравновешенного рельефа;  $M_g$  — положение границы Мохо, удовлетворяющее вычисленным изостатическим аномалиям;  $v = +2$  мм/год — скорости современных вертикальных движений земной коры).

Для многих тектонически активных регионов СССР показана тесная корреляция между степенью нарушения изостатического равновесия, напряженного состояния недр и величиной энергии, выделяемой при землетрясениях [1]. В качестве индикатора напряженного состояния принимается горизонтальный градиент изостатической аномалии  $|\delta(\Delta g_i)/\Delta l| = |(\Delta g_{\max} - \Delta g_{\min})/\Delta l|$  — абсолютные значения разницы между максимальным и минимальным значениями аномалий, отнесенные к расстоянию между экстремальными значениями аномалий в некоторой области.

Такие градиенты были вычислены для областей  $\sim 50$  км<sup>2</sup>, покрывающих территорию восточной и западной частей разлома. Максимальные значения градиентов обнаружены в трех областях.

Первая соответствует западному концу разлома ( $|\delta(\Delta g)/\Delta l| = 1,3 \cdot 10^{-5} \dots 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2/\text{км}$ ), вторая — восточному концу ( $|\delta(\Delta g)/\Delta l| = 0,6 \cdot 10^{-5} \dots 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2/\text{км}$ ) и третья охватывает район г. Гуменне ( $|\delta(\Delta g)/\Delta l| = 0,3 \cdot 10^{-5} \dots 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2/\text{км}$ ). Численные значения горизонтальных градиентов сравнивались с наблюдаемыми, сброшенными сильными землетрясениями в соответствующих зонах Пьенинского разлома. На качественном уровне здесь обнаруживается тесная корреляция\*.

Интересно отметить, что количественные оценки корреляции, выполненные для других регионов [1], дали большее значение коэффициентов корреляции между  $\max |\delta(\Delta g)/\Delta l|$  и землетрясениями высоких энергетических классов  $k = 0,6 \dots 0,8$ . Как справедливо отмечает автор работы [1], вряд ли можно экстраполировать полученные оценки на другие регионы, но анализ связи нарушений изостатического равновесия с сейсмичностью в разных регионах СССР показывает, что существует явно выраженная тенденция увеличения сейсмической опасности в областях, где нарушено равновесие земной коры (литосферы), и особенно там, где происходит быстрое изменение изостатического состояния в горизонтальном направлении. Это подтверждается и результатами горизонтальными в данной работе. Более того, для участков с повышенными значениями горизонтальных градиентов изостатических аномалий в зоне Пьенинского разлома характерны большие относительные частоты  $Q$  появлений землетрясений большой интенсивности  $i = 8-6$  баллов. Так, в первой области повышенных горизонтальных градиентов  $|\delta(\Delta g)/\Delta l|$  относительная частота появления землетрясений с интенсивностью  $i = 7-8$  баллов составляет  $Q = 0,67$ , во второй —  $Q = 0,8$  для землетрясений с  $i = 7-8$  баллов и в третьей  $Q = 0,55$  для землетрясений с  $i = 8-7$  баллов. Относительные частоты появлений землетрясений низкой интенсивности существенно меньше  $Q = 0,05 \dots 0,34$ . Это еще одно подтверждение повышенной сейсмической опасности выделенных областей.

Для западного конца Пьенинского разлома по изолированным изостатическим аномалиям были выполнены оценки глубин залегания некомпенсированных масс, вызывающих аномалии большой интенсивности  $\sim 50 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$ , по методу, описанному в [4]. В восточной части разлома эти массы располагаются на глубине 24 км, а в западной — на глубине 30 км. В обоих случаях оценки глубин приурочены к положению границы  $M$  (по данным ГСЗ), но корреляцию с глубинами очагов землетрясений этих зон не обнаружено: глубины очагов 8-7 балльных землетрясений I зоны располагались в диапазоне 16...28 км, а 7-8 балльных землетрясений VIII зоны — в диапазоне 5...15 км. Очевидно, этот вопрос требует дополнительного и более тщательного изучения.

В заключение следует отметить, что выполненный анализ нарушений изостатического равновесия литосферы в зоне Пьенин-

\* Коэффициент корреляции между указанными величинами не вычислялся из-за отсутствия достаточного количества данных для получения его надежного значения.

ского разлома и его сейсмичности показал, что наиболее напряженное состояние недр в зоне глубинного Пьенинского разлома соответствует местам повышенных значений горизонтальных градиентов изостатических аномалий силы тяжести  $|\delta(\Delta g)/\Delta l|$ ; эпицентры землетрясений большой интенсивности  $i = 8-7$  баллов и отсюда повышенной частоты их появления соответствуют также областям с повышенным  $|\delta(\Delta g)/\Delta l|$ .

Все это свидетельствует о том, что данные о нарушениях изостатического равновесия являются надежным дополнительным критерием для целей сейсмического районирования.

Список литературы: 1. Артемьев М. Е. Изостазия территории СССР. — М.: Наука, 1975. 2. Бадер О. С. Глубинные разломы и тектоника Карпат. — Геол. сб. Львов, геол. об-ва, 1965, № 9, 3. Гофштейн И. Д. Неотектоника Карпат. — К.: АН УССР, 1964. 4. Евсеева Э. М., Глаздова М. Л. Об изостатически некомпенсированных массах литосферы Карпатского региона. — Геология, картография и аэрофотосъемка, 1983, вып. 38, 5. Круглов О. С. О природе Мармошоцких утесов Советских Карпат. — Геол. сб. Львов, геол. об-ва, 1965, № 9, 6. Муратов М. В. Тектоника и основные этапы развития Восточных Карпат. — Бюллетень Моск. об-ва испыт. природ. Сер. геол., 1947, т. 22 (2), 7. Ноуэлл Кэтрин В. В., Саврук М. А., Дацишин А. П. Распределение напряжений около трещин в пластичных и обломочных. — К.: Наук. думка, 1976, 9. Пидфеденко К. Н. Геологическое строение СССР. — М.: Госгеолгеизиздат, 1958. — Т. 3. Тектоника. 10. Ризниченко Ю. В. Размеры очагов корового землетрясения и сейсмический момент. — В кн.: Исследования по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976. 11. Ризниченко Ю. В. Протяженный очаг и сейсмическое тепление торных масс. — В кн.: Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. 12. Солдауб В. В. Структура земной коры Центральной и Восточной Европы. — К.: Наук. думка, 1980. 13. Рюхакова Д., Карлицк В. Atlas of isostatic maps Central and Eastern Europe CARP. — Working Group, 43, 1978.

Статья поступила в редакцию 12.04.84

УДК 528.236

В. Г. КИРИЛЛОВ

### О ПОГРЕШНОСТЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ МАСШТАБОВ

В последнее время значительное развитие получили прямые методы преобразования прямоугольных координат в пространстве [2, 3], параметры которых находятся в два этапа: вычисление элементов некоторой квазиортогональной матрицы; ортонормирование этой матрицы.

До вычисления элементов квазиортогональной матрицы определений и учитывают масштаб, поэтому уменьшение квазиортогональности зависит и от его точности.

Согласно теории ошибок [1], наименьшие погрешности имеют средние (средневесовые) значения величин. Поэтому цель данной статьи — исследовать применительно к космическим сетям точность различных формул определения средних (средневесовых)