

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ, СЕЙСМИЧНОСТЬ И НАПРЯЖЕННОСТЬ КАРПАТ

Напряженное состояние внутренних частей Земли на поверхности проявляется колебаниями периодов от долей секунды до десятков тысяч лет. Высокочастотные колебания наблюдаются вследствие землетрясения, возникающего при достижении критических значений внутренних напряжений. Их средние периоды измеряются десятками лет и обобщены в группу современных вертикальных движений. Они сопоставимы с периодом процесса подготовки землетрясений. Неотектонические (больших периодов и малых амплитуд) обычно характеризуют процесс затухания внутренних напряжений и окончание процесса горообразования.

Современные вертикальные движения наиболее ярко проявляются в сейсмоактивных регионах и, естественно, именно они способствуют решению проблемы прогноза землетрясений. В мировой литературе отмечаются факты сопоставления наблюдений современных вертикальных движений земной коры с сильными землетрясениями и указывается возможность их использования для оценки как внутренних напряжений, так и времени достижения критических значений — времени подготовки землетрясений [1—3, 8—10, 19, 20].

Законы прохождения волн основаны на теории упругости. При сильных землетрясениях возникают деформации, наблюдаемые на поверхности Земли — разрывы. Если деформация — следствие высвобождения накопленных напряжений, тогда процессу их накопления также будут сопутствовать деформации, не такие большие и неразрывные. Эти деформации, постоянные во времени и неразрывные, свидетельствуют о процессе накопления напряжений и при достижении их больших значений — о приближении возможного сильного землетрясения. Постоянные во времени деформации — медленные движения поверхности Земли — один из основных методов предвидения возможного сильного землетрясения.

Землетрясения — это дискретные проявления изменений напряженного состояния земной коры и верхней мантии. Место и время возникновения землетрясений обуславливаются накоплением внутренних напряжений и достижением прочности среды. Процесс накопления внутренних напряжений отображается на поверхности Земли колебательными движениями и землетрясениями. Колебательные движения проявляются постоянно, землетрясения дискретно. Наблюдения современных вертикальных движений в сейсмоактивных зонах наряду с данными нако-

лономерных наблюдений и деформаций дали возможность установить зависимость между ними.

Медленные деформации улавливаются повторным нивелированием в сейсмоактивных зонах и наклономерными наблюдениями. Оба метода дополняют друг друга, однако повторное нивелирование проводится в определенные промежутки времени и вследствие прерывности во времени редко удается уловить землетрясение, замкнутое между двумя нивелировками, т. е. уловить и проследить процесс его подготовки и исследовать вызванные им деформации. Наклономерные наблюдения имеют преимущество: они постоянны во времени и с их помощью процесс подготовки землетрясения не может быть пропущен.

Общая причина обеих явлений — основа для установления связи между современными вертикальными движениями и землетрясениями. Особенно важны данные о деформации поверхности Земли в процессе подготовки землетрясений. Данные повторного нивелирования дали возможность определить ряд закономерностей: общее поднятие или опускание в зоне гипоцентра, приуроченность очагов землетрясений до и после землетрясения, внезапное изменение хода наклономерной кривой. Наблюдаемые факты совпадения обеих процессов используются как признаки землетрясений. Исследование медленных движений поверхности Земли позволяет сопоставить энергию землетрясений с вызванными ими деформациями, найти численную зависимость между этими двумя величинами и использовать полученные данные для прогнозирования силы землетрясений по наблюдаемым в процессе его подготовки деформациям.

Доказана площадная связь современных вертикальных движений земной коры с сейсмичностью. Она подтверждается сопоставлением карт современных вертикальных движений с картами сейсмичности отдельных районов.

В 1958 г. была опубликована схема распределения скоростей современных вертикальных движений на территории европейской части СССР. На юго-западе карта ограничивалась городами Золочев, Тернополь, Проскуров, Сербиновцы, Жмеринка, Бельцы, Унгены, Кишинев, Ревака, Одесса. Таким образом, самая активная в тектоническом отношении зона Карпат на карте не представлена [21].

Трудности со сбором исходных данных о современных вертикальных движениях Карпатского региона вызваны тем обстоятельством, что отдельные части указанной территории в разное время принадлежали разным государствам: западные области Украины до 1918 г. входили в состав Австро-Венгрии; после окончания первой мировой войны Предкарпатье вошло в состав Польши до воссоединения в 1939 г. с Украинской ССР; Закарпатье вошло в состав Венгрии; в 1923—1938 гг. оно принадлежало Чехии, с 1938 г. до освобождения в 1945 г. — опять Венгрии. Буковина после 1918 г. находилась в составе Румынии до воссоединения с Украиной в 1940 г. Повторное нивелирование проводилось в разные годы, разными методами, разным

классом точности с различными требованиями и в разных системах нуль-пункта.

Для того чтобы заполнить этот пробел, автором собран материал данных нивелирований Западной Украины с целью построения карты современных вертикальных движений поверхности Земли. Нивелирование проводилось: Венским Военно-географическим институтом Австро-Венгрии в 1873—1891 гг.; Пражским Военно-географическим институтом Чехословакии в 1926—1937 гг.; Министерством путей сообщения Польши в 1920—1938 гг.; советскими геодезическими организациями с 1945 г.

По собранным данным удалось идентифицировать два хода нивелировок по одним и тем же реперам, выполненных Военно-географическим институтом Австро-Венгрии и Пражским Военно-географическим институтом Чехии — обе нивелировки пересчитаны в ГУГК в Кронштадскую систему и приведены к одному уровню. По этим данным составлена первая карта современных вертикальных движений поверхности Земли Карпатского региона [13].

Данные материалы могут вызывать возражение: хотя обе нивелировки проводились соответственно требованиям I класса, но в связи с пересчетом в Кронштадскую систему нивелирование переведено во II класс точности. Как следует из карты, внутренняя часть Карпат опускается, а краевые зоны поднимаются. По геологическим данным движения носят обратный характер: внутренняя часть Карпат испытывает поднятие на протяжении всего неогена и четвертичного периода; возможно, что в настоящее время происходят короткопериодные колебательные движения, которые не всегда совпадают по направлению с общим движением, продолжающимся на протяжении длительных геологических эпох. Это несоответствие, очевидно, вызвано недостаточно точным исходным материалом. Важность составления этой карты заключается в том, что она является первой картой современных вертикальных движений Закарпатья и дала начало детальному исследованию современных тектонических движений Карпат и установлению их связи с сейсмичностью региона.

В связи с этим для составления карты современных вертикальных движений Карпат предложено провести их повторное нивелирование. Учитывая важность и необходимость решения вопроса о медленных движениях Карпатского региона и особенно в сейсмоактивной зоне Закарпатья Львовским филиалом Института геофизики АН УССР (О. И. Юркевич) и Львовским политехническим институтом (А. В. Заводовский) с 1961 г. совместно проводятся работы по повторному нивелированию Карпат. Нивелирный ход I класса был привязан к «Карте современных вертикальных движений Европейской части СССР» [4, 5] в двух пунктах нивелирования I класса: во Львове и Золочеве и проходил через Львов—Красне—Ужгород—Берегово—Мукачеве—Хуст—Сваляву—Рахов—Микуличин—Коломыю—Золочев.

Настоящие геодезические измерения совместно с данными повторного нивелирования, выполненного на протяжении прошлых лет, дали возможность построить ряд карт современных вертикальных движений земной коры западных областей Украины. На карте, составленной в 1968 г., отмечается совпадение изолиний одинаковых перемещений с направленностью тектонических зон и тектонических границ, отделяющих геологические структуры, контрастность и дифференцированность движений. Максимальные скорости вертикальных движений определены в Складчатых Карпатах $v = +10,5 \dots +11,0$ мм/год; Закарпатский внутренний прогиб характеризовался меньшей скоростью движений, чем Предкарпатский.

Представленная карта не согласуется с «Картой современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы», где максимальные скорости вертикальных движений достигают значений $+2,1$ мм/год. Причина этого несоответствия заключается в том, что согласно «Схеме распределения скоростей современных вертикальных движений на территории Европейской части СССР» значение скорости нуля-пункта в Золочеве принято $v = +7,4$ мм/год [14, 15].

После просмотра всех исходных материалов повторного нивелирования Карпат был исследован вопрос пространственно-временных вариаций скоростей современных вертикальных движений земной коры Карпатского региона. Составлены три карты современных вертикальных движений за три периода: первый период (1882—1891 гг.)—(1961—1972 гг.); второй период (1882—1891 гг.)—(1924—1937 гг.) и третий период (1924—1937 гг.)—(1961—1972 гг.). Таким образом, геодезическими исследованиями Карпатского региона охвачен период времени в 90 лет (1882—1972 гг.) с разделением на два подпериода: 1882—1937 и 1937—1973 гг. [16].

Анализ карт показывает, что скорость современных вертикальных движений (поднятий и опусканий) неодинакова в разные периоды времени и на разных участках Закарпатского внутреннего прогиба.

На протяжении всего периода (1882—1972 гг.) северо-восточная часть Закарпатья поднималась со скоростью около $+1,0$ мм/год, а юго-западная часть опускалась со скоростью вдвое меньшей. Нулевая линия, разделяющая поднятие от опускания, проходит примерно через Ужгород—Солотвино, параллельно главному Карпатскому хребту. Таким образом, отмечаются дифференцированные движения северной и южной частей Закарпатья с абсолютной амплитудой $v = +1,5$ мм/год. В первую половину периода (1882—1937 гг.) дифференцированные движения выражались более резко: горная часть испытывала поднятие с $v = +2,2$ мм/год, а юго-восточная часть опускалась со скоростью от $v = +1,0$ до $v = -1,5$ мм/год. На некоторых участках скорость опускания достигала $v = -2,1$ мм/год. Нулевая линия опустилась ниже и стала проходить примерно между Ужгородом и Чопом на северо-западной стороне и Тячево на юго-востоке. Аб-

солютные значения дифференцированных движений в первом периоде 13,6...4,2 мм/год.

На карте второй половины периода (1937—1972 гг.) вся территория Закарпатского внутреннего прогиба и Складчатых Карпат поднимается с разной скоростью: горная часть испытывает поднятие со скоростью $v = +1,1$ мм/год, а юго-западная часть — от $v = +0,5$ до $v = +0,9$ мм/год. Таким образом, хотя сохранились еще дифференцированные движения, но меньшей амплитуды и в Закарпатском внутреннем прогибе происходит процесс выравнивания.

В 1977 г. была опубликована карта современных вертикальных движений земной коры юго-запада европейской части СССР по данным повторного нивелирования (1875—1916 гг.) — (1925—1949 гг.) [17], а в 1978 г. — карта современных вертикальных движений земной коры западной части Украины и Молдовы [18]. Изолинии повторяют направление горных сооружений Карпат: на первой карте издания 1977 г. максимальные поднятия $v = 1,9$ мм/год относятся к Закарпатья, а на карте издания 1978 г. максимальные поднятия $v = +2,5$ мм/год отнесены к Предкарпатья.

В 1978 г. издана «Карта современных вертикальных движений земной коры Карпато-Балканского региона». Современные движения Восточных Карпат согласованы с движениями всего Карпато-Балканского региона. Эта карта не отличается такой детальностью, как предыдущие. В ней максимальные скорости поднятий достигают значений $v = +3,0$ мм/год в Предкарпатском прогибе и представляют замкнутую кривую в районе Стрыя, а вся Закарпатская впадина имеет скорость поднятия $v = +1,0$ мм/год [6].

В 1985 г. представителями Болгарии, Чехо-Словакии, Польши, Румынии, Венгрии, Германии и СССР составлена новая «Карта современных вертикальных движений в Карпато-Балканском регионе» [7], которая существенно отличается от составленных ранее. Максимальные поднятия достигают $v = +5,1$ мм/год и проявляются в Предкарпатья в районе Славска. Поднятие в районе Стрыя, где на предыдущей карте [6] $v = +3$ мм/год, проявляется со скоростью $v = +2,2$ мм/год. Овал поднятия передвинулся к юго-востоку вдоль Карпатского хребта, и поднятия здесь достигают $v = +1$ мм/год.

Таким образом, все поднятия происходят в Предкарпатья, нулевая изосейста простирается параллельно Карпатам и Пеннинскому разлому, к юго-западу от него. Юго-западная часть Закарпатья испытывала опускания $v = -1$ мм/год.

Карты современных вертикальных движений Карпатского региона показывают, что: 1) в настоящее время происходит поднятие всей системы Восточных Карпат, Предкарпатья и Закарпатья; 2) на карте современных вертикальных движений, составленной по материалам (1882—1819) — (1924—1937) гг., наблюдались дифференцированные движения — поднимались Предкарпатья и Складчатые Карпаты, опускалась юго-западная

часть Закарпатья; 3) в период (1924—1937)—(1961—1972) гг. произошла инверсия вертикальных движений юго-западной части Закарпатья — она испытывает поднятие, но с меньшей скоростью, чем северо-восточная часть региона; 4) линии равных поднятий параллельны горному сооружению Карпат; 5) на карте современных вертикальных движений Карпато-Балканского региона отмечаются максимальные скорости $v = +3,0$ мм/год в Предкарпатье, $v = 2,0$ мм/год в Складчатых Карпатах, $v = +1,0$ мм/год в Закарпатье; 6) на карте современных вертикальных движений Карпато-Балканского региона (издание 1985 г.) максимальные поднятия достигают $v = +5,1$ мм/год и расположены в Предкарпатье, в районе Славска. Все Закарпатье испытывает опускание и максимальное его значение достигает $v = -3,6$ мм/год в районе Чопа.

Собственно сейсмоактивным районом Советских Карпат является Закарпатье — отдельная сейсмоактивная зона, не связанная в генетическом отношении с известным сейсмоактивным узлом района гор Вранча. Согласно сейсмическому районированию Закарпатье отнесено к семибалльной зоне. Закарпатские землетрясения слабы, преимущественно $K = 6-9$, в немногих случаях $K = 10-11$.

Первые известные по летописным данным сильные землетрясения Закарпатья интенсивностью $I = 7$ баллов произошли в Долгом в 1972 г., Сваляве в 1908 г., Тересве в 1926 г.; $I = 6-7$ баллов в Сигете в 1784 и 1823 гг., Тячеве в 1870 г., Антоновке в 1936 г., Драгово в 1937 г., Берегово в 1965 г., Угле в 1979 г. Шестибалльные землетрясения произошли в Ракошино в 1797 г., Тячеве в 1830 г., Долгом в 1867 г., Тересве в 1926 г., Берегово в 1931 г., Угле в 1979 г. Все сильные землетрясения Закарпатья, кроме землетрясений в Антоновке и Берегово, приурочены к Пьенинскому глубинному разлому, отделяющему Складчатые Карпаты от Закарпатского внутреннего прогиба. На расстоянии около 50 км от государственной границы на чехословацкой территории Пеннинский разлом представлен группой сильных восьми- и семибалльных землетрясений района Гуменне—Вереховцы—Гиральтовцы в 1778, 1779, 1914, 1941 гг. На юго-восточном конце разлома сосредоточены сильные семи- и шестибалльные землетрясения в районе Тячев—Тересва в пределах Закарпатья, к которому примыкает сейсмоактивный район Сигет, расположенный уже на румынской территории. В обоих районах они отмечались в 1778, 1780 гг., в Долгом в 1867, 1910 гг., в Сигете в 1844 и 1881 гг., в Буштино в 1894 и 1902 гг., в Угле в 1902 и 1904 гг., в Сваляве в 1924 и 1935 гг., в Берегово в 1928 г., в Антоновке в 1936 г., в Драгово в 1937 г. [11].

Самым простым представлением сейсмичности являются карты эпицентров землетрясений с указанием их интенсивности. В Карпатском регионе выделяются еще две сейсмоактивные зоны: Предкарпатье и Буковина.

В Предкарпатье наблюдаются только одиночные землетрясения: в каталоге [11] приведены данные о землетрясениях в

Шкло в 1670 г. с $I=6$ баллов. Недостаточность достоверных макросейсмических данных не позволяет сделать окончательных выводов о его природе: тектонического или обвального характера.

Второе Предкарпатское землетрясение имело место в 1875 г. в Каменке-Бугской и отнесено к тектоническому; оно ощущалось населением на расстояниях 230 км в Залещиках и 250 км в Черновцах. Интенсивность его оценена в 6 баллов. В 1963 г. инструментально зарегистрировано слабое землетрясение в районе Тернополя.

В 1974—1976 гг. зарегистрирован ряд землетрясений в окрестности г. Долина с $I=3-5,5$ балла. Поскольку землетрясения имели место в районе нефтедобычи, их можно отнести к тектоногенным. В пользу этого свидетельствует факт, что в данном районе раньше землетрясения не происходили, однако сложное тектоническое строение района Долины не исключает возможности признать землетрясения 1974—1976 гг. тектоническими [12].

Буковина, расположенная к юго-востоку от Предкарпатья, также не отличается регулярной сейсмичностью: в этом районе известны землетрясения с $I=6$ баллов: в Залещиках в 1903 г. и в Сторожинце в 1950 и 1970 гг.; два пятибалльных землетрясения в 1970 и 1976 гг. На территории Буковины отмечались и более слабые толчки, зарегистрированные только инструментально: 1962, 1963, 1964, 1967, 1971, 1972 гг. Относительно землетрясения 1903 г. с эпицентром в Залещиках Тернопольской области существует мнение, что оно было обвального характера [12].

Рассмотрение сейсмичности Карпатского региона позволяет сделать следующие выводы.

1. Согласно «Карте сейсмического районирования территории СССР» район Советских Карпат отнесен к семибалльной сейсмической зоне. Собственно сейсмоактивной зоной является Закарпатье, в Предкарпатье и Буковине зарегистрированы отдельные события.

2. Исследование сейсмической активности Закарпатья дало возможность выделить две основные зоны повышенной сейсмической активности: Берегово—Мукачево—Свалявскую и Тячев—Сигетскую. Согласно картам максимальных возможных землетрясений в первой зоне можно ожидать землетрясения класса $K=14$ и во второй $K=13$.

3. Глубины гипоцентров закарпатских землетрясений не превосходят $h=15$ км; в большинстве случаев гипоцентры закарпатских землетрясений расположены на глубинах $h=2,5 \dots 10$ км, максимальное число землетрясений приурочено к глубине $h=5$ км.

4. Все сильные землетрясения Закарпатья за исключением Антоновского в 1936 г. и двух Береговских 1931 и 1965 гг. расположены на Пеннинском глубинном разломе. Слабые землетрясения отмечены по всей территории Закарпатья.

Наличие карт современных движений и сейсмичности дает возможность провести сопоставление и количественно оценить внутренние напряжения, вызвавшие оба явления.

Сопоставлялись карты современных вертикальных движений двух периодов: 1882—1937 и 1937—1972 гг. Используя математическое моделирование [22], определено, что в первом периоде при среднем значении $v = +2,2$ мм/год внутренние напряжения достигали значений $P_1 = 2,1 \cdot 10^7$ дин/см², во втором при среднем значении $v = +1,1$ мм/год $P_2 = 0,9 \cdot 10^7$ дин/см². При этом энергия, выделяемая землетрясениями в первом периоде, составляла $E_1 = 2,1 \cdot 10^{18}$ эрг/год, а во втором $E_2 = 0,7 \cdot 10^{18}$ эрг/год [23]. Таким образом, вполне подтвердился тезис о прямой зависимости между значением современных вертикальных поднятий, энергией землетрясений и напряжениями, вызвавшими эти два явления.

Более детальное исследование напряженного состояния Закарпатья показало, что имеющиеся данные повторного нивелирования не дают возможности увязать отдельные землетрясения с данными нивелировок, а дают только общую региональную картину напряженного состояния региона [24].

В связи с этим возникает вопрос, как оценить тот факт, что на двух последних картах современных вертикальных движений Карпато-Балканского региона в первом варианте максимальные поднятия $v = +3,0$ мм/год находятся в Предкарпатье, в районе г. Стрый, а во втором варианте карты поднятие $v = +5,1$ мм/год проявляется также в Предкарпатье, в районе г. Славск. И в районе Стрыя и Славска землетрясения не ощущались.

Объяснением этого вопроса могут послужить следующие обстоятельства: неоднородность данных повторного нивелирования, на которых основано построение карт современных вертикальных движений земной коры; повышение поднятий мантии интерпретировать, как проявление процесса подготовки землетрясений, но процесс еще не закончен, так как землетрясение еще не произошло; необходимость учета геологической неподготовки региона и более неполной дифференциации современных поднятий по регионам; необходимость учета горизонтальных движений Земли.

Для их подтверждения требуются более детальные данные о современных движениях Карпат — вертикальных и горизонтальных. Это вызывает необходимость более частых нивелировок и получение сведений о горизонтальных движениях. Последние данные можно получить путем измерений горизонтальных деформаций с помощью замеров, что дает возможность поставить две задачи на пути более детальных исследований: построить площадную модель современных движений и представить механическую модель Карпат [24] более совершенной, реологической. Таким путем можно будет объяснить кажущееся несоответствие между медленными современными движениями земной коры и сейсмичностью.

1. *Ботт М.* Внутреннее строение земля. М., 1974. 2. *Григорьев А. С.* О деформациях, земной коры, отвечающих гипотезе воздействия подкоровых конвекционных потоков // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1974. № 6. С. 3—11. 3. *Каракин А. В.* О напряжениях, возникающих при горизонтальных перемещениях литосферы // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1975. № 10. С. 3—9. 4. Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы / Под ред. Ю. А. Мещерякова. М., 1971. 5. Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. М., 1973. 6. Карта современных вертикальных движений земной коры Карпато-Балканского региона / Под ред. И. Йоо. Будапешт, 1988. 7. Карта современных вертикальных движений в Карпато-Балканском регионе / Под ред. Йоо И. Будапешт, 1988. 8. *Магницкий В. А.* Внутреннее строение и физика Земли. М., 1965. 9. *Магницкий В. А.* Основы физики Земли // Геодезист. М., 1953. С. 290. 10. *Магницкий В. А., Калашикова И. В., Сидоров В. А.* Некоторые особенности современных вертикальных движений земной коры и проблемы их интерпретации // Современные движения земной коры. 1973. № 5. С. 571—578. 11. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М., 1977. 12. Сейсмическое районирование территории СССР. М., 1980. 13. Современные вертикальные движения земной коры на территории Западной половины европейской части СССР // Тр. ЦНИИГАиК. 1959. Вып. 123. 14. *Сомов В. И.* Вариант карты современных вертикальных движений Советских Карпат // Геофизика и астрономия. 1967. № 11. С. 20—23. 15. *Сомов В. И.* Исследования по проблеме современных движений земной поверхности на геодинамических полигонах Украины // Геофиз. сб. 1973. № 56. С. 19—21. 16. *Сомов В. И.* Пространственные и временные вариации скорости современных вертикальных движений земной коры в западной части Украины // Докл. АН СССР. 1974. Т. 214. № 4. С. 902—905. 17. *Сомов В. И.* Карта современных вертикальных движений земной коры Украины для периода 1895—1937 гг. // Геофиз. сб. 1977. № 75. С. 68—72. 18. *Сомов В. И.* Современные вертикальные движения земной коры территории МССР и западной части Украины // Геофизические исследования глубинного строения земной коры. К., 1978. С. 3—6. 19. *Стейси Ф.* Физика Земли. М., 1972. 20. *Юркевич О. И.* Вязкие деформации земной коры. Динамика земной коры. М., 1965. 21. *Юркевич О. И.* Современные вертикальные движения земной коры и прогноз землетрясений // Современные движения земной коры. 1963. № 1. С. 218—223. 22. *Юркевич О. И.* Повільні деформації поверхні Землі. К., 1963. 23. *Юркевич О. И.* Современные вертикальные движения земной коры и сейсмичность Закарпатья // Геофиз. сб. 1980. № 5. С. 55—64. 24. *Юркевич О. И.* Механическое поле Карпат. Сейсмопрогностические исследования на территории Украины. К., 1988.