

УДК 551.240

Р. А. Мовсесян

**Геодезический мониторинг вдоль активного разлома с целью
обнаружения возможных очагов сильных землетрясений
и оценки их магнитуды**

(Представлено 4/III 1996)

Рассматривается программа по геодезическому мониторингу, основанная на выводах, вытекающих из:

- 1) гипотезы Г.Ф.Рейда, позволяющей установить прогнозный признак упругого напряженного состояния Земной коры;
- 2) гипотезы о предвестниках землетрясений, возникающих при крипе;
- 3) принципа построения локальных геодезических сетей, пересекающих разломы в перпендикулярных к ним направлениях.

1. Критерием, позволяющим прогнозировать возможные очаги землетрясений (ВОЗ) на основе теории Г.Ф.Рейда (1), является обнаруживаемое повторными геодезическими измерениями экспоненциальное распределение упругих смещений горных пород (2). Если в примерно перпендикулярном к линии разлома направлении закрепить в Земной коре ряд точек, находящихся в одной вертикальной плоскости, то при наличии упругих деформаций, свидетельствующих о подготовке землетрясения, через некоторое время точки сместятся относительно друг друга. Соединив мысленно эти точки в их новом положении, получим экспоненциальную кривую линию. Она может быть описана различными математическими выражениями. В общем виде можно написать $y = Af(\alpha, x)$, где $f(\alpha, x)$ характеризует вид экспоненциальной функции, ось y направлена вдоль разлома, а начало координат находится близко к линии (полосе) разлома. Величина A — значение координаты y , к которому она стремится, когда x стремится к бесконечности. Если скорость относительного перемещения литосферных блоков U см/год,

то $A = \frac{n}{2} \cdot U$, где n — число лет, прошедших после закрепления точек

1,2,3 ... в одной вертикальной плоскости. Коэффициент α , имеющий размерность, обратную размерности x , характеризует скорость прибли-

жения ординат y к величине A . Чем больше α , тем при меньших значениях x ординаты y будут приближаться к A .

Предположим, что точки 1, 2, 3 ... поперечника были закреплены на участке ВОЗ до начала подготовки землетрясения, и в момент закладки плиты (блоки) активного разлома, находящиеся в движении, зацепились своими граничными поверхностями по всей длине L ВОЗ. Предположим далее, что вне зоны очага длиной L и за пределами самого очага на некотором расстоянии B в обе стороны от разлома движение плит продолжается. Чтобы выполнить расчеты по формуле (1) для определения ординат деформационной кривой, примем значения A и α , исходя из следующих соображений. Имеется около десятка примеров, когда сильные землетрясения происходили в местах, имевших до землетрясения густые геодезические сети, что и позволило выявить экспоненциальное искривление геодезических сетей (1-3). Наиболее представительным по количеству точек наблюдений можно считать землетрясение в Танго с магнитудой 7,3 (Япония, 1927 г.). Оно готовилось 170 лет, скорость перемещения литосферных блоков относительно друг друга была равна 2 см/год. Общая сумма накопленных деформаций за 170 лет оказалась равной 3,4 м (2). Исходя из этих данных $U=2$ см/год, $A = \frac{u}{l} = 1$ см/год. Ширина зоны подготовки была около 44 км, т.е. $B=22$ км.

Допустим, мы приняли значение α в формуле (1) равным 0,1 (при x , выраженном в километрах). Тогда на расстоянии $x=22$ км y будет равен 0,975 A , если функцию $y=f(\alpha, x)$ считать гиперболическим тангенсом. Так как за 170 лет $A=170$ см, то $y=165,8$ см, т.е. $A-y=4$ см, что меньше тех ошибок, которые характеризовали точность триангуляционных измерений.

Приняв $\alpha=0,1$, $A=n$ см, мы рассчитали ординаты y для различных значений x (1 км, 2 км и т.д.) при $n=1$ см, 2 см и т.д.

Так как максимальная величина деформаций была равна 170 см на расстоянии 22 км от разлома, то максимальная относительная деформация в рассматриваемом случае была равна $7,7 \cdot 10^{-5}$.

Рассмотрим второй пример — землетрясение в Кум-Даге (Туркмения) в 1983 г. с магнитудой 5,6, когда смещения вдоль трещины составили в среднем около 0,2 м (4). Если считать, что накопление деформаций происходило с такой же скоростью, как в Танго, т.е. $U=2$ см/год, ($A=1$ см/год), то на подготовку землетрясения ушло 10 лет. Величину α приблизительно можно определить исходя из следующих рассуждений. При землетрясениях сравнительно небольшой магнитуды (4) предельную относительную деформацию можно считать несколько меньше ее среднего значения $4,7 \cdot 10^{-5}$, согласно данным Рикитаке (3). При землетрясениях с магнитудой 7 и выше, напротив, это значение выше среднего и близко к 10^{-4} согласно данным Цубои (3). Если принять для рассматриваемого случая предельную деформацию равной

$2 \cdot 10^{-5}$, то можно считать, что $10 \cdot A / x_1 = 2 \cdot 10^{-5}$, откуда при $A_{\max} = 10$ см получим $x = 5$ км. Коэффициент α должен быть таким, чтобы на расстоянии $x = 5$ км от разлома ордината y мало отличалась от значения A_{\max} . Так как за 10 лет величина A достигает своего максимального значения 100 мм, то $y_5 = 0,986 A_{\max} = 98,6$ мм и $A - y_5 = 1,4$ мм. Чем больше значение α , тем быстрее (при меньших значениях x) экспоненциальные кривые приближаются к одним и тем же значениям A . Кроме того, при землетрясении с магнитудой 5,6 α в несколько раз больше, чем при магнитуде 7,3. Следовательно, путем наблюдений за горизонтальными деформациями точек, закрепленных в поперечном к разлому направлении, можно сделать определенные выводы относительно ожидаемой магнитуды будущего землетрясения. Кроме того, поскольку магнитуда M связана с длиной L участка прекращения движений по разлому, то, следовательно, можно будет получить информацию о величине L (2). Очевидно, чем больше площадь зацепления (длина L), тем большая энергия накапливается к моменту достижения предельных деформаций, тем медленнее деформационная кривая приближается к значению A_{\max} . И наоборот, чем меньше L , тем меньше магнитуда, так как накапливаемая энергия не успевает достигнуть больших значений. Из-за меньшей сопротивляемости горных пород предельное значение относительных деформаций достигается при меньших значениях x , в результате чего уменьшается и ширина зоны B распространения деформаций. Таким образом, просматривается связь между L и B , о которой говорится в работе (2).

Значения A и α в формуле (1) должны будут определяться по результатам геодезического мониторинга для каждого конкретного разлома.

2. Перейдем теперь ко второй гипотезе. Согласно Н. Чигареву "смещение литосферных блоков не всегда сильное землетрясение, чаще всего оно происходит без ощутимых последствий" (5). В сеймотектонике такое ползучее смещение бортов блоков Земной коры называется сеймотектоническим крипом, хотя следует отметить, что большая часть предвестников срабатывает на него так же, как на землетрясение: поднимается уровень грунтовых вод, выделяется газ родон, появляются различные геофизические аномалии, в том числе и в электромагнитных полях. Высокоточные наблюдения регистрируют наклоны Земной поверхности в зоне разлома.

Гипотеза появления предвестников землетрясений широко развивается в различных странах. Нетрудно прийти к выводу о том, что если большая часть предвестников реагирует как на готовящееся землетрясение, так и на крип одинаковым образом, то наблюдения за предвестниками в зоне крипа могут привести к ложной тревоге. Этот факт проливает свет на вопрос о том, почему в некоторых случаях из числа

предсказанных в разных странах землетрясений одни действительно имели место, а другие не происходили.

Далее, если отмеченная выше гипотеза соответствует действительности, то логичным следует признать подход к решению задачи обнаружения ВОЗ, заключающийся в следующем. Сейсмогеологи и геологи должны распознать (дешифровать) на изучаемой территории зоны активных разломов. В отдельных случаях линии разломов достаточно четко просматриваются на больших расстояниях, в других они распознаются по косвенным признакам. Чем точнее будет намечена на карте достаточно крупного масштаба полоса разлома, тем успешнее может быть спроектирована геодезическая сеть по обе стороны от нее.

На втором этапе геодезисты приступают к исследованию данного активного разлома с целью определения на всем его протяжении участков, где наблюдается крип — ползучее смещение литосферных блоков как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях. Осуществляемые с этой целью геодезические построения должны позволять отличать смещения земной поверхности, возможные во время крипа, от таковых при упругих деформациях, возникающих в процессе подготовки землетрясения.

Для выявления характера деформационного процесса, происходящего на стыке двух литосферных блоков на данном участке разлома (крип или упругие деформации), целесообразно использовать построение в виде геодезического четырехугольника. Две стороны его должны располагаться на разных блоках, примерно параллельно направлению разлома. Длины сторон в зависимости от того, с какой ошибкой дешифрируется линия разлома, могут быть от 0,5 до 1,5 км. При указанной длине в линейных измерениях возможна относительная ошибка, близкая к $1 \cdot 10^{-6} D$, где D — длина измеряемой линии. Для достижения максимально возможной точности определения деформаций по направлениям диагоналей четырехугольника целесообразно одновременно с линейными измерениями выполнять измерения всех восьми углов. Для определения смещений в вертикальных направлениях с высокой точностью используется обычно метод геометрического нивелирования.

Результаты повторных измерений линий, углов и превышений в геодезическом четырехугольнике позволяют сделать определенные выводы о том, в каком состоянии находятся литосферные блоки на данном участке разлома. Если в результате повторных измерений выяснится, что длина одной из диагоналей увеличилась, а второй уменьшилась, это будет означать, что блоки движутся относительно друг друга в противоположных направлениях, т.е. наблюдается крип. Скорость такого смещения также может быть вычислена по данным результатов измерений. Построение четырехугольника должно выполняться по всему протяжению разлома через каждые 5-10 км.

Второй случай, который может иметь место, это зацепление литосферных блоков по поверхности разлома. При этом прекратится или замедлится движение на некотором участке разлома длиной L , однако за его пределами и на расстоянии B в обе стороны от разлома движение будет продолжаться с прежней скоростью, что, как уже отмечалось, явится причиной накопления упругих деформаций в области $L \cdot B$ в каждом из литосферных блоков. Для определения длины L участка зацепления блоков плотность геодезических четырехугольников должна быть повышена (2).

С целью обнаружения и оценки величины упругих деформаций, имеющих место на площади $L \cdot B$, уже недостаточно иметь четырехугольники, расположенные вдоль линии разлома. Необходимы дополнительные построения, простирающиеся в обе стороны поперек разлома на участке длиной L на 15-20 км. На первом этапе такие построения можно будет осуществить на ширину до 10 км.

Таким образом, предварительные построения четырехугольников на всем протяжении разлома позволят выявить те участки, где будет необходимо создавать более дорогостоящие геодезические сети. Такие сети, нужные для изучения характера деформационного процесса, могут быть реализованы в зависимости от рельефа местности как в виде триангуляционно-трилатерационных треугольников или четырехугольников с короткими сторонами (1-2 км), так и в виде вытянутых поперек разлома полигонометрических ходов. Частным случаем таких ходов могут быть створные построения.

В отмеченных локальных сетях будут измеряться длины сторон треугольников, горизонтальные и вертикальные углы. На каждом поперечнике локальные сети будут опираться на стороны четырехугольников, построенных для выявления крипа. В таких локальных сетях накопление ошибок будет происходить в пределах тех четырехугольников или треугольников, из которых состоит данная сеть. Каждое локальное построение будет иметь свое начало координат и свои направления осей x и y .

Дополнительное контролирование стабильности хранителя направления стороны четырехугольника, на которую опирается сеть, может осуществляться путем измерений с помощью системы *GPS*, а также путем периодического измерения астрономических азимутов. Точность таких измерений должна быть возможно высокой, оцениваться средней квадратической ошибкой $\pm 0,5''$.

Линейные измерения, как уже отмечалось, могут быть выполнены при длине сторон сети около 1 км с относительной ошибкой, близкой к $1 \cdot 10^{-6}$, или абсолютной ошибкой ± 1 мм. При такой точности углы в треугольниках трилатерации будут получены с ошибкой $\pm 0,3''$.

Для линейных измерений горизонтальных деформаций разработан лазерный деформограф на базе высокоточных дальномеров ДВСД. В приборе использована СВЧ модуляция излучения газового ОКГ на

частоте 1200 МГц. Прибор отличается простотой и надежностью. Фазоизмерительным устройством служит радиоуправляемая марка, на которой крепится компактный отражатель. Таким образом, марка и деформограф работают в паре в комбинированном приборе деформографе-створофиксаторе. Подвижная марка с непрерывным сканированием позволит повысить точность угловых и створных измерений в 1,5-2 раза. Деформограф-створофиксатор с успехом может использоваться при построении как трилатерационно-триангуляционных сетей, так и вытянутых полигонометрических ходов и створов большой протяженности.

Приведенные выше рассуждения относились к деформациям в горизонтальном направлении. В вертикальных плоскостях, пересекающих разлом в поперечном направлении, также будут накапливаться упругие деформации. Для определения вертикальных деформаций на геодинамических полигонах широко используется высокоточное геометрическое нивелирование. Оно может применяться и для определения относительного положения вершин описанных выше геодезических четырехугольников, используемых для обнаружения крипа. Однако представляется целесообразным использовать в определенных случаях, где это позволяет рельеф местности, стационарные системы гидродинамического нивелирования. Такие системы, будучи однажды смонтированы, в дальнейшем обслуживаются одним оператором, что исключает необходимость привлечения каждый раз бригады нивелировщиков высокой квалификации. Для определения высот точек, расположенных в вершинах четырехугольников, развиваемых поперек разлома на ширину 10-20 км в обе стороны от него, также должно использоваться геометрическое и тригонометрическое нивелирование.

Таким образом, в результате повторения с наперед заданной периодичностью указанного комплекса работ и математической обработки материалов наблюдений определяются плановые и вертикальные смещения пунктов сети, изменения длин базисных линий и конфигураций отдельных геодезических построений. К сожалению, вертикальные и горизонтальные составляющие смещений вследствие специфики геодезических построений, как правило, определяются отдельно и несинхронно.

Этого можно избежать, если при построении геодезических прогностических сетей воспользоваться опытом, приобретенным геодезистами при определении пространственных прогностических координат точек Земной поверхности методами и средствами космической геодезии. Этот путь развития пространственных прогностических сетей, который еще требует своей реализации в той схеме построения геодезических четырехугольников, которая описана выше, обеспечит синхронное определение всех трех составляющих векторов положения пунктов сети, являясь наиболее адекватным отражением физической сущности изучаемого процесса современных движений Земной коры.

Таким образом, предлагаемый путь выполнения геодезического мониторинга дает возможность определить: участки крипа, расположенные вдоль активного разлома; участки, где происходит зацепление литосферных блоков, т.е. возможные очаги будущих землетрясений, а также оценить путем изучения характера деформационных кривых и определения коэффициентов α возможную магнитуду M будущего землетрясения, длину L и ширину A зоны проникновения деформаций.

Следовательно, можно будет ответить на два из трех вопросов: где, какой силы и когда произойдет упругая отдача согласно Г.Ф.Рейду.

Для ответа на третий вопрос необходимо будет сосредоточить уже на конкретном участке, а не по всей длине разлома имеющиеся средства наблюдений за различными предвестниками, в том числе и геодезическими. Подход к решению проблемы прогнозирования землетрясения путем разделения ее на два этапа предложен в работе (6).

Ереванский архитектурно-строительный институт
Национальная служба сейсмической защиты

Հայաստանի ԳԱԱ ակադեմիկոս Ռ. Հ. ՄՈՎՍԻՍՅԱՆ

Գեոդեզիական մոնիտորինգ՝ երկրաշարժ առաջացնող ակտիվ խզվածքի երկայնքով ուժեղ երկրաշարժերի հնարավոր սջախներ հայտնաբերելու նպատակով

- Հոդվածում դիտարկվում է գեոդեզիական մոնիտորինգի ծրագիր, որը հիմնված է
- 1) Գ. Ֆ. Ռեյդի վարկածի վրա, որը թույլ է տալիս որոշել երկրային կեղևի առաձգական լարված վիճակի հստակությունը,
 - 2) սողունության ժամանակ գոյացող երկրաշարժերի նախանշանակների վարկածի վրա,
 - 3) տեղային գեոդեզիական ցանցերի կառուցման սկզբունքների վրա, որոնք ուղղահայաց հատում են խզվածքները:

ЛИТЕРАТУРА – ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- ¹ H.F.Reid, Bull. Department Geology. Univ.Calif. Publ., v.6, №19, p.413-444 (1911). ² А.К.Левнев, Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, №12, 1988. ³ Т.Рикитале, Предсказание землетрясений, М., Мир, 1979. ⁴ А.В.Друмя, Н.В.Шебалил, Землетрясение: где, когда, почему? Кишинев, Штиница, 1986. ⁵ Н.Чигарев, Перед землетрясением, газ. Коммунист, 02,04,1989. ⁶ С.С.Грягорян, ДАН СССР, т.306, №5 (1989).