

В. А. КАЗИНСКИЙ

**ВУЛКАНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА ГРАВИТЕКТониКИ**

(Представлено академиком М. А. Садовским 20 XI 1972)

Излагается теория метода и его особенности применения к решению вулканологических задач, касающихся определения координат эпицентра очага вулкана и плотности его вещества. В основе метода лежит региональная деформация уровенной поверхности геопотенциала, измеряемая с помощью стационарных наблюдений с гравитационным вариометром, установленным вблизи очага вулкана.

Пусть региональная деформация уровенной поверхности геопотенциала под влиянием тектонического процесса характеризуется разностями, вычисленными по результатам вариометрических измерений относительно некоторой исходной поверхности  $W(t_0)$ :

$$\begin{aligned} T_{\Delta} &= W_{\Delta}(t) - W_{\Delta}(t_0), & T_{xy} &= W_{xy}(t) - W_{xy}(t_0), \\ T_{yz} &= W_{yz}(t) - W_{yz}(t_0), & T_{xz} &= W_{xz}(t) - W_{xz}(t_0). \end{aligned} \quad (1)$$

Для решения упомянутой выше задачи воспользуемся формулами приведения разностей (1) к новым осям координат, конгруэнтно повернутых на углы  $\alpha_{ki}$  так, чтобы их левые части обратились в нуль:

$$\begin{aligned} 0 &= T_{\Delta}(\alpha_{\Delta}) = T_{\Delta}(0) \cdot \cos 2\alpha_{\Delta} - 2T_{xy}(0) \cdot \sin 2\alpha_{\Delta}, \\ 0 &= 2T_{xy}(\alpha_{xy}) = T_{\Delta}(0) \cdot \sin 2\alpha_{xy} + 2T_{xy}(0) \cdot \cos 2\alpha_{xy}, \\ 0 &= T_{yz}(\alpha_{yz}) = T_{yz}(0) \cdot \cos \alpha_{yz} - T_{xz}(0) \cdot \sin \alpha_{yz}, \\ 0 &= T_{xz}(\alpha_{xz}) = T_{yz}(0) \cdot \sin \alpha_{xz} + T_{xz}(0) \cdot \cos \alpha_{xz}; \end{aligned} \quad (2)$$

откуда определим углы  $\alpha_{\Delta}$ ,  $\alpha_{xy}$ ,  $\alpha_{yz}$  и  $\alpha_{xz}$ :

$$\begin{aligned} \alpha_{\Delta} &= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{T_{\Delta}(0)}{2T_{xy}(0)}, & \alpha_{xy} &= -\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2T_{xy}(0)}{T_{\Delta}(0)}, \\ \alpha_{yz} &= \operatorname{arctg} \frac{T_{yz}(0)}{T_{xz}(0)}, & \alpha_{xz} &= -\operatorname{arctg} \frac{T_{xz}(0)}{T_{yz}(0)}, \end{aligned} \quad (3)$$

и по вычисленным значениям  $\alpha_{ki}$  найдем направление линии, на которой может быть расположен эпицентр очага вулкана:

$$A_{xy} = \begin{cases} 90^{\circ} + \alpha_{xy}, \\ 270^{\circ} + \alpha_{xy}; \end{cases} \quad A_{xz} = \begin{cases} 90^{\circ} + \alpha_{xz}, \\ 270^{\circ} + \alpha_{xz}. \end{cases} \quad (4)$$

Формулы (4) дают два значения азимутов, отличающихся на  $180^{\circ}$ . Это расхождение объясняется тем, что эпицентр очага вулкана может находиться на линии, проходящей через пункт наблюдений с одной или с другой стороны от него. Неопределенность можно раскрыть с помощью групповых наблюдений с вариометрами, установленными в разных местах окрестности вулкана (хотя бы в двух пунктах).

Если тектонический процесс в очаге вулкана характеризуется увеличением или уменьшением его вещества, то этот факт не может сказаться на знаке углов, вычисленных по формуле (3), так как изменение знака оста-

Таблица 1

| Квадрант | Знак вариаций |             | Сектор  | Знак вариаций   |              | Сектор   |
|----------|---------------|-------------|---------|-----------------|--------------|----------|
|          | $T_{xz}(0)$   | $T_{yz}(0)$ |         | $T_{\Delta}(0)$ | $2T_{xy}(0)$ |          |
| 0—90°    | +             | +           | 0—45°   | —               | +            | 180—225° |
| 90—180   | —             | +           | 45—90   | +               | +            | 225—270  |
| 180—270  | —             | —           | 90—135  | +               | —            | 270—315  |
| 270—360  | +             | —           | 135—180 | —               | —            | 315—360  |

Таблица 2

| № п.п. | Вариации        |              | $\text{tg } 2\alpha_{\Delta}$ | $\text{tg } 2\alpha_{xy}$ | $\alpha_{\Delta}$ | $\alpha_{xy}$ | $A_{xy}$ | Сектор  |
|--------|-----------------|--------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------|----------|---------|
|        | $T_{\Delta}(0)$ | $2T_{xy}(0)$ |                               |                           |                   |               |          |         |
| 1      | +15,2           | -10,8        | -1,41                         | +0,72                     | -27°,3            | +17°,8        | 107°,8   | 90—135° |
| 2      | +22,8           | 0,0          |                               | 45,0                      | 45,0              | 0,0           | 90,0     |         |
| 3      | -14,0           | -10,3        | +1,37                         | -0,72                     | +26,9             | -17,8         | 72,2     | 45—90   |

точной плотности влечет за собой изменение знаков у всех разностей (1). Поэтому можно утверждать, что изменение знака остаточной плотности не препятствует безошибочному определению углов  $\alpha_{hi}$  по формулам (3). Но в то же время раздельное рассмотрение разностей (1) играет существенную роль при определении остаточной плотности очага вулкана. Особенно ценным в этом отношении является знак вариации  $T_{\Delta}$ . Так, например, если  $T_{\Delta}$  имеет знак плюс (при  $|y| > |x|$ ), то и остаточная плотность будет иметь знак плюс, и наоборот. Такое утверждение вытекает из анализа интеграла

$$T_{\Delta} = 3f \Delta \sigma \int_V \frac{y^2 - x^2}{\rho^5} dV, \quad (5)$$

в котором знак подинтегральной функции не зависит от изменения знаков  $y$  и  $x$ , а потому знак  $T_{\Delta}$  будет определяться только знаками  $\Delta \sigma$  и разности  $y^2 - x^2$ . Что касается знака разности, то его можно получить, как отмечалось выше, или по групповым измерениям на разных пунктах, или по имеющимся сведениям о расположении эпицентра очага вулкана.

Имеется и другая возможность для определения азимута на эпицентр очага вулкана. Эта возможность вытекает из анализа подинтегральной функции интеграла (5), см. табл. 1, составленную для  $\Delta \sigma > 0$ .

Применение таблицы 1 рассмотрим на примере, помещенном в табл. 2.

В табл. 2  $T_{\Delta}$  имеет всюду знак +, потому можно утверждать, что гравитектонический источник имеет тот же знак, что и остаточная плотность  $\Delta \sigma > 0$  и что он расположен сзади для первого его положения ( $2T_{xy} < 0$ ), справа — для второго его положения ( $2T_{xy} = 0$ ) и впереди — для третьего положения ( $2T_{xy} > 0$ ). Азимуты для этих трех положений вычислялись по формуле:

$$A_{xy} = 90^\circ + \alpha_{xy}. \quad (6)$$

Для контроля этих вычислений обратимся к измеренным вариациям градиентов силы тяжести, по которым были вычислены те же азимуты (см. табл. 3).

Так как в табл. 3 всюду  $T_{yz} > 0$ , то можно утверждать, что источник перемещался справа от вариометра и что его первое положение было сзади ( $T_{xz} < 0$ ), второе — справа ( $T_{xz} = 0$ ) и третье — впереди ( $T_{xz} > 0$ ). Азимуты положений источника вычислялись по формуле

$$A_{xz} = 90^\circ + \alpha_{xz} \quad (7)$$

Таблица 3

| № п.п. | Вариации    |             | $tg \alpha_{yz}$ | $tg \alpha_{xz}$ | $\alpha_{yz}$ | $\alpha_{xz}$ | $A_{xz}$ | Квадрант по табл. 1 |
|--------|-------------|-------------|------------------|------------------|---------------|---------------|----------|---------------------|
|        | $T_{xz}(0)$ | $T_{yz}(0)$ |                  |                  |               |               |          |                     |
| 1      | -4,4        | +6,7        | -1,52            | +0,66            | -56°,6        | +33°,5        | 123°,5   | 90—180°             |
| 2      | 0,0         | +13,8       | $\infty$         | 0,0              | 90,0          | 0,0           | 90,0     |                     |
| 3      | +4,9        | +8,8        | +1,81            | -0,56            | +61,0         | -29,2         | 60,8     | 0—90                |

Таблица 4

| Пункт набл.       | Дата         | Вариации        |              | $tg 2\alpha_{\Delta}$ | $tg 2\alpha_{xy}$ | $\alpha_{\Delta}$ | $\alpha_{xy}$ | $A_{xy}$          | Сектор                       |
|-------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|------------------------------|
|                   |              | $T_{\Delta}(0)$ | $2T_{xy}(0)$ |                       |                   |                   |               |                   |                              |
| Обнинск<br>Талгар | 30 VIII 1967 | +1,0            | +5,0         | +0,20                 | -5,0              | +5°,7             | -38°,8        | 51°,2             | 45—90°                       |
|                   | 28 VIII 1968 | -6,5<br>(+)     | +7,0<br>(-)  | -0,92                 | +1,07             | +22,4             | +23,4         | 113,4<br>(+180,0) | 0—45<br>(90—135)<br>(+180,0) |
| Зейва             | 29 VI 1969   | +1,0            | -0,8         | -1,25                 | +1,80             | -25,7             | +19,3         | 109,3             | 90—135                       |
| Гярд I            | 12 X 1970    | 14,0            | -7,8         | -1,90                 | +0,52             | -31,2             | +13,8         | 103,8             | 90—135                       |
| Гярд II           | 12 X 1970    | +16,0           | -13,8        | -1,25                 | +0,81             | -25,4             | +19,4         | 109,4             | 90—135                       |
| Баку              | 28 IV 1970   | +2,0            | -1,6         | -1,25                 | +0,80             | -25,7             | +19,3         | 109,3             | 90—135                       |
| Баку              | 12 V 1970    | -1,5<br>(+)     | +5,5<br>(-)  | 0,27                  | +654              | -7,6              | +37,5         | 127,5<br>(+180,0) | 0—45<br>(90—135)<br>(+180,0) |

и для тех квадрантов, которые были определены по табл. 1. Наибольшее расхождение между азимутами, вычисленными по формулам (6) и (7), достигает 15°,7. Это расхождение объясняется случайными погрешностями измерений. Поэтому более достоверное их значение определяется как среднее арифметическое или как среднее геометрическое, если мера точности их измерений известна.

Мы применили эту технику вычислений к опытным измерениям, выполненным на разных пунктах территории Советского Союза и получили следующие сведения об азимутах источников, вызывающих, по нашему мнению, наблюдаемые вариации. Эти сведения приведены в табл. 4.

Вычисленные углы  $\alpha_{xy}$  указывают, на сколько надо изменить направление вариометра, чтобы измеренные вариации обратились в нуль. Этот поворот производится по ходу часовой стрелки, если  $\alpha_{xy} > 0$  и против хода, если  $\alpha_{xy} < 0$ . Кроме того, с помощью углов  $\alpha_{xy}$  были найдены азимуты эпицентров, значения которых согласуются с сектором, за исключением двух азимутов для пп. Талгар и Баку. Вычисление азимутов по формуле  $A_{xy} = 270^\circ + \alpha_{xy}$  дает  $A_{xy} = 293^\circ,4$  и  $A_{xy} = 307^\circ,5$ , что также не согласуется с секторами.

Однако если тектонический процесс характеризуется не увеличением, а уменьшением плотности вещества источника ( $\Delta\sigma < 0$ ), то в силу этого вариации, отмеченные в таблице скобками, будут иметь противоположные знаки, при этом азимуты получаются согласованными с секторами, вычисленными по табл. 1, поскольку таблицы составлены для  $\Delta\sigma > 0$ . По нашему мнению, этот вариант объяснения более правдоподобен и поэтому ему следует отдать предпочтение. Следует отметить, что действительная причина этого несогласия остается не выясненной до конца. Но мы обращаем на этот факт особое внимание, поскольку некоторые тектонические источники могут характеризоваться уменьшением плотности их вещества (например, нефтегазовые провинции, миграцию которых можно изучать рассматриваемым методом).

В табл. 4 особый интерес представляют результаты наблюдений на п. Гярд, с помощью которых делается вывод, что их гравитектонический источник расположен на юго-востоке и что его азимут равен  $106^{\circ},6$ . Местное землетрясение 12 X 1970 г. мы принимаем за источник наблюдаемых вариаций и считаем их естественным примером, указывающим на возможность предсказания землетрясений за несколько дней до его начала. В этом отношении имеют определенный интерес наблюдения и на п. Баку, так как во время их выполнения произошло два землетрясения: в Западной Турции и в районе г. Махачкала. Но оба землетрясения были очень далеко от пункта наблюдений, и поэтому мы не ожидали получить достоверных сведений об азимутах этих эпицентров. Методический же интерес этих вычислений очевиден и он, например, проявляется в том, что для азимутов этих эпицентров надо принять те значения, которые указаны в скобках, т. е. к вычисленным значениям надо прибавить  $180^{\circ}$ , чтобы получить полное согласие с данными табл. 1. Такая операция может показаться произвольной, но она вполне закономерна, поскольку прибавление к азимуту  $180^{\circ}$  не нарушает направления вертикальной плоскости, в которой может находиться эпицентр источника наблюдаемых вариаций. Не противоречит эта операция и условию, при котором левые части равенств (2) равны нулю.

В табл. 4 все вариации  $T_{\Delta}$ , кроме вариаций на пп. Талгар и Баку, имеют знак плюс, что указывает на увеличение плотности вещества источников, вызывающих эти вариации. Это утверждение о корреляции знака  $T_{\Delta}$  со знаком остаточной плотности вещества источника объясняется следующим образом. Если наблюдаемые  $T_{\Delta} > 0$  и разности имеют тот же знак, то согласно интегралу (5) и остаточная плотность  $\Delta\sigma > 0$ . Но может быть иная комбинация знаков у исходных данных, тогда знак  $\Delta\sigma$  определится ошибочно. Чтобы избежать этого, следует также применять групповой метод измерения вариаций, с помощью которых можно определить знак разности  $y^2 - x^2$  и тогда по знаку наблюдаемых  $T_{\Delta}$  можно определить знак  $\Delta\sigma$ . В практике наших исследований не было групповых наблюдений и поэтому нам пришлось пользоваться иными данными, а иногда интуитивными соображениями, чтобы определить знак остаточной плотности вещества источника вариаций. Так, например, мы поступили при определении остаточной плотности вещества источников, вызывающих, по нашему мнению, отрицательные вариации на пп. Талгар и Баку.

Изложение основ теории метода выполнено на примере решения вулканологической проблемы. Однако следует заметить, что метод может найти применение при решении родственных задач сейсмологии и гляциологии и других задач, о которых упоминалось в ходе изложения статьи.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
14 XI 1972