

В. В. КИРИЧУК, А. А. ТАДЕЕВ

ОБ ОДНОЙ МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Определение инвариантных характеристик деформации земной коры осуществляется в настоящее время на основе гипотезы куочно-однородного деформирования изучаемой области [1, 4], при этом остается открытым вопрос выделения внутри этой области однородно-деформированных регионов. Поэтому целесообразно предварительно выделить внутри нее регионы с однородным характером деформаций, а затем уже вычислить деформации в пределах каждого региона. Поставленную задачу решают обычно путем привлечения геолого-геоморфологической и тектонической информации. Однако такой подход ввиду неоднозначности этой информации субъективен, обеспечивает лишь качественные характеристики регионов и не дает возможности четко устанавливать их границы. Вероятностно-статистические методы, основанные на представлении поля смещений точек земной поверхности как реализации некоторого случайного процесса, позволяют в определенной степени избежать указанных недостатков.

Обоснование и общие положения разработанной на такой основе методики вычисления инвариантов деформаций изложены в [3]. В соответствии с ней рассмотрим область, содержащую N пунктов, для каждого из которых определены компоненты горизонтального смещения по осям x и y . Таким образом, мы имеем дело с разложением случайного процесса, реализуемого на плоскости в виде векторного случайного поля, на две компоненты — два скалярных случайных поля [3]. Такое представление позволяет избежать сложностей формально-математического характера, возникающих при статистическом анализе векторных случайных полей. Методика анализа на стационарность по дисперсии каждого из составляющих полей (смещений Δx и смещений Δy) следующая [2]:

вычисление поля дисперсий $(\Delta x)^2$ и $(\Delta y)^2$ с помощью алгоритма скользящей дисперсии. В обработку принимаются пункты, попадающие в окрестность скольжения, ограниченную радиусом скольжения R_0 . Следует отметить, что R_0 необходимо задавать, исходя из степени обеспеченности территории пунктами (густоты пунктов) и детальности исследования данной области;

выделение внутри области регионов, стационарных по дисперсиям $(\Delta x)^2$ и $(\Delta y)^2$, при помощи критерия Фишера*.

Выделенные регионы можно с достаточным основанием считать регионами с локально-однородным характером деформирования и, следовательно, все пункты, заключенные в том или ином регионе, обрабатывать совместно.

Определение характеристик деформации (дилатации, максимального и минимального растяжения, сдвига, поворота участков) осуществляется по общеизвестным формулам (см., например, [1, 3, 4]) посредством вычисления компонент e_{ij} тензора деформаций. Поскольку смещения являются линейными функциями координат [1, 3], то для каждого отдельного пункта k будут иметь место соотношения

$$\Delta x_k = e_{11} x_k + e_{12} y_k + a, \quad \Delta y_k = e_{21} x_k + e_{22} y_k + b, \quad (1)$$

из которых определяются искомые компоненты e_{ij} тензора деформации (здесь Δx_k и Δy_k — составляющие деформаций вдоль осей x и y соответственно; x_k и y_k — плоские прямоугольные координаты пункта k ; a и b — свободные члены).

В нашем случае каждый из стационарных регионов содержит n пунктов. При $n > 3$ система (1) будет переопределенной, значит компоненты e_{ij} следует находить при условии

$$\sum_{k=1}^n \{[\Delta x_k - (e_{11} x_k + e_{12} y_k + a)]^2 + [\Delta y_k - (e_{21} x_k + e_{22} y_k + b)]^2\} = \min. \quad (2)$$

* Количество таких стационарных регионов, соответствующее каждому из составляющих реализации векторного поля смещений, может различаться, что следует из природы самого изучаемого явления.

Это условие приводит от уравнений (1) к нормальным уравнениям [3]

$$A^T \cdot A \cdot E - A^T \cdot L = 0, \quad (3)$$

где A — матрица известных коэффициентов уравнений (1) размером $2n \times 6$; E — матрица искоемых компонент e_{ij} тензора деформаций размером 6×1 ; L — матрица свободных членов размером $2n \times 1$.

После простых преобразований (3) получим систему уравнений вида

$$\begin{aligned} e_{11} \sum_{i=1}^n x_i^2 + e_{12} \sum_{i=1}^n x_i y_i + a \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n \Delta x_i x_i &= 0, \\ e_{11} \sum_{i=1}^n x_i y_i + e_{12} \sum_{i=1}^n y_i^2 + a \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n \Delta x_i y_i &= 0, \quad \text{I группа} \\ e_{11} \sum_{i=1}^n x_i + e_{12} \sum_{i=1}^n y_i + a \cdot n - \sum_{i=1}^n \Delta x_i &= 0, \\ \dots \dots \dots \\ e_{21} \sum_{i=1}^n x_i^2 + e_{22} \sum_{i=1}^n x_i y_i + b \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n \Delta y_i x_i &= 0, \\ e_{21} \sum_{i=1}^n x_i y_i + e_{22} \sum_{i=1}^n y_i^2 + b \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n \Delta y_i y_i &= 0, \quad \text{II группа} \\ e_{21} \sum_{i=1}^n x_i + e_{22} \sum_{i=1}^n y_i + b \cdot n - \sum_{i=1}^n \Delta y_i &= 0, \end{aligned}$$

которая разделяется на две независимые группы уравнений. Решая уравнения каждой группы, можно, используя для I группы значения Δx_i , x_i , y_i , получить компоненты e_{11} и e_{12} для каждого из выделенных стационарных по дисперсиям $(\Delta x)^2$ регионов по n пунктам, входящим в соответствующий регион. Для II группы уравнений, используя Δy_i , x_i , y_i для всех n пунктов каждого отдельного региона, стационарного по дисперсиям значений Δy , можно получить компоненты e_{21} и e_{22} тензора деформаций. Искомые неизвестные получаем из решения эквивалентных систем I и II групп уравнений системы (4):

$$\begin{aligned} e_{11} \sum_{i=1}^n x_i^2 + e_{12} \sum_{i=1}^n x_i y_i + a \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n \Delta x_i x_i &= 0, \quad (4) \\ e_{12} K_1 + a K_2 - K_3 &= 0, \quad \text{I группа} \\ a \left(K_4 - \frac{K_2}{K_1} \right) - \left(K_5 - K_2 \frac{K_3}{K_1} \right) &= 0, \\ \dots \dots \dots \end{aligned}$$

$$e_{21} \sum_{i=1}^n x_i^2 + e_{22} \sum_{i=1}^n x_i y_i + b \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n \Delta y_i x_i = 0,$$

$$e_{22} K_1 + b K_2 - K_6 = 0,$$

II группа

$$b \left(K_4 - \frac{K_2}{K_1} \right) - \left(K_7 - K_2 \frac{K_6}{K_1} \right) = 0, \quad (5)$$

где

$$K_1 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}; \quad K_2 = \sum_{i=1}^n y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2};$$

$$K_3 = \sum_{i=1}^n \Delta x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}; \quad K_4 = n - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2};$$

$$K_5 = \sum_{i=1}^n \Delta x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n \Delta x_i x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}; \quad K_6 = \sum_{i=1}^n \Delta y_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i \cdot \sum_{i=1}^n \Delta y_i x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2};$$

$$K_7 = \sum_{i=1}^n \Delta y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n \Delta y_i x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}.$$

Определенные таким образом значения e_{11} и e_{12} постоянны для всех n пунктов в пределах каждого региона, стационарного по дисперсиям значений смещений Δx , а значения e_{21} и e_{22} соответственно постоянны для всех n пунктов каждого региона, стационарного по дисперсиям значений смещений Δy .

Таким образом, каждый из N пунктов изучаемой области получает присущие ему значения компонент e_{ij} тензора деформации, которые служат затем исходной информацией для вычисления характеристик деформации. В итоге имеем довольно простой алгоритм, легко реализуемый на ЭВМ.

Апробация изложенной методики выполнена на материалах повторных измерений в сети триангуляции I и II класса, приуроченных к землетрясению в Канто, 1923 г. (Япония). Исходной информацией служили координаты и горизонтальные смещения

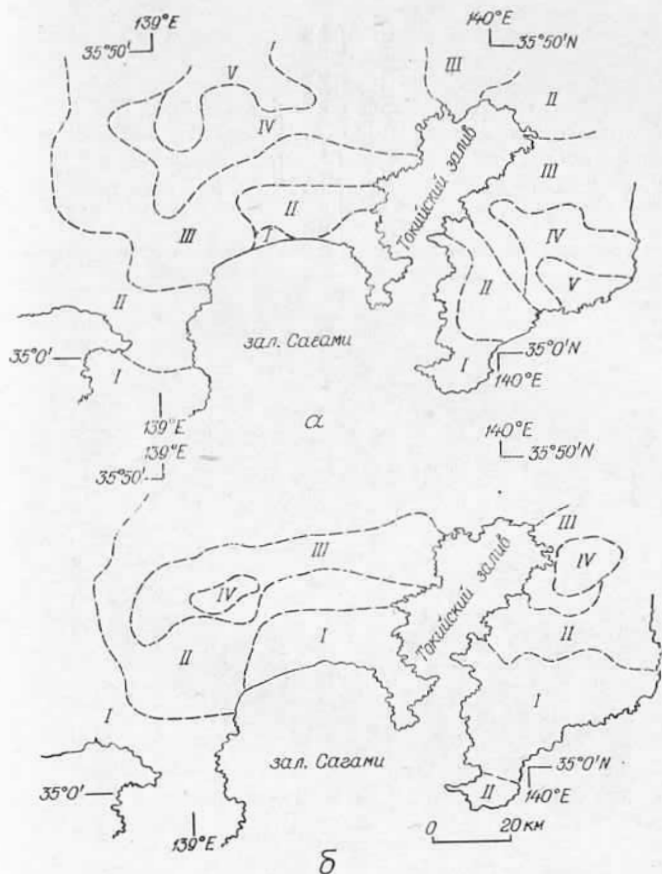


Рис. 1. Регионы, стационарные по дисперсиям значений смещений.

а — по оси x ; б — по оси y .
 ----- границы регионов; IV — номера регионов.

$N=172$ пунктов сети [4] *. В процессе районирования предварительно был выделен тренд, в качестве которого использовалось среднее арифметическое из 172 значений смещений Δx и Δy соответственно для каждого из составляющих реализации поля смещений. Задаваясь радиусом скольжения $R_0=10'$, вычисляли дисперсии $(\Delta x)^2$ и $(\Delta y)^2$ и при помощи критерия Фишера с уровнем

* В [4] координаты пунктов приведены без оценки их точности. Автор отмечает, что точность определения векторов смещений достаточна для выявления движений земной поверхности в районе. Поэтому, хотя методика предусматривает использование неравноточных измерений, мы вынуждены принять в обработку цитированные данные как равноточные.

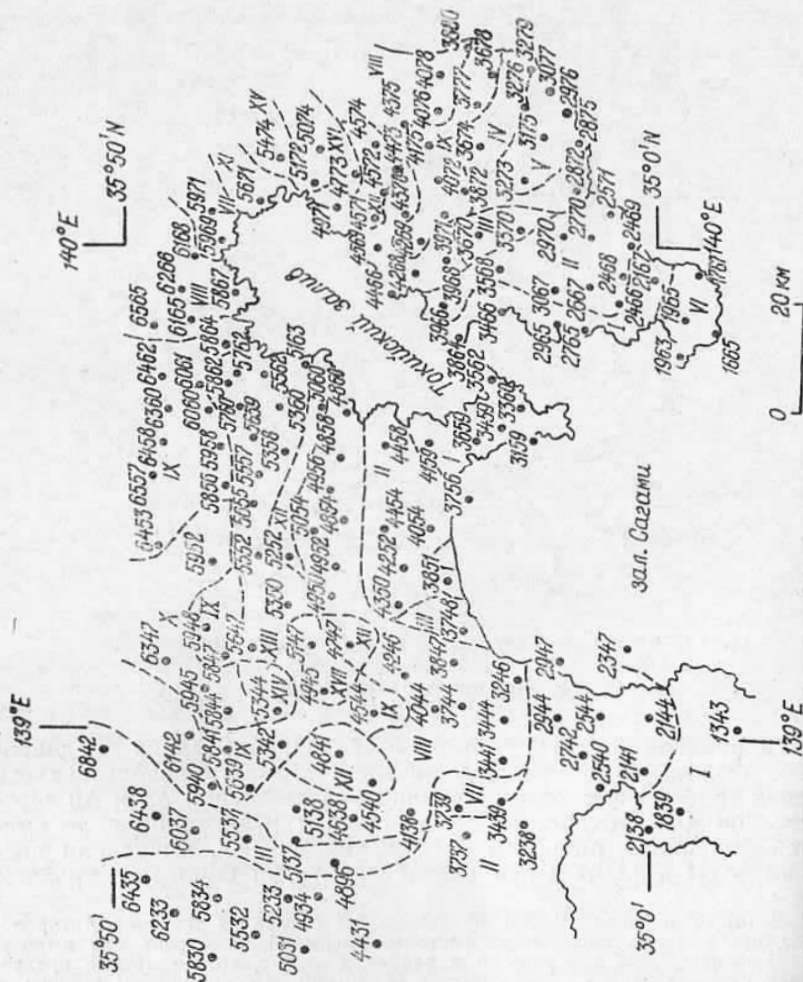


Рис. 2. Деформационные площадки.

— границы площадок; I-X — номера площадок; 3847 — пункты триангуляции.

значимости 10% выделяли стационарные регионы. В результате было выделено 5 регионов, стационарных по дисперсиям значений смещений Δx (рис. 1, а), и 4 региона — по Δy (рис. 1, б). Далее по описанной выше схеме вычисляли компоненты e_{ij} тензора деформации и, как конечный результат, характеристики деформаций для каждого из 172 пунктов сети. Значения дилатации, максимального и минимального растяжений, сдвига, поворота участков, направления действия максимального растяжения (главная ось деформации) приведены в таблице. Для удобства пользова-

Значения инвариантных характеристик деформации
для выделенных площадок

Деформационные площадки	Дилатация θ (10^{-6})	Максимальный сдвиг γ_m (10^{-6})	Максимальное растяжение E_1 (10^{-6})	Минимальное растяжение E_2 (10^{-6})	Направление действия E_1 $\varphi, ^\circ$	Поворот площадки ω (10^{-6})
I	-26,7	+62,7	+18,0	-44,6	+25,93	+ 4,0
II	+25,1	+40,2	+32,6	- 7,6	-35,49	+ 9,6
III	+14,1	+27,3	+20,8	- 6,6	-42,79	+15,0
IV	+13,4	+23,4	+18,4	- 5,0	-43,30	+16,8
V	+21,9	+29,5	+25,8	- 3,8	-35,20	+14,7
VI	-29,2	+54,2	+12,5	-41,7	+24,07	- 0,5
VII	+22,6	+33,0	+27,8	- 5,2	-30,90	+ 5,2
VIII	+11,6	+18,9	+15,2	- 3,6	-37,95	+10,6
IX	+10,9	+15,1	+13,0	- 2,0	-37,52	+12,4
X	+19,4	+22,6	+21,0	- 1,6	-28,36	+10,2
XI	+19,3	+37,0	+28,1	- 8,9	-29,64	+ 6,5
XII	+ 8,3	+22,4	+15,4	- 7,0	-34,69	+11,9
XIII	+ 7,6	+18,7	+13,1	- 5,6	-33,70	+13,8
XIV	+16,1	+26,7	+21,3	- 5,4	-26,99	+11,6
XV	+18,2	+30,3	+24,2	- 6,0	-24,31	+ 2,0
XVI	+ 7,2	+14,9	+11,0	- 3,8	-26,45	+ 7,4
XVII	+ 6,5	+11,7	+ 9,1	- 2,6	-22,33	+ 9,2

ния одноименные характеристики сгруппированы по принципу равенства их значений. В итоге получено 17 так называемых деформационных площадок (участки, претерпевающие деформации однородного характера). Другими словами, деформационные площадки — это зоны перекрытия выделенных стационарных по дисперсиям значений Δx и Δy регионов, для которых деформации следует считать однородными.

Получение конечного результата исследований в виде подобных площадок, в совокупности с данными геологии и тектоники, упрощает интерпретацию изучаемого явления, дает возможность судить не только о его качественной стороне, но и существенно повышает степень информативности количественной. Учет погрешностей получения исходных данных приведет к уточнению границ выделенных однородно-деформированных регионов.

Список литературы: 1. Есиков Н. П. Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности. — Новосибирск: Наука, 1979. — 173 с. 2. Лебедев С. В., Нейман Ю. М. Методика определения корреляционной функции аномального гравитационного поля Земли для локальных участков. — Межвузовский сб. науч. тр. по геодезии, 1977, т. 1(41), с. 87—91. 3. Таде-

св А. А., Киричук В. В. Об определении характеристик деформаций по данным о горизонтальных движениях земной коры. — К., 1984. — 11 с. — Рукопись деп. в УкрНИИНТИ, № 1171 Ук-84. 4. Nakane K. Re-evaluation of Horizontal Displacements of Second Order Triangulation Stations associated with the 1923 Kanto, Japan, Earthquake. — Jour. Geod. Soc. Japan, 1978, v. 24, № 4, p. 214—225.

Статья поступила в редколлегию 26. 10. 84