

Л.Н.Волынец, О.Д.Воевода

**ДЕФОРМАЦИИ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ, ВЫЗВАННЫЕ
ЗАГЛУБЛЕННЫМ РАЗРЫВОМ**

L.N.Volynets, O.D.Voevoda

**DEFORMATION OF THE FREE BOUNDARY CAUSED
BY AN INTERNAL DISLOCATION**

The two-dimensional problem on the elastic equilibrium of homogeneous isotropic halfplane under stress with a relief on the free surface and an internal fault has been solved by perturbation method. The small parameter is the ratio of a maximum relief amplitude to the minimum distance between the fault and the bounding free surface. The results show, that the influence of the relief should be taken into account for strain measurements.

Введение

Для физики очага землетрясений, сейсмотектоники и других вопросов геофизики представляет интерес изучение влияния разрывов сплошности, находящихся в земной коре, на перемещения, деформации и наклоны ее дневной поверхности [1]. В основе таких исследований лежат данные гравиметрических, геодезических, деформографических и наклономерных наблюдений на поверхности Земли. Анализ решения соответствующих задач механики твердого деформируемого тела может оказать определенную помощь при интерпретации натуральных экспериментов.

Задача о квазистатическом деформировании упругой однородной изотропной полуплоскости, в которой находится прямолинейный разрыв сплошности, является достаточно простой и тем не менее одной из основных до настоящего времени [2-6]. В наиболее общей постановке указанная задача рассмотрена в работе [6], где подробно исследовано влияние параметров заглубленного разрыва на остаточные перемещения прямолинейной границы полуплоскости. Однако возможности геофизических приложений результатов этой работы ограничены предположением о прямолинейности свободной границы.

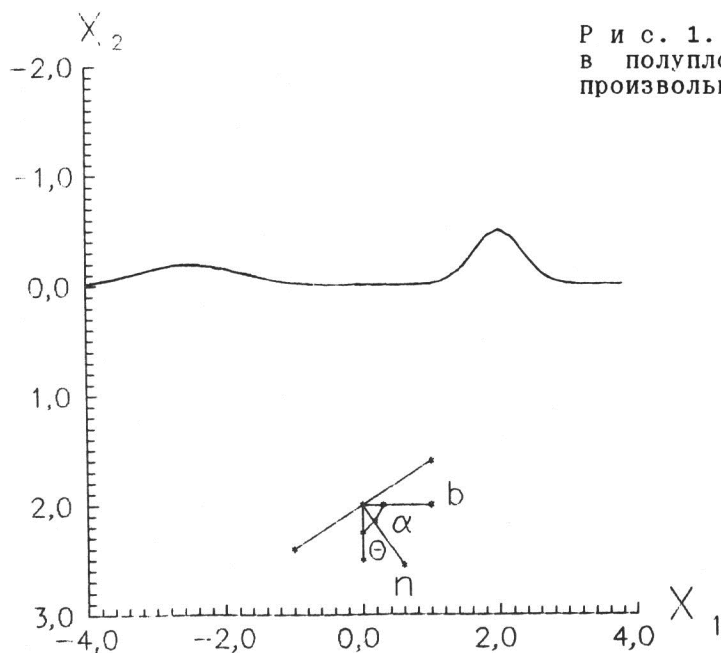
Целесообразность учета влияния рельефа поверхности Земли на кинематические характеристики ее деформированного состояния отмечалась в работах [7,8]. В связи с этими результатами возникает необ-

ходимость последовательного теоретического изучения влияния формы поверхности Земли на величины перемещений и деформаций. Попытка решения такой задачи при условии, что амплитуда рельефа мала по сравнению с его характерным размером по горизонтали, была предпринята в работе [9]. В ней предложен метод вычисления деформаций на границе полуплоскости, внутри которой находится вертикальный полубесконечный разрыв.

Основной целью настоящей статьи является исследование влияния рельефа свободной границы полуплоскости на деформации, обусловленные разрывом сплошности. Решение получено при значительно более общих предположениях по сравнению с [9]. Предлагаемую работу следует рассматривать как непосредственное продолжение [6].

Постановка задачи

Рассмотрим находящуюся в равновесии напряженную полуплоскость с произвольной гладкой границей Γ . В полуплоскости находится прямолинейный разрыв сплошности длиной $2l_0$, который не имеет общих точек с Γ (рис.1). На границе Γ полуплоскости вектор напряжений равен нулю. На разрыве L вектор напряжений непрерывен, а вектор перемещений испытывает заданный скачок. Материал полуплоскости линейноупругий, однородный и изотропный, его деформации малы, объемные силы отсутствуют.



Р и с. 1. Разрыв сплошности в полуплоскости с гладкой произвольной границей

Введем декартову систему координат $(0, x_1, x_2)$ так, что область $x_2 \geq 0$ занята материалом полуплоскости. В выбранной системе координат вызванные наличием разрыва возмущения характеристик напряженно-деформированного состояния полуплоскости удовлетворяют известным уравнениям равновесия и принятым выше граничным условиям

$$(\lambda + \mu) u_{j, ji} + \mu u_{i, jj} = 0, \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} N_j = 0, \quad \text{на } \Gamma, \quad (2)$$

$$[\sigma_{ij} n_j] = 0, \quad [u_i] = b_i, \quad \text{на } L. \quad (3)$$

В формулах (1)-(3) $i, j=1, 2$; λ и μ - коэффициенты Ламе; σ_{ij} , u_i , b_i - компоненты тензора напряжений, вектора перемещений и его скачка; n_j и N_j - компоненты единичных нормалей к разрыву L и границе полуплоскости Γ соответственно. По допустимым значениям повторяющихся индексов производится суммирование. Запятая перед индексом обозначает частную производную по соответствующей координате. Положительной считается нормаль к Γ , направленная внутрь материала полуплоскости. Направления вектора нормали к разрыву и вектора скачка перемещений на разрыве определяются углами θ и α (см. рис.1).

Рассматриваемую полуплоскость считаем моделью земной коры. Будем искать деформации точек границы полуплоскости, которую отождествим с рельефом поверхности Земли.

Деформации прямолинейной границы

Получим сначала решение для полуплоскости с прямолинейной границей, совпадающей с координатной осью $(0, x_1)$. Пусть U_i и Σ_{ij} - соответствующие перемещения и напряжения точек полуплоскости. Тогда условие (2) принимает вид

$$\Sigma_{i2}(0, x_1) = 0. \quad (4)$$

Из работы [6] следует, что перемещения границы полуплоскости практически не зависят от вида функции скачка перемещений $b_i(x_1)$, т.е. от физической природы разрыва. Поэтому можно ограничиться рассмотрением разрыва в виде дислокации Вольтерра, для которого абсолютная величина вектора скачка перемещений постоянна и равна B . При таком условии перемещения прямолинейной границы полуплоскости могут быть найдены аналитически. Пусть x_{10} и x_{20} - координаты геометрического центра разрыва, $n_j = \delta_{j1} \sin \theta + \delta_{j2} \cos \theta$ и $\tau_j = \delta_{j1} \cos \theta + \delta_{j2} \sin \theta$ - компоненты единичного вектора нормали и касательной к

разрыву. Введем обозначения $X_i = \delta_{i1}(x_1 - x_{10}) + \delta_{i2}x_{20}$; $X^2 = X_i X_i$. Если $X_i n_i \neq 0$, то искомые перемещения имеют вид

$$\begin{aligned}
 U_m = & - \frac{2B l_0}{\pi} \left\{ \left[\frac{X_m [1_0^2 + X^2 - 2(X_j \tau_j)^2] + \tau_m X_j \tau_j (1_0^2 - X^2)}{(X^2 + 1_0^2)^2 - 4(X_j \tau_j)^2 1_0^2} + \right. \right. \\
 & + \left. \frac{X_m + \tau_m X_j \tau_j}{2l_0 X_i n_i} \arctg \frac{2l_0 X_i n_i}{X^2 - 1_0^2} \right] \cos \alpha + \frac{1}{X_i n_i} \times \\
 & \times \left[\frac{2X_m X_j \tau_j [1_0^2 - (X_j \tau_j)^2] - \tau_m \{X^2 [X^2 + (X_j \tau_j)^2] + 1_0^2 [X^2 - 3(X_j \tau_j)^2]\}}{(X^2 + 1_0^2)^2 - 4(X_j \tau_j)^2 1_0^2} + \right. \\
 & \left. + \frac{2X_m X_j \tau_j + \tau_m [X^2 + (X_j \tau_j)^2]}{2l_0 X_i n_i} \arctg \frac{2l_0 X_i n_i}{X^2 - 1_0^2} \right] \sin \alpha \left. \right\}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Уравнению $X_i n_i = 0$ удовлетворяет только одна точка, в которой компоненты перемещений обращаются в нуль [6]. Эта точка находится на пересечении продолжения линии разрыва и координатной оси $(0, x_1)$. Условимся называть x_{20} глубиной гипоцентра разрыва, x_{10} - координатой его эпицентра, а X и X_1 - гипоцентральной и эпицентральной расстояниями. Случай $\alpha = 90^\circ$ соответствует закрытому разрыву, а $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ - открытому разрыву.

Дифференцируя перемещения (5) по координате x_1 , получаем формулы для деформаций $U_{1,1}$ и наклонов $U_{2,1}$, вызванных на прямолинейной границе полуплоскости заглубленным разрывом, при $X_i n_i \neq 0$:

$$\begin{aligned}
 U_{m,1} = & \frac{2}{\pi} \frac{B l_0}{(X_i n_i)^2} \left\{ \left[\frac{(X_i n_i)^2}{(X^2 + 1_0^2)^2 - 4(X_j \tau_j)^2 1_0^2} \{ \delta_{m1} (1_0^2 + X^2 - \right. \right. \\
 & - 2(X_j \tau_j)^2) + 2X_m (X_1 - 2X_j \tau_j \tau_1) + \tau_m \tau_1 (1_0^2 - X^2) - 2\tau_m X_j \tau_j X_1 - \\
 & - \frac{4[(1_0^2 + X^2)X_1 - 2l_0^2 \tau_1 X_j \tau_j]}{(X^2 + 1_0^2)^2 - 4(X_j \tau_j)^2 1_0^2} [X_m (1_0^2 + X^2 - (X_j \tau_j)^2) + \\
 & + \tau_m X_j \tau_j (1_0^2 - X^2)] \} + \frac{n_1 (X_0^2 - 1_0^2) - 2X_1 X_i n_i}{(X^2 - 1_0^2)^2 + 4(X_i \tau_i)^2 1_0^2} X_i n_i (X_m + \tau_m X_j \tau_j) + \\
 & \left. + \frac{1}{2l_0} [(\delta_{m1} + \tau_m \tau_1) X_i n_i - n_1 (X_m + \tau_m X_j \tau_j)] \arctg \frac{2l_0 X_i n_i}{X^2 - 1_0^2} \right] \cos \alpha +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\frac{X_i n_i}{(X^2 + 1_0^2)^2 - 4(X_j \tau_j)^2 1_0^2} \{ 2(\delta_{m1} X_j \tau_j + \tau_1 X_m) (1_0^2 - (X_j \tau_j)^2) - \right. \\
& - \tau_1 X_m (X_j \tau_j)^2 - 2\tau_m [X_1 (1_0^2 + 2X^2 + (X_j \tau_j)^2) + \tau_1 X_j \tau_j (X^2 - 31_0^2)] + \\
& + \frac{\tau_m [X^2 (X^2 + 1_0^2) + (X_j \tau_j)^2 (X^2 - 31_0^2)] - 2X_m X_j \tau_j [1_0^2 - (X_j \tau_j)^2]}{X_i n_i [(X^2 + 1_0^2)^2 - 4(X_j \tau_j)^2 1_0^2]} \times \\
& \times [n_1 ((1_0^2 + X^2) - 41_0 (X_j \tau_j)^2) + 4X_i n_i (X_1 (1_0^2 + X^2) - 1_0^2 \tau_1 X_j \tau_j)] \} + \\
& + \frac{n_1 (X_0^2 - 1_0^2) - 2X_1 X_i n_i}{(X^2 - 1_0^2)^2 + 4(X_i \tau_i)^2 1_0^2} [2X_m X_j \tau_j + \tau_m (X^2 + (X_j \tau_j)^2)] + \\
& + \{ \delta_{m1} X_j \tau_j + \tau_1 X_m + \tau_m (\tau_1 X_j \tau_j + X_1) - \frac{1}{X_i n_i 1_0} [2X_m X_j \tau_j + \\
& + \tau_m (X^2 + (X_j \tau_j)^2)] \} \arctg \frac{21_0 X_i n_i}{X^2 - 1_0^2} \Big] \sin \alpha \Big\}. \quad (6)
\end{aligned}$$

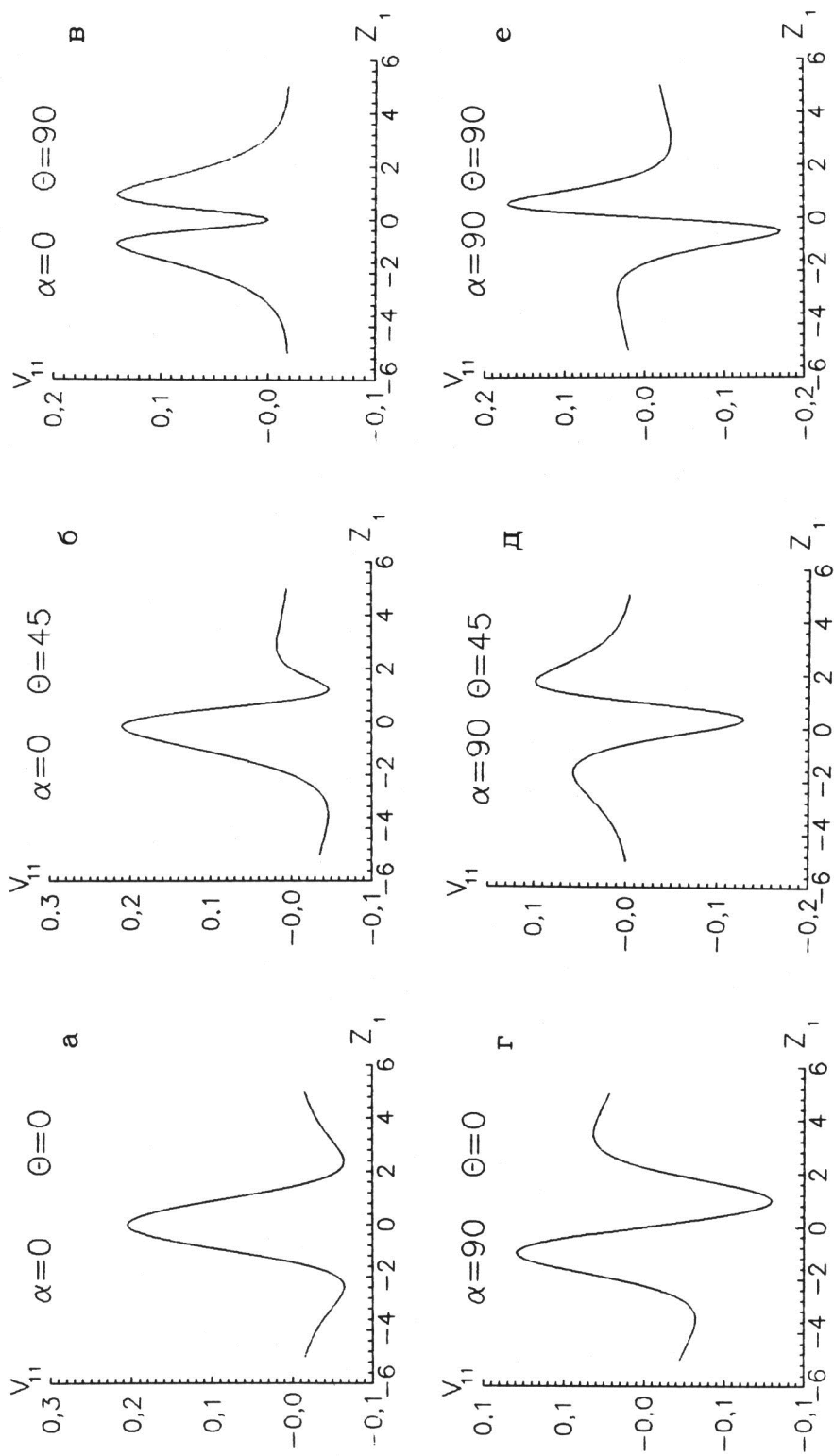
В точке, удовлетворяющей условию $X_i n_i = 0$, вместо формул (6) следует пользоваться выражениями

$$\begin{aligned}
U_{m,1} = \frac{2}{\pi} \frac{B1_0}{1_0^2 - (X_j \tau_j)^2} \ln \left(\frac{X_j \tau_j + 1_0}{X_j \tau_j - 1_0} \right)^2 \times \left[X_m \left(\frac{1}{X_j \tau_j} + \frac{1_0^2 - (X_j \tau_j)^2}{41_0 (X_j \tau_j)^2} \right) + \right. \\
\left. + \tau_m \left(1 - \frac{1_0^2 - (X_j \tau_j)^2}{1_0 (X_j \tau_j)^2} \right) \right] \sin \theta \sin \alpha. \quad (7)
\end{aligned}$$

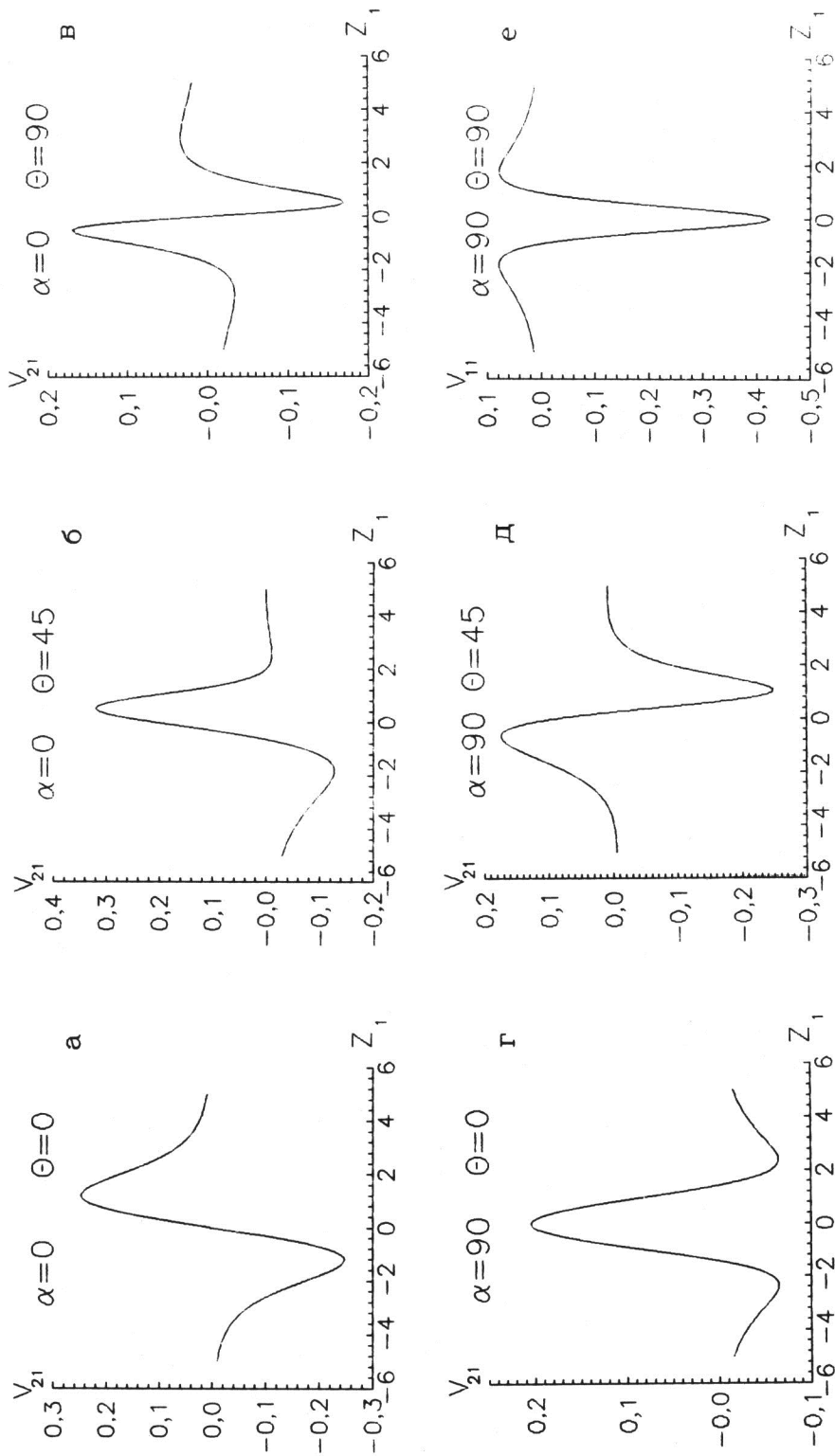
Введем безразмерные переменные $z_i = X_i / 1_0$; z_{10} и z_{20} - координаты гипоцентра разрыва. Таким образом, все линейные размеры нормируются на половину длины разрыва. На рис. 2 и 3 в качестве примера изображены безразмерные дисторсии $v_{i1} = U_{i,1} / (B/1_0)$ при глубине гипоцентра равной длине разрыва $z_{20} = 2$. Расчеты проводились для открытых и закрытых разрывов при различных значениях угла θ .

Применение метода возмущений

Рассмотрим полуплоскость с произвольной гладкой границей, которая однозначно задана кривой $x_2 = H(x_1)$. В общем случае аналитически найти решение граничной задачи (1)-(3) невозможно. Однако некоторые достаточно общие предположения о конфигурации границы позволяют использовать метод возмущений при построении асимптотики пе-



Р и с. 2. Горизонтальные деформации V_{11} , вызванные на прямолинейной границе полуплоскости отрывными (а-в) и сдвиговыми (г-е) разрывами различной ориентации с глубиной гипцентра $z_{20} = 2$



Р и с. 3. Наклоны V_{21} , вызванные на прямолинейной границе полуплоскости отрывными и сдвиговыми разрывами различной ориентации (а-е) с глубиной гипотцентра $z_{20}=2$

ремещений, вызванных заглубленным разрывом сплошности на границе полуплоскости Γ .

Возможность использования метода возмущений определяется наличием некоторого малого безразмерного параметра. Геометрия рассматриваемой задачи позволяет ввести несколько характерных безразмерных параметров, каждый из которых в определенной ситуации может быть малым.

Рассмотрим практически реальный случай, когда максимальное значение абсолютной величины $|N|$ много меньше минимального из расстояний x_2 от точек разрыва до прямой $x_2=0$. Введем безразмерный, малый по сравнению с единицей параметр $\varepsilon = |N|_{\max} / x_{2\min}$. Не нарушая общности положим

$$N(x_1) = \varepsilon h(x_1). \quad (8)$$

Перемещения точек полуплоскости, ограниченной кривой Γ , представим в виде ряда по степеням малого параметра ε :

$$u_i = u_i^0 + \varepsilon u_i^{(1)} + \varepsilon^2 u_i^{(2)} + \varepsilon^k u_i^{(k)} + \dots \quad (9)$$

Отсюда, очевидно, каждое из приближений $u_i^{(k)}$ должно удовлетворять уравнению равновесия (1). Отметим, что только компоненты u_i^0 не зависят от вида кривой, ограничивающей полуплоскость. Поэтому выберем в качестве нулевого приближения решение изложенной выше задачи о деформировании прямолинейной границы полуплоскости заглубленным разрывом, на котором задан скачок перемещений b_i .

Сформулированные предположения дают возможность применить стандартную процедуру метода возмущений [10] к решению поставленной задачи. Она состоит в сведении исходной задачи к совокупности некоторых граничных задач, решение каждой из которых может быть последовательно получено из известного нулевого приближения.

Ограничимся первым приближением, т.е. отбросим в (9) члены порядка ε^2 и выше:

$$u_i = U_i + \varepsilon u_i. \quad (10)$$

Тогда соответствующие перемещениям (10) напряжения представляются в виде суммы:

$$\sigma_{ij} = \Sigma_{ij} + \varepsilon \sigma_{ij}^{(1)}. \quad (11)$$

Рассмотрим далее условия (2) на границе Γ . Компоненты единичной нормали к Γ имеют вид: $N_j = (\delta_{i2} - \varepsilon h, \delta_{j1}) / \sqrt{1+h^2}$. Подставив это выражение в (2), получаем

$$\sigma_{i2}(x_i) - \varepsilon h, \sigma_{i1}(x_i) = 0, \quad x_i \in \Gamma. \quad (12)$$

Входящие в (12) значения напряжений σ_{ij} при $x_2 = \varepsilon h(x_1)$ найдем с помощью разложения Маклорена и оставим в соответствующем ряду члены не выше первого порядка по ε :

$$\sigma_{i2}(x_1) + \varepsilon h(x_1) \frac{\partial \sigma_{i2}(x_i)}{\partial x_2} \Big|_{x_2=0} - \varepsilon h_{,1} \sigma_{i1}(x_1) = 0. \quad (13)$$

Заметим, что граничные условия (13) содержат напряжения и их производные, зависящие только от переменной x_1 . Подставим в (13) представление (11) и, учитывая условие (4), получим с точностью до малых второго порядка:

$$\sigma_{i2}^{(1)}(x_1) = h_{,1} \Sigma_{i1}(x_1). \quad (14)$$

Следовательно, наличие рельефа проявляется в действии напряжений $\sigma_{i2}^{(1)}$, которые распределены на прямолинейной границе полуплоскости и зависят от производной $h_{,1}$. Решение уравнений равновесия относительно перемещений $u_i^{(1)}(x_i)$ при соответствующих граничных условиях (14) можно получить с помощью интегральной формы записи теоремы взаимности и фундаментального решения $G_{ik}(x_i - \xi_i)$ (функции Грина) уравнений равновесия сплошной однородной изотропной полуплоскости с незагруженной прямолинейной границей [11]. Перемещения точек полуплоскости в этом случае вычисляются следующим образом:

$$u_i^{(1)}(x_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{k2}(\xi_1) G_{ik}(x_i - \xi_i) \Big|_{\xi_2=0} d\xi_1. \quad (15)$$

В силу структуры функции Грина для плоской задачи перемещения на границе полуплоскости определяются с точностью до константы. Конкретные вычисления можно провести только для отдельных задач при дополнительных граничных условиях. Поэтому будем заниматься исследованием деформаций и наклонов на свободной границе полуплоскости.

Деформации произвольной границы

Для того, чтобы найти выражение для деформаций и наклонов, продифференцируем перемещения (15) по x_1 и на границе $x_2=0$ получим

$$u_{i,1}^{(1)}(x_1) = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{k2}(\xi_1) \left(\frac{\partial}{\partial x_1} G_{ik}(x_1 - \xi_1, x_2) \right) \Big|_{x_2=0} d\xi_1. \quad (16)$$

Граничные условия (4) означают, что на прямой $x_2=0$ напряжения $\Sigma_{21}(x_1)$ обращаются в нуль. Тогда в формуле (14) остается одна ненулевая компонента:

$$\sigma_{12}^{(1)}(x_1) = h_{,1} \Sigma_{11}(x_1). \quad (17)$$

Непосредственно из (16) и (17) следует, что для вычисления $u_{i,1}^{(1)}$ нам необходимы только компоненты $G_{i1}(x_1 - \xi_1, x_2)$, которые можно представить следующим образом [11]:

$$G_{11} = -\frac{1}{2\pi\mu} \left[\frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \ln((x_1 - \xi_1)^2 + x_2^2) + \frac{(x_1 - \xi_1)^2}{(x_1 - \xi_1)^2 + x_2^2} \right],$$

$$G_{21} = \frac{1}{2\pi\mu} \left[\frac{\mu}{\lambda+\mu} \operatorname{arctg} \frac{x_2}{x_1 - \xi_1} + \frac{(x_1 - \xi_1)x_2}{(x_1 - \xi_1)^2 + x_2^2} \right]. \quad (18)$$

Заметим, что $G_{21}=0$ при $x_2=0$, следовательно $u_{2,1}^{(1)}(x_1)=0$ и $u_{2,1}^{(1)}(x_1)=0$. Это означает, что для двумерной модели наличие рельефа в первом приближении не оказывает влияния на вертикальную компоненту перемещений произвольной свободной границы полуплоскости и, следовательно, на наклоны, а отражается только на величине перемещений u_1 и деформаций $u_{1,1}$.

Из первой формулы (18) следует, что

$$\frac{\partial}{\partial x_1} G_{11} \Big|_{x_2=0} = \frac{\lambda+2\mu}{2\pi\mu(\lambda+\mu)} \frac{1}{x_1 - \xi_1}. \quad (19)$$

Если подставить (17) и (19) в (16), решение сводится к

$$u_{1,1}^{(1)}(x_1) = \frac{\lambda+2\mu}{2\pi\mu(\lambda+\mu)} \int_{-\infty}^{\infty} h_{,1}(\xi_1) \Sigma_{11}(\xi_1) \frac{1}{x_1 - \xi_1} d\xi_1. \quad (20)$$

Напряжения Σ_{11} на прямой $x_2=0$ определим через $U_{1,1}$ при помощи условия (4) и закона Гука для изотропной среды:

$$\Sigma_{11}(x_1) = \frac{4\mu(\lambda+\mu)}{\lambda+2\mu} U_{1,1}(x_1). \quad (21)$$

Вернемся к соотношению (9) и получим из него выражение для деформаций:

$$u_{1,1} = U_{1,1} + \varepsilon u_{1,1}^{(1)}. \quad (22)$$

После некоторых преобразований находим из (20), (21), (22) с учетом (8) окончательное решение для деформаций на произвольной свободной границе полуплоскости Γ :

$$u_{1,1}(x_1) = U_{1,1}(x_1) + \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial H(\xi_1)}{\partial \xi_1} U_{1,1}(\xi_1) \frac{1}{x_1 - \xi_1} d\xi_1. \quad (23)$$

Формулы (6), (7), (23) позволяют оценить влияние рельефа границы Γ на деформации, вызванные на этой границе заглубленным прямо-

линейным разрывом сплошности. Из указанных формул следует, что в первом приближении поправка, связанная с существованием рельефа, зависит от его наклона $\partial H(\xi_1)/\partial \xi_1$, расположения разрыва, размера разрыва и величины скачка смещений B .

Точность расчетов определяется величиной ε^2 , причем для данной геометрии разрыва ε вычисляется следующим образом :

$$\varepsilon = |N|_{\max} / (z_0 - \sin\theta). \quad (24)$$

Так как по условию задачи разрыв не пересекается с границей, z_{20} всегда больше 1 и, следовательно, максимальное значение ε достигается при $\theta=90^\circ$.

Перейдем к введенным выше безразмерным координатам z_1 . Для исследования влияния рельефа на горизонтальные деформации границы полуплоскости возьмем в качестве примера функцию вида

$$H(z_1) = H_{\max} \exp\{-[(z_1 - a)/b]^2\}. \quad (25)$$

Задавая H_{\max} , a , b можно изменять форму рельефа, рассматривать различные варианты взаимного расположения рельефа и разрыва внутри среды. Можно также построить непрерывный рельеф, состоящий из нескольких указанных элементов.

Подставляя $H(z_1)$ и $V_{11}(z_1)$ в (23), получаем выражение для безразмерных деформаций $v_{11} = u_{1,1} / (B/l_0)$:

$$v_{11}(z_1) = V_{11}(z_1) + \frac{2}{\pi} \frac{2H_{\max}}{b^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\rho_1 - a}{\rho_1 - z_1} \times \\ \times \exp[-((\rho_1 - a)/b)^2] V_{11}(\rho_1) d\rho_1, \quad (26)$$

где ρ_1 - безразмерная переменная интегрирования.

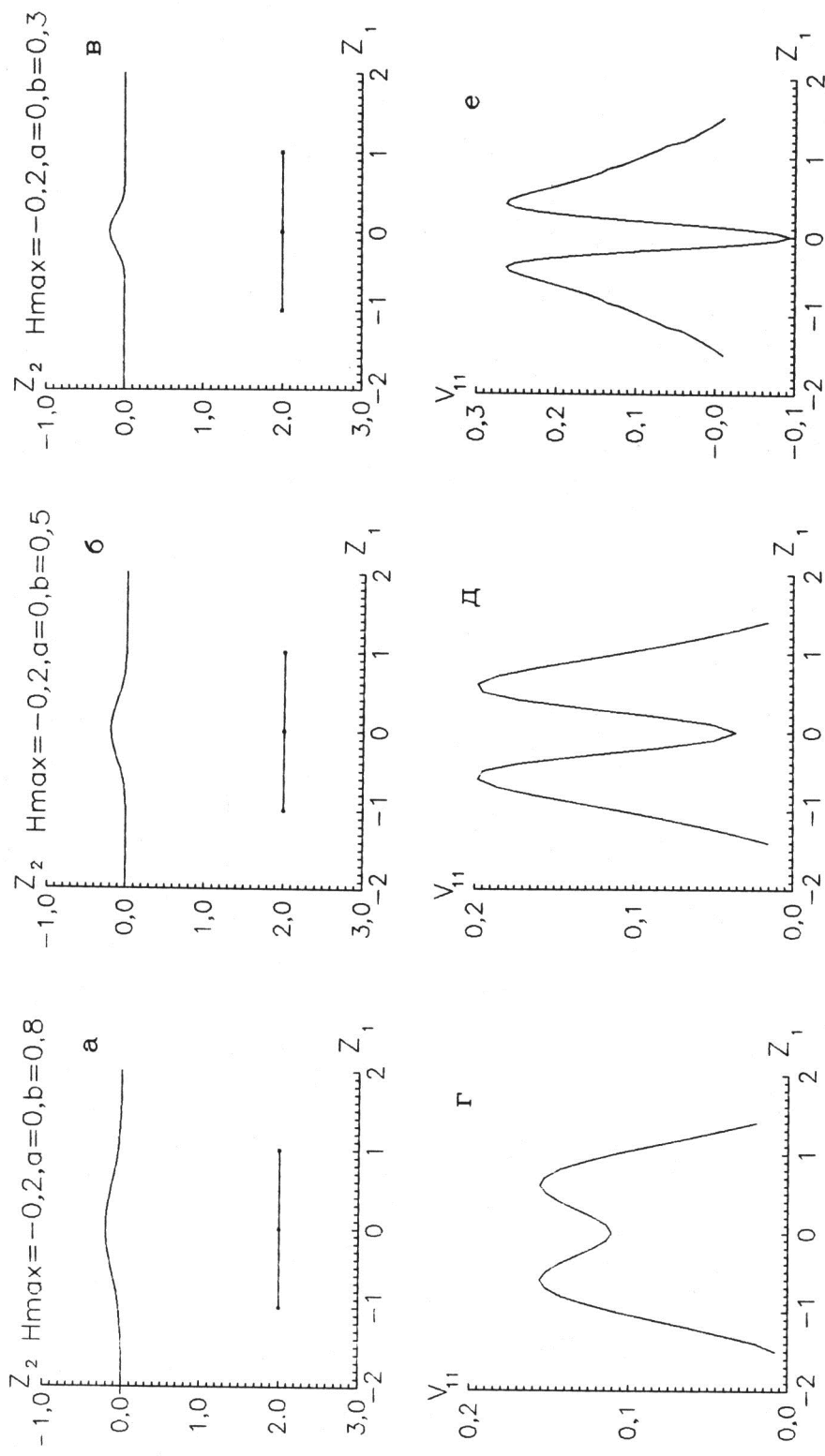
Изменения, обусловленные наличием рельефа, определяются интегралом в правой части (26). Максимальные значения этот интеграл может принимать при z_1 , близких к константе a , так как экспонента быстро убывает. При таких z_1 интеграл имеет тот же знак, что и функция $V_{11}(z_1)$. Поэтому качественные изменения v_{11} по сравнению с V_{11} могут появляться только при $H_{\max} < 0$, что соответствует "возвышенности" на границе полуплоскости (рис.4, а). При $H_{\max} > 0$ ("впадина" на границе) поправка за счет влияния рельефа существенных изменений не внесет. Проиллюстрируем это на конкретных примерах. Положим $|H_{\max}| = 0,2$, а $z_{20} \geq 2$. Тогда в соответствии с (24) точность расчетов не превышает 0,01.

На рис. 4-7 изображены различные случаи расположения разрыва в полуплоскости с рельефом и соответствующие им горизонтальные деформации $v_{11}(z_1)$, рассчитанные по формуле (26). Сравним кривые на рис. 2, а и рис. 4 для открытого горизонтального разрыва. Рельеф в виде "возвышенности", расположенной над разрывом, вызывает существенные качественные изменения деформаций, в частности, перемену знака вблизи эпицентра при возрастании крутизны рельефа (см. рис. 4, а, б, в). Не приводя графики отметим, что при смещении центра разрыва относительно рельефа поправка становится незначительной. Для закрытого вертикального разрыва наблюдается обратная картина: минимальное влияние рельефа (см. рис. 2, г и рис. 5, г) в том случае, когда вершина рельефа расположена точно над центром разрыва (см. рис. 5, а), а при смещении вершины рельефа (см. рис. 5, б, в) происходят принципиальные изменения вида деформаций (см. рис. 5, д, е). При заглублинии закрытого разрыва (см. рис. 6, а, б, в) уменьшаются абсолютные значения деформаций, а появившиеся дополнительные точки перемены знака (ср. рис. 2, д и 6, г) остаются неизменными (см. рис. 6, д, е). Как уже отмечалось, при рельефе в виде "впадины" (см. рис. 7, а, б, в) возникают лишь незначительные изменения формы деформаций, вызываемых закрытыми разрывами разной ориентации (ср. рис. 2, г, д, е и 7, а, б, в).

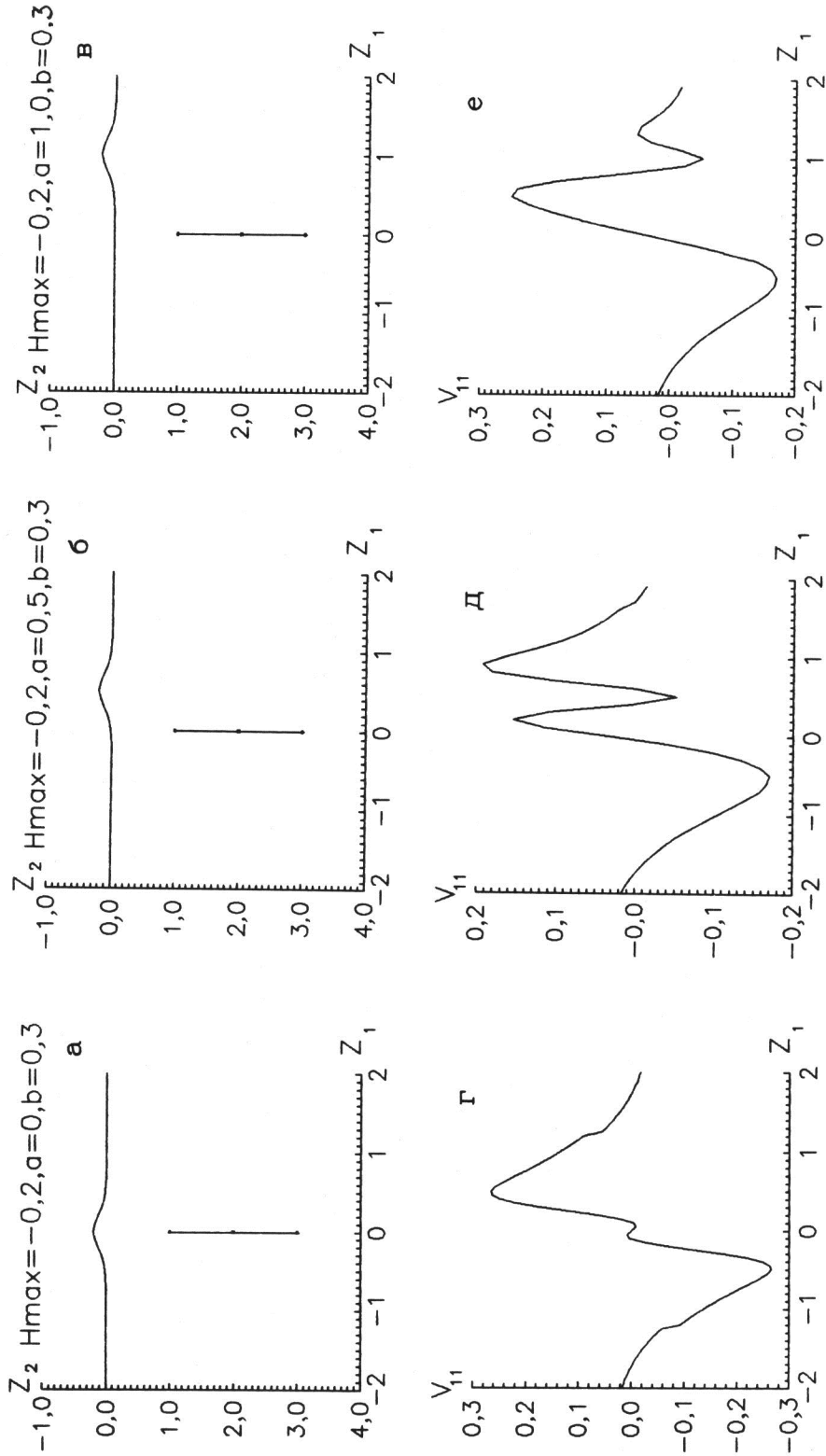
Представленные на рисунках результаты относятся к конкретному виду функции (25) и не позволяют выявить какие-либо общие закономерности, связанные с влиянием рельефа на деформации. Рельеф вносит изменения, которые зависят как от геометрии границы, так и от всех параметров разрыва сплошности, находящегося внутри среды. При этом поправка за счет рельефа во многих случаях может иметь порядок деформаций нулевого приближения, т.е. вызывать значительные качественные изменения. Следовательно, учет влияния рельефа необходим при интерпретации деформографических натуральных наблюдений. Возможно, что некоторые общие выводы о влиянии рельефа Земли на деформации ее поверхности можно получить в рамках вероятностного описания рельефа границы.

Основные результаты и выводы

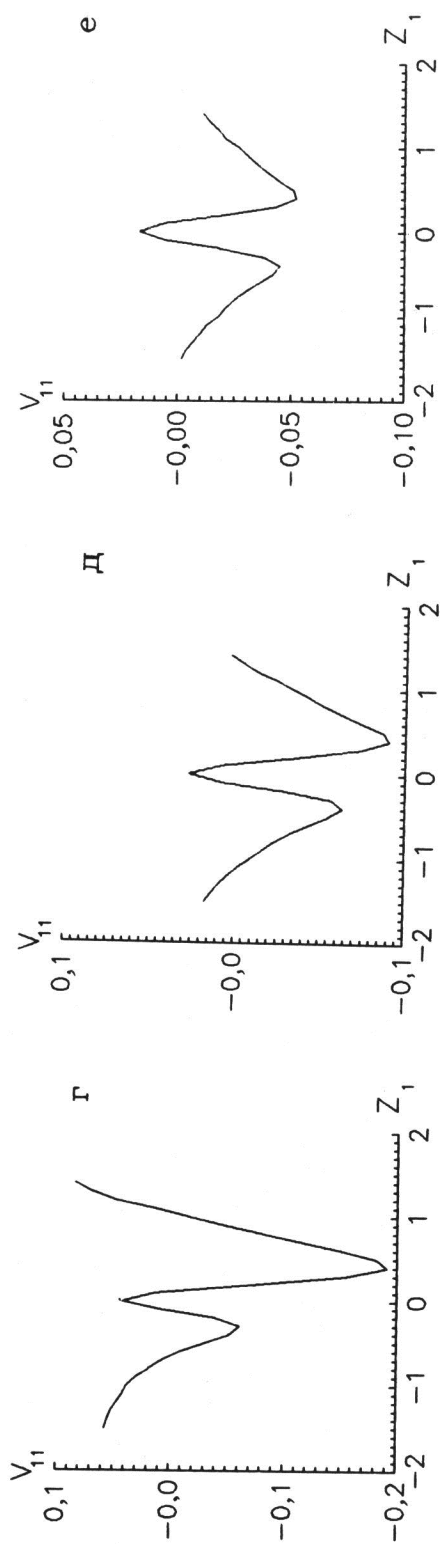
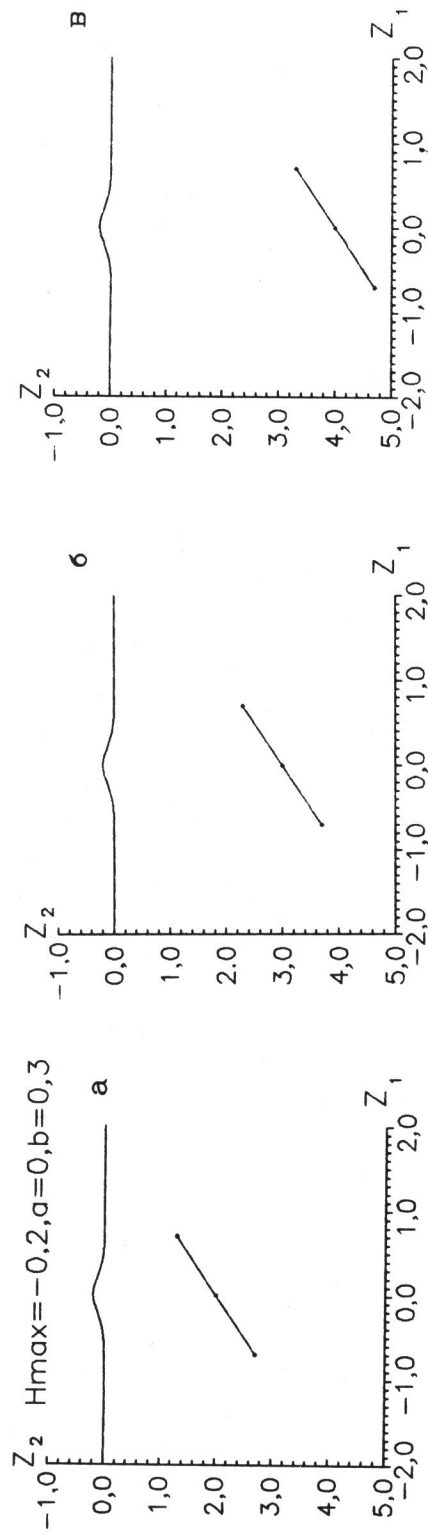
В статье рассмотрена задача о деформировании заглублинным разрывом рельефной незагруженной границы упругой однородной изотропной полуплоскости. Методом возмущений построено решение при условии, что амплитуда рельефа много меньше расстояния от свободной



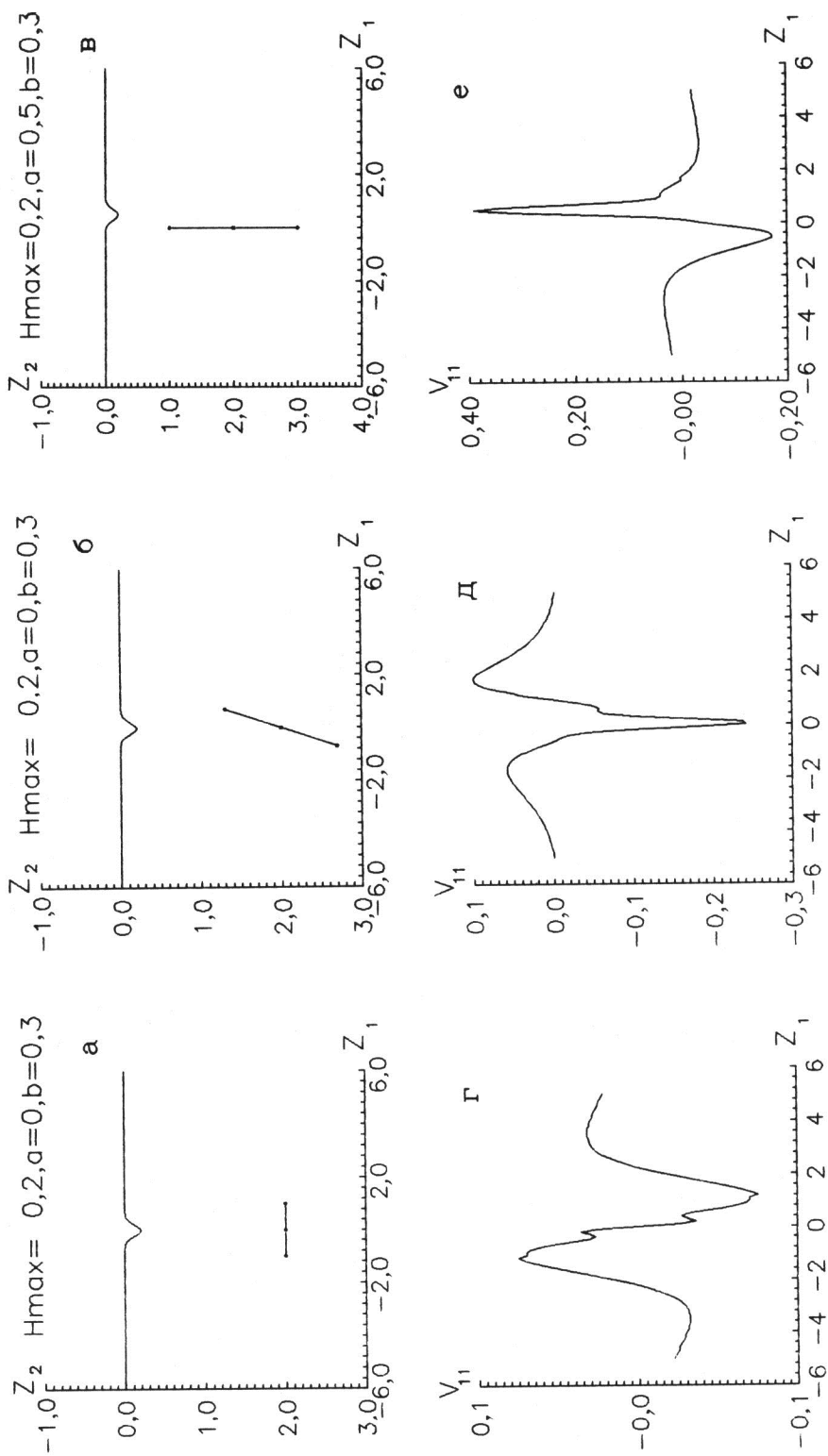
Р и с. 4. Влияние формы рельефа (а-в) на деформации свободной границы v_{11} (г-е), вызванные открытым разрывом ($\alpha=0, \theta=90$)



Р и с. 5. Влияние взаимного расположения закрытого разрыва и рельефа (а-в) на деформации свободной границы $v_{11}(\Gamma)$



Р и с. 6. Заглубление закрытого разрыва (а-в) и соответствующие изменения деформаций свободной границы v_{11} (Г-е)



Р и с. 7. Деформирование свободной границы закрытыми разрывами различной ориентации (а-е)

границы до разрыва. Предполагалось, что полуплоскость представляет собой модель земной коры.

В рамках принятой модели обнаружено влияние рельефа поверхности Земли на перемещения деформации и наклоны, вызванные на этой поверхности заглубленным разрывом. Характер влияния рельефа в первом приближении определяется его крутизной, а также зависит от размера разрыва, скачка смещений на разрыве и расположения разрыва относительно поверхности Земли.

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод: корректная интерпретация проявлений на поверхности Земли сейсмотектонических движений не может не учитывать существующий рельеф.

Литература

1. *Касахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264с.
2. *Chinnery M.A.* The stress changes that accompany strike-slip faulting // Bull.Seismol.Soc.Amer. 1963.Vol.53, N 5. P.921-932.
3. *Weertman J.* Relationship between displacements on a free surface and the stress on a fault // Bull.Seismol.Soc.Amer. 1965. Vol. 55, N 6. P. 945-953.
4. *Maruama T.* On two dimensional elastic dislocations in an infinite and semi-infinite medium //Bull.Earth.Res.Ins. 1966. Vol. 44, N 3. P. 811-871.
5. *Chinnery M.A.* Theoretical fault models // Bull. Domin. Observ. Ottawa. 1969. Vol. 37, N 7. P. 211-223.
6. *Волынец Л.Н., Воевода О.Д.* Влияние параметров разрыва сплошности на перемещения границы полуплоскости//Акта Geophys.Polonica. 1984. Vol. 32, N 3. P. 259-269.
7. *Ishii. H., Takagi A.* Theoretical study on the crustal movements. Part 1. The influence of surface topography // Sci.Rep. Tohoku Univ. Ser. 5. Geophys. 1967. Vol. 19, N 1. P. 77-94.
8. *Harrison J. C.* Cavity and topographic effects in the tilt and strain measurements // J.Geophys.Res. 1976. Vol. 81. P.319-328.
9. *Mahrer K.D.* Approximating surface deformation from a buried strike-slip fault or shear crack in a mildly uneven half-space // Bull.Seismol.Soc.Amer. 1984. Vol. 74, N 3. P.797-803.
10. *Ломакин В.А.* Статистические задачи механики твердых деформируемых тел. М.: Наука, 1970. 343с.
11. *Лурье А.И.* Теория упругости. М.: Наука, 1970. 670с.