



ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕИМУЩЕСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ТРЕЩИН ОТ РЕЛЬЕФА В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА

Б.П. Сибиряков, Е.Б. Сибиряков

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: sibiryakovbp@ipgg.sbras.ru, sibiryakoveb@ipgg.sbras.ru*

Работа посвящена оценке возможной анизотропии верхней части разреза (ВЧР), вызванной рельефом местности. Экспериментальные наблюдения расщепления волн различной поляризации являются признаком анизотропии ВЧР. Однако причины этого явления могут быть и иными. Обоснованием того, что анизотропия обусловлена рельефом, может служить расчет напряженно-деформированного состояния под вертикальными поднятиями, в частности, интенсивности касательных деформаций. Для расчета упругих деформаций использовался метод граничных элементов. В ходе работы трещиной считался объект с максимальной интенсивностью касательных деформаций больше, чем 10^{-4} .

Метод граничных элементов, тензор деформаций, ориентация трещин, критерий трещинообразования

DEPENDENCE OF THE DOMINANT CRACKS ORIENTATION ON THE SEISMIC SECTION SURFACE TOPOGRAPHY

B.P. Sibriakov, E.B. Sibriakov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
Acad. Koptyuga prosp., 3, Russia, Novosibirsk, 630090, e-mail: sibiryakovbp@ipgg.sbras.ru, sibiryakoveb@ipgg.sbras.ru*

The paper deals with possible anisotropy caused by surface topography. The possible reason of S wave's splitting is anisotropy of the upper part of the seismic section. Nevertheless, mentioned phenomenon can be caused by other reasons. The calculation of stress-strain state and second invariant of the strain tensor deviator can be used for clarifying of the topography induced anisotropy. For the strain calculation boundary element method was used. In the paper we treated object with maximal effective tangential strain more than 10^{-4} as a crack.

Method of boundary elements, strain tensor, cracks orientation, criterion of cracks origination

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмические наблюдения быстрых и медленных поперечных волн различной поляризации являются достаточно надежным признаком анизотропии [Bakulin et al., 2000] горных пород. Она обычно связывается с некоторой преимущественной ориентацией трещин продуктивных горизонтов [Gorshkalev et al., 2007]. Таким образом, анизотропные свойства пород нередко служат индикатором того, что у трещин есть некоторая преимущественная ориентация. Примеры такой зависимости можно наблюдать в продуктивных отложениях рифея в Восточной Сибири. Однако, аналогичные эффекты расщепления поперечных волн были обнаружены также в верхних частях разреза. Эти эффекты осложняют изучение анизотропии целевых объектов, но имеют самостоятельное геодинамическое значение. Критерии разрушения упругих сред являются достаточно эвристическими и связаны с определенными экспериментальными традициями. Известный критерий максимальной интенсивности касательных напряжений (критерий Мизеса) основан на опытах, проводимых на прессах, а также на растяжении образцов и их скручивании. При этом по умолчанию считается, что вес самого образца во много раз меньше приложенной нагрузки. Это значит, что неявно используется однородное уравнение равновесия без участия массовых сил, т. е. силы тяжести. В геофизических исследо-

ваниях напряженного состояния земных недр этот фактор (сила тяжести) имеет первостепенное значение, поэтому, очевидно, необходима некоторая модернизация упомянутого критерия. Критерий Мизеса верно описывает расположение сколов у образцов под углами в 45° . Это связано с тем, что боковые напряжения соизмеримы с вертикальными. Однако, разрушение горных пород во многих случаях противоречит упомянутому критерию. В частности, образцы, насыщенные водой, разрушаются хаотично (рассыпаются). Использование деформационных критериев трещинообразования (т. е. таких, в которых трещина является объектом с достаточно большой интенсивностью касательных деформаций, а ориентация ее в пространстве определяется отношением главных деформаций) дает совершенно иной результат. В этом случае при условии достаточно простого и однородного напряженного состояния (вертикальное проседание, боковые деформации гораздо меньше вертикальных) должны наблюдаться субвертикальные трещины, что нередко подтверждается геологическими данными. Представляется интересным вычислить все компоненты тензора деформаций, порожденные сложным рельефом, на небольшой глубине в однородной среде. После этого определить преимущественную ориентацию трещин, обусловленных этими деформациями.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается однородная упругая среда с параметрами $\lambda = \mu = \rho = g = 1$ где λ и μ – упругие модули, ρ – плотность, g – ускорение свободного падения. Уравнение свободной поверхности имеет вид

$$F = 0.1 \exp(-25y^2)(\exp(-100(x - 0.2)^2) + \exp(-100(x + 0.2)^2)), \quad (1)$$

Вид свободной поверхности, описанный формулой (1), показан на рис. 1. Переменные x и y в (1) изменяются в пределах от -1 до 1 . Задача состоит в том, чтобы на поверхности $z_0 = -0.05$ (моделирующей погружение на малую глубину) вычислить все компоненты тензора деформаций и с их помощью попытаться определить преимущественную ориентацию трещин, т. е. найти решение неоднородного уравнения равновесия, удовлетворяющего на границе условию равенства нулю всех компонентов вектора нагрузок.

Поскольку нормаль к поверхности меняется достаточно быстро, для решения упругой задачи использовался модифицированный метод граничных элементов. Также использовались цилиндрические координаты, чтобы в областях большего градиента деформаций находилось больше точек.

Уравнение упругих стационарных колебаний имеет вид

$$\Delta u_i + k^2 u_i + \frac{\lambda + \mu}{\mu} \text{grad}_i (\text{div} \mathbf{u}) = 0, \quad (2)$$

где ω – циклическая частота стационарных колебаний, $k^2 = \frac{\rho \omega^2}{\mu}$.

Метод граничных интегральных уравнений предназначен для того, чтобы найти вектор перемещений (либо нагрузок), удовлетворяющий не только уравнению (2), но и граничным условиям.

Решение ищется в виде свертки с некоторым ядром, которое удовлетворяет уравнению в любой фиксированной точке замкнутого объема (но может и сколь угодно близко стремиться к поверхности), интегрирование же проводится в бегущей точке x , в ней же вычисляется элемент поверхности:

$$u_i(x_0) = \frac{1}{2\pi} \int M_{ik}(x_0, x) f_k(x) dS_x, \quad (3)$$

Тензор $\mathbf{M}(x_0, x)$ строится таким образом, чтобы уравнения (2) удовлетворялись при любом векторе по-

тенциала $\mathbf{f}(x)$, который вычисляется таким образом, чтобы вектор перемещений удовлетворял еще и граничным условиям.

Казалось бы, если использовать в качестве ядер фундаментальные решения для полупространства, то главного недостатка, связанного с появлением неинтегрируемого ядра (что, в свою очередь, приводит одновременно и к потере точности, и к повышению числа обусловленности системы) можно избежать.

В самом деле, на любой поверхности есть одно выделенное направление – вектор внешней нормали. По этой причине в качестве координаты $x_1 = (\mathbf{r}, \mathbf{n})$ выбирается скалярное произведение этого вектора на нормаль к поверхности в бегущей точке. В зависимости от знака x_1 ядрами будут решения либо для верхнего, либо для нижнего полупространства. Также на поверхности есть два взаимно-ортогональных касательных направления: $\mathbf{e}_{\tau 1}$, $\mathbf{e}_{\tau 2}$. Обозначим

$$x_2 = (\mathbf{r}, \mathbf{e}_{\tau 1}), \quad x_3 = (\mathbf{r}, \mathbf{e}_{\tau 2}), \quad r_\tau = \sqrt{x_2^2 + x_3^2}, \quad x_2 = r_\tau \cos \varphi, \\ x_3 = r_\tau \sin \varphi. \quad (4)$$

В качестве ядра для решения упругой задачи будет использоваться конечный аналог тензора фундаментальных решений для полупространства. Его использование позволяет существенно повысить точность решения задачи без ущерба для обусловленности системы. Тензор фундаментальных решений для полупространства – это набор откликов на сосредоточенную нагрузку, приложенную в разных направлениях на поверхности (при $x_1 = 0$):

$$\delta(S) = -\frac{1}{2\pi} \int_0^\infty k_r J_0(k_r r_\tau) dk_r, \quad (5)$$

где $J_0(k_r r_\tau)$ – функция Бесселя первого рода. δ -функция представляет собой инструмент для аналитического моделирования. Однако, при использовании численных методов нагрузку лучше сосредоточивать не в точке, поскольку численное моделирование ограничено пространственными частотами Найквиста (обратно пропорциональных шагу разбиения), а на одной (или нескольких) элементарных площадках. Это означает, что интегрировать в формуле (5) возможно не до бесконечности, а до обратного характерного размера разбиения. Таким образом, вместо классической δ -функции при использовании численных

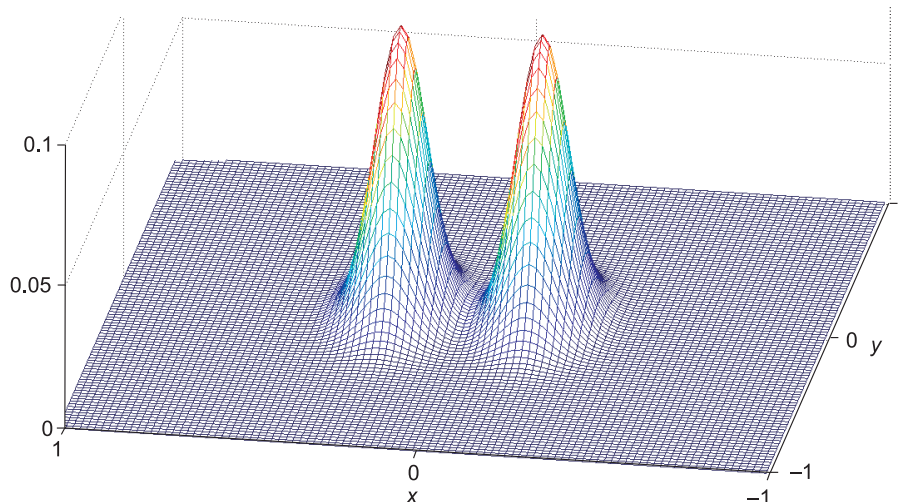


Рис. 1. Вид свободной поверхности, описываемой формулой (1).

методов правильнее использовать δ -функцию с ограниченным пространственным спектром (т. е. “размазанную” на несколько элементарных ячеек).

Теперь, если использовать в качестве ядра отклик на δ -функцию с ограниченным пространственным спектром, то предел интегрирования в выражении (5) будет не бесконечность, а какое-то конечное число N . Это означает, что “излишнюю” обусловленность мы “поменяем” на большую точность. Отметим, что серьезное повышение точности следует из гладкости и финитности ядер. При этом верхний предел интегрирования – число N – предлагается брать как обратный характерный размер разбиения: $N \sim \frac{1}{h}$. Если перейти

к компонентам $\mathbf{e}_n, \mathbf{e}_{r\tau}, \mathbf{e}_\varphi$ (цилиндрические координаты), то увидим, что тензоры фундаментальных решений будут иметь вид

$$M_{nn} = \int_0^N J_0(k_r r_\tau) \frac{\exp(-|x_1| k_r)}{4\pi\mu(1-\gamma^2)} (1 + k_r |x_1| (1-\gamma^2)) dk_r, \quad (6)$$

$$M_{rr} = \int_0^N -J_0'(k_r r_\tau) \frac{\exp(-|x_1| k_r)}{4\pi\mu(1-\gamma^2)} (-\gamma^2 + k_r |x_1| (1-\gamma^2)) dk_r, \quad (7)$$

$$M_{r\tau} = \int_0^N -J_0'(k_r r_\tau) \frac{\exp(-|x_1| k_r)}{4\pi\mu(1-\gamma^2)} (\gamma^2 + k_r |x_1| (1-\gamma^2)) dk_r, \quad (8)$$

$$M_{rr} = \int_0^N (2J_0(k_r r_\tau)(1-\gamma^2) + J_0''(k_r r_\tau)(1-2\gamma^2) + k_r |x_1| (1-\gamma^2) J_0''(k_r r_\tau)) \frac{\exp(-|x_1| k_r)}{4\pi\mu(1-\gamma^2)} dk_r, \quad (9)$$

$$M_{\varphi\varphi} = \int_0^N (J_0(k_r r_\tau) - J_0''(k_r r_\tau)(1-2\gamma^2) - k_r |x_1| (1-\gamma^2)(J_0(k_r r_\tau) + J_0''(k_r r_\tau))) \frac{\exp(-|x_1| k_r)}{4\pi\mu(1-\gamma^2)} dk_r. \quad (10)$$

Каким образом решения для полупространства (6)–(10) можно использовать для нахождения решений краевых задач на произвольных поверхностях?

Если коротко, то прежде всего ядра нужно правильно сориентировать. На поверхности есть выделенное направление – единичный вектор внешней нормали \mathbf{n} . Напомним, что проекция на внешнюю нормаль вектора, направленного из фиксированной точки в бегущую, есть новая переменная $x_1 = (\mathbf{r}, \mathbf{n})$. Что касается касательных направлений $\mathbf{e}_{\tau 1}, \mathbf{e}_{\tau 2}$, то в их выборе есть некоторая свобода. Соответственно, направления $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_{\tau 1}, \mathbf{e}_{\tau 2}, \mathbf{e}_\varphi$, связаны между собой соотношениями (4), с учетом того, что $\mathbf{e}_{r\tau} = \mathbf{e}_r, \mathbf{e}_{\tau 1} = \mathbf{e}_{x_2}, \mathbf{e}_{\tau 2} = \mathbf{e}_{x_3}$.

Формулы (6)–(10) задают перемещения, нагрузки вычисляются аналитически через производные от перемещений. Индексы i у компонент тензоров $M_{ik}(x, y)$, $R_{ik}(x, y)$ – это направления одного из трех векторов базисной тройки в фиксированной точке $(\mathbf{n}_0, \mathbf{e}_{\tau 10}, \mathbf{e}_{\tau 20})$. Индексы k – направления какого-либо из трех векторов в бегущей точке $(\mathbf{n}, \mathbf{e}_{\tau 1}, \mathbf{e}_{\tau 2})$. Соответственно, проекции ядер для уравнений, где свободным членом является вектор перемещений, преобразуются по тем же законам, что и векторы. Ядра же для уравнений, где свободным членом является вектор нагрузок, зависят от деформаций и преобразуются по законам преобразования тензоров второго ранга. Например, нормальные компоненты векторов перемещений и нагрузок вычисляются через скалярные произведения базисных

векторов в фиксированной и бегущей точках следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{n0} &= \mathbf{u}_n(\mathbf{n}_0, \mathbf{n}) + \mathbf{u}_r(\mathbf{n}_0, \mathbf{e}_r) + \mathbf{u}_\varphi(\mathbf{n}_0, \mathbf{e}_\varphi), \\ p_{n0} &= \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} + 2\mu \varepsilon_{n0n0} = \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} + 2\mu (\varepsilon_{x_1 x_1}(\mathbf{n}_0, \mathbf{n})^2 + \\ &+ \varepsilon_{rr}(\mathbf{n}_0, \mathbf{e}_r)^2 + \varepsilon_{\varphi\varphi}(\mathbf{n}_0, \mathbf{e}_\varphi)^2 + 2\varepsilon_{x_1 r}(\mathbf{n}_0, \mathbf{n})(\mathbf{n}_0, \mathbf{e}_r) + \\ &+ 2\varepsilon_{x_1 \varphi}(\mathbf{n}_0, \mathbf{n})(\mathbf{n}_0, \mathbf{e}_\varphi) + 2\varepsilon_{r\varphi}(\mathbf{n}_0, \mathbf{e}_r)(\mathbf{n}_0, \mathbf{e}_\varphi)). \end{aligned}$$

Уравнения же при этом будут иметь следующий вид (одна из компонент вектора перемещений):

$$\mathbf{u}_{n0}(x_0) = \int (M_{n0n}(x_0, x) f_n(x) + M_{n0\tau 1}(x_0, x) f_{\tau 1}(x) + M_{n0\tau 2}(x_0, x) f_{\tau 2}(x)) dS_x.$$

Обратим внимание на то, что новые ядра в форме (6)–(10) не зависят ни от вида граничных условий, ни от геометрии поверхности. Из всех параметров, определяемых геометрией поверхности, они зависят только от параметров $|x_1|$ и r_τ , точнее, от их максимальных значений на поверхности. Поэтому перед решением конкретной упругой задачи (а особенно серии задач) имеет смысл сначала определить максимальные расстояния между точками, которые возможны на этой поверхности (эти расстояния и будут верхней границей для $|x_1|$ и r_τ , нижняя граница, очевидно, есть ноль). После этого необходимо создать библиотеку, которая будет представлять собой эти пять двумерных функций (6)–(10), вычисленных в узлах определенной сетки, а также их частные производные, вплоть до третьих включительно. Таким образом, наличие в библиотеке 50 файлов при решении конкретной группы статических задач дает возможность избежать вычисления в каждой точке интегралов (6)–(10). Гораздо быстрее интерполировать функции, используя двумерную формулу Тейлора и значения в узлах. Например, если известно, что необходимо будет решать статические задачи на поверхности, где максимальное расстояние между точками будет равно 2, то можно задать число N в (6)–(10) равным 200 для поверхностной сетки размером 50×50 .

Вычисление в каждой точке векторов $\mathbf{n}, \mathbf{e}_{\tau 1}, \mathbf{e}_{\tau 2}$ их скалярных произведений в фиксированной и бегущей точках, а также параметров x_1, x_2, x_3, r_τ элемента поверхности, а также столбца свободных членов (который зависит от граничных условий) происходит несравнимо быстрее, чем вычисление интегралов. Поэтому процесс вычисления матрицы коэффициентов для системы линейных уравнений, предназначенной для нахождения вектора-потенциала, становится вполне приемлемым по времени (см. пример ниже). Представление ядер в виде конечных аналогов фундаментальных решений приводит к тому, что решение системы (2) естественным образом ищется в виде конечной суммы, а не интегралов (3).

Таким образом решение ищется не в виде интеграла, а в виде конечной суммы:

$$\mathbf{u}_i(x_0) = \sum M_{ik}(x_0, x) f_k(x), \quad (11)$$

где x_0 – фиксированная точка поверхности (либо внутренняя точка среды), а суммирование ведется по всем бегущим точкам поверхности x . Тензор $\mathbf{M}(x_0, x)$ является конечным аналогом тензора фундаментальных решений для полупространства. При этом первый нижний значок (i) совпадает с ориентацией нормали либо с одной из двух взаимно-ортогональных касательных в фиксированной точке, второй значок (k)

соответствует ориентации конечного аналога дельта-нагрузки. Если верхний предел $N \rightarrow \infty$, то все компоненты совпадут с тензором Грина для полупространства. Использование конечных и гладких ядер, а также суммы вместо интеграла позволяет на порядки повысить точность решения краевой задачи. Использование (11) позволяет аналитически вычислить все компоненты тензора деформаций, а также компоненты тензора нагрузок, если необходимо решать первую граничную задачу:

$$p_i(x_0) = -\sum P_{ik}(x_0, x) F_k(x).$$

СПОСОБ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Нулевое приближение, удовлетворяющее неоднородному уравнению упругости, есть

$$\mathbf{u} = \left(0, 0, -\frac{\rho g z^2}{2(\lambda + 2\mu)} \right). \quad (12)$$

Формула (12) не удовлетворяет условиям на свободной границе F . Для того чтобы найти решение, удовлетворяющее и уравнению, и граничным условиям, необходимо найти решение однородного уравнения с вектором нагрузок, противоположным нагрузкам на поверхности F , порожденным нулевым приближением. И сложить это решение с выражением (12).

Также представляется целесообразным использовать цилиндрические координаты при исследовании любых возмущений, находящихся на свободной поверхности, поскольку шаг сетки увеличивается при увеличении расстояния от источника возмущения.

Можно также вычислить из (11) производные от перемещений, т. е. все компоненты тензора деформаций. На рис. 2 представлена компонента деформации e_{zz} . Видно, что эта компонента по модулю примерно на порядок больше остальных компонент, только сжимающая. Она имеет максимум под вершинами структур. На рис. 3 представлена компонента деформации e_{xx} . Поведение этой компоненты нетривиально. Преобладает сжатие, но имеются и зоны растяжения. Мак-

симумы сжатий не совпадают с максимумами свободной поверхности (вершинами структур).

Причиной этого сложного поведения является быстрое изменение вектора нормали для рассматриваемой структуры. Поле горизонтальных перемещений, изображенное на рис. 4, есть гладкая функция. Однако ее градиенты очень велики, так что горизонтальные деформации, как сжимающие, так и растягивающие, должны иметь весьма сложный характер.

Критерий трещинообразования и результаты вычислений

Современные критерии трещинообразования заимствованы из теории пластичности. В разных задачах используются различные критерии. Поскольку трещины (а также области перехода в пластичность) в случае однородного напряженного состояния близки к плоскостям, то А.Э. Треска предложил использовать в качестве критерия перехода в пластичность (потери упругости) разность между главными напряжениями. Это означает, что эффективный сдвиг в определенной плоскости не влияет на трещинообразование в двух остальных плоскостях. Критерий Мизеса использует второй инвариант девиатора тензора напряжений. Более сложные критерии (Друкера–Прагера, Шлейхера–Надаи [Каркашадзе, 2004]) учитывают, что сжимающие и растягивающие напряжения могут как усиливать, так и ослаблять трещинообразование. В основном все упомянутые критерии используются для лабораторных исследований (силой тяжести в которых можно пренебречь). В том случае если глубина залегания достаточно велика, то одна из компонент тензора деформаций существенно превосходит остальные, и поле деформаций существенно неоднородно по глубине. По этой причине желательно изменить критерий трещинообразования, чтобы адекватно описывать упомянутые выше особенности. В частности, объяснение наличия субвертикальных трещин. Поскольку даже на относительно небольшой глубине боковые и вертикальные напряжения соизмеримы, а деформации различаются на поряд-

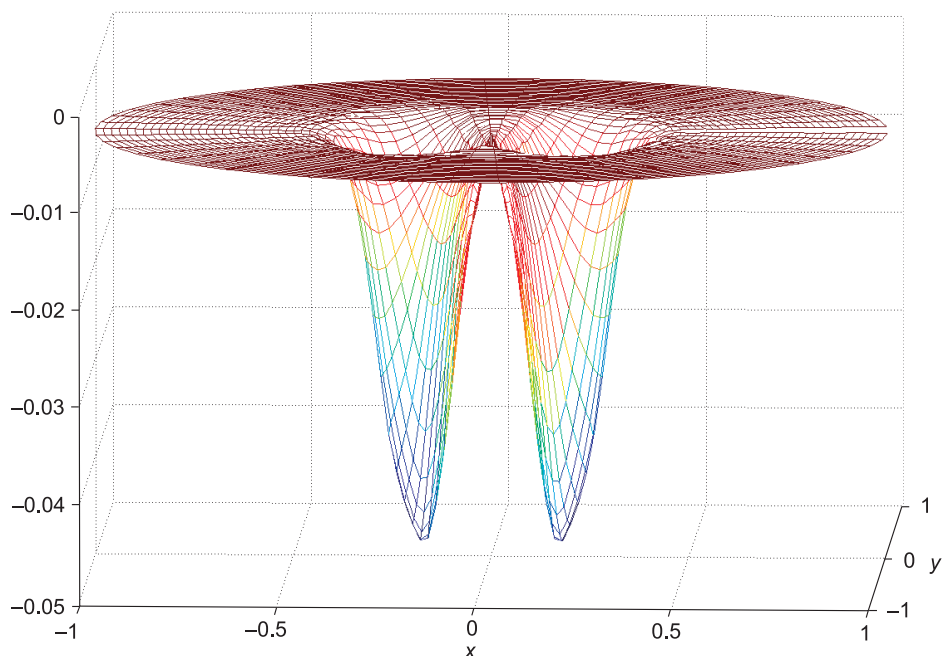


Рис. 2. Компонента деформации в цилиндрических координатах. Максимум сжатия совпадает с вершинами структур.

Рис. 3. Компонента деформации в цилиндрических координатах. Максимум сжатия не совпадает с вершинами структур. Преобладает сжатие, но есть и области растяжения.

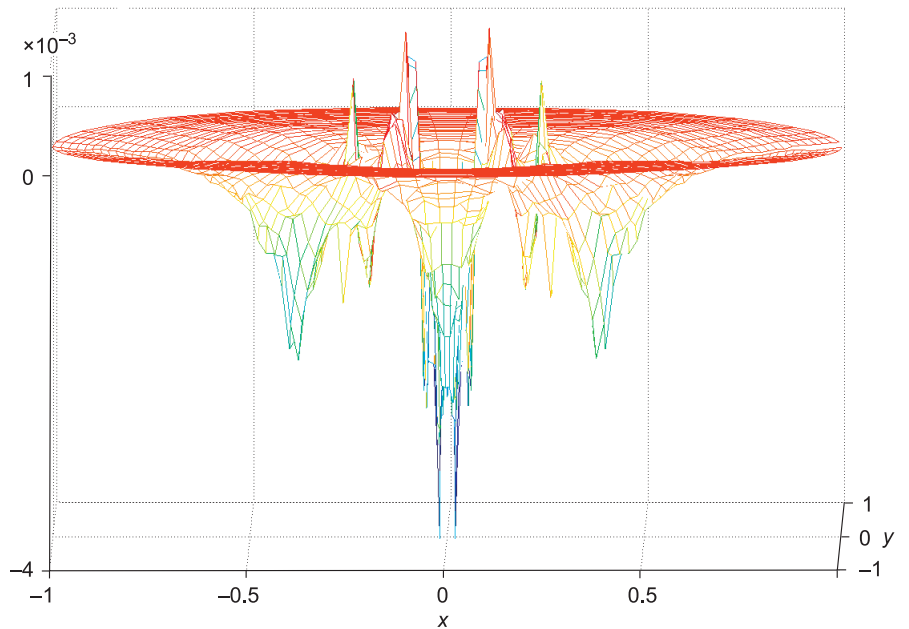
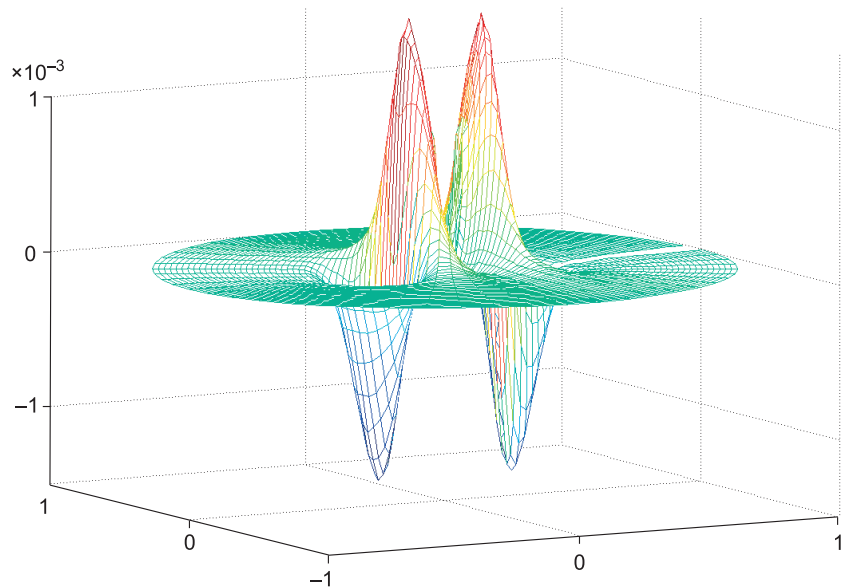


Рис. 4. Поле горизонтальных перемещений (u_x) на поверхности сложного рельефа. Очень большие горизонтальные градиенты данной компоненты вызывают сложное поле горизонтальных деформаций.



ки, имеет смысл использовать для задач геодинамики не силовые критерии трещинообразования (связанные с напряжениями), а деформационные. Представляется правильным использовать простоту подхода А.Э. Треска, заменив эффективные касательные напряжения на деформации. Кроме того, предлагается учесть тот факт, что деформации сжатия препятствуют трещинообразованию, а растяжения – наоборот, способствуют, аналогично тому, как это используется в критерии Шлейхера–Надаи. Рассмотрим формулы (13–16):

$$I_x = \sqrt{(e_{yy} - e_{zz})^2 + 6e_{yz}^2} + \alpha e_{xx}, \quad (13)$$

$$I_y = \sqrt{(e_{xx} - e_{zz})^2 + 6e_{xz}^2} + \alpha e_{yy}, \quad (14)$$

$$I_z = \sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + 6e_{xy}^2} + \alpha e_{zz}. \quad (15)$$

Построим вектор

$$\mathbf{N} = (I_x \theta(I_x), I_y \theta(I_y), I_z \theta(I_z)), \quad (16)$$

где θ – функция Хэвисайда. При этом параметр α можно положить равным 0.5 для достаточно широкого класса сред. Будем считать направление этого вектора совпадающим с наиболее вероятной ориентацией нормали к плоскости трещины. Это дает возможность количественно учесть то, что деформация сжатия препятствует образованию трещины. Если в (16) есть только одна ненулевая компонента, то это значит, что нормаль к трещине имеет точно такое же направление. В том случае если ненулевых компонент две, то разность между ними и будет являться отклонением наиболее вероятной ориентации от случайной в сторону одной из осей. Если все три компоненты одинаковы, то это будет означать хаотичную ориентацию трещин в трехмерном пространстве. Результаты обработки решения упругой задачи показывают, что почти всюду на виртуальной поверхности $z_0 = -0.05$ компонента (15) равна нулю. Это означает, что трещины субвертикальны. Из рис. 5 следует, что вдали от структуры ориентация нормали к плоскости трещины в плоскости XY случайна ($I_x = I_y$). Вблизи структуры нормаль

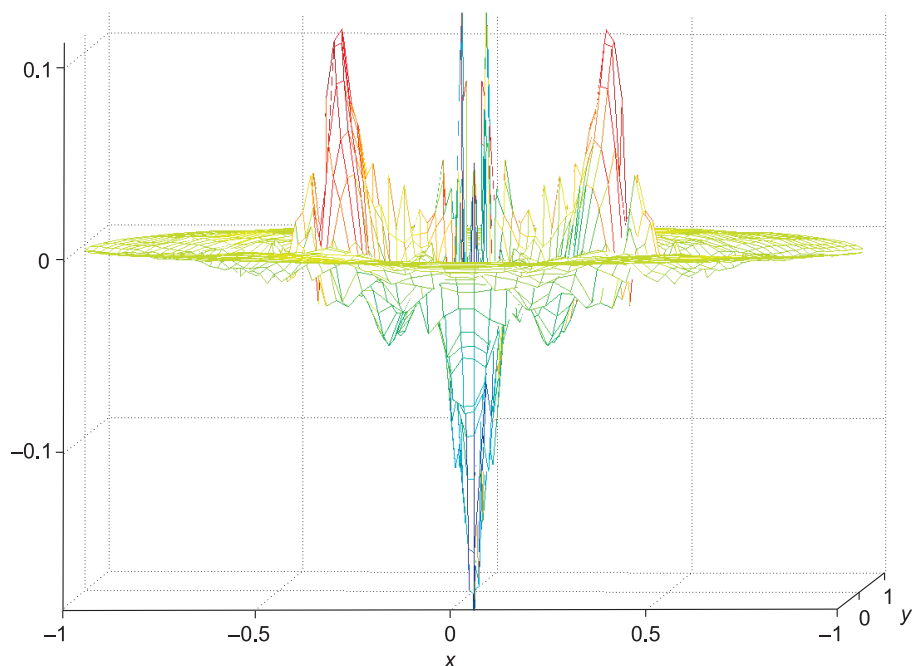


Рис. 5. Отклонение нормали к плоскости трещин от хаотичной ориентации (в сторону от оси X) в радианах. Максимальное отклонение не совпадает с элементами структуры.

к трещине отклоняются в сторону оси x примерно на 5° , что может приводить к слабой анизотропии. Иными словами, доля ориентированных вдоль хребтов трещин составляет около 5 % по сравнению с хаотично ориентированными трещинами. Под случайной ориентацией на плоскости следует понимать одинаковую вероятность появления трещины в обоих горизонтальных направлениях.

ВЫВОДЫ

В работе предложен критерий трещинообразования, учитывающий роль силы тяжести в процессе трещинообразования, а также выдвинуто предположение о том, что сжимающие нормальные деформации препятствуют образованию трещин.

Расчеты показали, что под возвышенностями высотой 300 м для пород с отношением $\gamma = \frac{V_S}{V_P} = 0.577$

имеет место сильное превышение вертикальных деформаций над всеми остальными почти по всей площади. Интенсивность касательных деформаций максимальна под “хребтами” возвышенностей и достигает значений 10^{-3} , чего вполне достаточно для образования трещин.

Сильное превышение вертикальных деформаций над горизонтальными и сдвиговыми деформациями обеспечивает наличие почти вертикальных трещин под

структурой с отклонениями всего лишь $5-7^\circ$. Этот результат является прямым следствием деформационного критерия трещинообразования, принятого в данной работе.

Ориентация трещин в горизонтальной плоскости имеет более сложный характер. Большинство трещин имеет хаотичную ориентацию в горизонтальной плоскости и лишь 4–8 % из них имеют ориентацию, совпадающую с простираемостью структур. При этом ориентированные трещины концентрируются как перед поднятиями, так и под ними. Тем самым, следует ожидать сравнительно слабой горизонтальной анизотропии верхней части разреза с коэффициентом порядка 5 %.

Литература

- Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I.** Estimation of fracture parameters from reflection seismic data. Part I: HTI model due to a single fracture set, Part II: Fractured models with orthorhombic symmetry // *Geophysics*. 2000. V. 65. P. 1788–1817.
- Gorshkalev S.B., Karsten W.V., Lebedev K.A., Korsunov I.V.** Evidence for Rapid Variation of Azimuthal Anisotropy in the Near Surface: An Example from Eastern Siberia, Russia // *J. Seism. Expl.* 2007. V. 16. P 319–330.
- Каркашадзе Г.Г.** Механическое разрушение горных пород. М.: Изд-во МГГУ, 2004. 222 с.

Статья поступила в редакцию 10 августа 2016 г., в окончательном варианте – 5 сентября 2016 г.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

СИБИРЯКОВ Борис Петрович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИНГГ СО РАН им. А.А. Трофимука.
E-mail: sibiryakovbp@ipgg.sbras.ru, тел.: (383) 330-90-02

СИБИРЯКОВ Егор Борисович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИНГГ СО РАН им. А.А. Трофимука.
E-mail: sibiryakoveb@ipgg.sbras.ru, тел.: (383) 330-90-02.