

МЕТОДЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ

© 1999 г. Ю. Л. Ребецкий

Представлено академиком В.Н. Страховым 11.07.97 г.

Поступило 30.07.97 г.

Главной проблемой реконструкции тензоров тектонических напряжений и скорости сейсмо-тектонических деформаций по сколовым разрывам и трещинам является создание однородных выборок исходных структурно-кинематических данных (СКД), определяющих границы однородно деформирующихся доменов, в вообще говоря 4-мерном объеме с координатами по пространству и времени. В работе предлагается метод реконструкции, использующий для этих целей вслед за [1, 2] принципы теории пластического течения с упрочнением, расширенные для описания процессов деформирования трещиноватых горных массивов. Процесс накопления необратимых деформаций за счет скольжения вдоль поверхностей пониженной прочности множества произвольно ориентированных взаимно пересекающихся разломов в массивах горных пород имитируется процессом квазипластического течения, а метод, анализирующий закономерности этого течения, — методом катакластического анализа.

Рассмотрим принцип максимума Мизеса, лежащий в основе построения современной теории пластичности,

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*) de_{ij}^p \geq 0, \quad (1)$$

определяющий выпуклость поверхности нагружения Σ (рис. 1), построенной в шестимерном пространстве напряжений [3]. В (1) σ_{ij} — действительные значения компонент напряжений, соответствующие данному значению de_{ij}^p , а σ_{ij}^* — компоненты любого возможного напряженного состояния, лежащего внутри поверхности нагружения. Из (1) и (рис. 1) следует, что вектор приращений пластических деформаций de^p , ассоциирован с Σ . Таким образом, во всех случаях, кроме пластической разгрузки, произведение тензоров приращений

пластических деформаций и напряжений не может быть отрицательным:

$$d\sigma_{ij} de_{ij}^p \geq 0, \quad (2)$$

и создание необратимой деформации требует дополнительной работы:

$$\sigma_{ij} de_{ij}^p \geq 0. \quad (3)$$

Выполнение (2) определяет стадию устойчивого упругопластического деформирования (активного нагружения). На рис. 1 неравенствам (2), (3) отвечает острый угол между соответствующими векторами.

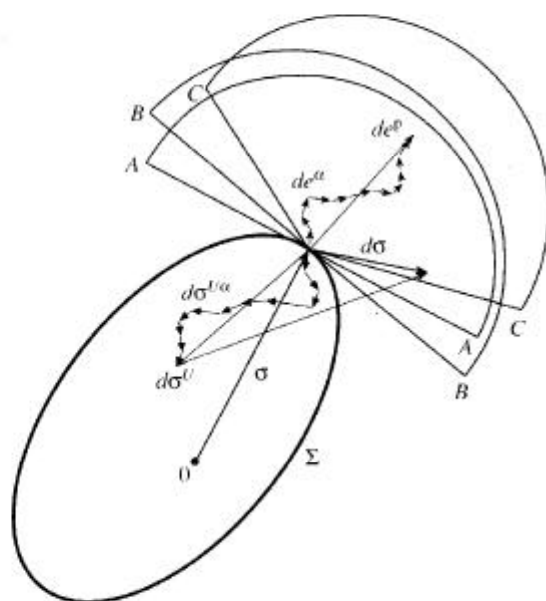


Рис. 1. Поверхность упругопластического нагружения Σ в шестимерном пространстве напряжений.

Объединенный институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта Российской Академии наук,
Москва

Следствием (1) является также условие упорядоченности компонент тензоров напряжений и скоростей пластических деформаций [4]

$$(\sigma_i - \sigma_j)(de_{ii}^p - de_{jj}^p) \geq 0, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Здесь de_{ii}^p – компоненты тензора приращений пластических деформаций удлинения и укорочения в направлении осей главных напряжений σ_i . Выбирая индексы в (4) так, чтобы разность между главными напряжений была положительной, находим, что

$$de_{11}^p \geq de_{22}^p \geq de_{33}^p, \quad (5)$$

т.е. в направлении действия осей главных напряжений необратимые пластические деформации удлинения и укорочения формируются в соответствии с индексом этих осей. Последнее выражение накладывает ограничение на характер пластического течения для широкого класса материалов, включая анизотропные среды.

При описании процесса квазипластического деформирования под σ_{ij} будем подразумевать средние для однородных доменов эффективные напряжения, а под de_{ij}^p – соответствующие приращения остаточных, трещинных, деформаций. Рассматривая каждую подвижку вдоль трещины скола (очага землетрясения) как результат микроакта пластического деформирования, вслед за работой [5] запишем

$$de_{ij}^a = \frac{\Omega^a D^a}{2V^a} (n_i^a s_j^a + n_j^a s_i^a), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (6)$$

Здесь тензор de_{ij}^a определяет средний для всех точек области упругой разгрузки V^a вклад в тензор сеймотектонических деформаций разрыва с номером a , n_i^a и s_i^a – направляющие косинусы векторов нормали к плоскости разрыва и подвижки вдоль него (нормали нодальных плоскостей для сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений) в произвольной системе координат, D^a – средняя величина подвижки вдоль плоскости разрыва, а Ω^a – площадь разрыва. Известен стандартный способ расчета тензора приращений (скорости) сеймотектонических деформаций [6], основанный на суммировании отдельных вкладов в процесс накопления остаточных деформаций согласно (6) от землетрясений, эпицентры которых попадают в произвольно выделяемый макроробъем осреднения. В работе [6] показано, что в рамках представляемого в настоящей статье подхода расчет тензора приращений сеймотектони-

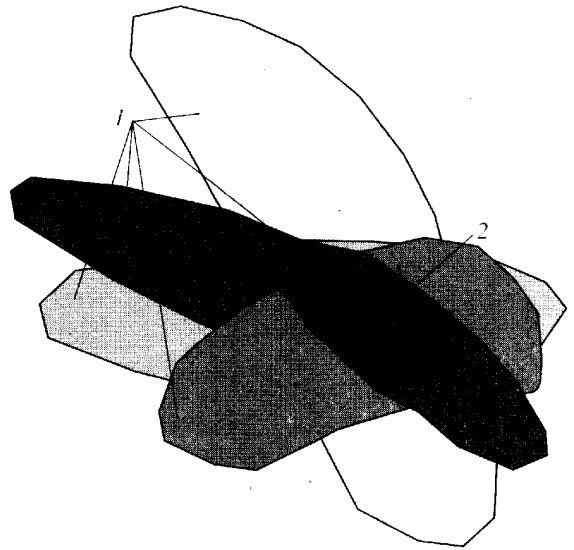


Рис. 2. Зона взаимного пересечения (2) областей упругой разгрузки (1) для совокупности землетрясений.

ческих деформаций следует производить на основе выражения

$$S_{ij} = d\gamma \sum_{\alpha=1}^A (n_i^{\alpha} s_j^{\alpha} + n_j^{\alpha} s_i^{\alpha}) / 2, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где $d\gamma$ определяет среднюю для областей упругой разгрузки V^a величину максимальной упругой деформации сдвига, снимаемой после землетрясения. Величина $d\gamma$ характеризует способность к пластическому течению соответствующих горных массивов и предполагается близкой к постоянной для однородной выборки СКД. Первым критерием однородности выборки СКД и возможности расчета S_{ij} через выражение (7) является наличие взаимно пересекающейся зоны областей упругой разгрузки землетрясений, точкам которой и присваивается значение рассчитываемого тензора приращений сеймотектонических деформаций (рис. 2). Заметим, что (7) совпадает с точностью до нормировки с известным выражением для расчета среднего механизма по Юнга [7].

В работах [1, 2] показано, что использование принципа положительности диссипации на истинном тензоре напряжений (3) для каждого из сколовых разрывов однородной выборки СКД приводит к следующему ограничению на ориентацию скольжения вдоль поверхности скола для произвольно ориентированной плоскости разрыва:

$$n_1^{\alpha} s_1^{\alpha} \geq 0, \quad n_3^{\alpha} s_3^{\alpha} \leq 0. \quad (8)$$

Последние неравенства в силу подобия выражений (2) и (3) определяют также условие активного

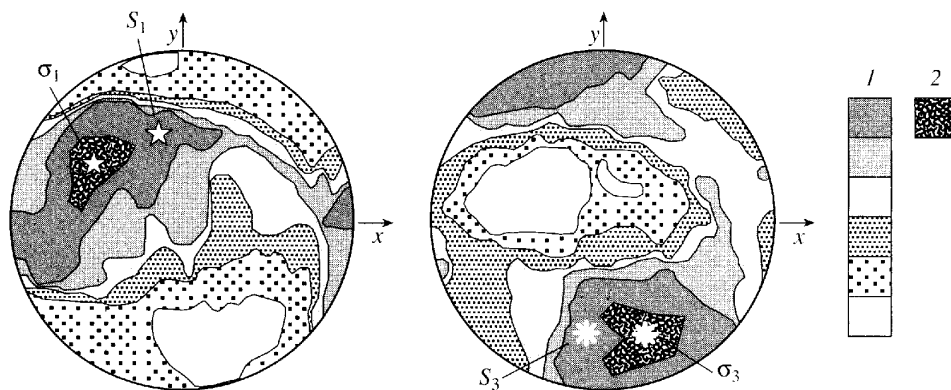


Рис. 3. Области допустимой ориентации приращений сейсмостектонических деформаций (1) и главных осей напряжений (2), выделяемые на сферах единичного радиуса на основе ограничивающих неравенств, для совокупности сколов из однородной выборки СКД и выходы главных осей соответствующих тензоров.

нагружения однородного домена в процессе квази-пластического деформирования. Неравенства (8), полученные, однако, с позиций дислокационной теории пластичности, являются основой для создания однородных выборок СКД в рамках реконструкции напряжений по методу "right dihedral" [8, 9] и "кинематическому методу" [10]. Таким образом, вопреки утверждениям, высказанным в работе [11], подтверждается их корректность с позиции выполнения положительности диссипации механической энергии.

Существование условия упорядоченности упругопластического течения (4) при его распространении на каждый микроакт пластического деформирования позволяет из (5) на основании (6) записать следующий критерий создания однородных выборок СКД:

$$n_1^\alpha s_1^\alpha \geq n_2^\alpha s_2^\alpha \geq n_3^\alpha s_3^\alpha. \quad (9)$$

При выполнении (9) в силу условия коллинеарности векторов $\mathbf{n}^\alpha$ и $\mathbf{s}^\alpha$ (8) следует автоматически. В пространстве напряжений рис. 1 действие неравенств (8) и (9) можно изобразить в виде секторов AA и CC соответственно, в пределах которых должны располагаться векторы $\mathbf{de}^\alpha$, отвечающие искомому тензору эффективных тектонических напряжений σ_{ij} . Таким образом, параметрическая область, в пределах которой выполняются неравенства (9), является областью допустимых решений для тензора искомого тектонических напряжений (рис. 3) и при построении этих областей на сфере единичного радиуса, подобно тому как это делается в методе "right dihedral", последние создают ограничения на спектр возможных ориентаций главных осей напряжений. Критерий существования области, удовлетворяющей ограничениям (9), для совокупности землетрясений является

вторым критерием при создании однородной выборки СКД.

Заметим далее, что для плоских трещин напряжения, снимаемые в области упругой разгрузки в результате сколового смещения, отвечают состоянию чистого сдвига, а вектор снимаемых напряжений $d\sigma_{ij}^{U\alpha}$ ($d\sigma_{ij}^{U\alpha} = -G_{ns}^\alpha de_{ij}^\alpha$, где G_{ns}^α — модуль сдвига в плоскости, образованной векторами $\mathbf{n}^\alpha$ и $\mathbf{s}^\alpha$) должен быть направлен внутрь поверхности нагружения (рис. 1)

$$d\sigma_{ij}^{U\alpha} de_{ij}^\alpha = -G_{ns}^\alpha de_{ij}^\alpha de_{ij}^\alpha \leq 0. \quad (10)$$

Будем полагать, что для устойчиво развивающегося процесса деформирования тензор приращений сейсмостектонических деформаций стремится быть подобным тензору полных пластических деформаций $de_{ij}^p = kS_{ij}$ ($de_i^p = 0$, $k = \text{const} > 0$). Тогда, используя выражения (6), на основании (10), записанного в главных осях тензора приращений сейсмостектонических деформаций, получим

$$n_i^\alpha s_i^\alpha S_i \geq 0. \quad (11)$$

Ограничение (11) для произвольного и наперед неизвестного значения коэффициента вида тензора приращений сейсмостектонических деформаций выполняется при выполнении неравенств типа (8). При этом в выражении (8) n_i^α и s_i^α будут представлять собой уже направляющие косинусы в системе главных осей тензора приращений сейсмостектонических деформаций. В пространстве напряжений рис. 1 действие этих неравенств можно изобразить в виде секторов BB, в пределах которых должны располагаться векторы $\mathbf{de}^\alpha$, отвечающие искомому тензору приращений сейсмостектонических деформаций S_{ij} . Таким образом, параметрическая область, в пределах которой

выполняются неравенства (8), является областью допустимых решений для тензора рассчитываемых приращений сейсмотектонических деформаций. Критерий существования области, удовлетворяющей ограничениям (8), для совокупности землетрясений является третьим критерием при создании однородной выборки СКД.

Таким образом, в рамках единого подхода, опирающегося на принципы "катакластического анализа", сформулированы критерии создания однородных выборок СКД для сколовых трещин, на основе которых возможен расчет как тензора приращений сейсмотектонических деформаций, так и определение областей возможных ориентаций главных осей искомого тензора тектонических напряжений. Нахождение истинных параметров напряжений в контексте предлагаемого метода следует выполнять на основании требования максимальной диссипации механической энергии [11]. Для этого на сфере единичного радиуса в областях допустимой согласно неравенствам (9) ориентации осей главных напряжений отыскивается такое их положение и определяется такое значение коэффициента Лодэ-Надаи, при которых для рассчитанного тензора приращений сейсмотектонических деформаций выполняется условие максимума Мизеса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребецкий Ю.Л. // ДАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 101–104.
2. Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Rasanova G.V., Fursova E.V. // J. Earthquake Prediction Res. 1997. V. 6. № 1. P. 11–36.
3. Ключников В.Д. Математическая теория пластичности. М.: Изд-во МГУ, 1979. 207 с.
4. Черных К.Ф. Введение в анизотропную упругость. М.: Наука. 1988. 190 с.
5. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.
6. Rebetsky Yu.L. // J. Earthquake Prediction Res. 1996. V. 5. № 4. P. 557–573.
7. Лукк А.А., Юнга С.Л. Геодинамика и напряженно-деформированное состояние литосферы Средней Азии. Душанбе: Дониш, 1988. 230 с.
8. Angelier J., Mechler P. // Bull. Soc. géol. France. 1977. V. 19. № 6. P. 1309–1318.
9. Mercier J., Carey E., Philip H., Sorel D. // Ibid. 1976. V. 18. № 2. P. 355–372.
10. Гуценко О.И., Кузнецов В.А. В сб.: Поля напряжений в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 60–66.
11. Мухамедиев Ш.А. // ДАН. 1993. Т. 331. № 4. С. 500–503.