

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТОСФЕРЫ КАВКАЗА НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д. Ж. Акматов*, В. Н. Татаринцов

Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

**E-mail: d.akmatov@gcras.ru*

В работе рассмотрены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния литосферы Большого Кавказа как сегмента Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. Моделирование выполнено в среде COMSOL Multiphysics методом конечных элементов в квазистатической трехмерной постановке. Земная кора описана как упругопластическая среда, а верхняя мантия – как вязкоупругая среда типа Максвелла. Геометрия модели включает коровую часть мощности до 60 км и подстилающий мантийный слой до глубины 150 км. Граничные условия задавались с учетом регионального режима сжатия $SH_{\max} > Sh_{\min} > Sv$. Ключевое значение имеет преобразование боковых смещений в вертикальные (поперечное сплющивание или сдвиг по Л. М. Расцветаеву). Для верификации и интерпретации результатов привлекались опубликованные в сейсмических каталогах данные о современных движениях земной коры и распределении высвобожденной сейсмической энергии.

Результаты моделирования показали, что поле напряжений земной коры в пределах Большого Кавказа определяется откликом перемещений жестких структурных блоков, разделенных ослабленными разломными зонами и анизотропией реологических свойств по глубине. Максимальные вертикальные перемещения и повышенные значения интенсивности напряжений локализованы в осевой части орогена и вблизи крупных тектонических структур. Анализ параметров тенденции к сдвигу и коэффициента Лоде–Надаи показал, что крупнейшие разломы находятся преимущественно в режиме сжатия и надвигообразования, тогда как отдельные сегменты разломной сети обладают выраженной предрасположенностью к сдвиговой реактивации. Это подтверждает сложный, пространственно неоднородный характер современного напряженно-деформированного состояния литосферы региона.

Наиболее важным результатом является выявление метастабильных зон концентрации механической энергии в пределах сейсмогенерирующего слоя. Эти зоны характеризуются повышенными девиаторными напряжениями, накоплением упругой энергии и качественно совпадают с областями максимальной плотности высвобождения сейсмической энергии, рассчитанной по каталогам землетрясений. Тем самым показано, что Большой Кавказ представляет собой метастабильную геомеханическую систему, в которой накопленная энергия может трансформироваться как в вертикальное поднятие орогена, так и в энергию разрушения в виде землетрясений. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшей оценки сейсмической опасности региона, а также для последующей интеграции численного моделирования с данными ГНСС наблюдений и другими геодезическими измерениями.

ANALYSIS OF THE STRESS–STRAIN STATE OF THE CAUCASUS LITHOSPHERE BASED ON THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELING

D. Z. Akmatov*, V. N. Tatarinov

Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: d.akmatov@gcras.ru*

The paper presents the results of numerical modeling of the stress–strain state of the Greater Caucasus lithosphere as a segment of the Alpine–Himalayan collisional belt. The modeling was carried out in COMSOL Multiphysics using the finite element method in a quasi-static three-dimensional formulation. The Earth’s crust was represented as an elastoplastic medium, whereas the upper mantle was described as a Maxwell-type viscoelastic medium. The model geometry includes a crustal layer up to 60 km thick and an underlying mantle layer extending to a depth of 150 km. Boundary conditions were specified with regard to the regional compressional regime, $SH_{\max} > Sh_{\min} > Sv$. Of key importance is the transformation of lateral displacements into vertical ones (transverse shortening, or «sodvig» in the sense of L. M. Rastsvetaev). For verification and interpretation of the results, published data on present-day crustal movements, seismic catalogs, and the distribution of released seismic energy were used.

The modeling results showed that the stress field of the crust within the Greater Caucasus is controlled by the displacement response of rigid structural blocks separated by weakened fault zones and by the anisotropy of rheological properties with depth. Maximum vertical displacements and elevated stress intensity values are localized in the axial part of the orogen and near major tectonic structures. Analysis of slip tendency and the Lode–Nadai coefficient demonstrated that the largest faults predominantly operate under compression and thrust-related deformation, whereas certain segments of the fault network exhibit a pronounced tendency toward strike-slip reactivation. This confirms the complex and spatially heterogeneous character of the present-day stress–strain state of the region’s lithosphere.

The most important result is the identification of metastable zones of mechanical energy concentration within the seismogenic layer. These zones are characterized by elevated deviatoric stresses and elastic energy accumulation, and they qualitatively coincide with areas of maximum seismic energy release density calculated from earthquake catalogs. Thus, the Greater Caucasus is shown to represent a metastable geomechanical system in which the accumulated energy may be transformed both into vertical uplift of the orogen and into fracture energy released in the form of earthquakes. The obtained results may be used for further assessment of the seismic hazard of the region, as well as for the subsequent integration of numerical modeling with GNSS observations and other geodetic measurements.