

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ

Жантаев Ж.Ш.¹, Бреусов Н.Г.¹, Бибосинов А.Ж.², Виляев А.В.²

АО "Национальный центр космических исследований и технологий"¹
ДТОО «Институт ионосферы»², Республика Казахстан, Алматы, breusov_47@mail.ru

Введение

К факторам динамического проявления НДС относятся современные движения земной поверхности фиксируемые мониторинговыми GPS-наблюдениями. В регионе Северного Тянь-Шаня исследования современных движений земной коры на основе GPS-технологий ведутся с 1992г.

Вблизи г. Алматы создана и функционирует локальная сеть непрерывных GPS-наблюдений, состоящая из 10 станций. С учетом наблюдений на станциях глобальной и локальной сетей определены особенности напряженно-деформированного состояния отдельных блоков земной коры.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) земной коры складывается под воздействием различных факторов статического и динамического характера, в ряду которых особенности распределения вещества по латерали и вертикали, наличие зон разломной трещиноватости, современные движения земной поверхности, тепловой поток, сейсмичность. Оценка НДС позволяет выявить вероятные места проявления сильной сейсмичности, а также определить степень сейсмической опасности территории.

Физико-математическая модель

Общая постановка задачи определения напряженно-деформированного состояния горных пород выглядит следующим образом. При данных граничных условий (поле перемещений или поле вектора скорости на поверхности) и данном начальном приближении (НДС от нетронутого горного массива) следует определить компоненты тензоров напряжений и деформации в каждой точке исследуемой территории (6 компонент тензора напряжений, 6 компонент тензора деформации, 3 компоненты вектора перемещений). Связь между напряжениями и деформациями принимается линейной, т.е. соответствующей закону Гука. Условием применимости этих соотношений является выполнение гипотезы о сплошности среды, которая состоит в непрерывности напряжений и перемещений, как функций координат точки [14,15].

При относительно малых деформациях тензор деформации выражается через вектор перемещений называемые уравнениями Коши. Движение элемента массива горных пород определяется приложенными к нему силами, подсчитав которые получим дифференциальные уравнения движения [11,12,14,15]. Эти соотношения подробно изучены в курсах теории упругости [5] и пластичности, и широко используются в механике горных пород.

3D геомеханическая модель на примере Северного Тянь-Шаня

Модель земной коры Северо-Тянь-Шанского региона создана для области 42.5°N –43.7°N и 76.0°E –78.5°E. Размеры модели составляют 202.5km×127.5km×80km.

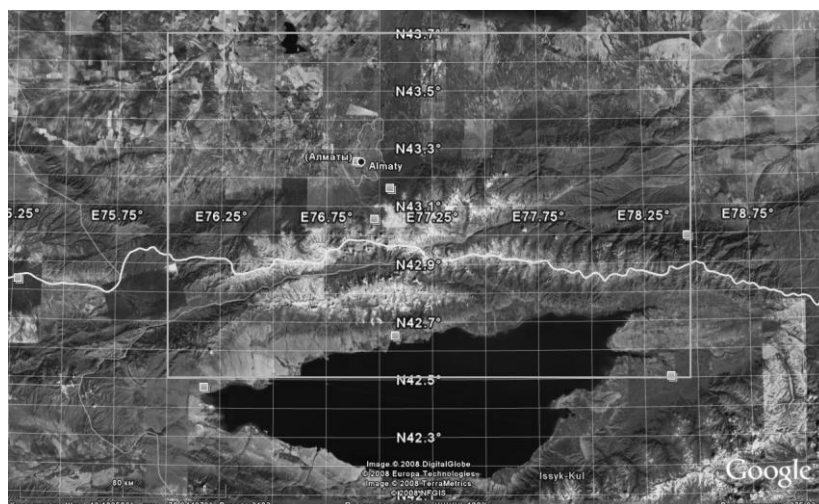


Рис.1 – Карта Северо-Тянь-Шаньского региона

Исходная база данных привязана к географическим координатам и глубине, включает следующие параметры исследуемого региона:

- рельеф поверхности (единица измерения в метрах);
- компоненты скорости движения поверхности земли (Запад-Восток, Юг-Север, Вертикальная компонента);
- абсолютная величина скорости (метры в год);
- дивергенция скорости (1/сек);
- осредненные геомеханические параметры.
- коэффициент поврежденности (нарушенности) с учетом разломно-блокового строения;
- коэффициент поврежденности с учетом сейсмичности.

Модель содержит горный рельеф по данным радарной интерферометрической съемки SRTM с размером элементарной площадки 90х90 м (<http://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/>), а также характерные внутренние границы – кровлю консолидированной коры и поверхность Мохоровичича.

С учетом внутренней структуры коры и тепловых свойств образующих пород, в модель введена верхняя граница астеносферы. Ведение слоя, моделирующего астеносферу, позволяет вложить в расчетную модель вязкость и выступает граничным условием для получения поля температур. Распределение температур принято в предположении постоянного кондуктивного теплового потока на нижней границе. Радиогенное тепловыделение не учитывалось. Астеносфера моделируется вязкоупругой средой Максвелла.

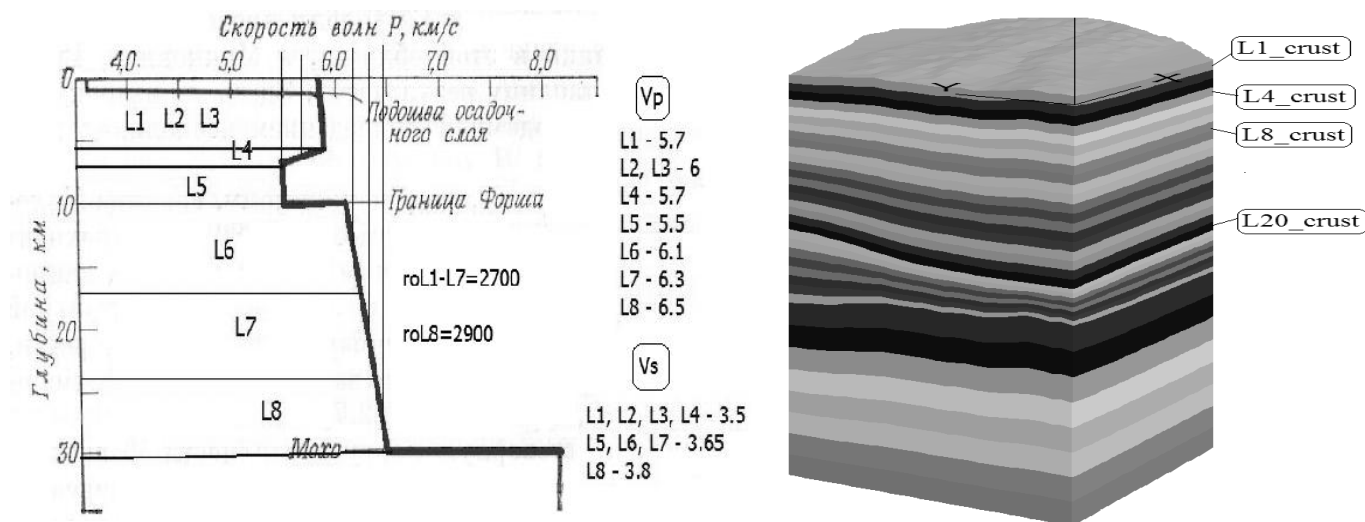


Рис. 2. Модель распределения скорости продольных волн в коре с волноводом в ее верхней части и схема расположения расчетных слоев параметров НДС (справа).

Механические свойства земной коры выбраны с известным типичным распределением скоростей продольных волн с глубиной с волноводом в верхней части коры [9,10]: кора – плотность $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, модуль сдвига $G = 1.218 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ и объемный модуль $K = 2.028 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, сцепление $c = 2 \cdot 10^7 \text{ Па}$, максимальный угол трения $\phi = 26^\circ$ и прочность на растяжение $\sigma = 1 \cdot 10^7 \text{ Па}$; литосфера – плотность $\rho = 3200 \text{ кг/м}^3$, модуль сдвига $G = 2.538 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ и объемный модуль $K = 2.1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, сцепление $c = 2 \cdot 10^7 \text{ Па}$, максимальный угол трения $\phi = 30^\circ$ и прочность на растяжение $\sigma = 1 \cdot 10^7 \text{ Па}$; астеносфера – плотность $\rho = 3200 \text{ кг/м}^3$, модуль сдвига $G = 2.16 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ и объемный модуль $K = 2.1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, вязкость $\eta = 1.5 \cdot 10^{21} \text{ Па} \cdot \text{сек}$

Разломноблоковое строение земной коры аппроксимировалось моделью сплошной среды с распределенной непрерывной неоднородностью, как в функция распределения нормированной плотности разрывных нарушений для каждого узла сетки в данной области [2,3,16]. Предполагалось, что разломы прослеживаются в верхней и средней части коры и исчезают в нижней при приближении к границе Мохо. Определенную сложность представляет способ учета воздействия сейсмичности на параметры НДС среды. Результатом сейсмического события, происшедшего в земной коре, является образование дополнительных нарушений ее целостности, тем самым увеличивая общую нарушенность (трещиноватость) среды. Проявление сейсмичности учитывалось в виде нарушения

сферической формы, с радиусом, связанным с энергией (классом) землетрясения. Количественная характеристика нарушения отождествляется с энергетическим классом землетрясения, нормируется и приводится к функции поврежденности от координат и глубин, и имеет значения от 0 до 1.

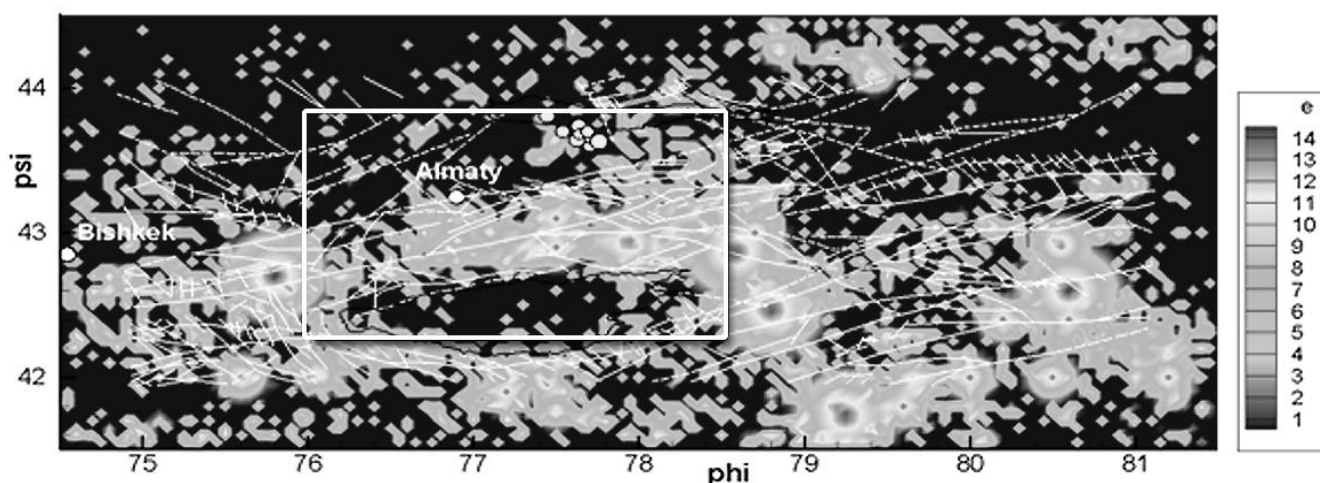


Рис.3 Распределение эпицентров землетрясений на территории Северного Тянь-Шаня.

В расчете НДС учтены основные факторы - это некомпенсированный вес горного рельефа, горизонтальные и вертикальные тектонические движения, вариации плотности, неравномерный нагрев [1,2,3,16].

Этапы расчета

- 1) Сначала рассчитывается начальное напряженное состояние модели под действием сил собственного веса, вызванные гравитацией. Силы собственного веса вносят основной вклад в распределение некоторых значимых величин, например таких, как среднее напряжение в точке. Остальные виды нагрузки лишь дополняют его, существенно не меня характер распределения.
- 2) Рассчитываются напряжения в коре с учетом распределения температуры. Так как свойства твердой среды в значительной степени определяются температурой, на втором этапе учитываются напряжения, вызванные температурным расширением. Учет температурных напряжений существенно не меняет распределение основных параметров напряженного состояния, однако изменяет напряжения в сторону их увеличения.
- 3) Выполняется нагрузка горизонтальными тектоническими усилиями, порождаемыми движениями тектонических плит. Для этого используются данные наблюдений на сети GPS станций в Северо-Тянь-Шанском регионе (рис. 4) [4,6,7,8].

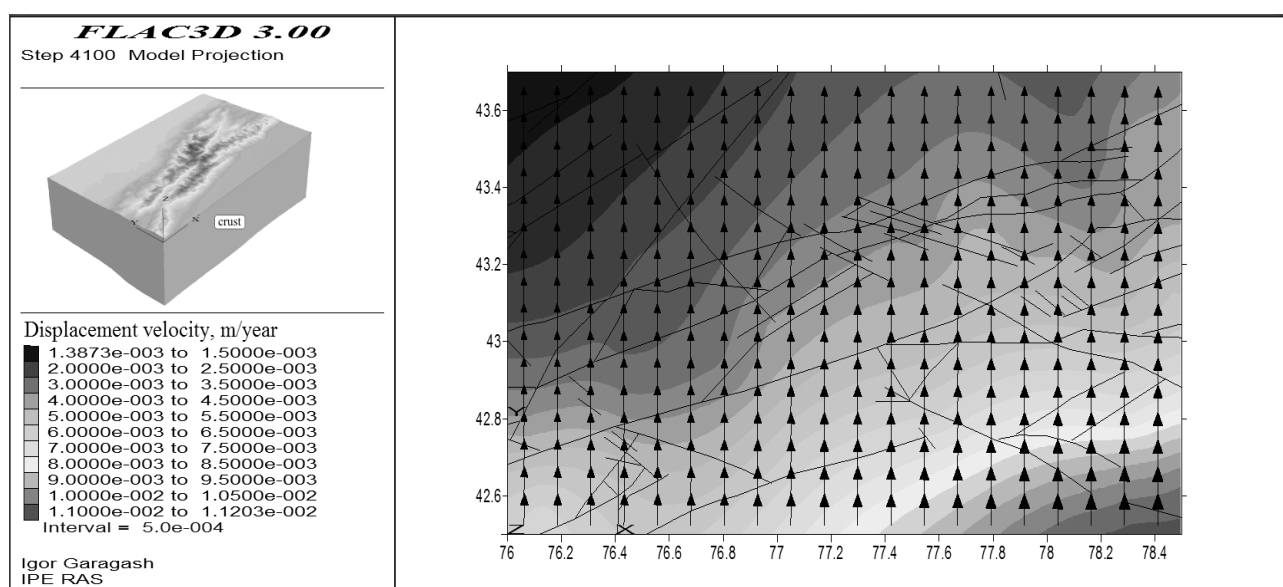


Рис. 4. Скорости горизонтальных движений земной поверхности и их распределение, принятое для расчетов.

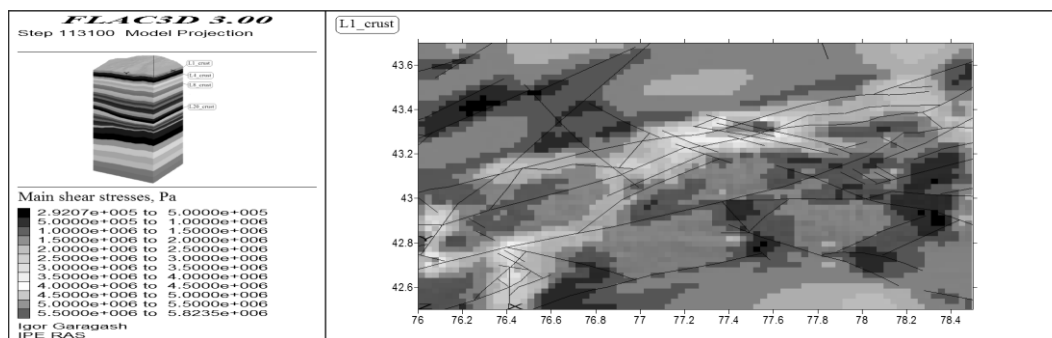


Рис. 5. Распределение вариаций максимальных касательных напряжений в Па от собственного веса и температуры с учетом ползучести в астеносфере в слое L1_crust

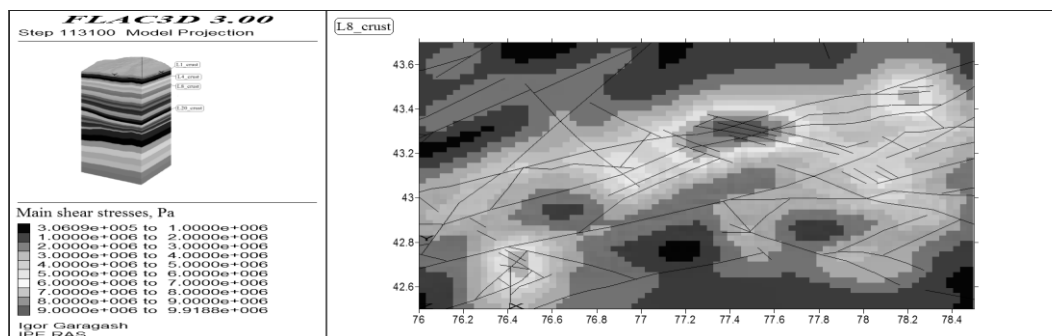


Рис. 6. Распределение вариаций максимальных касательных напряжений в Па от собственного веса и температуры с учетом ползучести в астеносфере в слое L8_crust

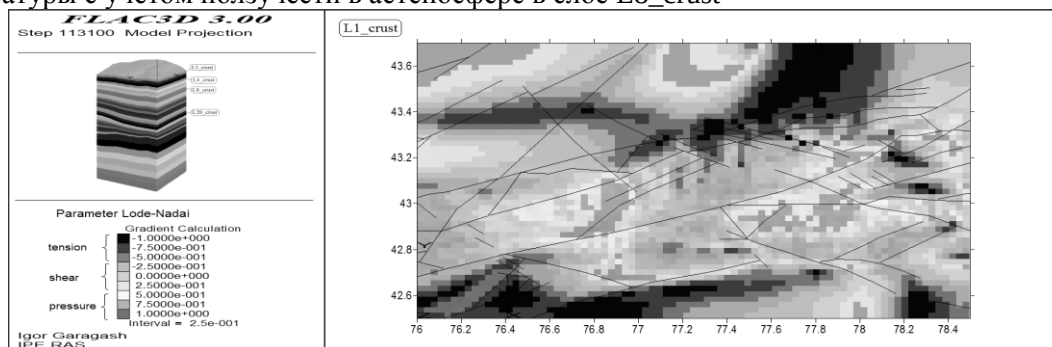


Рис. 7. Распределение параметра Лоде-Надаи для напряженного состояния от собственного веса и температуры с учетом ползучести в астеносфере в слое L1_crust

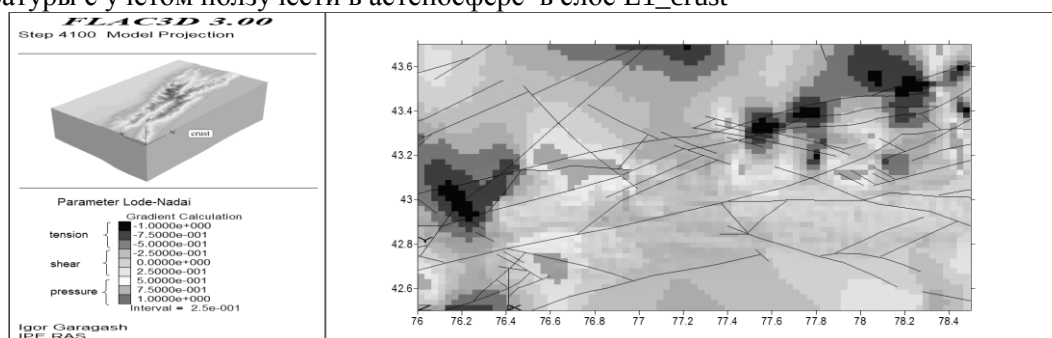


Рис. 8. Распределение параметра Лоде-Надаи для напряженного состояния от горизонтальных движений земной коры по данным GPS в слое L1_crust

Приняв за первое приближение напряженно-деформированное состояние от собственного веса в программном комплексе FLAG3D [13] проведен расчет параметров НДС с учетом сейсмичности (как распределение параметра поврежденности). Учет горизонтальной составляющей современных движений земной коры меняет картину распределения основных параметров напряженно-деформированного состояния Северо-Тяньшаньского региона.

Заключение

Интересным представляется слой земной коры, ограниченный глубинами от 10 до 15 км, т.к. в Северном Тянь-Шане локализация гипоцентров сильных землетрясений приурочена именно к этому

слою. Как видно из рис. 5,6 распределение интенсивности касательных напряжений пропорционально потенциальной энергии среды за счет деформаций происходящих в ней, и совпадает в пространстве с расположением очагов землетрясений, что говорит о корректности расчетов.

Зоны с максимальными значениями касательных напряжений тяготеют к хребтам Заилийский и Кунгей Алату, где также наблюдается концентрация эпицентров сильных землетрясений с $K=12-18$. Практически асейсмичной является Илийская и Иссык-Кульская впадины.

Более детальные результаты можно получить по мере заполнения базы геомеханических параметров новыми данными. Указанные методы и модели среды допускают неограниченное развитие в зависимости от новых данных, и являются отображением представлений о регионе и основой для дальнейшего геодинамического анализа.

Работа выполняется по теме НИР «Методы оценки геомеханического состояния земной коры кризисных территорий с использованием математического моделирования и спутниковых технологий» по программе О.0577 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности».

Список литературы

1. Гарагаш Н.А., Жантаев Ж.Ш., Агжигитов Б.Ч., Аубакиров М.Ш. Количественная оценка влияния горного рельефа на сейсмическую опасность Средней Азии. //Тезисы докладов Всесоюзной школы-семинар «Геолого-геодинамические исследования в сейсмоопасных зонах СССР». Фрунзе, «Илим».–1989.–35 с.
2. Гарагаш И.А., Жантаев Ж.Ш. Влияние горного рельефа на распределение приливных напряжений в земной коре Северного Тянь-Шаня и связь с сейсмичностью. // Международный симпозиум ""Геодезия, сейсмология и прогноз"", Ереван.–1989.–С.41-45.
3. Гарагаш И.А., Жантаев Ж.Ш., Дубовская А.В. Трехмерная геомеханическая модель земной коры Северо-Тянь-Шанского региона. //Институт физики Земли РАН, г. Москва.–1989.–С.23-31.
4. Зубович А., Бейсенбаев Р., Ван Сяочан, Джан Юнфен, Кузиков С., Мосиенко О., Нусипов Е., Щелочков Г., Щерба Ю. О некоторых результатах анализа кинематики Тянь-Шаня и окружающих районов по данным GPS наблюдений / Министерство образования и науки Республики Казахстан, Институт сейсмологии, Международный научно-исследовательский центр - геодинамический полигон. Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска. //Доклады Казахстанско-Российской международной конференции, посвященной году России в Казахстане 22-24 июня 2004 года. Алматы.–2005.–С.34-40.
5. Лурье А.И. Теория упругости//М.–1970. –939с.
6. Макаров В.И., Абдрахматов К.Е., Айтматов И.Т. и др. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) //М.: «Научный мир».–2005.–400 с.
7. Миди Б.Дж., Хагер Б.Х. Современное распределение деформации в Западном Тянь-Шане по блоковым моделям, основанным на геодезических данных // Геология и геофизика.– 2001.– Т. 42, № 10.–С. 1622-1633.
8. Тимуш А.И. Сейсмоструктура литосферы Казахстана. //Luxe Media Group, Алматы.– 2011.– 590 с.
9. Шапилов В.И., Горбунов П.Н. Упруго-прочностные характеристики земной коры Тянь-Шаня //Прогноз землетрясений и глубинная геодинамика. Алматы.–1997. –С.359-374.
10. Шапилов В.И., Сайипбекова А.М. Профильная томография литосферы Тянь-Шаня по материалам региональной сейсмологии //Докл. НАН РК.–1994, №6.–С.47-52.
11. Alik Ismail-Zadeh, Paul J. Tackley. Computational Methods for Geodynamics // Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK. – 2010. – 349 p.
12. Anandarajah A. Computational Methods in Elasticity and Plasticity // Springer Science+Business Media, LLC – 2010. – 659 p.
13. FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, ver.3.1, ITASCA, Minneapolis, MN 55401 USA, 2006
14. Jaeger J. C., Cook N. G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of Rock Mechanics, Fourth Edition, - Blackwell Publishing. – 2007. – 489 p.
15. William Lowrie. Fundamentals of Geophysics, Second Edition, - Published in the United States of America by // Cambridge University Press, New York. – 2007. –393 p.
16. Zhantaev Z.S., Namvar R.A-A. Facilities of Space Geodesy for Estimations of Lithosphere Geodynamic Conditions at the Territory of Kazakhstan. // First International specialized Symposium space and global security of Humanity. Cyprus. –2009. –P. 41-42.