

**NEWS**

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

Volume 6, Number 304 (2015), 34 – 39

**CALCULATION THE STRESS-STRAIN STATE PARAMETERS  
OF THE EARTH'S CRUST ON THE KAZAKHSTAN TERRITORY  
USING SATELLITE GPS-DATA**

**Zh. Zhantayev, A. Bibossinov, B. Torybayev**

LPP "Institute of Ionosphere", JSC "NCSRT", Almaty, Kazakhstan.  
E-mail: baljigit2011@gmail.com

**Keywords:** GPS-station, displacement vector, strain tensor, stress tensor, the stress-strain state, Earth's surface displacement, modeling.

**Abstract.** Processes occurring in the Earth's crust are accompanying by a change in its state of stress. The relevance of studying of the Earth's crust stress state to solve various geological problems is evident. The necessity for the setting of such studies within Central Asia and Kazakhstan territory is driven by the revision of the basic concepts of the region evolution. First of all, this is a new understanding of the geodynamics, seismicity and Earth's crust structure, the conditions of formation and distribution of minerals. All marked processes are interrelated somehow and embodied in stress fields. The result of the stress state is a manifestation of the dynamics of interior. Therefore, if we go from the reverse, i.e. explore geodynamics, and then based on it investigate the stress-strain state (SSS), the knowledge of this processes is leading to the understanding of SSS genesis. Initial data for the construction of SSS maps covering the territory of Kazakhstan is GPS-station's data of the Central Asian Region (CAR).

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА  
ПО СПУТНИКОВЫМ GPS-ДАННЫМ**

**Ж. Ш. Жантаев, А. Ж. Бибосинов, Б. С. Торыбаев**

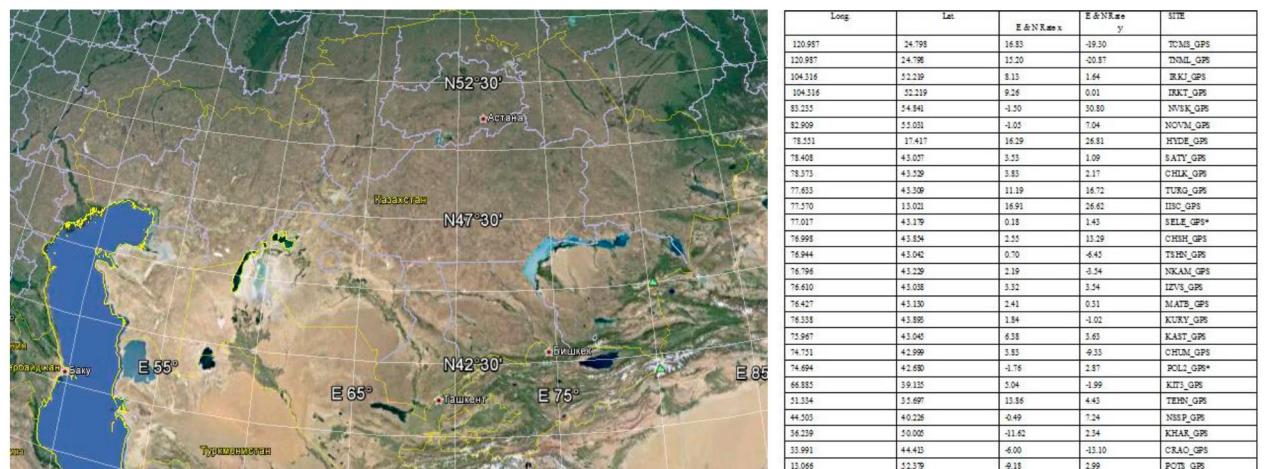
ДТОО «Институт ионосферы» АО «Национальный центр космических исследований и технологий»,  
Алматы, Казахстан

**Ключевые слова:** GPS-станций, вектора смещений, тензора деформации, тензор напряжений, напряженно-деформированное состояние, смещения земной поверхности, моделирование.

**Аннотация.** Процессы, происходящие в земной коре, сопровождаются изменением ее напряженного состояния. Актуальность изучения напряженно-деформированного состояния земной коры для решения различных геологических задач очевидна. Необходимость постановки таких исследований в пределах Центральной Азии и, в частности, по территории Казахстана, диктуется пересмотром основополагающих концепций развития указанного региона. Прежде всего, это новые представления о геодинамике, сейсмичности, структуре земной коры, условиях формирования и размещения полезных ископаемых. Все отмеченные процессы, будучи взаимосвязанными, так или иначе, находят отражение в полях напряжений. Результатом напряженного состояния являются проявления динамики недр. Поэтому, если идти от обратного, т.е. исследовать геодинамику, а потом на ее основе - напряженно-деформированного состояния (НДС), то можно подойти к исследованию процессов, приводящих к возникновению НДС. Исходными данными для построения карт НДС, охватывающие территорию Казахстана, служили GPS-станций Центрально-Азиатского региона (ЦАР).

**Введение.** В основе представлений о природном напряжённо-деформированном состоянии недр Земли лежат гравитационная теория и тектонические процессы, изменяющие данное исходное состояние. Дрейф континентов, погружение фронтальных частей плит литосферы в верхнюю мантию, вертикальные движения земной коры являются главным механизмом изменения природного напряжённого состояния недр и отражают эволюцию этого природного феномена [1-3]. Тектонические движения представляют единую динамическую систему перемещающихся объёмов горных пород, в которой геомеханические процессы зависят от масштаба вовлечённых объёмов земной коры и фактора времени. Они сопровождаются сжатием или растяжением массива горных пород и определяют сейсмичность и деформирование недр. Фундаментальные работы в области геологии и геомеханики показали, что существует не только рост напряжений с глубиной, но и наблюдается повышенная концентрация их в окрестности неоднородностей различной природы: разрывов, блоков, включений, узлов складчатости и т.п. Крупные геологические нарушения происходят либо путём сдвига, либо путём отрыва и представляют собой зоны со сложным строением. Внутри разлома горные породы раздроблены, обладают повышенной трещиноватостью и пониженной прочностью, ведут себя как вязкая среда. Нестационарные процессы в зонах тектонических разломов в настоящее время малоизучены. Вместе с тем они имеют важное значение при прогнозировании разрушения породных массивов, для расчёта движения массивов блочной структуры, формирования природного поля напряжений и контроля сейсмической активности геологической среды [4-14].

**Исходные данные.** Исходными данными для разработки карт НДС служили данные от GPS-измерений.



а

б

Рисунок 1 – а) исследуемый регион–область ( $40^{\circ}\text{N}$ - $55^{\circ}\text{N}$ ) С.Ш., ( $46^{\circ}\text{E}$ - $88^{\circ}\text{E}$ ) В.Д., охватывающий всю территорию Казахстана; б) итоговая таблица скоростей относительно Евразийского континента за 2014 г.

Итоговая таблица скоростей служит для построения карт смещений, в дальнейшем мы используем для определения НДС.

### М е т о д ы

**Определение тензора деформации от вектора смещений.** Вектор перемещения

$$u(P) = P - P^*, \text{ здесь } \vec{u} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

здесь  $u(P)$  – смещение парод.

После определения компонентов деформации, в трёхмерном пространстве, мы определяем компоненты трёхмерного тензора деформации  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Как и в двумерном случае, матрица деформации равна симметричной части градиента смещений  $\nabla u$ , компоненты которого являются частными производными смещений относительно трёх координат, то есть [17],

$$\varepsilon = \text{sym}(\nabla u) \equiv \frac{1}{2}[\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (2.5)$$

$$\nabla u = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Физический смысл в том, что диагональные компоненты  $\varepsilon_{ii}$  описывают удлинение или сжатие, остальные шесть  $\varepsilon_{ij}$  компоненты деформации сдвига описывают вращение тела как целого [20].

**Определение тензора напряжения от тензора деформации.** В изотропной среде взаимосвязь между вертикальным напряжением и вертикальной деформацией является таким же, как между горизонтальным напряжением и горизонтальной деформацией и т.д. Важным следствием свойств изотропии в том, что главные оси деформации должны совпадать с главными осями напряжения.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\lambda + 2G)\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{yy} + \lambda\varepsilon_{zz} & 2G\varepsilon_{xy} & 2G\varepsilon_{xz} \\ 2G\varepsilon_{yx} & \lambda\varepsilon_{xx} + (\lambda + 2G)\varepsilon_{yy} + \lambda\varepsilon_{zz} & 2G\varepsilon_{yz} \\ 2G\varepsilon_{zx} & 2G\varepsilon_{zy} & \lambda\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{yy} + (\lambda + 2G)\varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

значение упругих параметров изотропного материала  $E$ ,  $K$ , и  $\nu$  в терминах  $\lambda$  и  $G$  определяется следующим образом:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} G = \frac{E}{2(1+\nu)}, K = \frac{E}{3(1-2\nu)}; \quad (2.8)$$

здесь  $\lambda$  – параметр Ламе,  $E$  – модуль упругости (Юнга);  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $K$  – модуль объемного расширения, модуль сдвига  $G$  – коэффициент пропорциональности между касательными напряжениями и напряжениями сдвига (МПа) [15].

*Физический смысл* в том, что одинаковой особенностью тензоров напряжений и деформаций является то, что они зависят не только от самого тела, но и от воздействия на него. Тензор напряжений характеризует силу, действующую на тело от собственного веса породы [18].

**Определение главных напряжений от тензора деформации и напряжений.** Для нормальных и касательных напряжений, действующих на плоскости, единичный вектор внешней нормали вращается против часовой стрелки от оси  $x$  на угол  $\theta$ :

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + \frac{1}{2}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})\cos 2\theta + \sigma_{xy}\sin 2\theta \quad (2.9)$$

для нормального напряжения, описанного в (2.9), можно взять

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \pm \left[ \sigma_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 \right]^{-1/2}. \quad (2.10)$$

Уравнение (2.10) определяет два нормальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , которые, как известно, как главных нормальных напряжений, или просто главные напряжения. Если принять  $\sigma_1 \geq \sigma_2$ , то тогда знак (+) в (2.10) связано с  $\sigma_1$ , то есть,

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + \left[ \sigma_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - \left[ \sigma_{xy}^2 + \frac{1}{4}(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

здесь,  $\sigma_1$  – максимальное напряжение,  $\sigma_2$  – минимальное напряжение.

Эти два главные нормальные напряжения не только различно действует на точках, на которых нет сдвига, но и также максимальные и минимальные напряжения, которые действует на любых плоскостях [16].

*Физический смысл: нормальное напряжение* – появляется, когда точки стремятся отдалиться (растяжения) друг от друга либо, напротив, сблизиться (сжатия); *касательные напряжения* – связаны со сдвигом частиц породы по плоскости рассматриваемого сечения [19].

**Известные входные механические параметры для определения НДС по территории Казахстан.** Радиус земли –  $R_E = 6\ 371\ 302$  м, гравитационный параметр –  $g = 9.82\ m/c^2$ , плотность породы –  $\rho_{cp} = 2775\ kg/m^3$ , коэффициент Пуассона (характеризующем упругие свойства породы) –  $\nu_{cp} = 0.26$ , модуль объемной упругости- $K = 69.1 \cdot 10^9$  Па, от синего цвета к красному – возрастающий. Синий цвет – оседания, зеленый цвет – стабильные участки, красный цвет – поднятия.

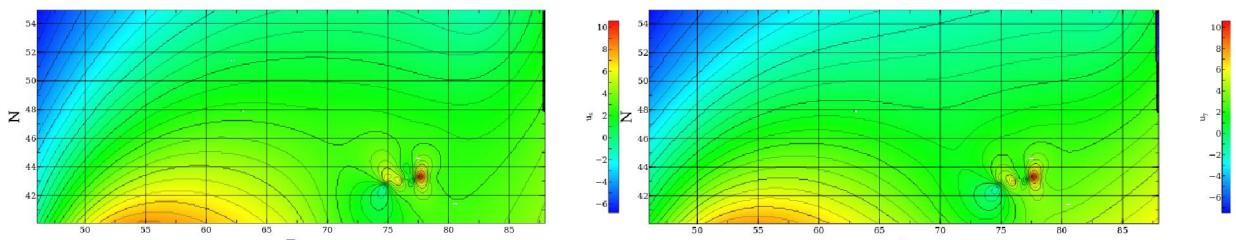


Рисунок 2 – Распределение смещений земной поверхности территории Казахстан по спутниковым данным за 2011-2014 гг.

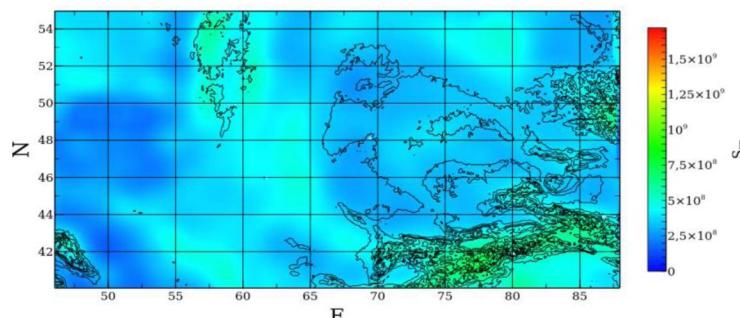


Рисунок 3 – Распределение параметров напряженно-деформированного состояния земной коры от собственного веса по территории Казахстан, Па

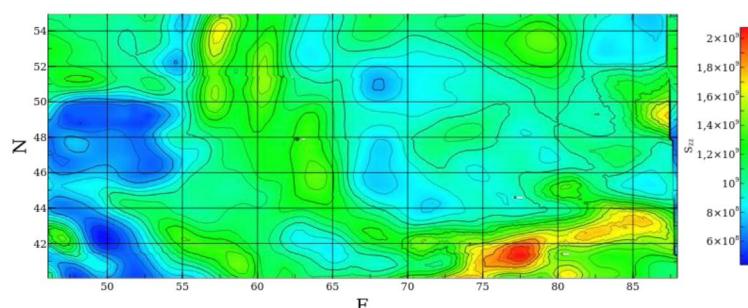


Рисунок 4 – Распределение параметров потенциальной энергии поверхности от собственного веса по территории Казахстана, Дж

**Выводы.** Получены трехмерные распределения параметров напряженно-деформированного состояния(НДС) различных масштабов, в зависимости от рельефа, геомеханических свойств парод, геодинамических процессов. Разработана методика и программное обеспечение для компьютерного моделирования геодинамических процессов, происходящих в земной коре, на основе данных геодезического мониторинга с применением современных ГИС-технологий, позволяющее выявлять и оценивать сейсмически активные зоны путем построения карт районирования по данным геомеханического моделирования.

**Научная новизна работы** заключается в комплексном использовании GPS-данных для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) земной коры сейсмически опасных районов по территории Казахстана и разработке программно-математического обеспечения выявления критических зон геодинамически активных территорий, которое позволило оценить сейсмичность земной коры по ее геомеханическим условиям.

Результаты работы непосредственно используется для введения геодинамического мониторинга, определения напряженно-деформированного состояния (НДС) земной коры территории Казахстана.

*Работа выполнена по программе 101 «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках темы «Создание геоинформационной системы на базе спутниковых технологий по исследованию земной коры территории Казахстана» (Грант 0076/ГФ4, Регистрационный номер (РН) 0115РК00396).*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сила тяжести и тектоника./Под ред. К.А. Де Джонга и Р. Шолтена. – М.: Мир, 1976.- 504 с.
- [2] Косягин Ю.А. Тектоника. – М.: Недра, 1983. - 536 с.
- [3] Арtyушков Е.В. Физическая тектоника. – М.: Наука, 1993. - 454 с.
- [4] Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках. – М.: Недра, 1994. – 207 с.
- [5] Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
- [6] Булат А.Ф., Хохолев В.К. Геофизический контроль массива при отработке угольных пластов. – Киев: Наукова думка, 1990. – 168 с.
- [7] Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. – Екатеринбург: УрОРАН, 2001. – 335 с.
- [8] Марков Г.А., Савченко С.Н. Напряжённое состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа. – Ленинград: Наука, 1984. – 138 с.
- [9] Курленя М.В. Результаты экспериментальных исследований напряжённого состояния угольных массивов Кузбасса // Напряжённое состояние земной коры. – М.: Наука, 1973. С. 128-134.
- [10] Курленя М.В., Ерёменко А.А., Шрепп Б.В. Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. - Новосибирск: Наука, 2001. – 184 с.
- [11] Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. – Апатиты: АН СССР, 1982. – 146 с.
- [12] Управление горным давлением в тектонически напряжённых массивах. – Апатиты: Изд-во КНИЦ РАН, 1996. Части: I – 159 с., II – 162 с.
- [13] Hast N. The Measurement of Rock Pressure in Mines. – Sveriges Geologiske Uhdersokning, Serie C. Arsbok, 1958. – 52. - №3. - Р. 183.
- [14] Мюллер Л.Инженерная геология, механика скальных массивов. М.:Мир, 1971.–256 с
- [15] Jaeger J. C., Cook N. G.W. Zimmerman R. W. Fundamentals of Rock Mechanics. – 4th ed. – Blackwell Publishing, 2007. –P.360.
- [16] Ставрогин А.Н., Протесеня А.Н. Пластичность горных парод. М.: Недра, 1979. -300 с.
- [17] Аменадзе Ю.А. Теория упругости. М.: Высшая школа, 1976.-272 с.
- [18] [http://dssp.petrusu.ru/p/tutorial/flt/Part4/part4\\_1.htm](http://dssp.petrusu.ru/p/tutorial/flt/Part4/part4_1.htm)
- [19] <http://referatman.ru/downloadjob.html>
- [20] <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1164708&uri=lect1-1.html>

## REFERENCES

- [1] The gravity and tectonics. Ed. K.A. De Dejonga and Robert Scholten.M: Mir, 1976.504 p.
- [2] Kosygin Y.A. Tectonics. M.: Nedra, 1983.536 p. (in Russ.).
- [3] Artyushkov E. V. Physical tectonics. M: Nauka, 1993. 454 p. (in Russ.).
- [4] Vlokh N.P. Management of rock pressure in underground mines.-M.: Nedra, 1994.-207 p.(in Russ.).
- [5] Petukhov I.M., Linkov A.M. The mechanics of rock bursts and releases. M: Nedra, 1983.280 p. (in Russ.).
- [6] Bulat A.F., Chocholyov V.K. Geophysical control array when mining coal seams. Kiev: Naukova Dumka, 1990.168 p. (in Russ.).
- [7] Zubkov. Geomechanics and geotechnology. Yekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 2001. 335 p. (in Russ.).

- [8] Markov G.A., Savchenko S.N. Stress state of rocks and rock pressure in the structures of the mountainous terrain. Leningrad: Nauka, 1984. 138 p. (in Russ.).
- [9] Kurnenya M.V. The results of experimental studies of the stress state of Kuzbass coal arrays. Stress state of the Earth's crust. M.: Science, 1973, pp. 128-134. (in Russ.).
- [10] Kurnenya M.V., Eremenko A.A., Shrepp B.V. Geomechanical problems of development of iron ore deposits in Siberia. Novosibirsk: Nauka, 2001. 184 p. (in Russ.).
- [11] The nature and the methodology for determining the tectonic stress in the upper crust. - Apatity: USSR Academy of Sciences, 1982. 146 p. (in Russ.).
- [12] Management of mountain pressure in tectonically intense arrays. Apatity of KSC, 1996. Part: I – 159 pp. II – 162 p. (in Russ.).
- [13] Hast N. The Measurement of Rock Pressure in Mines. Sveriges Geologiske Uhdersokning, Serie C. Arsbok, 1958. 5, №3. P. 183.
- [14] Mueller L. Engineering geology, rock mechanics arrays. Moscow: Mir, 1971. 256 pp. (in Russ.).
- [15] Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of Rock Mechanics. - 4th ed. - Blackwell Publishing, 2007. 360 p.
- [16] Stavrogin A.N., Protesenya A.N. Plasticity mountain stock's. M.: Nedra, 1979. 300 p. (in Russ.).
- [17] Amenadze Y.A. The theory of elasticity. M.: Higher School, 1976. 272 p. (in Russ.).
- [18] [http://dssp.petsru.ru/p/tutorial/ft/Part4/part4\\_1.htm](http://dssp.petsru.ru/p/tutorial/ft/Part4/part4_1.htm)
- [19] <http://referatman.ru/downloadjob.html>
- [20] <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1164708&uri=lect1-1.html>

**СЕРИКТІК GPS-МӘЛІМЕТТЕРДІ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП ҚАЗАҚСТАН ТЕРРИТОРИЯСЫНДАҒЫ  
ЖЕР ҚЫРТЫСЫНЫҢ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛЫ ҚҮЙІНІҢ (КДҚ)  
ПАРАМЕТРЛЕРІН ЕСЕПТЕУ**

**Ж. Ш. Жантаяев, А. Ж. Бибосинов, Б. С. Торыбаев**

«Институт ионосферы» ЕЖШС, «Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ,  
Алматы, Қазақстан

**Тірек сөздер:** GPS-станциялар, ығысу векторы, деформация тензоры, кернеу тензоры, кернеулі-деформациялы қүйі, жер бетінің ығысы, пішімдеу.

**Аннотация.** Жер қыртысында болып жатқан процестер, оның кернеулі-деформациялы қүйімен тікелей байланысты. Геологиялықесептерді қарастырғандажер қыртысының кернеулі-деформациялы қүйін зерттеу өзектілігі айқын көрініс табады. Орталық Азия соның ішіндегі Қазақстан аймағына қатысты аталған есептің койылуы, аймақ дамуының негізгі концепциясын құрайтын, геологиялық құрамын қарастыру мәселесінен туындалған отыр. Ен алдымен бұл жана зерттеулер жер қыртысының геодинамикалық, сейсмикалық құрылышының қалыптасуы мен ондағы пайдалы қазбалар көнінің орналасуын анықтау мәселесіне байланысты болып отыр. Аталған процестер өзара тығыз байланыста болып, соңғы зерттеу мәселесі жер қыртысында болып жатқан кернеудің өзгерісін зерттеуге апарады. Кернеулі-деформациялы қүйдің көрінуі нәтижесінше койнауының динамикасының өсуіне байланысты болып отыр. Сондықтан, біз кері есепті қарастырсақ, яғни жер қойнауының динамикасын бакылап, соның негізінде оның кернеулі-деформациялы қүйінін (КДҚ) қалай пайда болатынын зерттесек, КДҚ-ның қалай пайда болатынын анықтау оңай болатын еді. Қазақстан аймағын қамтитын КДҚ картасын құрудың негізгі бастапқы мәліметтерін Орталық Азия аумағында (ОАА) орналасқан GPS-станциялардан аламыз.

Поступила 03.11.2015 г.