

УДК 551.241 (575.2)(04)

## СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

*А.Д. Костюк*

Рассматриваются результаты оценки поля скоростей и деформации земной коры на основе данных многолетних измерений Центрально азиатской GPS сети.

*Ключевые слова:* GPS; деформация земной коры; геодинамика.

Глобальная спутниковая система позиционирования (GPS) в настоящее время стала одним из эффективных средств изучения современных движений земной коры и геодинамики. С начала 90-х годов прошлого века на территории Центральной Азии идет планомерная работа по развертыванию пунктов наблюдения GPS сети и проводятся регулярные измерения (рис. 1). Геометрия сети и местоположение пунктов измерений определяются исходя из неотектонической структуры региона, так, чтобы в максимально возможной степени характеризовать относительные смещения отдельных элементов этой структуры и общую деформацию земной коры [1]. Каждый наблюдательный пункт GPS сети представляет собой участок на земной поверхности, обычно с выходами коренных пород, где на небольшом расстоянии друг от друга установлены 2–4 реперные марки. Расстояние между реперными марками составляет от нескольких метров до одного километра. Так как выходы коренных пород имеются не везде, некоторые из пунктов, расположенных в долинах, заложены в рыхлых осадочных породах. Для таких пунктов в грунте пробуривается отверстие диаметром 15 см и глубиной 1,5–2 м, которое укрепляется арматурой и заливается бетоном. В верхней части устанавливается марка.

Измерения на каждом из пунктов наблюдений GPS-сети производятся один раз в 1–2 года в осенне-летний период во время полевых кампаний, продолжительность которых обычно составляет 30–40 дней. В течение полевой кампании одновременно производятся измерения от 3 до 9 пунктов, при этом продолжительность сессий, как правило, составляет 36 часов. Вместе с тем наблюдения выполняются и на постоянно-

действующих станциях. В результате наблюдений создаются файлы данных, которые приводятся к единому формату. Для этого используется один из стандартных форматов – RINEX [2]; конвертирование осуществляется программой *teqc*, разработанной в UNAVCO [3].

В результате использования фазовых задержек сигнала и тому факту, что большинство факторов, искажающих фазовые измерения, достаточно хорошо изучены и имеются их точные оценки, точность современной геодезической системы GPS достигает 1–2 мм. Это позволяет применять ее для реконструкции современных относительных смещений и скорости движения поверхности земной коры. Существуют различные специализированные программные пакеты, такие как GAMIT (Массачусетский технологический институт, США) [4, 5], GIPSY (Лаборатория реактивного движения Калифорнийского технологического института, США) [6], BERNSE (Астрономический институт Бернского университета, Швейцария) [7] и другие, которые реализуют алгоритмы анализа измерений, позволяющие получать оценки с достаточно высокой точностью. В настоящем случае обработка GPS-данных осуществлялась комплексом программ GAMIT/GLOBK. В качестве исходной информации использовались данные измерений за 1994–2009 гг. Результаты оценки поля GPS-скоростей представлены на рис. 2.

Видно, что векторы скоростей имеют преимущественно меридиональные направления, а их величины убывают с юга на север. Это свидетельствует о сокращении земной поверхности поперек Тянь-Шаня, что согласуется с геологическими данными о сжатии этого региона [8–10]. Вместе с тем наблюдаются незначитель-

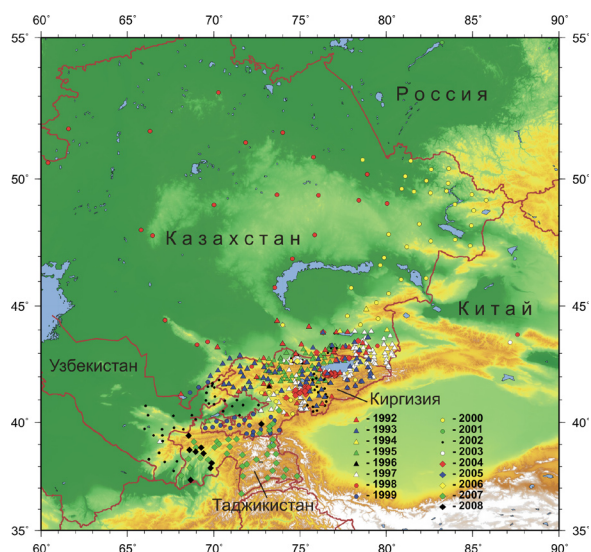


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдения Центральноазиатской GPS сети. Маркеры указывают год закладки пункта наблюдения согласно легенде.

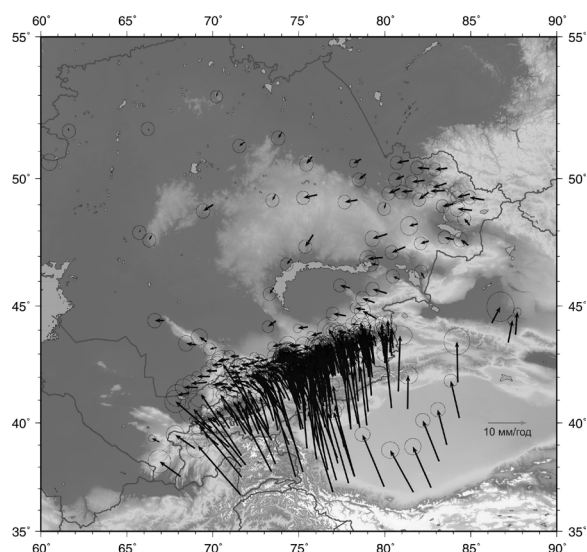


Рис. 2. Результаты оценки GPS скоростей в системе EURA. Исходные данные за 1994–2009 гг.

ные смещения на территории Казахского щита – разнонаправленность векторов и высокая величина ошибки свидетельствует о минимальных изменениях в векторном поле. Векторы в восточной и западной частях территории Тянь-Шаня расходятся в восточном и западном направлении соответственно, что говорит о значительной неоднородности векторного поля GPS-скоростей. Полученные результаты хорошо согласуются с другими работами, посвященными оценке скорости движения земной коры в данном регионе с помощью GPS-измерений [1, 11–14]. Вместе с тем, точность определения вертикальной компоненты с помощью GPS-технологий значительно уступает точности определения горизонтальных составляющих скорости. А так как деформацию земной коры можно считать непрерывной и рассматривать как изменение конфигурации и объема тела, то можно каждой точке земной коры и ее поверхности поставить в соответствие относящийся к данному моменту времени тензор деформации. Вместе с тем, при анализе только горизонтальных компонент современных движений земной поверхности легко оценить плоскую деформацию – состояние деформации, при котором одна из главных компонент – константа. Поэтому представляется разумным использовать только горизонтальные компоненты поля GPS-скоростей, которые оцениваются с достаточно высокой точностью.

Существуют различные способы расчета компонент тензора деформаций, но многие из них вследствие необходимости нахождения разницы между малыми величинами наталкиваются на вычислительные трудности. Вместе с тем, возможно обратное решение этой задачи, подборка такого тензора деформации, в результате которого модельные и наблюдаемые векторы максимально совпадают друг с другом.

Рассмотрим движение точек твердого тела (рис. 3).

Скорость  $U_i$  в точке  $i$  будет складываться из скорости движения в целевой точке  $c$ , упругой деформации ( $\varepsilon$ ) и угловой скорости  $w$ :  $U_i = u_c + (\varepsilon)r_i + [wr_i]$ , где  $r_i$  – радиус вектор между точками  $c$  и  $i$ . Введя новые обозначения, за-

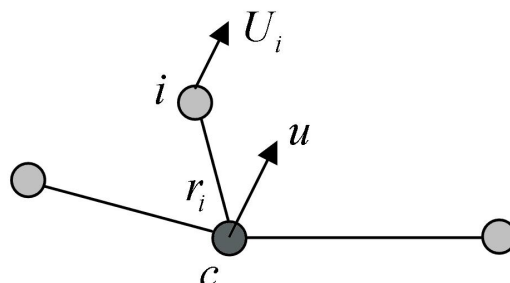


Рис. 3. Схема расположения движущихся точек.

пишем отношение для каждой компоненты трехмерной скорости:

$$\begin{aligned} V_x &= v_x + \Delta x e_{xx} + \Delta y e_{xy} + \Delta z e_{xz} - \omega_y \Delta z + \omega_z \Delta y \\ V_y &= v_y + \Delta x e_{xy} + \Delta y e_{yy} + \Delta z e_{yz} - \omega_x \Delta x + \omega_z \Delta z, \\ V_z &= v_z + \Delta x e_{xz} + \Delta y e_{yz} + \Delta z e_{zz} - \omega_x \Delta y + \omega_y \Delta x \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V$  – компонента скорости в точке  $i$ ;  $e$  – компонента тензора скорости деформации в точке  $c$ ;  $\omega$  – угловая скорость и  $\Delta$  – расстояние между точками  $c$  и  $i$ . Зная связь между двумя точками  $c$  и  $i$ , можно оценить состояние целевой точки  $c$ , если известна скорость в точке  $i$ . Для этого выражение (1) представим в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x & \Delta y & 0 & \Delta z & 0 & 0 & 0 & -\Delta z & \Delta y \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x & \Delta y & 0 & \Delta z & 0 & \Delta z & 0 & -\Delta x \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta x & \Delta y & \Delta z & -\Delta y & \Delta x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ e_{xx} \\ e_{xy} \\ e_{xz} \\ e_{yy} \\ e_{yz} \\ e_{zz} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

Как видно, для решения системы (2) требуется минимум четыре точки  $i$  с известными скоростями в окружении целевой точки  $c$ . Таким образом, зная скорости четырех точек в окружении некоторой целевой точки, легко в ней определить скорость и тензор деформации.

Аналогичный подход для двумерного случая, основанный на методе Шена (Shen) [15], реализован в программе Сагия (Sagiya) [16], модифицированный вариант которой использовался в настоящей работе для оценки деформации по данным GPS наблюдений. Зная компоненты двумерного тензора скорости деформации ( $e_{xx}$ ,  $e_{xy}$ ,  $e_{yy}$ ) в некой целевой точке  $c$  можно оценить направления осей удлинения/укорочения (рис. 4), интенсивность скорости деформации (рис. 5) и скорость дилатации, скорость деформации сдвига (например, [17]).

Оси укорочения и удлинения показывают, что сокращение земной коры в регионе происходит в субмеридиональном направлении, причем оно несколько меняется от района к району (рис. 4). Так, в районе Киргизского хребта оси укорочения имеют направление север-юг; Суусамырская впадина характеризуется осями укорочения, имеющими северо-западное направление. Северная часть озера Иссык-Куль, Терской Ала-Тоо сокращается в том же направлении. Вместе с тем на территории Таласского Ала-Тоо укорочение имеет северо-северо-восточное на-

правление. Значительное удлинение в широтном направлении наблюдается в Кунгей Ала-Тоо.

Значительны вариации направления оси укорочения на границе сочленения Тянь-Шаня и Таримской впадины, но данных на этом участке пока недостаточно для однозначных выводов. Максимальные значения оси укорочения имеют в районе Памира, кроме того на границе Памира и Таримской впадины наблюдаются максимальные значения осей удлинения. В целом исследуемый регион испытывает сокращение в северо-северо-западном направлении. Оценка интенсивности скорости деформации показала, что наиболее деформируемым районом является территория сочленения Тянь-Шаня, Памира и Таримской впадины, кроме того, высокие значения интенсивности скорости деформации наблюдаются на территории озера Иссык-Куль, Киргизского хребта, хребта Тхаталык, части Суусамырской впадины и хребта Молдо-Тоо (рис. 5).

Полученные результаты в целом хорошо согласуются с другой оценкой деформационной картины региона, основанной на применении отличной методики с более высокой разрешающей способностью [18]. Тем не менее, на данном масштабном уровне использование подхода [15] вполне оправдано, так как позволяет хорошо выделить имеющиеся тенденции, и передает особенности деформационной картины в полном объеме. Вопросы вызывает лишь общая ориентация осей укорочения/удлинения, которая несколько отличается при использовании этих двух подходов (общее северо-северо-западное направление осей укорочения для [15] и общее северо-северо-восточное направление осей укорочения для [18]). Однако сопоставление направлений осей укорочения, полученных согласно подходу [15] (например, [17]), и осей укорочения, построенных на базе сейсмологических данных [19], подтвердили северо-северо-западное направление общего укорочения центральной части исследуемого региона [14], что позволяет с уверенностью говорить о корректности оценки направлений осей укорочения/удлинения для всей территории исследования.

Если предположить, что при деформировании объем остается постоянным, то на основе имеющихся компонент тензора ( $e_{xx}$ ,  $e_{xy}$ ,  $e_{yy}$ ) можно оценить вертикальную компоненту полного тензора  $e_{zz}$  (рис. 6). Как видно на всей территории за редким исключением имеются только положительные значения вертикальной компоненты, что говорит о воздымании земной

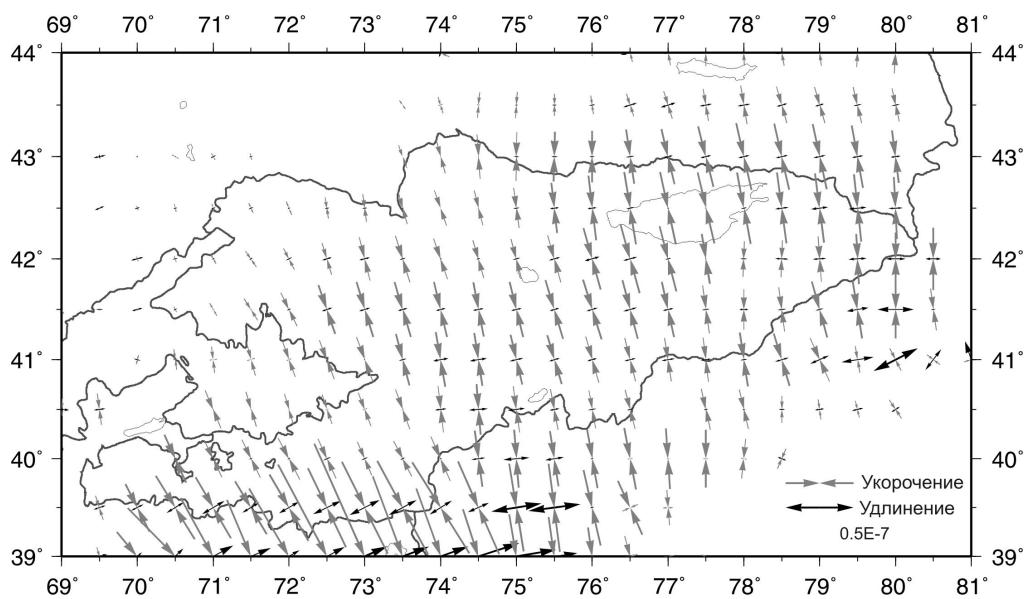


Рис. 4. Направления осей укорочения \ удлинения.

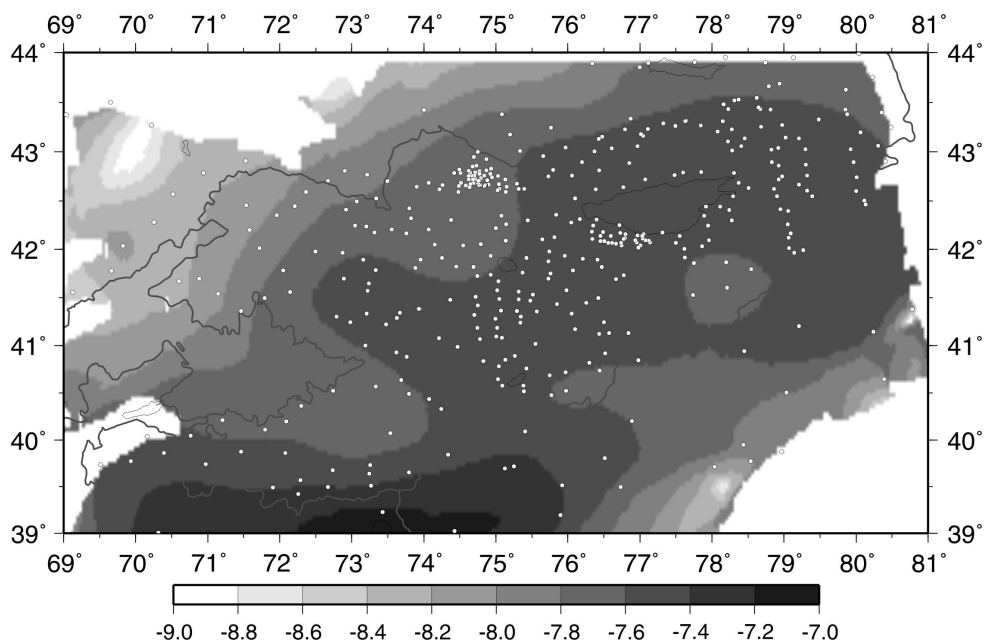


Рис. 5. Площадное распределение интенсивности скорости деформации в логарифмическом масштабе. Белые точки – пункты наблюдений, используемые при оценке.

поверхности на этой территории. Отрицательные значения можно объяснить недостаточностью данных и односторонним окружением целевой точки при расчете. Полученная оценка вертикальной компоненты непосредственно для территории Тянь-Шаня согласуется с

результатами оценки сейсмотектонической деформации [14], которые были получены на основе механизмов очагов землетрясений [19]. Тем не менее, вопрос о достоверной оценке вертикальной компоненты остается открытым.

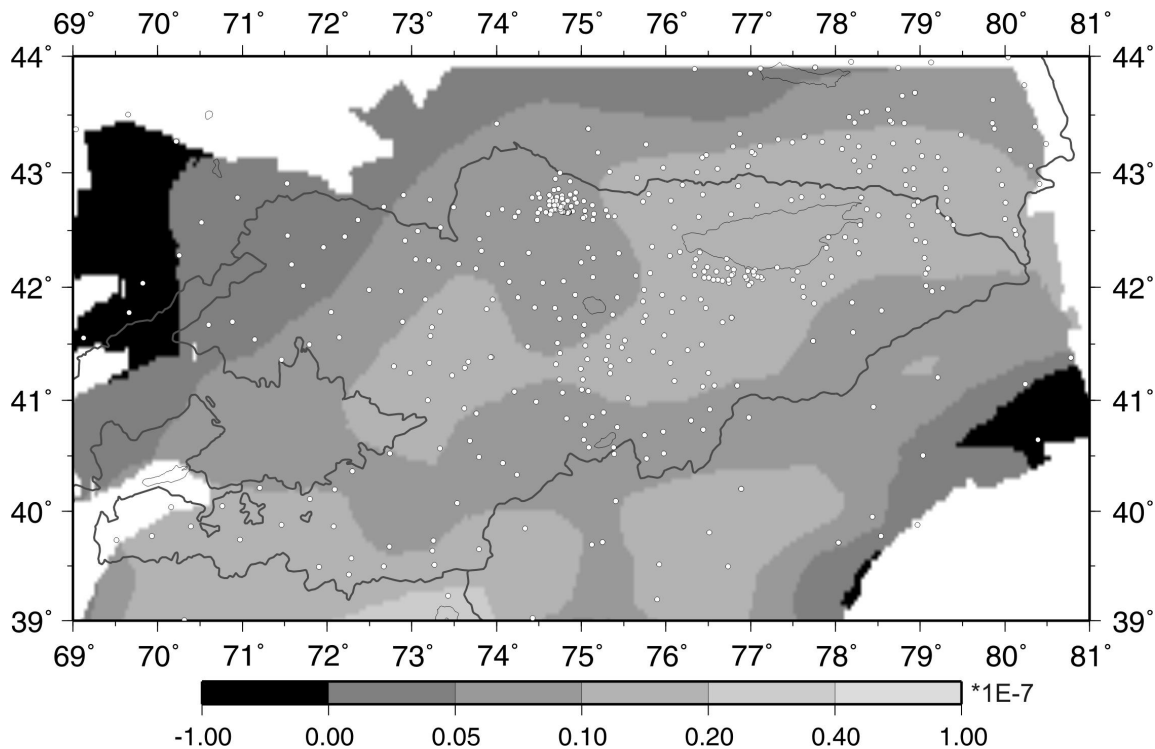


Рис. 6. Площадное распределение вертикальной компоненты тензора скорости деформации. Белые точки – пункты наблюдений, используемые при расчетах.

Представляется разумным не только использовать крайние условия при восстановлении вертикальных компонент тензора, но и привлекать иные методы, дающие прямую оценку по вертикали, например InSAR [20].

Работа была частично поддержана грантом РФФИ 09-05-00687-а.

#### Литература

1. *Зубович А.В., Макаров В.И., Кузиков С.И., Мосиенко И.О., Щелочков Г.Г.* Внутриконтинентальное горообразование в Центральной Азии по данным спутниковой геодезии // *Геотектоника*. 2007. № 1. С. 16–29.
2. *Gurtner W.* RINEX: The Receiver-Independent Exchange Format // *GPS World*. 1994. Vol. 5. № 7.
3. *Estey L.H., Meertens C.M.* TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data // *GPS Solutions* (pub. by John Wiley & Sons). 1999. Vol. 3. № 1. P. 42–49.
4. *Herring T.A., King B.W., McClusky S.C.* GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.3 // *EAPS*. MIT, 2006. – 87 p.
5. *Herring T.A.* GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program version 10.1. Internal Memorandum. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 2003. – 94 p.
6. *Bertiger W., Desai S., Haines B., Harvey N., Moore A., Owen S., Weiss J.* Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data // *J. Geodesy*. 2010. 84. P. 327–337, doi:10.1007/s00190-010-0371-9.
7. *Springer T., Dach R.* GPS GLONASS and More // *GPS World*. 2010. vol.21(6). – P. 48–58.
8. *Molnar P., Tapponier P.* Cenozoic tectonic of Asia: Effect of a collision // *Science*. 1975. Vol. 89. P. 419–426.
9. *Макаров В.И.* Новейшая тектоническая структура Центрального Тянь-Шаня. М.: Наука, 1977. 171 с.
10. *Чедия О.К.* Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1986. 314 с.
11. *Abdrakhmatov K.Y. et al.* Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present day crustal deformation rates // *Letters to Nature*. 1996. Vol. 384. P. 450–453.

12. *Reigber Ch., Michel G.W., Galas R. et al.* New space geodetic constrains on the distribution of deformation in Central Asia // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2001. Vol. 191. P. 157–165.
13. *Муди Б.Д., 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.
14. *Костюк А. Д., Сычева Н. А., Юнга С. Л., Богомолов Л. М., Яги Ю.* Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии // *Физика Земли.* 2010. № 3. С. 52–65.
15. *Shen Z., D.D. Jackson, B.X. Ge.* Crustal deformation across and beyond the Los Angels Basin from geodetic measurements // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 27957–27980.
16. *Sagiya T., Miyazaki S., Tada T.* Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan // *PAGEOPH.* 2000. P. 2303–2322.
17. *Костюк А.Д.* Деформационные изменения земной коры Северного Тянь-Шаня по данным космической геодезии // *Вестник КPCY.* 2008. Т. 8. № 3. С. 140–144.
18. *Zubovich A.V., Mukhamediev Sh.A.* A method of superimposed triangulations for calculation of velocity gradient of horizontal movements: application to the Central Asian GPS network // *Geodynamics & Tectonophysics.* 2010. Vol. 1. № 2. P. 169–185.
19. *Костюк А.Д.* Механизмы очагов землетрясений средней силы на Северном Тянь-Шане // *Вестник КPCY.* 2008. Т. 8. № 1. С. 100–105.
20. *Pritchard M.E.* InSAR, a tool for measuring Earth's surface deformation // *Physics Today.* 2006. July. P. 68–69.