

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

А.Д. Костюк – мл. науч. сотрудник,
Научная станция РАН, Бишкек

High density of Central Asia GPS network in the Northern Tien Shan and long period of observations have allowed to estimate a velocity vector field of movement crust and strain field. Results shows that strain rate axes have north-north-west directions; strain field is heterogeneous and have high compression zones.

Введение. Тянь-Шань представляет собой внутриконтинентальную горную систему длиной около 2500 км и шириной до 350 км, которая расположена в Центральной Азии. Основные тектонические силы в данном регионе обусловлены коллизией между Индийской и Евразийской плитами [1]. Тянь-Шань относится к одним из самых сейсмоактивных регионов мира. Крупные землетрясения в этом регионе приурочены к северной и южной границам орогена [2]. Для понимания процессов, происходящих в данном регионе, и снижения сейсмической опасности крайне важно изучение

геодинамики Тянь-Шаня. Катастрофические землетрясения, происходящие на Тянь-Шане, представляют большую угрозу для проживающего здесь населения. Современные движения земной коры в этом регионе выражаются проявлением интенсивной сейсмичности, поэтому их оценка очень важна для изучения геодинамических процессов [3]. Применение методов космической геодезии позволяет оценить деформационный процесс земной коры. Более десяти лет Научная станция Российской академии наук в г. Бишкек (НС РАН) проводит регулярные измерения GPS сети Центральной

Азии. Накопленный материал позволяет не только проводить изучение региона в целом, но и детально оценить состояние отдельных областей. Настоящая работа посвящена изучению деформации земной коры Северного Тянь-Шаня, который представляет собой зону активных разломов, непрерывно простирающуюся более чем на 600 км вдоль окраины орогена [4]. Знание особенностей тектонических движений в регионе может оказать помощь как в прогнозе землетрясений, так и в вопросах, касающихся причин горообразования на Тянь-Шане.

Исходные данные и метод обработки.

Для определения поля скоростей деформации по данным GPS-наблюдений нами использовалась программа, разработанная Т. Сагия (Saggiya) и основанная на методе Шена (Shen) [5, 6]. В этом методе компоненты горизонтальной скорости смещения (u, v), компоненты тензора скорости деформации (e_{xx}, e_{xy}, e_{yy}) и скорость вращения ω в произвольной точке с координатами (x_i, y_i) связаны со скоростью смещения (U, V) в точке наблюдения (X, Y) следующим образом:

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta x_i & \Delta y_i & 0 & \Delta y_i \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_i & \Delta y_i & -\Delta x_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ e_{xx} \\ e_{xy} \\ e_{yy} \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x^i \\ \varepsilon_y^i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^i &= \sigma_x^i \exp(\Delta x_i^2 / 2D^2), \\ \varepsilon_y^i &= \sigma_y^i \exp(\Delta y_i^2 / 2D^2), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta x_i = X - x_i$; $\Delta y_i = Y - y_i$; σ_x^i – ошибка измерения компоненты X скорости смещения; σ_y^i – ошибка измерения компоненты Y скорости смещения; D – параметр, контролирующий вес измерения (Distance Decaying Constant, DDC).

Значение DDC зависит от сети точек наблюдений, скорости смещения и тектонических особенностей региона. Скорость дилатации и скорость деформации сдвига в каждой точке вычисляются как:

$$\Delta = e_{xx} + e_{yy}, \quad (3)$$

$$\Sigma = \sqrt{e_{xy}^2 + (e_{xx} - e_{yy})^2 / 4}. \quad (4)$$

При вычислении компонент скорости деформации, компонент горизонтальной скорости смещения и скорости вращения в i -ой точке используются данные векторов всех соседних точек, расположенных в радиусе 2D от нее. В данном случае параметр D составлял 28 км. При этом ε_x^i и ε_y^i играют роль весовых коэффициентов при решении системы уравнений, построенной согласно (1). Чем дальше от текущей точки находится пункт GPS-измерения и чем больше ошибка измерения скорости в нем, тем меньшее влияние он оказывает на результат решения системы уравнений для данной точки. Исходные данные для оценки скорости деформации представляли собой поле векторов скоростей (рис. 1), полученных по данным GPS за интервал времени с 1994 по 2006 г. Их обработка осуществлялась на ИС РАН комплексом программ GAMIT/GLOBK Массачусетского технологического института США [7, 8]. В расчетах, кроме пунктов GPS наблюдений, измеряемых периодически, использовались также 9 постоянно действующих станций ИС РАН, работающих в непрерывном круглосуточном режиме, и ряд станций мировой IGS (International GPS Service for Geodynamics) сети, расположенных в смежных регионах. При вычислении векторов скоростей для стабилизации решения использовались базовые станции IGS (рис. 2), при этом в качестве системы координат выступала система ITRF 2005.

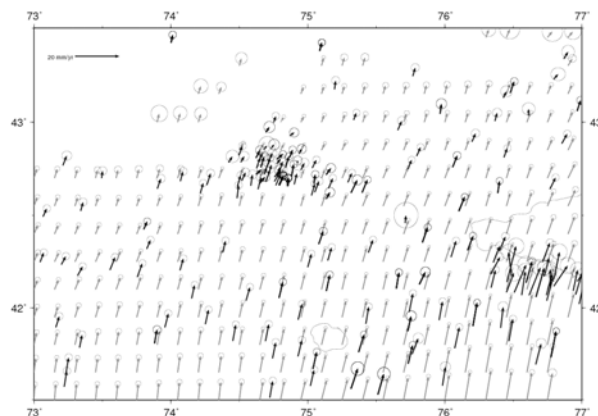


Рис. 1. Поле векторов скоростей по данным GPS относительно станции NVSK (г. Новосибирск). Черные вектора – скорости, полученные с помощью GAMIT/GLOBK; серые – скорости, смоделированные при расчете деформаций.

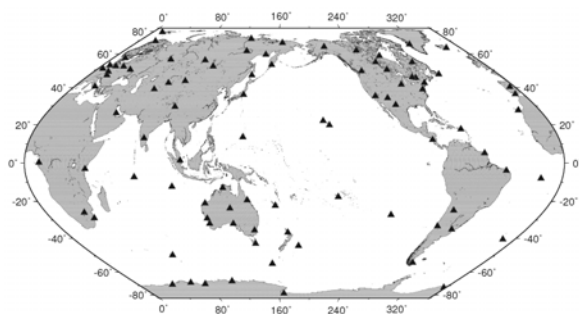


Рис. 2. Базовые станции мировой IGS сети, используемые для стабилизации решения при оценке векторов скоростей.

Регулярные измерения в течение 13 лет и высокая плотность Центральной Азиатской GPS сети в исследуемом регионе позволили в данной работе использовать представительный набор данных, что помогло значительно детализировать деформационную картину и отметить локальные особенности.

Результаты. Оси сжатия и растяжения, полученные по данным GPS (рис. 3), показывают, что сокращение земной коры в регионе происходит в субмеридиональном направлении, причем оно несколько меняется от района к району. Так, в районе Киргизского хребта оси сжатия имеют направление север-юг, Суусамырская впадина характеризуется осями сжатия, имеющими направление северо-западное направление.

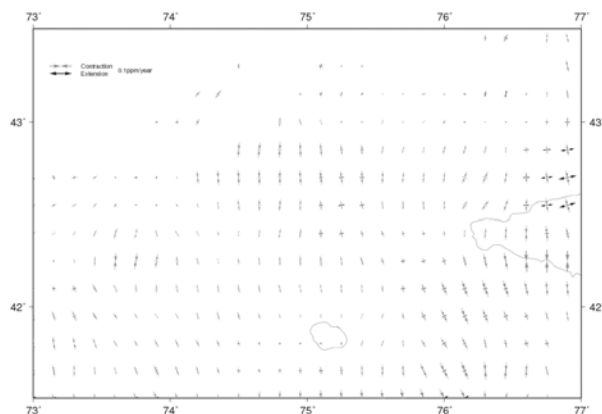


Рис. 3. Расположение осей сжатия/растяжения по данным GPS. Серые стрелки – оси сжатия; черные – оси растяжения.

Северная часть озера Иссык-Куль, Терской Алатау сжимаются в том же направлении. Вместе с тем на территории Таласского Алатау сжатие имеет северо-северо-восточное направление. Значительное растяжение в широтном направлении наблюдается в Кунгей Алатау. В целом исследуемый регион испытывает сжатие в северо-северо-западном направлении. Сокращение коры в меридиональном направлении подтверждается и сеймотектоническими деформациями [9]. Они показывают, что Северный Тянь-Шань находится в условиях простого меридионального сжатия, за исключением Суусамырской впадины, где преобладают сдвиговые сеймотектонические деформации. Оцененные по результатам работы [10] деформации Тянь-Шаня также подтверждают сжатие данного региона в меридиональном направлении и отмечают наличие областей с высокой скоростью деформации. Поле скоростей деформаций, полученное в настоящей работе, не противоречит результатам исследований в работах [11–14].

Области высокой скорости сжатия расположены в центральной части Киргизского хребта, западных частях Кунгей Алатау и Терской Алатау, вдоль хребтов Арамсу и Тахталык (рис. 4). Зоны максимальной скорости деформации сдвига наблюдаются в горах Нарын-Тоо, западной части Терской Алатау и на северном склоне Киргизского хребта. В Кекирмтау, Арамсу, Суусамыртау также отмечены высокие скорости деформации сдвига (рис. 5).

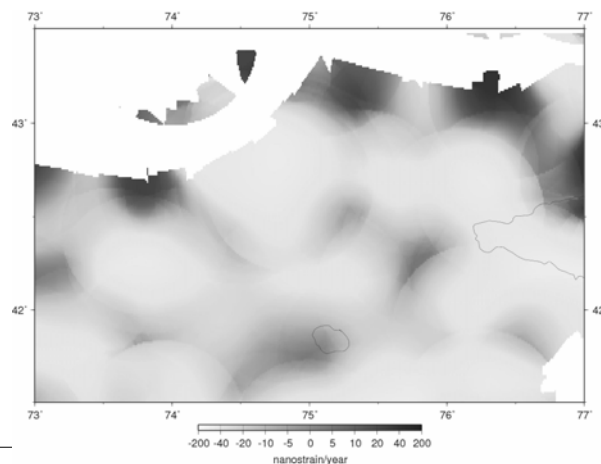


Рис. 4. Поле скорости дилатации.

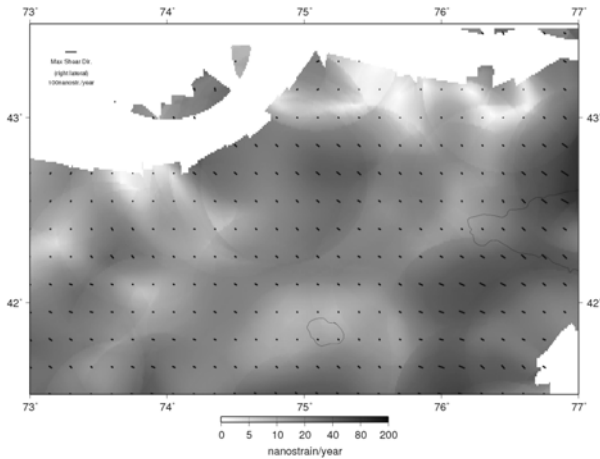


Рис. 5. Поле скорости деформации сдвига.

Ось, вдоль которой происходит смещение при деформации сдвига, имеет за редким исключением северо-западное направление. Таким образом, Северный Тянь-Шань испытывает интенсивное сжатие в северо-северо-западном направлении, причем распределение зон концентрации деформаций и направлений осей сжатия указывает на дискретный характер земной коры. По-видимому, движущиеся с разными скоростями блоки, взаимодействуя между собой, меняют положение и деформируются. Полученные результаты согласуются с результатами других работ [12, 15], подтверждающая, что в настоящее время происходит интенсивное субмеридиональное укорочение Тянь-Шаня, которое в целом согласуется с неотектонической структурой, субширотным простиранием хребтов и впадин, взбросо-надвиговым характером разрывных нарушений и другими особенностями структуры, уточняя, вместе с тем, локальные особенности деформаций земной коры на территории Северного Тянь-Шаня.

Итак, полученные результаты позволили:

- ✓ уточнить направление общего сжатия региона, которое происходит в северо-северо-западном направлении (азимут 346°);
- ✓ выявить локальные зоны, имеющие иной характер деформирования, например, сжимающиеся в северо-восточном направлении;

- ✓ определить небольшие участки растяжения в широтном направлении, свидетельствующие о существенной неоднородности деформационного поля, подчеркивают неравномерный характер движения земной коры и ее дискретность.

Можно сделать вывод о том, что скорее всего, модель, рассматривающая кору как ансамбль блоков и слоев разного масштабного уровня [16] ближе к действительности, чем представления, которые исходят из реологической модели нелинейно-вязкой жидкости [17].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту №07-05-004336.

Литература

1. Molnar P. and Tapponier P. Cenozoic tectonic of Asia: Effect of a collision // *Science*. – 1975. – V. 89. – P. 419–426.
2. Sujoy Ghose, Michael W. Hamburger, Charles J. Ammon. Source parameters of moderate-sized earthquakes in Tien Shan, central Asia from regional moment tensor inversion // *Geophysical Research Letters*. – 1998. – V. 25. – №16. – P. 3181–3184.
3. Зубович А.В. Изучение поля скоростей современных движений земной коры Центрального Тянь-Шаня методами космической геодезии // Дисс... канд. физ-мат. наук. – М., 2001. – 125 с.
4. Абдрахматов К.Е. Современная блоковая структура Северного Тянь-Шаня // *Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов (Сб. материалов Второго междунар. симпозиума 29 октября – 3 ноября 2002 г.)*. – Москва – Бишкек: НС ИОВТ РАН, 2003. – С. 19–33.
5. Sagiya T., Miyazaki S. and Tada T. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan // *PAGEOPH*. – 2000. – P. 2303–2322.
6. Shen Z., D.D. Jackson, B.X. Ge. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles Basin from geodetic measurements // *J. Geophys. Res.* – 1996. – V. 101. – P. 27957–27980.
7. GAMIT. Reference manual. GPS analysis at MIT. Release 10.3 / Herring T.A., King B.W., McClusky S.C. – EAPS. MIT. – 2006. – 182 p.
8. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.3 / Herring T.A., King B.W., McClusky S.C. – EAPS. MIT. – 2006. – 87 p.

9. Сычева Н.А., Аладьев А.В., Мухамадеева В.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М. Очаговые механизмы и сеймотектонические деформации как проявления напряженного состояния коры Северного Тянь-Шаня // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска. – Алматы, 2005. – С. 41–48.
10. Зубович А.В., Бейсенбаев Р.Т., Сяочан В., Юнфен Д., Кузиков С.И., Мосиенко О.И., Нусипов Е.Н., Щелочков Г.Г., Щерба Ю.Г. О некоторых результатах анализа кинематики Тянь-Шаня и окружающих районов по данным GPS-наблюдений // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска. – Алматы, 2005. – С. 34–40.
11. Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Мосиенко О.И., Щелочков Г.Г., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. Поле деформации, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – №10. – С. 1634–1640.
12. 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.
13. Kostuk A. Seismicity and crustal deformation in Kyrgyzstan // Individual studies by participant at the international institute of seismology and earthquake engineering. – 2005. – V. 41. – P. 45–57.
14. Костюк А.Д., Sagia T., Зубович А.В. Сравнение распределения сейсмичности и поля деформаций // Вестник КРСУ. – 2006. – Т. 6. – №3. – С. 64–70.
15. Abdrakhmatov K.Ye. et al. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present day crustal deformation rates // Letters to Nature. – 1996. – V. 384. – P. 450–453.
16. Avouac J.P., Tapponier P. Kinematic model of active deformation in Central Asia // J. Geophys. Res. – 1993. – V. 20. – P. 895–898.
17. England P., Molnar H. Active Deformation of Asia: From Kinematics to Dynamics // Science. – 1997. – V. 278(5338). – P. 647–650.