

УДК 550.372 + 551.24

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПАМИР-ГИССАРО-АЛАЙСКОЙ ЗОНЫ ПО ДАННЫМ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ

А.Н. Мансуров, А.К. Рыбин

Приведены расчеты двумерного поля деформаций Памир-Гиссаро-Алайской зоны по результатам космогеодезических измерений межрегиональной Центральноазиатской сети, осуществляемых Научной станцией РАН. Построено поле скорости современных плоских деформаций, проведен анализ распределения деформаций по исследуемой территории.

Ключевые слова: деформация; тензор; кора; GPS-скорости; 2D-модель; взвешенный метод наименьших квадратов; программный комплекс.

QUANTITATIVE ESTIMATION OF MODERN DEFORMATIONS OF EARTH CRUST FOR PAMIR-GISSAR-ALAY ZONE BY SPACE GEODETIC MEASUREMENTS

A.N. Mansurov, A.K. Rybin

Calculations of 2D field of deformations of Pamir-Gissar-Alay zone are carried out. It is constructed the field of speed of modern plane deformations and made the analysis of distribution of deformations on the investigated area.

Key words: strain; tensor, crust, GPS velocities; 2D model; weighted least squares; software suite.

Введение. Современные движения и деформации, наблюдаемые на поверхности Земли с помощью средств космической геодезии (GPS), являются одним из проявлений сложных геодинамических процессов, происходящих внутри нее. Характер деформаций земной коры в условиях современных тектонических движений зависит от многих факторов, таких как физические свойства пород, глубинное строение земной коры, степень ее расслоенности и др. [1, 2]. В статье рассматриваются вопросы, связанные с определением деформационных характеристик геодинамической системы взаимодействия двух крупнейших горных сооружений Центральной Азии: Тянь-Шаня и Памира.

Территорию области сближения Памира и Тянь-Шаня будем называть Памир-Гиссаро-Алайской зоной или районом. Эта зона включает в себя Заалайский хребет, высокогорную Алайскую долину и примыкающие к ней горные хребты Тянь-Шаня, расположенные к югу от Ферганской долины (рисунок 1). На современном этапе Памир-Гиссаро-Алайская область характеризуется интенсивными деформациями и высоким уровнем сейсмичности [3].

Результаты проводимых здесь с 2007 г. GPS-наблюдений позволяют исследовать кинематические характеристики движений и получить количественную оценку поля современных деформаций земной поверхности этой области. Так, в региональном масштабе анализ кинематики горной системы Памира и окружающих территорий, включая рассматриваемую нами зону, представлен в работе [4]. Авторами показано, что GPS-измерения определяют скорость относительного движения ~30 мм/год в северном направлении, характеризующую сближение двух стабильных регионов: Пакистана и Евразии. В этой конвергенции локализованное сокращение ~10–15 мм/год происходит в пределах Алайской зоны. Поэтому особый интерес представляет построение количественной модели современных деформаций земной поверхности Памир-Гиссаро-Алайской области на основе результатов GPS-наблюдений.

Для решения этой задачи был использован программный комплекс “Sur_GPS_strains” [5], реализующий методику расчета двумерного поля скорости деформаций, основанную на вычислении тензора градиента скорости [6, 7].

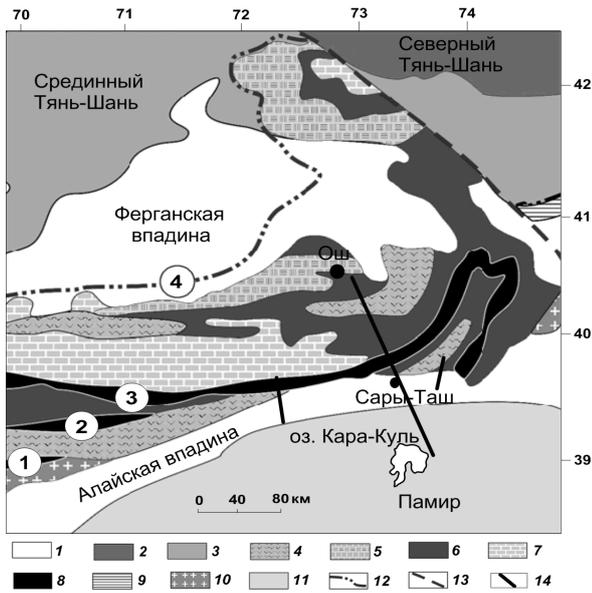


Рисунок 1 – Тектонические элементы в структуре Гиссаро-Алайской горной области (по М.Г. Леонову [3]):

1 – мезозойско-кайнозойский чехол обрамления складчато-покровного сооружения Тянь-Шаня; 2 – Северный Тянь-Шань; 3 – Срединный Тянь-Шань; 4-9 – Южный Тянь-Шань; 4 – выходы пород внутрибассейновых вулканических гряд (параавтохтонные), 5 – выходы пород внутрибассейновых вулканических гряд в аллохонном залегании, 6 – выходы пород относительно глубоководных прогибов, склонов вулканических поднятий и склонов мелководных отмелей, 7 – выходы пород чехла микроконтинентов, 8 – зоны концентрированной деформации, 9 – структуры Южного Тянь-Шаня нерасчлененные; 10 – Сулутерекский и Южно-Гиссарский массивы; 11 – структуры Памира; 12 – структура Палеотуркестанского океана; 13 – Таласо-Ферганский разлом; 14 – существующие геофизические профили.

Цифры в кружках: зоны концентрированной деформации: 1 – Каракуль-Зиддинская, 2 – Зеравшанская, 3 – Нурагау-Курганакская, 4 – Южно-Ферганский офиолитовый шов

Математическая модель и методика расчета поля скорости деформации

Математическая модель основана на следующих допущениях:

- поле скорости деформации в исследуемой области непрерывно;
- поле скорости деформации в исследуемой области однородно;
- изменение взаимного расположения двух произвольных точек в результате деформации пренебрежимо мало.

Методика нахождения **тензора градиента скорости** с помощью каталога скоростей GPS-марок подробно изложена в работе [6].

Рассмотрим более подробно основные моменты расчета **тензора скорости деформации** и определение его параметров. Полученный тензор градиента скорости аддитивно разделяется на симметричную и кососимметричную части:

$$L = E + \Omega \text{ или } L_{\dot{y}} = \varepsilon_{\dot{y}} + \omega_{\dot{y}} = \left(\frac{L_{ij} + L_{ji}}{2} \right) + \left(\frac{L_{ij} - L_{ji}}{2} \right), \quad (1)$$

отражающие эффекты деформации и вращения соответственно.

Диагонализация тензора скорости деформации приводит к собственным векторам (направлениям) и собственным значениям, удовлетворяющим отношению $E\bar{v}_k = \lambda_k \bar{v}_k$. Собственные значения λ_k представляют собой главные значения тензора скорости деформации, и традиционно обозначаются как e_{max} , e_{min} для двумерного случая и e_{max} , e_{int} , e_{min} – для трехмерного случая. Соответствующие собственные векторы задают главные направления тензора скорости деформации.

На основе полученных основных значений тензора скорости деформации вычисляются дилатансия (в двумерном случае 2D-дилатансия Δ_{2D} – скорость плоской деформации, в трехмерном случае 3D-дилатансия Δ_{3D} – скорость объемной деформации) и скорость максимальной сдвиговой деформации Σ :

$$\Delta_{2D} = e_{max} + e_{min}, \quad (2)$$

$$\Delta_{3D} = e_{max} + e_{int} + e_{min}, \quad (3)$$

$$\Sigma = e_{max} - e_{min}. \quad (4)$$

Метод оценки **достоверности результатов** необходим при допущении локального характера однородности поля. Его цель состоит в том, чтобы отбросить результаты расчета в точках, где тензор градиента скорости получен с использованием экстраполяции, и в точках, сильно удаленных от всех пунктов GPS-наблюдений. Для формализации этих требований при расчете использовался следующий подход.

1. В двумерном случае можно использовать простую равномерную сетку точек, в трехмерном случае, во избежание экстраполяции, следует использовать точки, принадлежащие дневной поверхности. Для получения таких точек в масштабе региона можно воспользоваться имеющейся в открытом доступе цифровой моделью рельефа (DTM) земного шара, содержащей высоты точек земной поверхности на равномерной в географических координатах сетке с шагом в 30 угловых секунд.

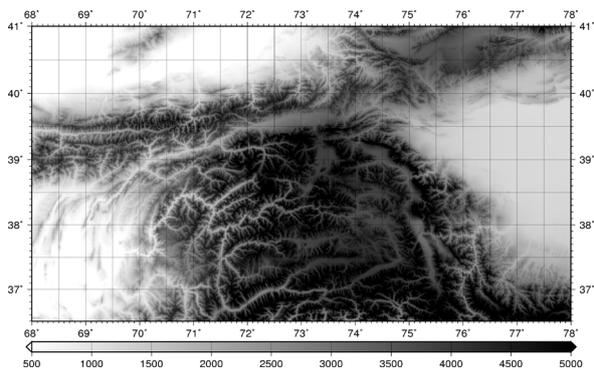


Рисунок 2 – Рельеф исследуемого региона

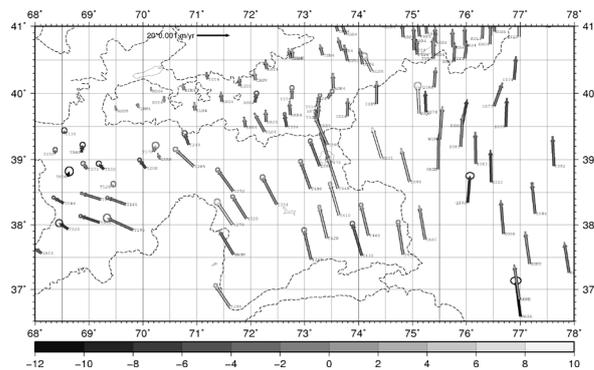


Рисунок 3 – Оцененные скорости GPS-марок Центральноазиатской сети наблюдений. Цветом показаны значения вертикальной компоненты скорости

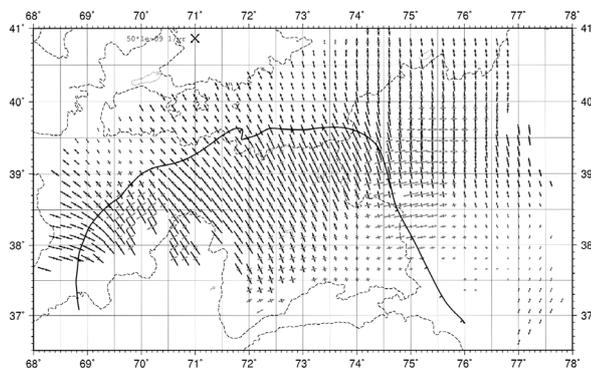


Рисунок 4 – Рассчитанное поле тензора скорости 2D-деформации. Черный цвет – сжатие, серый – растяжение. Сплошной линией показан Вахш-Заалайский (Вахш-Казыкартский) надвиг – тектоническая граница Памира [8]

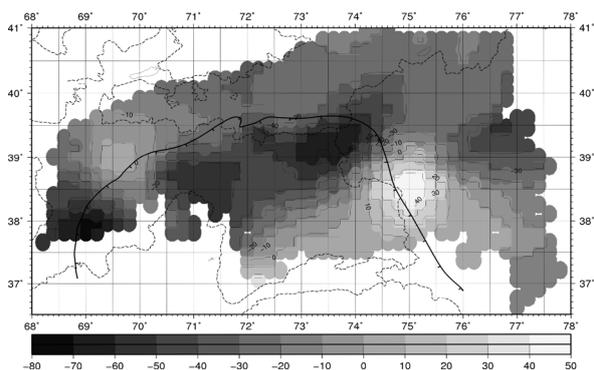


Рисунок 5 – Поле следа тензора скорости 2D-деформации (в масштабе 10^{-9}). Отрицательные значения говорят о сжатии

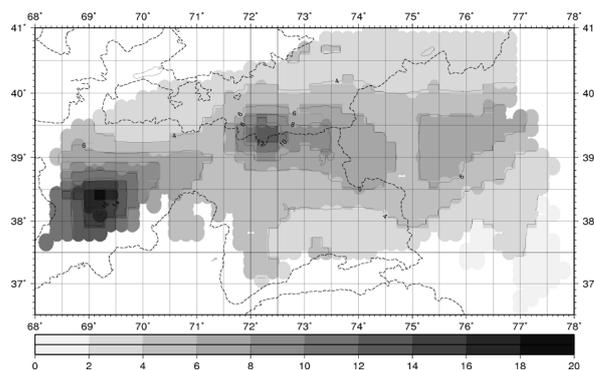


Рисунок 6 – Поле оцененных ошибок следа тензора скорости 2D-деформации (в масштабе 10^{-9})

2. Вводится критерий значимости результата расчета в произвольной точке: в проекции на плоскость Oxy рассматривается круг с центром в точке расчета и радиусом $2d_0$. Из центра круга в направлении всех точек наблюдений, лежащих в этом круге, проводятся лучи. Затем находится максимальный угол между двумя лучами, внутри которого нет других лучей. Результат расчета признается “высоко значимым”, если этот угол не превосходит 90 градусов, “средне значимым”, если он не превосходит 180 градусов, и “низко значимым” в других случаях.

Построение двумерной модели современных деформаций земной коры Памир-Гиссаро-Алайской зоны

Рельеф исследуемого региона показан на рисунке 2.

В качестве исходных данных был использован каталог оцененных скоростей GPS-марок, рассчитанный по результатам измерений, проводимых лабораторией космической геодезии ИС РАН. Оценки скоростей из этого каталога представлены на рисунке 3. Данный набор (113 марок) не содержит марок, в которых ошибки определения скорости превосходят 4 мм/год по горизонтальным компонентам и 8 мм/год – по вертикальной компоненте.

При расчете регион, ограниченный 36,5 и 41 градусами северной широты и 68 и 78 градусами восточной долготы, был покрыт равномерной сеткой точек с шагом 16,6 км по направлениям север – юг и восток – запад. При расчете использовался сглаживающий коэффициент $d_0 = 50$ км, что хорошо подходит для исследуемого региона с относительно редко расположенными пунктами наблюдений.

Поле диагонализированного тензора скорости современной деформации земной коры, рассчитанное по двумерной модели на выбранной сетке, показано на рисунке 4. Поле следа тензора (условная плоская дилатансия) показано на рисунке 5. Поле оцененной ошибки следа показано на рисунке 6.

Обсуждение и выводы. Как видно на рисунках 4 и 5, для южного Тянь-Шаня характерно сжатие с абсолютными значениями около $25 \cdot 10^{-9}$ и направлением, меняющимся от субмеридионального (южная часть Ферганского хребта) до азимута -60° (Западная оконечность Заравшанского хребта).

Для центральной части северного Памира (от хребта Академии наук до Сарыкольского хребта, 38.5–39.5 с.ш., 72–74 в.д.) и зоны сопряжения Памира и Тянь-Шаня (Алайская впадина, 39.5 с.ш., 72–74 в.д.) характерно доминирующее сжатие по азимуту около -30° с абсолютными значениями до $70 \cdot 10^{-9}$. К западу от этой зоны до 70.5 в.д. (изгиб Дарвазского хребта) азимут сжатия меняется до -45° при абсолютных значениях до $60 \cdot 10^{-9}$.

Далее на запад, в зоне сопряжения Северного Памира и Таджикской депрессии (38–39 с.ш., 69.5–70.5 в.д.) наблюдается сжатие по азимуту -30° и растяжение по азимуту 60° , причем их абсолютные значения приблизительно одинаково меняются от $30 \cdot 10^{-9}$ (на севере) до $60 \cdot 10^{-9}$ (на юге). Далее на запад в Таджикской депрессии растяжение исчезает, а азимут сжатия меняется от -30° до -80° при абсолютных значениях около $60 \cdot 10^{-9}$.

К востоку от северной части Сарыкольского хребта до западной оконечности Таримской впадины (Северо-Восточный Памир, окрестности хребта Кингтал, 38.5–40 с.ш., 74–76 в.д.) характер деформации плавно меняется от субмеридионального сжатия с абсолютными значениями $50 \cdot 10^{-9}$ (на севере) к субширотному растяжению с абсолютными значениями $50 \cdot 10^{-9}$ (на юге). К югу от этой зоны (Восточный Памир, южная часть Сарыкольского хребта и северная часть хребта Западный Кунь-Лунь, 37.5–38.5 с.ш., 74–76 в.д.) субширотное растяжение убывает от значений $50 \cdot 10^{-9}$ (на севере) к $10 \cdot 10^{-9}$ (на юге). Для Центрального Памира (окрестности Северо-Аличурского хребта, 37.5–38.5 с.ш., 72–74 в.д.) сжатие по азимуту около -30° с абсолютными значениями до $30 \cdot 10^{-9}$ и растяжение по азимуту 60° с абсолютными значениями до $20 \cdot 10^{-9}$.

Таким образом, выявлено крайне неоднородное распределение деформации земной коры Памир-Гиссаро-Алайской области. Режим сжатия доминирует на территории Южного Тянь-Шаня. Максимальные величины скорости сжатия наблюдаются в зоне сопряжения Памира и Тянь-Шаня. В восточном Памире выделяется обширная область субширотного растяжения.

Представленное в работе исследование поддержано грантом РФФИ № 14-05-00545.

Литература

1. Bogomolov L., Bragin V., Fridman A., Makarov V., Sobolev G., Polyachenko E., Schelochkov G., Zeigarnik V., Zubovich A. Comparative analysis of GPS, seismic and electromagnetic data on the Central Tien Shan Territory // *Tectonophysics*. 2007. Vol. 431. P. 143–151.
2. Рыбин А.К. О связи поля современных деформаций и глубинной структуры электропроводности Центрального Тянь-Шаня по данным GPS и МТЗ // *Вестник ВГУ. Серия Геология*. 2008. № 2. С. 165–175.
3. Леонов М.Г. Внутриплитные зоны концентрированной деформации: тектоническая структура и особенности эволюции / М.Г. Леонов // *Геотектоника*. 2012. № 6. С. 3–26.
4. Ischuk A., Rebecca Bendick, Anatoly Rybin, Peter Molnar, Shah Faisal Khan, Sergey Kuzikov, Solmaz Mohadjer, Umed Saydullaev, Zhyra Ilyasova,

- Gennady Schelochkov, and Alexander V. Zubovich*
Kinematics of the Pamir and Hindu Kush regions from GPS geodesy // Journal of geophysical research: solid earth, 2013. V. 118, 1–9, doi:10.1002/jgrb.50185, 2013.
5. Мансуров А.Н. Структурное проектирование автоматизированной системы расчета поля скорости деформации земной коры по данным GPS-наблюдений / А.Н. Мансуров // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек, 2012. № 2. С. 120–127.
 6. Мансуров А.Н. Математическая модель и методика расчета поля скорости деформации земной коры по данным GPS-наблюдений / А.Н. Мансуров // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек, 2012. № 2. С. 57–63.
 7. Мансуров А.Н. Расчет скоростей современных деформаций земной коры региона сопряжения Памира и Тянь-Шаня по данным GPS-наблюдений при помощи автоматизированной системы / А.Н. Мансуров // Современная тектонофизика: методы и результаты: матер. третьей молод. тектонофизической школы-семинара. М.: ИФЗ РАН, 14–18 октября 2013 г. Т. 1. С. 205–211. http://tph_2013.ifz.ru/Vol_1.pdf
 8. Буртман В.С. Тянь-Шань и Высокая Азия: Геодинамика в кайнозой / В.С. Буртман; под ред. Ю.Г. Леонова. М.: ГЕОС, 2012. 188 с.