

УДК 551.24 (235.216):550.8.053

**ПОЛЕ СКОРОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ  
ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО И ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ  
ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОАЗИАТСКОЙ GPS-СЕТИ**

А.Н. Мансуров

Предложена методика расчета поля тензора скорости современных деформаций земной коры по каталогу скоростей пунктов на поверхности земли. Представлены результаты такого расчета в пределах региона Северного и Центрального Тянь-Шаня на основе каталога скоростей пунктов наблюдений Центральноазиатской GPS-сети, полученного специалистами ИС РАН в г. Бишкеке.

*Ключевые слова:* земная кора; скорость деформации; тензор; градиент скорости; GPS; геодезия; непрерывная модель; метод Шена.

**MODERN STRAIN RATE FIELD OF EARTH CRUST IN NORTH AND MIDDLE TIEN-SHAN  
ON VELOCITIES OF POINTS OF CENTRAL-ASIAN-GPS-NETWORK**

A.N. Mansurov

It is offered the method of calculating modern Earth crust's strain rate tensor field on geodetic velocity catalogue. It is presented the results of such calculating within the region of Northern and Central Tien-Shan based on the catalog of speeds of supervision points of the Central-Asian GPS network, received by experts of NS RAS in Bishkek.

*Keywords:* Earth crust; strain rate; tensor; velocity gradient; GPS; geodesy, continuous model; Shen's method.

**Введение.** Движения точек поверхности земли, наблюдаемые с помощью технологий GPS, являются проявлением сложных деформационных процессов в толще земной коры. Накопленный к настоящему времени объем данных GPS-наблюдений на геодезических сетях по всему миру позволяет строить устойчивые двумерные деформационные модели даже в масштабе отдельных регионов. Оценки распределения деформаций, предоставляемые такими моделями, позволяют лучше понять природу и локализацию различных геодинамических процессов, дать дополнительные сведения о современном состоянии земной коры.

В данной работе кратко изложена активно используемая в настоящее время [1–4] деформационная модель, впервые предложенная в [1], представлены результаты ее применения к данным GPS-наблюдений Центральноазиатской GPS-сети.

**Регион расчета и исходные данные.** Рассматриваются современные деформации земной коры в регионе, ограниченном 40,5 и 44 град. с.ш. и 72

и 78 град. в.д. Рельеф исследуемого региона показан на рисунке 1.

В качестве исходных данных был использован каталог оцененных скоростей геодезических реперов, рассчитанный по результатам измерений, проводимых лабораторией космической геодезии ИС РАН при помощи технологии GPS. Этот каталог представлен на рисунке 2. Он не содержит пунктов, для которых ошибки определения скорости превосходят 4 мм/год по горизонтальной и 8 мм/год – по вертикальной компоненте.

**Математическая модель и методика расчета** скорости деформации земной коры была предложена в [1]. Она основана на разложении в ряд Тейлора функции скорости точки GPS-наблюдения от ее радиус-вектора:

$$U = T + \frac{dU}{dX} \Delta X + E = T + L \Delta X + E \quad \text{или} \\ u_i = t_i + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \Delta x_j + e_i = t_i + L_{ij} \Delta x_j + e_i, \quad (1)$$

где  $U$  – вектор скорости в точке наблюдения;  $T$  – вектор скорости в начале отсчета;  $L$  – тензор гра-

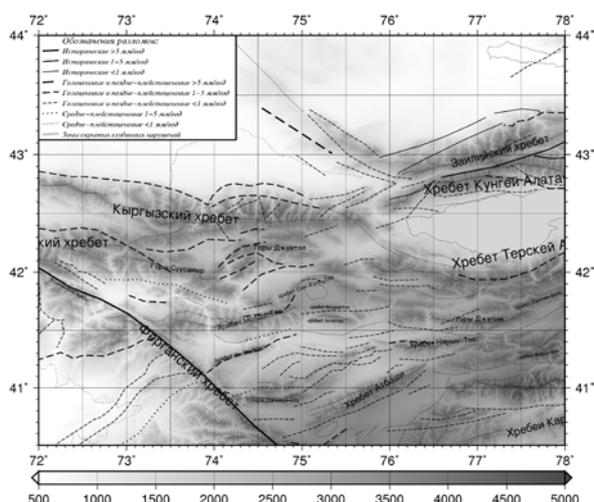


Рисунок 1 – Рельеф исследуемого региона (шкала – метры над ур. м.) с нанесенной на него картой геологических разломов согласно [5]

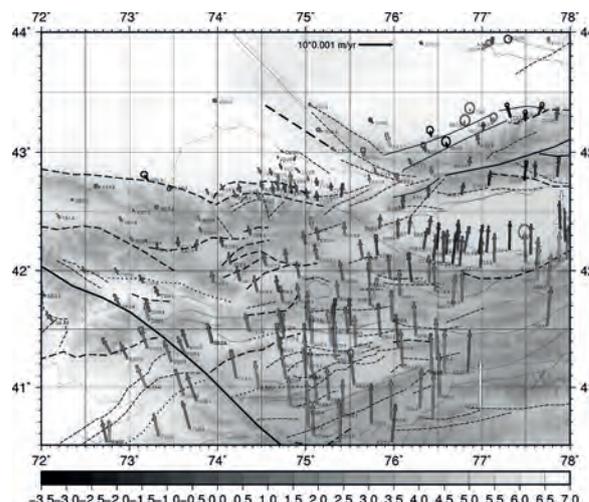


Рисунок 2 – Оцененные скорости пунктов Центральноазиатской сети GPS-наблюдений. Цветом показаны значения вертикальной компоненты скорости

диента скорости в начале отсчета (точке расчета);  $\Delta X$  – радиус-вектор точки наблюдения;  $E$  – остаточный член:

$$U = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}; T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} L_{xx} & L_{xy} \\ L_{yx} & L_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{\partial u_x}{\partial y} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} & \frac{\partial u_y}{\partial y} \end{bmatrix};$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}; E = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix}.$$

Тензор градиента скорости  $L$  разбивается на симметричную, и косимметричную части, характеризующие соответственно скорость деформации и скорость вращения земной коры вокруг точки расчета:

$$L = E + \Omega \text{ или } L_{ij} = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij} = \left( \frac{L_{ij} + L_{ji}}{2} \right) + \left( \frac{L_{ij} - L_{ji}}{2} \right).$$

Диагонализация тензора скорости деформации  $E$  дает собственные векторы (направления) и собственные значения, удовлетворяющие соотношению  $E \bar{v}_k = \lambda_k \bar{v}_k$ . Собственные значения  $\lambda_k$  являются главными значениями тензора скорости деформации (обычно обозначаются как  $e_{max}, e_{min}$ ). Соответствующие собственные векторы задают главные направления тензора скорости деформации.

На основе полученных главных значений тензора скорости деформации вычисляется скорость двумерной дилатансии  $\Delta_S$  (скорость изменения площади) и скорость горизонтально-сдвиговой де-

формации – максимальная возможная  $\Sigma_{max}$ , и кажущаяся  $\Sigma_{apparent}$ :

$$\Delta_S = e_{max} + e_{min}$$

$$\Sigma_{max} = e_{max} - e_{min}$$

$$\Sigma_{apparent} = \begin{cases} \min(|e_{max}|, |e_{min}|), & e_{max} \cdot e_{min} < 0 \\ 0, & e_{max} \cdot e_{min} \geq 0 \end{cases}.$$

Рассмотрим методику расчета тензора градиента скорости  $L$ . В уравнении (1)  $U$  и  $\Delta X$  определяются исходным каталогом скоростей, а  $T$  и  $L$  – неизвестные. Объединив неизвестные уравнения (1) в векторе  $\bar{l}$ , и рассматривая несколько точек наблюдений одновременно, можно перейти к следующей форме записи уравнения (1):

$$\bar{u} = A \bar{l} + \bar{e}, \tag{2}$$

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} u_{x(1)} \\ u_{y(1)} \\ u_{x(2)} \\ u_{y(2)} \\ \dots \\ u_{x(N)} \\ u_{y(N)} \end{bmatrix} \quad \bar{l} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ L_{xx} \\ L_{xy} \\ L_{yx} \\ L_{yy} \end{bmatrix}$$

вектор горизонтальных компонент скоростей в точках GPS-наблюдений      вектор параметров, содержащий компоненты тензора градиента скорости  $L$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta x_{(1)} & \Delta y_{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{(1)} & \Delta y_{(1)} \\ 1 & 0 & \Delta x_{(2)} & \Delta y_{(2)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{(2)} & \Delta y_{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & \Delta x_{(N)} & \Delta y_{(N)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{(N)} & \Delta y_{(N)} \end{bmatrix}$$

матрица модели содержит информацию о положении точек GPS-наблюдений относительно точки расчета.

Из-за того, что точность оценки скорости пункта GPS-наблюдения не очень высока, в вектор невязок  $\bar{e}$  в уравнении (2) входят не только компоненты остаточного члена  $E$  из уравнения (1), но и ошибки оценки исходных данных – вектора  $\bar{u}$ . Относительные ошибки оценки радиус-векторов точек наблюдений ( $\Delta x$  и  $\Delta y$ ) пренебрежимо малы.

Уравнение (2) является классическим уравнением линейной регрессии, для решения которого обычно применяется метод наименьших квадратов – МНК, минимизирующий квадратичную форму  $J = \bar{e}^T W \bar{e}$ . Компоненты матрицы весов  $W$  определяют, в каком соотношении будут минимизироваться отдельные компоненты вектора  $\bar{e}$ .

Так как для каждого пункта наблюдения известны не только оценки компонент вектора скорости  $\bar{u}$ , но и оценки их среднеквадратических ошибок  $\bar{\sigma}$ , то в качестве сомножителя матрицы  $W$  следует взять матрицу

$$W_{src} = \text{diag}(\sigma_{\bar{u}(1)}^{-2} \sigma_{\bar{u}(1)}^{-2} \sigma_{\bar{u}(2)}^{-2} \sigma_{\bar{u}(2)}^{-2} \dots \sigma_{\bar{u}(N)}^{-2} \sigma_{\bar{u}(N)}^{-2}).$$

Остаточный член  $E$  в уравнении (1) должен быть минимизирован в соответствии с дополнительными предположениями модели. Можно предположить, что поле скорости деформации в окрестности точки расчета тем менее однородно, чем больше рассматриваемая окрестность. В этом случае ожидаемое среднеквадратическое отклонение остаточного члена от нуля в уравнении (1) увеличивается с ростом длины радиус-вектора соответствующей точки наблюдения. Таким образом, одним из сомножителей матрицы весов  $W$  должна быть матрица:

$$W_{dist} = \text{diag}(f(d_{(1)}) f(d_{(1)}) f(d_{(2)}) f(d_{(2)}) \dots f(d_{(N)}) f(d_{(N)})),$$

$$d_{(i)} = \sqrt{\Delta x_{(i)}^2 + \Delta y_{(i)}^2}, \quad i = 1 | N,$$

где  $f(x)$  – некоторая убывающая функция. В [1] предложено использовать:

$$f = \exp\left(\frac{-2d}{d_0}\right),$$

где  $d_0$  – произвольная постоянная величина – радиус сглаживания.

Чтобы оценить распределение скорости деформации по исследуемой области, эту область можно покрыть равномерной сеткой точек и рассчитать тензор скорости деформации в каждом узле этой сетки. Именно такой подход предложен в [1] и будет использован в данной работе.

При допущении локальной однородности поля скорости деформации следует избегать экстраполяции и с осторожностью относиться к резуль-

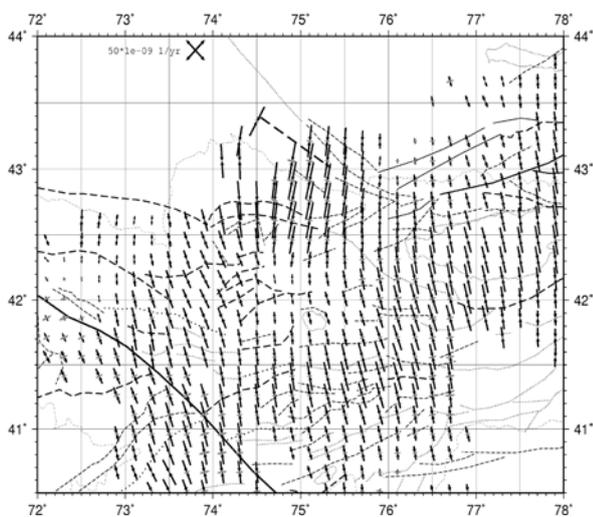


Рисунок 3 – Поле тензора скорости деформации. Черный цвет – сжатие, серый – растяжение

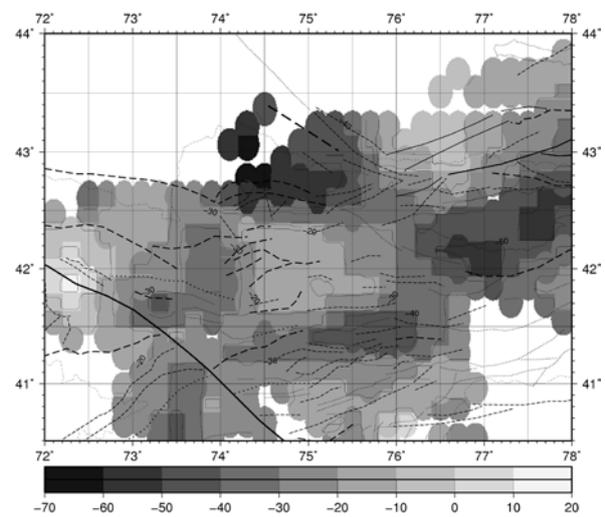


Рисунок 4 – Поле следа тензора скорости деформации (в масштабе  $10^{-9}$ ). Отрицательные значения говорят о сжатии

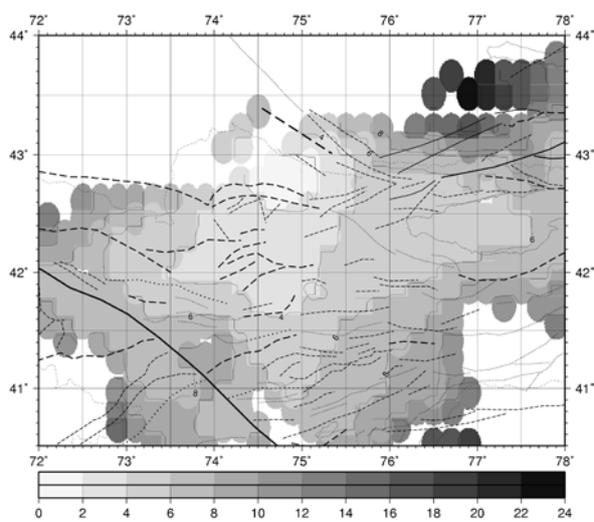


Рисунок 5 – Поле оцененных ошибок следа тензора скорости деформации ( $10^{-9}$ )

татам расчета в узлах, сильно удаленных от всех пунктов GPS-наблюдений. Для формализации этих требований вводится *критерий значимости результата расчета*. Из точки расчета проводятся лучи в направлении всех точек наблюдений, лежащих в радиусе  $2d_0$  от нее. Находится максимальный угол между двумя лучами, внутри которого нет других лучей. Результат расчета признается высоко значимым, если этот угол не превосходит  $90^\circ$ , средне значимым, если он не превосходит  $180^\circ$ , и низко значимым в других случаях.

**Построение двумерной модели современных деформаций земной коры Северного и Центрального Тянь-Шаня.** При расчете исследуемый регион был покрыт равномерной сеткой точек с шагом 16,7 км по направлениям север-юг и восток-запад. Использовался радиус сглаживания  $d_0 = 25$  км, приблизительно равный расстоянию между пунктами наблюдений в большей части территории исследуемого региона.

Для расчета поля тензора скорости деформации был использован разработанный автором программный комплекс SUR\_GPS\_STRAINS [6].

Поле диагонализированного тензора скорости современной деформации земной коры, рассчитанное по двумерной модели на выбранной сетке, показано на рисунке 3. Поле следа тензора (изменение площади) показано на рисунке 4. Поле оцененной ошибки следа тензора показано на рисунке 5. На всех рисунках показаны результаты с высоким и средним уровнем значимости.

На рисунках видно, что для исследуемого региона в целом характерно субмеридиональное сжатие, однако деформации распределены неоднородно.

Наибольшее сжатие происходит в Чуйской впадине по азимуту около  $15^\circ$  (поперек простирания впадины), и в Иссык-Кульской впадине по азимуту около  $-20^\circ$  (поперек простирания впадины). Меньшие по модулю уровни сжатия наблюдаются в Нарынской (азимут около  $-30^\circ$ , поперек простирания впадины) и Кетмень-Тюбинской впадины (азимут около  $-20^\circ$ , под углом около  $60^\circ$  к простиранию впадины).

В восточной части региона сжатие направлено поперек простирания геологических разломов. В западной части региона сжатие направлено под углом  $30-45^\circ$  по часовой стрелке к Таласо-Ферганскому разлому (свидетельствует о возможности правого сдвига), а западнее его – поперек простирания разломов, обрамляющих Ферганскую впадину.

Таким образом, для Северного и Центрального Тянь-Шаня характерно субмеридиональное сжатие. Максимальная скорость сжатия наблюдается в восточной части исследуемого региона, в Чуйской, Иссык-Кульской и Нарынской впадинах, причем ось сжатия направлена поперек простирания этих впадин.

Представленное в работе исследование частично поддержано грантом РФФИ № 15-05-06857а.

#### Литература

1. Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements / Z.-K. Shen, D.D. Jackson, B.X. Ge // Journ. of Geoph. Res. 1996. 101. P. 27957–27980.
2. Sagiya T., Miyazaki S. and Tada T. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan / T. Sagiya, S. Miyazaki and T. Tada // PAGEOPH. 2000. P. 2303–2322.
3. Allmendinger R.W., Reilinger R., Loveless J. Strain and rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia and the Altiplano / R.W. Allmendinger, R. Reilinger, J. Loveless // Tectonics. 2007. Vol. 26. TC3013, doi:10.1029/2006TC002030.
4. Pesci A., Teza G. Strain rate analysis over the central Apennines from GPS velocities: the development of a new free software / A. Pesci, G. Teza // Bollettino di Geodesia e Scienze Affini. 2007. 56. P. 69–88.
5. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / под ред. В.И. Макарова. М.: Научный мир, 2005. 400 с.
6. Мансуров А.Н. Структурное проектирование автоматизированной системы расчета поля скорости деформации земной коры по данным GPS-наблюдений / А.Н. Мансуров // Проблемы автоматизации и управления. 2012. № 2. Бишкек.