УДК 551.24.08::528.344::551.242.3

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПЛОСКОГО ТЕНЗОРА СОВРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПАМИРА И ТЯНЬ-ШАНЯ, РАССЧИТАННОЕ ПО ТРИПЛЕТАМ ПУНКТОВ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ

© 2022 г. А. Н. Мансуров

Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

E-mail: sur98gdirc@gmail.com

На основе каталога скоростей пунктов наблюдений Центрально-Азиатской GPS-сети рассчитано распределение значений тензора современной плоской деформации земной поверхности для большей части Памира и прилегающих тектонических формаций, а также участков Центрального и Западного Тянь-Шаня. Каталог скоростей был получен в результате обработки данных многолетних GPS-наблюдений, выполненных в Научной станции РАН в г. Бишкеке в ходе полевых экспедиций. Расчет распределения деформаций земной коры произведен на основе отдельных наборов из трех-четырех близлежащих пунктов GPS-наблюдений. Результаты расчета были сопоставлены с картами разломов и тектонических структур. В итоге выделены наиболее тектонически-активные в настоящее время области исследуемого региона и описан характер деформации в них. Поперек Главного Памирского Надвига происходит сильное укорочение с небольшим правым сдвигом. Каракульский грабен на Памире по крайней мере в северной своей части проявляет выраженную активность: поперек него (направление восток-запад) происходит удлинение. В северной части Конгур-Шанской системы сбросов (Восточно-Памирский Пулл-апарт) также происходит поперечное удлинение. Центральная и восточная части Таджикской Депрессии испытывают субширотное укорочение. В зоне сопряжения Таджикской Депрессии и Гиссарского хребта предположительно наблюдается правый сдвиг. Поперек простирания тектонических структур в области Нарынской впадины происходит укорочение. Область Токтогульского водохранилища испытывает субмеридиональное укорочение. В области Джумгальской и Кочкорской впадин наблюдается укорочение по азимуту северо-северо-запад. В Суусамырской впадине происходит субмеридиональное укорочение. В пределах Чуйской впадины выделяются две субширотно вытянутые зоны сильного субмеридионального укорочения.

Ключевые слова: Памир, Тянь-Шань, деформации, современная тектоника, GPS, ГНСС.

Для цитирования: *Мансуров А.Н.* Распределение значений плоского тензора современных деформаций земной поверхности Памира и Тянь-Шаня, рассчитанное по триплетам пунктов GPS-наблюдений // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14. № 1. С. 39–50. http://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_39.

Введение

Памир – расположенная в Центральной Азии горная система, представляющая собой направленный на север выступ Альпийско-Гималайского складчатого пояса. С севера и северо-запада Памир смыкается с юго-западной частью Тянь-Шаня – протяженной с запада на восток горной системы, огибающей Памир и Таримскую плиту с севера.

Тянь-Шань принято разделять на Западный – к западу от Таласо-Ферганского разлома, Центральный – между Таласо-Ферганским разломом и пиком Победы и восточный – к востоку от пика Победы [Миколайчук и др, 1995].

Памир, Тянь-Шань и соседние горные системы образовались в результате коллизии Индостанского континента с Евразией [Буртман, 2013]. В настоящее время Памир продолжает двигаться относительно окружающих его структур и изучение возникающих в результате этого движения деформаций земной коры представляет несомненный интерес. Исследования современной тектоники Памира и Тянь-Шаня

ведутся уже несколько десятилетий с использованием различных методов и подходов. С 2000-х годов применение высокоточных GPS-наблюдений позволило получить оценки скорости отдельных пунктов земной поверхности.

Настоящее исследование основано на наиболее полном наборе данных GPS-наблюдений за 2007–2011 года в Таджикистане, 1998-2012 года в Китайском Памире и 1994–2012 года в Тянь-Шане. Все эти данные были обработаны в программном комплексе GAMIT/GLOBK в ходе единой вычислительной процедуры, что гарантирует отсутствие ошибок, которые могли бы быть вызваны совмещением каталогов скоростей, полученных из разных источников. Наблюдения на территории Таджикистана и Киргизии и их обработка в системе GAMIT были проведены сотрудниками лаборатории GPS Научной станции Российской Академии Наук в г. Бишкеке. Заключительная обработка всех использованных данных (включая Китайский Памир) в системе GLOBK с получением каталога скоростей GPS пунктов была проведена автором в ходе его десятилетней работы в Научной станции РАН в г. Бишкеке.

Ранее на основе этого же каталога скоростей было проведено исследование [Мансуров, 2017], включавшее расчет распределения деформаций земной коры с использованием сглаживающей методики [Shen et al,, 1995], позволившей получить общую картину распределения значений тензора скорости современной деформации земной коры Тянь-Шаня, Памира и прилегающих территорий. В частности, было показано, что Памир в целом движется: относительно Таджикской депрессии – на запад (сталкивается с ней), относительно Юго-Западного Тянь-Шаня – на северо-запад (сталкивается и скользит), относительно Таримской плиты – на запад (расходится с ней).

Методика расчета

Метод расчета основан на вычислении тензора градиента скорости движения точек земной поверхности посредством решения системы алгебраических уравнений, выведенных из линейной части разложения Тейлора функции скорости точки от ее радиус-вектора. Земная поверхность в окрестности точки расчета значения тензора скорости деформации (далее – точка расчета) полагается приблизительно плоской, и производится пересчет географических координат пунктов в декартовы с использованием цилиндрической равнопромежуточной проекции.

Начало отсчета декартовой системы координат помещается в точку расчета деформации. Теперь скорость движения произвольной точки земной поверхности (а в частности – любой k-той точки наблюдения с координатами $\Delta P_{(k)}$) можно описать уравнением, основанным на линейной части разложения Тейлора функции скорости точки от ее радиус вектора $\vec{v} = F(\vec{r})$:

$$U_{(k)} = F(\Delta P_{(k)}) = T + \frac{dF}{d\vec{r}} \Delta P_{(k)} + E_{(k)} = T + G\Delta P_{(k)} + E_{(k)} \quad (1)$$

или, в скалярной форме:

$$u_{x(k)} = t_x + g_{xx}\Delta p_{x(k)} + g_{xy}\Delta p_{y(k)} + e_{x(k)} \quad (2)$$

$$u_{y(k)} = t_y + g_{yx}\Delta p_{x(k)} + g_{yy}\Delta p_{y(k)} + e_{y(k)} \quad (3)$$

где $U_{(k)}$ – вектор скорости в k-той точке наблюдения, T – вектор скорости в начале отсчета, G – тензор градиента скорости в начале отсчета, $\Delta P_{(k)}$ – радиус-вектор k-той точки наблюдения, $E_{(k)}$ – остаточный член разложения Тейлора, *x, y* – оси декартовой системы координат, направленные на восток и север соответственно, *k* – порядковый номер точки наблюдения в каталоге (рис. 1):

$$U_{(k)} = \begin{bmatrix} u_{x(k)} \\ u_{y(k)} \end{bmatrix}; \quad T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} \\ g_{yx} & g_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial x} & \frac{\partial F_x}{\partial y} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} & \frac{\partial F_y}{\partial y} \end{bmatrix}; \quad \Delta P_{(k)} = \begin{bmatrix} \Delta p_{x(k)} \\ \Delta p_{y(k)} \end{bmatrix}; \quad E_{(k)} = \begin{bmatrix} e_{x(k)} \\ e_{y(k)} \end{bmatrix}$$

В уравнении (1) $U_{(k)}$ и $\Delta P_{(k)}$ определяются исходным каталогом скоростей, а T и G – неизвестные. Объединив неизвестные уравнений (2) и (3) в векторе можно перейти к следующей форме записи этих уравнений:

$$\begin{bmatrix} u_{x(k)} \\ u_{y(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta p_{x(k)} & \Delta p_{y(k)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta p_{x(k)} & \Delta p_{y(k)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ g_{xx} \\ g_{xy} \\ g_{yx} \\ g_{yy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{x(k)} \\ e_{y(k)} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Затем, обозначив содержащую значения $\Delta p_{i(k)}$ матрицу как A, а вектор неизвестных – как $\overline{l}$ и объединив уравнения, описывающие движения N точек наблюдений, получаем:

$$\overline{u} = A\overline{l} + \overline{e}, \tag{5}$$

(5) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений, для решения которой применяется метод наименьших квадратов, минимизирующий компоненты вектора невязок $\overline{e}$.

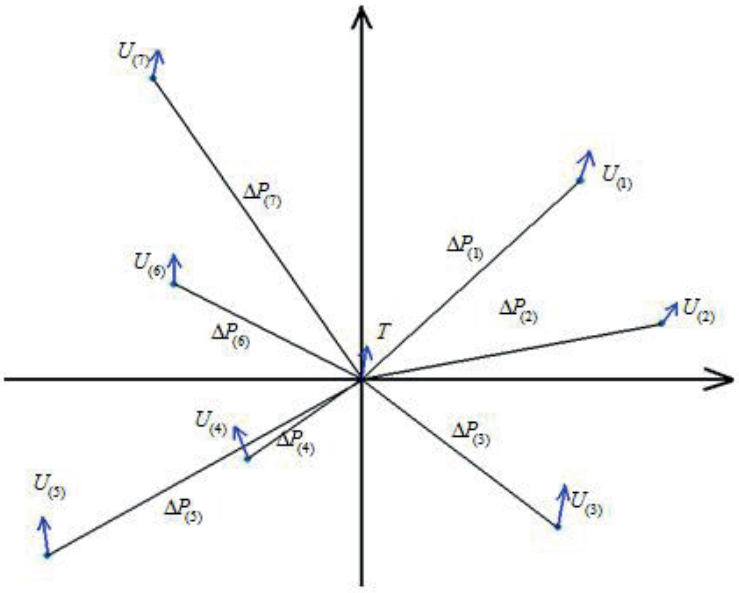

Рис. 1. Пример расположения пунктов наблюдений, иллюстрирующий смысл переменных ΔP (значение соответствует радиус-вектору – черной линии), U и T (значения векторов скорости – синие стрелки)

Так как для каждого пункта наблюдения известны не только оценки компонент вектора скорости $u_{x(k)}$ и $u_{y(k)}$, но и оценки среднеквадратических ошибок этих компонент $\sigma_{ux(k)}$ и $\sigma_{uy(k)}$, используется взвешенный МНК, согласно которому вектор параметров находится в результате минимизации квадратичной формы $J = \overline{e}^{\mathrm{T}} \cdot W \cdot \overline{e}$, где W – матрица весов:

$$W = diag\left(\sigma_{ux(1)}^{-2} \quad \sigma_{uy(1)}^{-2} \quad \sigma_{ux(2)}^{-2} \quad \sigma_{uy(2)}^{-2} \quad \ldots \quad \sigma_{ux(N)}^{-2} \quad \sigma_{uy(N)}^{-2}\right)$$

Согласно обобщенному МНК, итоговая формула для расчета вектора неизвестных имеет вид:

$$\overline{l} = (A^T W A)^{-1} A^T W \overline{u} \tag{6}$$

Из рассчитанного тензора градиента скорости G выделяется симметричная часть, характеризующая скорость горизонтальной деформации земной коры. Затем этот тензор скорости деформации диагонализуется и изображается на карте в точке расчета.

Очевидно, что в системе линейных уравнений (5) всегда ровно 6 неизвестных и 2*N уравнений (N – количество использованных для расчета точек наблюдений). Таким образом, при $N = 3$ получаем систему из 6 уравнений с 6 неизвестными, имеющую **единственное решение**, обращающее вектор невязок $\overline{e}$ в ноль. Если $N > 3$, то система уравнений переопределена, и значение тензора G будет зависеть также и от значений элементов матрицы весов W, с минимизацией невязок для GPS-пунктов с более точно оцененной скоростью движения. Заметим, что в вышеописанной модели значение G **не зависит** от положения начала отсчета (точки расчета тензора скорости деформации).

В данной работе для получения распределения значений тензора скорости деформации земной коры по площади исследуемых регионов использован **«триангуляционный»** подход. Он заключается в разбиении исследуемой области земной поверхности на участки, окруженные минимально необходимым количеством ($N \geq 3$) GPS-пунктов. Для расчета были выбраны наборы из трёх, реже четырёх или пяти пунктов. Тензор скорости деформации рассчитывается для каждого участка независимо от соседних, то есть подразумевается кусочно-постоянное распределение скорости деформаций. Более детальный анализ допущений и ограничений приведенной методики изложен в работе [Мансуров, 2021].

Распределение значений тензора скорости деформации Памира

Для всей исследованной территории Памира исходные данные (скорости пунктов GPS-наблюдений) и полученные результаты (значения тензора скорости деформации земной коры) изображены на рис. 2. Из этого рисунка можно понять соотношение величин скорости деформации в различных областях Памира. Три области интенсивных деформаций, обведенные на рисунке жирными черными прямоугольниками, рассмотрены в деталях ниже.

Северный Памир

Результат расчета значений тензора скорости деформации земной коры показан на рис. 3. Видно, что деформации наиболее интенсивны в узкой области Памира, непосредственно прилегающей к Тянь-Шаню. С этой полосой традиционно ассоциируется термин **«Главный Памирский Надвиг»**, описываемый некоторыми исследователями как один разлом, а другими, как, например [Shurr et al., 2014], – в виде полосы фрагментированных разломов. Из полученных в данной работе результатов видно лишь, что GPS-пункты KRK4, DAT4, T334, T504 и IKZ4 находятся к северу (со стороны Тянь-Шаня) от этой полосы, а пункт ALD4 – скорее к югу (со стороны Памира). Пункт BAB5, возможно, лежит внутри полосы, между двумя параллельными разломами, но от Памира его отделяет намного большая скорость деформации, чем от Тянь-Шаня. При этом к югу от пункта ALD4 также наблюдается значительное

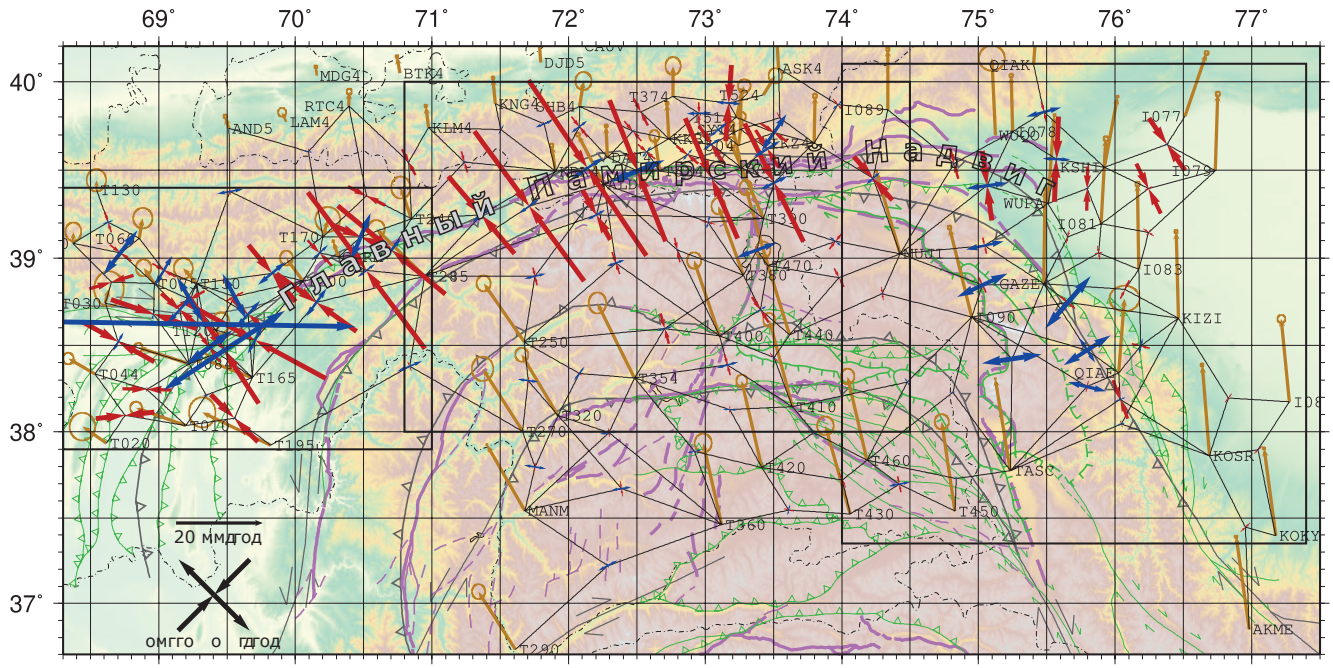

Рис. 2. Общая картина полученного распределения значений тензора скорости современных деформаций земной коры. Желто-коричневые стрелки – исходные оценки скоростей пунктов GPS наблюдений, эллипсы на их концах – неточности оценок. Главные направления и значения диагонализованного тензора скорости деформации показаны синими (положительное – удлинение) и красными (отрицательное – укорочение) стрелками. Черные линии соединяют изображение тензора с пунктами наблюдений, на основе которых произведен расчет. Черные стрелки – масштаб скоростей пунктов и тензоров скорости деформации

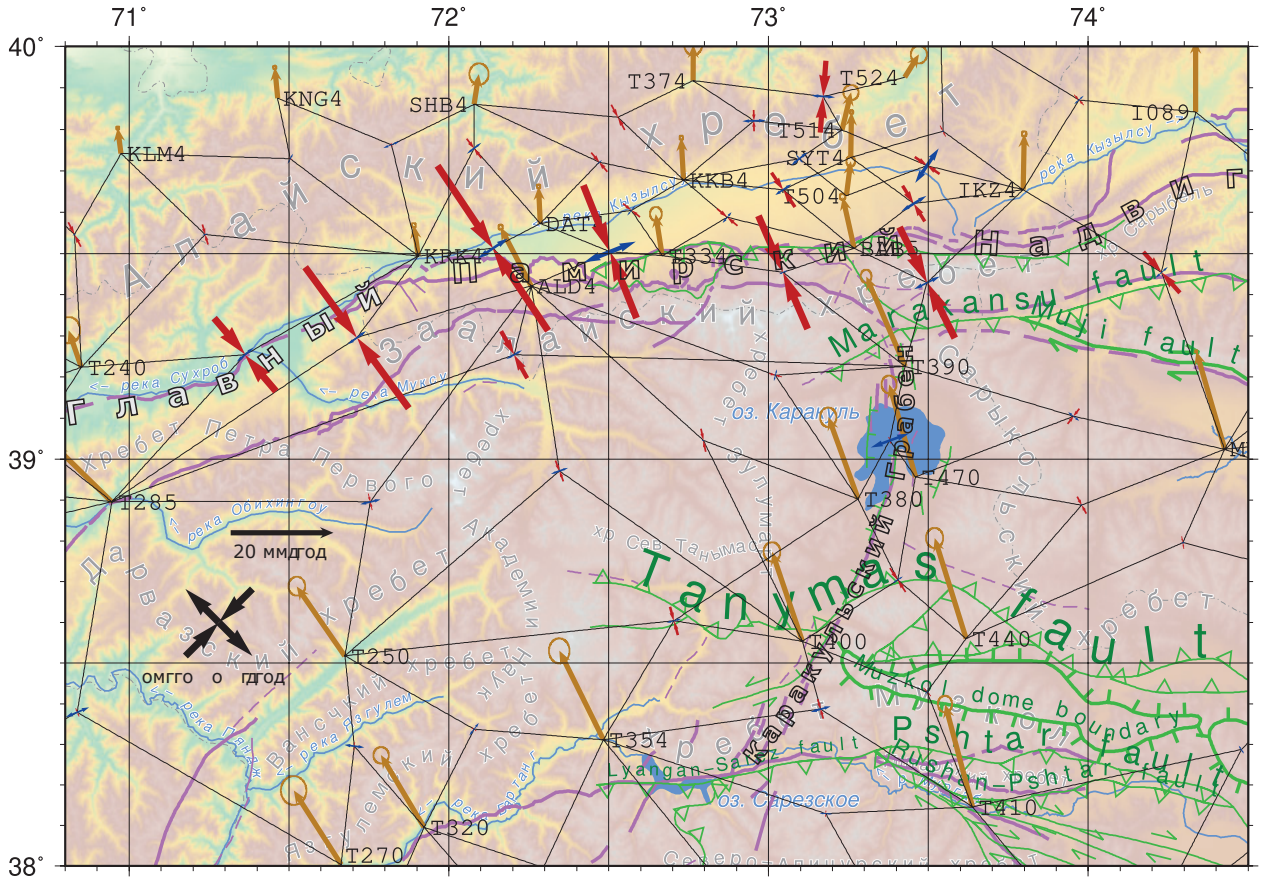

Рис. 3. Значения тензора скорости деформации земной коры Северного Памира. Зеленые линии – разломы по [Robinson et al, 2007]. Фиолетовые линии – активные разломы по [Shurr et al., 2014]

укорочение (треугольник T285-ALD4-T390), которое можно ассоциировать с разломом, изображенном вдоль гребня Заалайского хребта. Принадлежность этого разлома к Главному Памирскому Надвигу может быть предметом дискуссий.

В целом по данным GPS на Главном Памирском Надвиге происходит укорочение поперек его простирания с небольшой правосдвиговой компонентой. Более точно локализовать местоположение и детальный характер современной тектонической активности Главном Памирском Надвиге затруднительно ввиду малой плотности сети пунктов GPS-наблюдений.

Другой широко известной зоной современной тектонической активности на Памире является **Каракульский (Сарез-Каракульский)** Грабен, субмеридионально рассекающий озеро Каракуль и тянущийся далее на юго-юго-запад в направлении Сарезского озера. На рис. 3 он изображен также не одним разломом, а системой сбросов. Видно, что по данным GPS явно заметное расхождение между бортами грабена наблюдается лишь в области озера Каракуль, между пунктами T390 и T470 – на востоке и пунктом T380 – на западе.

В остальных областях Северного, Центрального и Южного Памира рассчитанные значения главных компонент тензора скорости современной деформации земной коры не превышают 20–50 миллиардных долей в год, в среднем сочетая субмеридиональное укорочение с субширотным удлинением.

Восточный Памир

Результат расчета значений тензора скорости деформации земной коры показан на рисунке 4. Можно выделить две зоны сильных деформаций, различных по своему характеру. На севере расположена субширотно вытянутая область сильного субмеридионального укорочения, начинающаяся на Главном

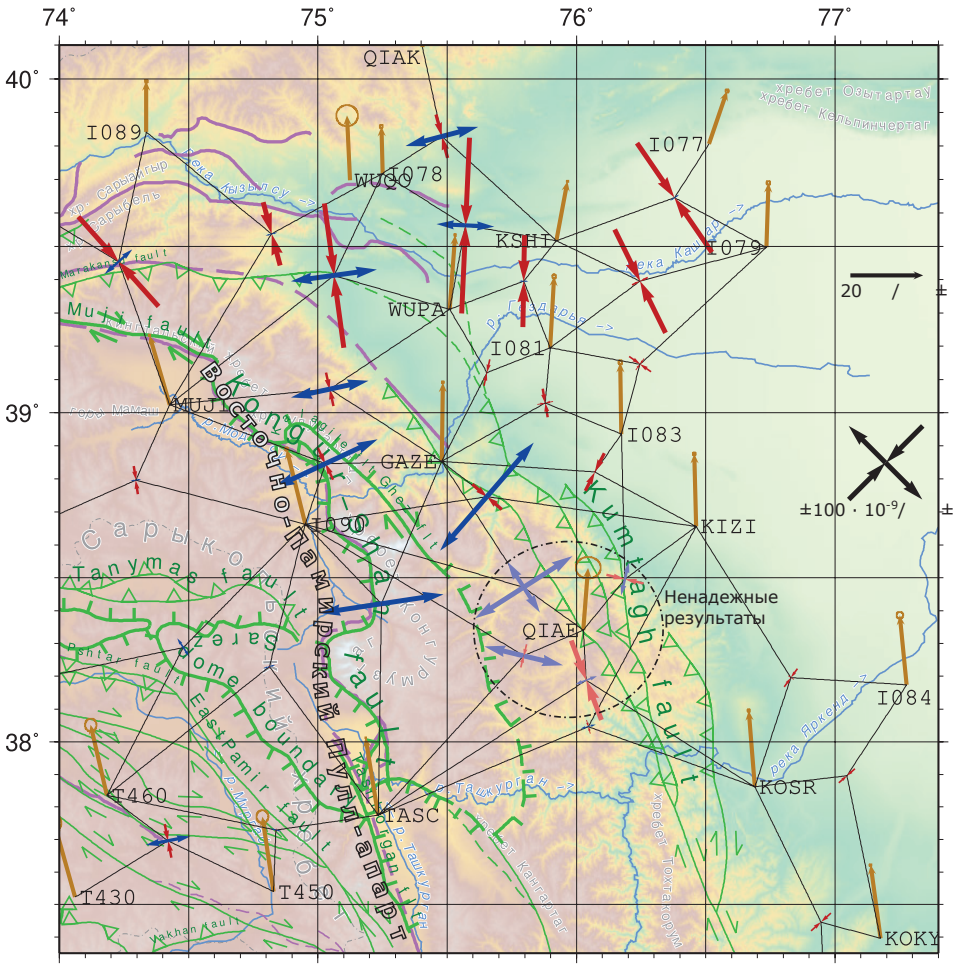

Рис. 4. Значения тензора скорости деформации земной коры Восточного Памира.
Зеленые линии – разломы по [Robinson et al., 2007]. Фиолетовые линии – активные разломы по [Shurr et al., 2014]

Памирском Надвиге и переходящая на прилегающую к Тянь-Шаню полосу Таримской плиты, показывая современную коллизию между ними.

Вторая область соответствует широко известной тектонической структуре – **Восточно-Памирскому Пулл-апарту,** характеризующейся расхождением поперек субмеридионально вытянутых грабенов и сбросов. В схеме разломов [Robinson et al., 2007] эта структура представлена двумя ярко выраженными сбросами: более протяженным Конгур-Шанским, лежащим севернее 38° с.ш., и Ташкорганским в южной части. Субширотное удлинение поперек северной части Конгур-Шанского сброса хорошо прослеживается по значениям тензоров скорости деформаций, подсчитанных между GPS пунктами MUJI и I090 к западу от него и WUPA и GAZE на востоке. Исследование деформаций в южной части затруднено тем, что ни на западе ни на востоке нет близко расположенных GPS пунктов кроме пункта QIAE, скорость которого оценена с большой ошибкой и результаты, полученные с использованием данных этого пункта специально помечены как ненадежные на рисунке 4. Очень близко к Ташкорганскому разлому расположен GPS пункт TASC. Если он действительно находится на восточном крыле разлома, то, по-видимому, в современную эпоху Ташкорганский ралом не проявляет активности. Если же этот пункт расположен на западном крыле, то оценить современные деформации на разломе по имеющимся GPS данным очень трудно из-за отсутствия близко расположенных пунктов восточнее разлома.

Западный Памир

В работе [Мансуров, 2017] на основании расчета сглаженного распределения скорости деформации были сделаны выводы о характере деформаций в зоне сопряжения Памира, Тянь-Шаня и Таджикской депрессии: прилегающая к Западному Памиру часть Таджикской депрессии испытывает субширотное укорочение, а севернее, вдоль полосы, где она переходит в Гиссарский хребет Тянь-Шаня, происходит право-сдвиговые деформации, ассоциированные с **Южно-Гиссарским право-сдвиговым разломом** из схемы главных разломов Памира и окружающих территорий.

На рис. 5 показаны результаты расчета деформации по тройкам GPS-пунктов в этой зоне на фоне

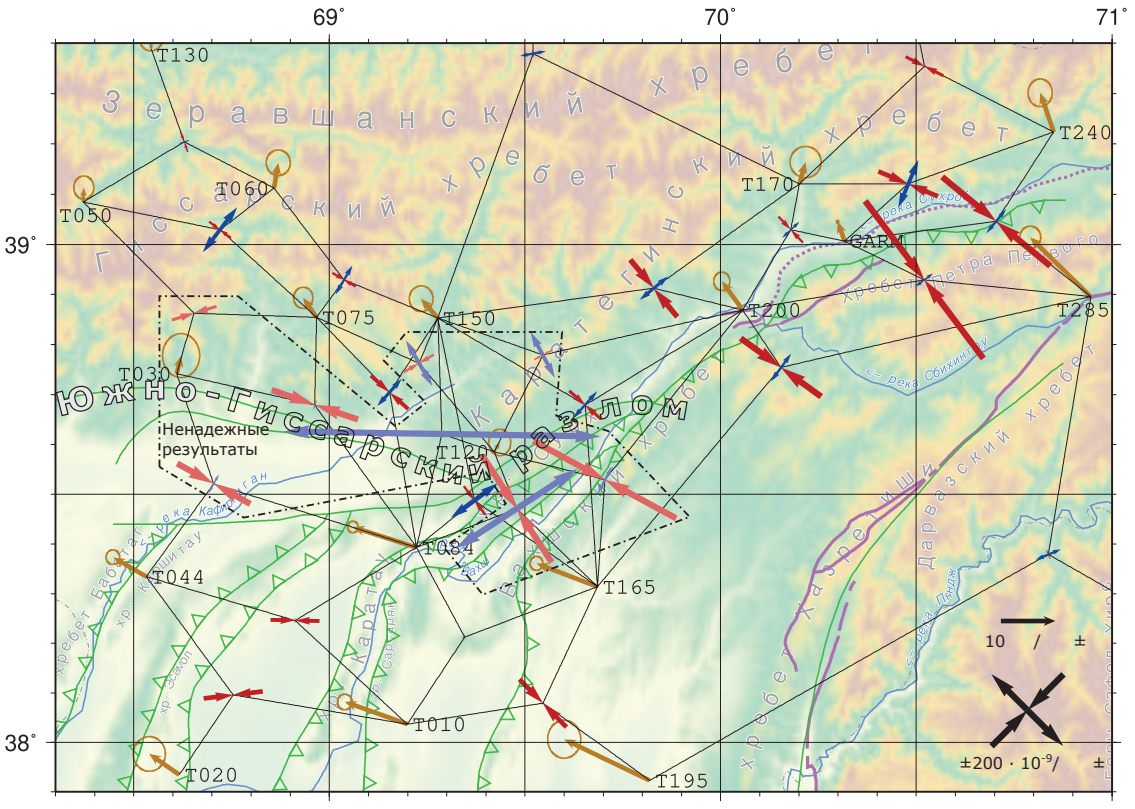

Рис. 5. Значения тензора скорости деформации земной коры на участках Западного Памира и Таджикской депрессии. Зеленые линии – разломы по [Буртман, 2013]. Фиолетовые линии – активные разломы по [Shurr et al., 2014]

более детальной карты разломов из [Буртман, 2013]. Видно, что в изображенной части Таджикской депрессии субмеридионально простираются несколько надвигов, поперек которых действительно происходит значительное субширотное укорочение.

В северной части Таджикской депрессии эти надвиги упираются в субширотно простирающуюся систему разломов, расположенную к югу от Гиссарского хребта. Однако расчет достоверного детального распределения деформации в этой области по имеющимся данным невозможен, так как ключевой GPS-пункт на западе T030 имеет слишком малую точность оценки скорости, а второй ключевой пункт T120 недостоверно сильно выбивается из общего тренда движения окружающих пунктов. Результаты, полученные с использованием этих двух пунктов, на рис. 5 помечены как ненадежные. При этом значения тензора скорости деформации этой области, рассчитанные по удаленным пунктам T075, T084, T150, T165 и T200, действительно соответствуют правому сдвигу по субширотно простирающимся разломам.

Южный и Срединный Центральный Тянь-Шань

На рис. 6 представлены результаты расчета тензора скорости деформации земной коры Южного и Срединного Центрального Тянь-Шаня, восточной оконечности Западного Тянь-Шаня, лежащего

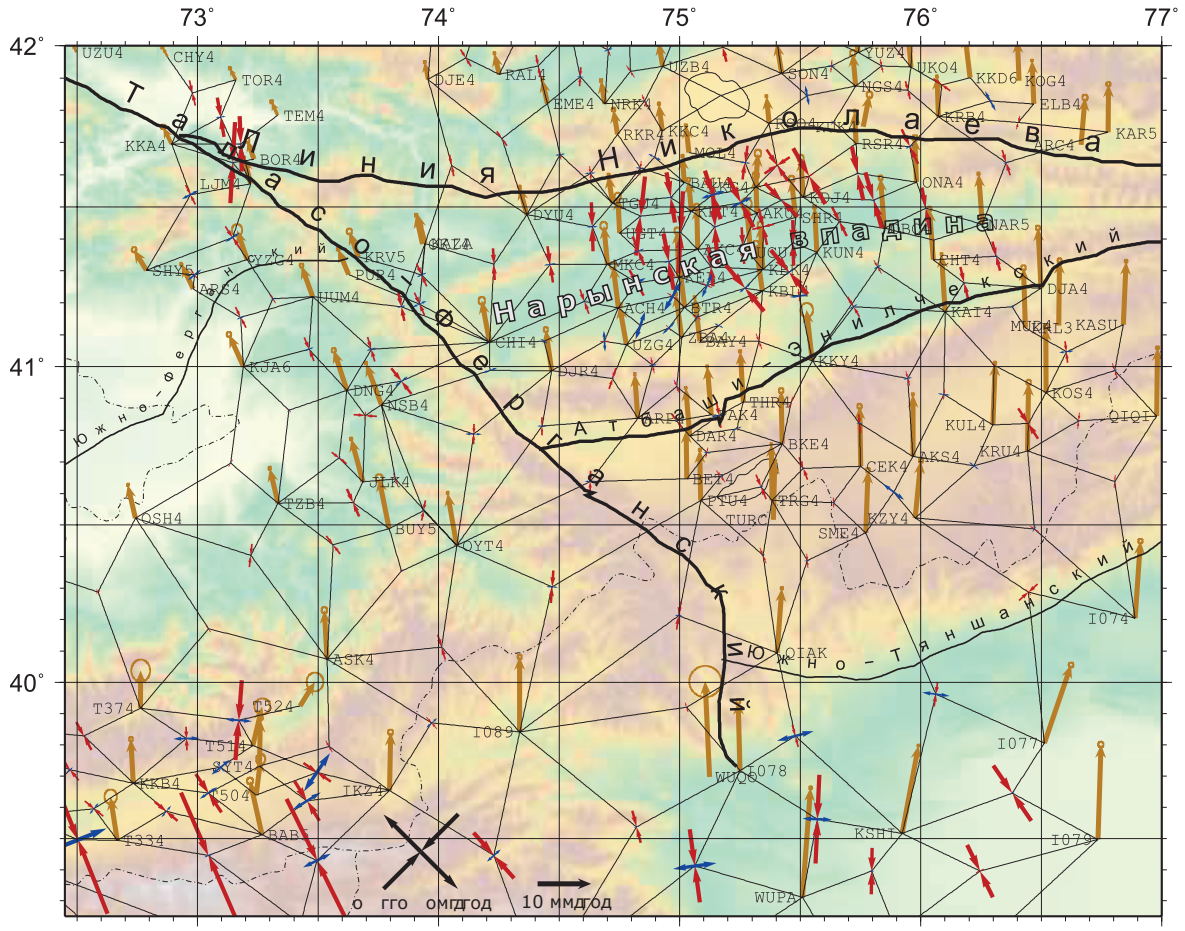

Рис. 6. Значения тензора скорости деформации земной коры на участках Южного и Срединного Центрального Тянь-Шаня и прилегающих к ним с юго-запада территорий.
Жирные черные линии – разломы по [Миколайчук и др., 1995]

к западу от Таласо-Ферганского разлома. В южной части рисунка показаны результаты расчета деформаций для зоны сопряжения Тянь-Шаня с Памиром и Таримской плитой, рассмотренные выше; видно, что скорость деформаций в той области намного выше, чем в Срединном Тянь-Шане.

Из рис. 6 видно, что в Срединном Тянь-Шане наиболее сильные деформации наблюдаются в Нарынской впадине, занимающей большую часть его территории. Преимущественный характер деформаций – укорочение поперек простирания впадины.

Другой заметной особенностью распределения деформации является значительное субмеридиональное укорочение в области слияния Линии Николаева с Таласо-Ферганским разломом. Возможно, современные активные деформационные процессы в этой области связаны с заполнением образованного около 50 лет назад Токтогульского водохранилища, находящегося в северной части этой области.

Северный Тянь-Шань

Результаты расчета значений тензора скорости деформации Северного Тянь-Шаня показаны на рис. 7.

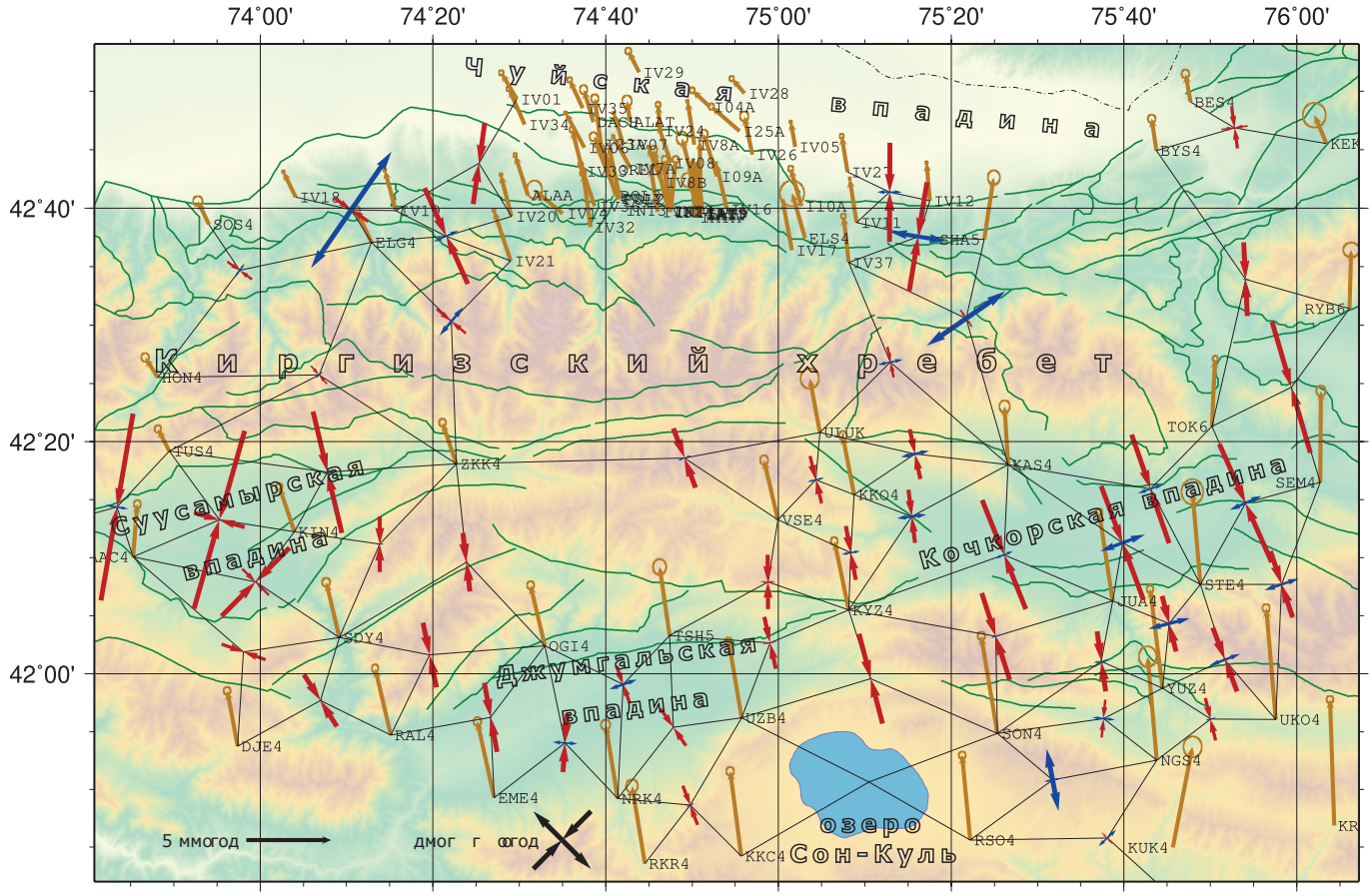

Рис. 7. Значения тензора скорости деформации земной коры в Северном Тянь-Шане. Зелеными линиями показаны разломы по С.И. Кузикову [Ребецкий и др., 2016]

Общий тип деформации остается субмеридиональным сжатием максимальная скорость которого (за исключением Чуйской впадины, центральная часть которой рассмотрена ниже отдельно) наблюдается в Суусамырской впадине. При этом направление сжатия меняется в разных частях Суусамырской впадины, являясь приблизительно перпендикулярным к направлению простирания этих частей. Значительное сжатие по азимуту -30° наблюдается в Кочкорской впадине и прилегающих к ней с юго-запада и северо-востока отрогам горных хребтов.

Деформации в восточной и западной части Чуйских предгорий Кыргызского хребта распределены неоднородно, направление сжатия отклоняется от меридиана и соседствует с растяжением. Вероятно, сделать какие либо достоверные заключения по полученным данным нельзя, так как в восточной

части сомнительна оценка скорости пункта SHA5, а в западной части сложные микротектонические структуры покрыты пунктами наблюдений недостаточно густо.

Чуйская впадина

Для получения карты распределения деформаций Чуйской впадины были использованы оценки скорости 37 пунктов GPS-наблюдений, лежащих в пределах 42.58°–42.87° с.ш., 74.47°–75.17° в.д. Ошибки оценки горизонтальной компоненты этих скоростей не превышают 0.15 мм/год. Результаты расчета значений тензора скорости деформации показаны на рис. 8.

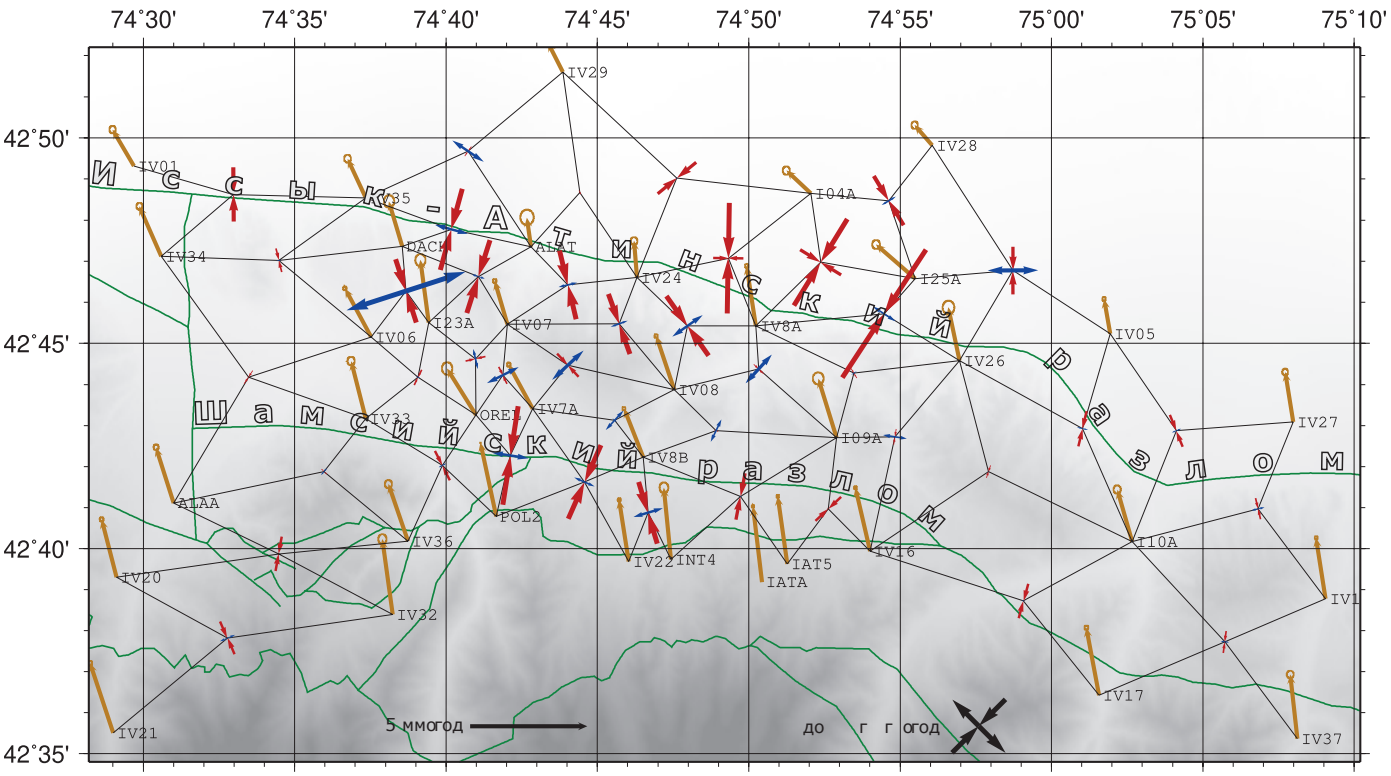

Рис. 8. Значения тензора скорости деформации земной коры на участках Чуйской впадины. Зелеными линиями показаны разломы по А.В. Миколайчуку [Современная геодинамика…, 2005]

Для Чуйской впадины в целом характерно сильное субмеридиоальное сжатие, при этом на рисунке 8 четко выделяются 2 области с его максимальными величинами. Северная из этих зон вытянута субширотно по Иссык-Атинскому разлому, между 74°37′–74°56′ в.д. Южная зона расположена к югу от восточной части Шамсийского разлома (южная граница этой зоны не может быть определена из-за отсутствия там пунктов наблюдений). Скорость деформации между этими зонами, а также к северу, востоку и к западу от них существенно ниже. Феномен наличия на Иссык-Атинском разломе относительно небольшой зоны сильного сжатия известен давно и описан в [Макаров и др., 2005]. Там же отмечено, что такие чередующиеся участки различной деформационной плотности создают условия для накопления значительных напряжений на концах этих участков, что может говорить о подготовке сильного землетрясения.

Заключение

В работе произведен детальный расчет распределения значений тензора скорости деформации земной коры для большей части территории Северного, Восточного и Западного Памира, Западного и Центрального Тянь-Шаня и прилегающих к ним участков соседних тектонических формаций. В

результате расчета выделены наиболее тектонически-активные области и описан характер деформации в них:

- Главный Памирский Надвиг – поперечное укорочение с правым сдвигом;
- Каракульский грабен – поперечное удлинение;
- Восточно-Памирский Пулл-апарт – поперечное удлинение в северной части;
- центральная и восточная части Таджикской Депрессии – субширотное укорочение, сопряжение Таджикской Депрессии и Гиссарского хребта – предположительно, правый сдвиг;
- Нарынская впадина – укорочение поперек простирания;
- Область Токтогульского водохранилища – субмеридиональное укорочение;
- Суусамырская впадина – субмеридиональное укорочение;
- Джумгальская и Кочкорская впадины – укорочение по азимуту северо-северо-запад;
- Чуйская впадина – две субширотно вытянутые зоны субмеридионального укорочения.

Финансирование

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания ИФЗ РАН.

Благодарности

Автор благодарен Научной станции РАН в г. Бишкеке за возможность продолжать пользоваться каталогом скоростей пунктов GPS-наблюдений, в подготовке которого автор участвовал в период работы на Научной станции. Автор выражает личную благодарность участникам полевых измерений лаборатории GPS НС РАН, заведующему лабораторией GPS НС РАН С.И. Кузикову, директору НС РАН А.К. Рыбину и своим нынешним наставникам и руководителям – сотрудникам Института Физики Земли Н.А. Сычевой и Ю.Л. Ребецкому.

Список литературы

Буртман В.С. Геодинамика Памир-Пенджабского синтаксиса // Геотектоника, 2013, № 1, с. 36–58. DOI: 10.7868/S0016853X13010025.

Мансуров А.Н. Непрерывная модель распределения современных деформаций Памиро-Тяньшаньского региона по данным GPS-наблюдений // Геология и геофизика, 2017, т. 58, № 7, с. 986–1005.

Мансуров А.Н. Влияние расположения пунктов GPS-наблюдений относительно активных тектонических структур на результат расчета деформации земной поверхности – вычислительный эксперимент. Современная тектонофизика: методы и результаты: Материалы Седьмой молодежной тектонофизической школы-семинара. ИФЗ, Москва, 11–12 октября 2021 г.

Миколайчук А.В., Котов В.В., Кузиков С.И. Структурное положение метаморфического комплекса Малого Нарына и проблема границы Северного и Срединного Тянь-Шаня // Геотектоника, 1995, № 2. С. 75–85.

Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И. Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня // Геология и Геофизика 2016. Т. 57, № 6. С. 1225–1250. DOI:10.15372/GiG20160609.

Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Под ред. В.И. Макарова – М. : Научный мир, 2005. 400 с., 32 с. цв. вклейки. ISBN 89 176 321 4.

Robinson A.C., Yin A., Manning C.E., Harrison T.M., Zhang S., Wang X. Cenozoic evolution of the eastern Pamir: implication for strain accommodation mechanisms at the western end of the Himalayan Tibetan orogen // Bull. Geo. Soc. Am. 2007. Vol. 119. P. 882–896.

Schurr, B., L. Ratschbacher, C. Sippl, R. Gloaguen, X. Yuan, and J. Mechie, Seismotectonics of the Pamir // Tectonics, 2014 V. 33. P. 1501–1518. DOI:10.1002/2014TC003576.

Shen Z.-K., Jackson, D.D., Ge, B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // Journal of Geophysical Research, 1996, 101, p. 27957-27980.

DISTRIBUTION OF CONTEMPORARY EARTH SURFACE'S 2D STRAIN TENSOR IN PAMIR AND TIEN-SHAN COMPUTED BY TRIPLETS OF GPS-OBSERVATION POINTS

A. N. Mansurov

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: sur98gdirc@gmail.com

Based on catalogue of velocities of Central Asian GPS network's observation points we computed a distribution of values of contemporary 2D strain tensor of Earth surface for most part of Pamir and its neighbor tectonic formations and also for parts of Central and Western Tien-Shan. The velocity catalogue was gained as the result of processing data from many years of GPS observations conducted in the framework of field expeditions by Research station of Russian Academy of Sciences in Bishkek. The computation of Earth crust strain was done using data from sets of three or four neighbor GPS points for computation of each single strain tensor value. By matching the results of computations against maps of regional faults and tectonic structures we mark out the most tectonically active areas and describe types of contemporary surface deformations within them. The most rapid deformation within the region of study is shortening with moderate right lateral shift across the Main Pamir Thrust. The northern part of Karakul Graben at Pamir show moderate tectonic activity as transversal (east-west directed) extension. Normal faults in Kongur-Shan (East Pamir Pull-apart) also undergo transversal extension in their northern part. At central and eastern parts of Tajik Depression we observe latitudinal shortening while in zone of conjunction between Tajik Depression and Gissar ridge we have presumably right lateral shift. There is also significant shortening across main tectonic structures of Naryn basin. Area around Toktogul water storage reservoir undergoes longitudinal shortening. At Jumgal and Kochkor basins we have shortening along north-north-west direction as well as longitudinal shortening across Suusamyr basin. Inside Chu basin we clearly observe two latitudinally-elongated zones rapid longitudinal shortening.

Keywords: Pamir, Tien-Shan, deformations, contemporary tectonics, GPS, GNSS.