УДК 551.242.3

НЕПРЕРЫВНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПАМИРО-ТЯНЬШАНЬСКОГО РЕГИОНА ПО ДАННЫМ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ А.Н. Мансуров

Научная станция РАН, 720049, Бишкек, Кыргызстан

Рассматривается построение деформационных моделей земной коры Памиро-Тяньшаньского региона. Существуют два подхода к построению таких моделей — блочный и непрерывный. В данной работе использован метод построения непрерывной деформационной модели, основанный на вычислении поля двумерного тензора скорости деформации земной коры. Суть метода заключается в независимом вычислении тензора градиента скорости в каждой точке расчетной сетки посредством решения переопределенной системы линейных уравнений, основанных на линейной части разложения в ряд Тейлора функции скорости точки среды от ее радиус-вектора. Приводится подробное описание метода, включающее предложенный автором метод оценки достоверности результата в каждой точке расчетной сетки. Рассмотрены характеристики деформационной модели для территории Памиро-Тяньшаньского региона, рассчитанной автором с использованием этого метода по данным каталога скоростей движений земной поверхности 506 пунктов Центрально-Азиатской сети GPS-наблюдений. К наиболее заметным особенностям полученного поля деформаций следует отнести субмеридиональное сжатие крупнейших впадин Тянь-Шаня и зоны сопряжения Памира и Тянь-Шаня, а также свидетельства смещения восточной и западной границ Памира на запад относительно Таримской плиты и Таджикской депрессии.

Деформация, тензор, кора, GPS-скорости, 2D/3D модель, взвешенный метод наименьших квадратов, программный комплекс.

A CONTINUUM MODEL OF PRESENT-DAY CRUSTAL DEFORMATION IN THE PAMIR-TIEN SHAN REGION CONSTRAINED BY GPS DATA

A.N. Mansurov

We present a new model of crustal deformation in the Pamir–Tien Shan region. There are two different ways of assessing the deformation: block and continuum modeling. In this study we adopt a continuum modeling approach, which is based on computation of the two-dimensional strain rate tensor field of the Earth's crust. This approach allows independent computation of the deformation at any point of the computation grid by solving an over-constrained system of linear algebraic equations based on the linear term of the Taylor series expansion of any geoenvironment point velocity function about its radius-vector. We propose a detailed description of this method including a significance criterion introduced by the author for estimating the reliability of modeling results. We discuss the parameters of this deformation model for the Pamir–Tien Shan region, computed from the GPS velocity data measured at 506 sites of the Central Asian GPS network. The most distinctive features of the estimated strain field are N–S shortening of the largest basins in the Tien Shan and at the junction between the Pamir and Tien Shan, as well as the westward motion of the eastern and western boundaries of the Pamir relative to the Tarim plate and Tajik depression.

Deformation, tensor, crust, GPS velocities, 2D/3D model, weighted least-squares method, software

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.

Изучение современных движений и деформаций требует проведения высокоточных геодезических измерений смещений реперов на специально оборудованных наблюдательных станциях с применением современного высокоточного геодезического оборудования.

С начала своей деятельности Научная станция РАН в г. Бишкек осуществляет геодезические исследования, связанные с изучением смещений и деформаций земной поверхности. В течение двух последних десятилетий наряду с традиционными геодезическими наблюдениями стали активно использоваться методы спутниковой геодезии. Спутниковые технологии благодаря своей высокой масштабируемости позволяют получать информацию о деформациях земной поверхности различного простран-

© А.Н. Мансуров[⊠], 2017

[™]e-mail: sur98ke@gmail.com

ственно-временного масштаба, что было затруднительно сделать ранее с помощью традиционных геодезических измерений. С 1992 г. силами Научной станции и других организаций осуществляются геодезические измерения положения точек земной поверхности с применением GPS-технологии в более чем 600 специально оборудованных пунктах на территории Центрально-Азиатского региона. Изначально эти пункты входили в состав отдельных геодезических сетей, обслуживаемых различными организациями, однако впоследствии благодаря сотрудничеству по обмену данными GPS-измерений, эти сети были фактически объединены в Центрально-Азиатскую GPS-сеть, ведущую роль в развитии и измерении которой играет НС РАН [Зубович, 2001]. Для проведения спутниковых геодезического класса фирм Торсоп, Trimble, Ashtech и других. Результаты измерений обрабатываются при помощи программного пакета GAMIT/GLOBK [Herring et al., 2009], который позволяет получить каталог высокоточных оценок скоростей пунктов GPS-наблюдений.

Наличие такого объема экспериментальных данных вкупе с достаточной плотностью сети GPSнаблюдений позволяет детально исследовать деформационные процессы земной поверхности на различных пространственно-масштабных уровнях. Для моделирования деформационных процессов в земной коре в настоящее время в основном применяют два различных подхода [Shen et al., 2005]:

1. Блочное моделирование. Описывает деформационный процесс в земной коре как локализованный на границах недеформируемых блоков. Для качественного моделирования желательно иметь несколько точек наблюдений в пределах каждого блока.

 Непрерывное моделирование. Описывает деформационный процесс в земной коре как непрерывный и распределенный по всей поверхности Земли. Большая концентрация деформации в некоторой области означает либо наличие одного крупного активного разлома, либо наличие распределенной сети мелких разломов, разделяющих блоки небольшого размера.

В работе [Shen et al., 2005] также приводится краткое описание этих двух подходов. При этом авторы предполагают, что при уменьшении размеров блоков в блочной модели для описания деформации на глубине можно применять непрерывную модель.

Для региона Центрального Тянь-Шаня имели место, как минимум, два исследования деформационных процессов с использованием блочного моделирования результатов GPS-наблюдений. В работе [Миди, Хагер, 2001] блоки заданы на основе геологических данных. Для моделирования поля скоростей был выбран метод, позволяющий разбивать рассматриваемые области на конечное число блоков. В модели детально рассматривается накопление упругих деформаций, связанных со сцеплением бортов разломов, так что их воздействие распространяется не только на данный блок, но также и через границы разломов. Таким образом, в модели, состоящей из дискретных перемещающихся блоков, поле поверхностных скоростей непрерывно. Геометрия модели была определена путем деления области на ряд блоков, ограниченных разломами, которые считаются активными в региональном плане. С использованием имевшегося в то время экспериментального поля скоростей пунктов GPS-наблюдений были вычислены скорости подвижки на границах блоков и показано, что модельное поле скоростей хорошо согласуется с наблюдениями.

В работе [Кузиков, Мухамедиев, 2010] жесткие блоки выделялись статистически на основе пренебрежимо малой деформации внутри них. Для этого был введен математический критерий суммарного отклонения скоростей соседних пунктов наблюдений от такого состояния, при котором эти точки могли бы принадлежать абсолютно недеформируемому блоку. Определение того, какие пункты наблюдений считать соседними, было задано триангуляцией сети пунктов наблюдений. Для выделения блоков, называемых автором «квазижесткими доменами», осуществлялась итерационная вычислительная процедура, изначально приписывающая каждой точке наблюдения отдельный блок, а затем объединявшая соседние блоки с условием минимизации вышеописанного критерия. Эта процедура использует доверительные интервалы *t*-критерия Стьюдента, выбирая которые можно варьировать допустимыми отклонениями внутри блоков от идеально жесткого состояния. При более высоких требованиях жесткости размеры блоков могут уменьшаться, при увеличении уровня допусков отклонений векторов скорости от жесткого тела — размеры выделяемых доменов могут увеличиваться.

Результаты, полученные в этих работах, свидетельствуют о том, что трудно предложить единую блочную модель Тяньшаньского региона. Возможно, это связано с тем, что реальные размеры жестких блоков малы, и плотность сети GPS-наблюдений недостаточна для их устойчивого выделения.

В то же время оценка характеристик деформации Тянь-Шаня с использованием двумерных непрерывных моделей была выполнена в работах [Зубович, 2001; Костюк, 2008; Зубович, Мухамедиев, 2010].

В исследовании [Зубович, 2001] двумерное моделирование деформаций не являлось основной задачей исследования, и автор ограничился вычислением дивергенции поля скоростей пунктов GPSнаблюдений. На карте дивергенции автором были выделены зоны сжатия: Чуйская, Суусамырская, Кетмень-Тюбинская, Иссык-Кульская и Кочкорская впадины. В статье [Костюк, 2008] проведен расчет поля тензора скорости деформации при помощи программного обеспечения [Sagiya et al., 2000], реализующего модифицированный алгоритм вычисления тензоров скорости деформации и вращения с помощью взвешенного метода наименьших квадратов [Shen et al., 1996]. В расчет вошли данные GPS-наблюдений с 1995 по 2006 г. На полученной карте дивергенции выделяются зоны сжатия: Чуйская, Суусамырская, Иссык-Кульская и Кочкорская впадины.

В работе [Зубович, Мухамедиев, 2010] была предпринята попытка увеличить пространственное разрешение метода, использованного в [Костюк, 2008], благодаря построению расчетной сетки на основе блоков, разделенных отрезками, проводимыми между близкими точками наблюдений. Приведено математическое обоснование этого подхода и выполнен расчет по сетке, полученной на основе имевшегося тогда каталога скоростей. Результат в общем согласуется с ранними [Костюк, 2008], расчетная область расширена на запад и юго-запад. Детализация увеличилась, однако, так как использованный подход чувствителен к отсутствию ошибок скоростей для всех пунктов, достоверность отдельных деталей распределения деформаций остается спорной.

Отметим, что, несмотря на различную методику расчета, результаты моделирования, полученные автором [Зубович, 2001; Костюк, 2008; Зубович, Мухамедиев, 2010], в значительной мере схожи.

Одно из исследований кинематики Тянь-Шаня и Памира по последним данным представлено в [Zubovich et al., 2010]. В нем для анализа поля скоростей пунктов использована одномерная модель, деформации рассчитывались для отдельных профилей, результат сопоставлялся с геологическими данными.

На настоящий момент одним из наиболее авторитетных источников сведений о кинематике современных деформаций по всему миру является модель, изложенная в [Кreemer et al., 2014]. Двумерный тензор скорости деформации рассчитан на поверхности геоида на сетке с шагом 0.25° по долготе и 0.2° по широте. Были заданы априорно недеформируемые ячейки и ячейки, в которых допускалась деформация. К последним относились ячейки на границах тектонических плит и ячейки внутри нескольких обширных зон сочленения плит и их фрагментов. Одна из таких зон, простираясь от Средиземного моря до Тихого океана, включает в себя Тань-Шань и Памир. На одном из рисунков детально показано полученное распределение скорости деформации на территории Тянь-Шаня (за исключением Восточного), Памира, Гиндукуша и западной части Гималаев. Наибольшие значения 2-го инварианта тензора деформации получены по северному контуру Памира, в Чуйской, Иссык-Кульской и Кетмень-Тюбинской впадинах, что вполне согласуется с другими вышеизложенными исследованиями по непрерывным моделям.

С учетом вышесказанного, использование в работе непрерывного подхода к моделированию деформационных процессов земной коры исследуемых областей Центрально-Азиатского региона на основе данных GPS-наблюдений обосновано следующими аргументами:

— отсутствие однозначных представлений о структуре активных разломов, которые должны служить границами блоков;

низкая устойчивость статистических методов выделения блоков;

в предположении о небольших размерах реальных блоков:

— недостаточная плотность сети наблюдений для устойчивого выявления блоков малого размера;
 — трудность сопоставления модели «раздробленной» коры с результатами других геофизических методов.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходные данные для расчета скорости деформации представляют собой поле векторов скорости движения земной поверхности Тянь-Шаня, Памира, южной части Казахстанского щита и краевых зон западной половины Таримской плиты, полученное по результатам измерений Центрально-Азиатской GPS-сети в период с 1994 по 2012 г. Положение пунктов GPS-сети, для которых была получена оценка скорости, показано на рис 1.

Обработка GPS-данных осуществлялась в Научной станции РАН с помощью комплекса программ GAMIT/GLOBK Массачусетского технологического института США [Herring et al., 2009]. Обработка проводилась согласно стандартной процедуре в три этапа.

На первом этапе при помощи GAMIT на основе фазовых измерений GPS-сигнала, принимаемого установленными на нескольких реперах антеннами, были получены посуточные решения, содержащие оценки геоцентрических координат этих реперов и их матрицу ковариации при свободных ограничениях на координаты. Эту задачу GAMIT решает методом двойных разностей (для устранения ионосферных задержек) с учетом зенитных задержек на каждом репере, орбит GPS-спутников и ориентации Земли. При этом в обработку на первом этапе были включены данные с полевых GPS-измерений, данные с постоянно действующих станций Центрально-Азиатской GPS-сети, а также данные с 8—12 постоянно



Рис. 1. Расположение пунктов Центрально-Азиатской сети GPS-наблюдений.

Разломы, по [Современная геодинамика..., 2005], скорости смещения (мм/год): *I*—3 — исторические: *I* > 5, 2 — 1—5, 3 < 1; 4—6 — голоценовые и позднеплейстоценовые: 4 >5, 5 — 1—5, 6 <1; 7, 8 — среднеплейстоценовые: 7 — 1—5; 8 <1; 9 — зоны скрытых глубинных нарушений. Штрихпунктирными линями показаны государственные границы.

действующих станций всемирной IGS-сети. Последние необходимы для надежной привязки регионального решения к глобальной системе отсчета скоростей.

На втором этапе было произведено комбинирование региональных посуточных решений, полученных на первом этапе, с глобальными решениями, рассчитываемыми Scripps Institution of Oceanography (SIO), а также осреднение по временным интервалам 4—5 сут. Результат второго этапа также содержит оценки геоцентрических координат реперов и их матрицу ковариации при свободных ограничениях на координаты. Затем на каждое из решений, полученных на втором этапе, были наложены жесткие ограничения по координатам большого количества реперов SIO-сети согласно глобальной системе отсчета ITRF2008EURA, содержащей такие согласованные данные о положении реперов IGS-сети, при которых смещение и вращение стабильной части Евразийской плиты минимально. Это позволило получить «первичные» («черновые») временные ряды координат реперов и выделить в них выбросы и скачки (здесь скачок — «сдвиг» одной части временного ряда относительно другой по оси значений при сохранении линейного коэффициента изменения значения со временем).

Затем на основе просмотра временных рядов проводилась очистка и правка входных данных: данные, приводящие к сильным выбросам на временных рядах, были исключены из расчетов; а в случае скачков во временных рядах координат репера, положения этого репера до и после скачка были признаны независимыми друг от друга (однако в дальнейшем при оценке скорости соблюдалось требование равенства скоростей репера до и после скачка). Такой подход к обработке выбросов и скачков является общепринятым стандартом, причем для станций IGS-сети, необходимых для привязки к системе отсчета и стабилизации, удалялись даже слабые выбросы и скачки, вызванные землетрясениями (это необходимо для соблюдения линейной модели движения, принятой в GLOBK и отраженной в априорных оценках глобальной системы отсчета ITRF2008EURA); а для реперов, расположенных в исследуемом регионе, были удалены только сильные выбросы и скачки, очевидно, вызванные огрехами измерений. После редакции исходных данных расчет второго этапа был повторен, и такие повторения продолжались до тех пор, пока во временных рядах координат реперов наблюдались неприемлемые выбросы и скачки.

На третьем этапе скомбинированные решения, полученные на выходе второго этапа, были пропущены через фильтр Калмана, реализованный в GLOBK, что дало согласованный набор координат и скоростей всех реперов региональной сети. Здесь также была использована система отсчета ITRF2008EURA, но в отличие от второго этапа, для «стабилизации» было выбрано только 28 реперов IGS-сети. Такой расчет был проведен в две итерации: каталог координат и скоростей всех реперов региональной сети, являющийся результатом первой итерации, был использован в качестве априорных данных (системы отсчета) для второй итерации.

На третьем этапе также был использован реализованный в модуле glorg пакета GAMIT/GLOBK подход, позволяющий уравнять скорости реперов, находящихся на расстоянии не более 10 м друг от друга. Это позволило получить более надежные оценки скорости для пунктов с несколькими реперами, в которых сначала измерялся один репер, а начиная с какого-то момента измерения (по разным причинам) были перенесены на другой репер. Также этот подход позволил соблюсти единство оценки скорости репера, имеющего скачки на временных рядах координат.

Для автоматизации действий по контролю целостности GPS-данных и передаче их от одного модуля пакета GAMIT/GLOBK к другому автором была разработана и использована программная система SUR GPS GLOBK PROCESSING [Мансуров, 2013, 2015].

В итоговый каталог вошли оценки скоростей 506 пунктов Центрально-Азиатской сети GPSнаблюдений. Поле этих скоростей показано на рис 2.

Перейдем к рассмотрению методической части работы. В следующем разделе излагается метод, позволяющий по исходному каталогу скоростей пунктов наблюдений рассчитать тензор скорости деформации земной коры в любой ее точке, получить скалярные параметры деформации и оценить достоверность такого расчета.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В данной работе используется математическая модель, впервые предложенная в исследовании [Shen et al., 1996] для анализа деформационной кинематики участков земной поверхности различного масштаба — от огромных регионов коллизий тектонических плит [Allmendinger et al., 2007] до отдельных оползней размерами сотни метров [Teza et al., 2008]. Далее приводится описание математической модели и основанной на ней методики расчета скорости деформации земной коры.

Переход к декартовой системе координат и выбор расчетной сетки

На практике в большинстве случаев положение и скорости пунктов GPS-наблюдений задаются в географической системе координат. Так как в изложенной ниже математической модели используется декартова система координат, следует определиться с методом перехода от одной системы к другой.





В данной работе регион расчета невелик как по широте, так и по долготе, что позволяет приближенно считать поверхность земной коры плоской, направление на север во всех точках — одинаковым и длину градуса долготы и широты — постоянной. При таких допущениях для пересчета координат выбирается точка, близкая к центру масс пересчитываемых точек и объявляется началом отсчета условной прямоугольной системы координат. В этой точке вычисляется длина градуса широты и долготы, а затем декартовы координаты других точек вычисляются как разности их географических координат с географическими координатами этой точки, умноженные на длину градуса по соответствующей оси.

Проекция Гаусса—Крюгера может дать более высокую точность по расстояниям, но для этого понадобится пересчитывать скорости пунктов наблюдений с учетом угла между направлением на север в пункте наблюдения и средним меридианом отсчета.

Используемая в данной работе математическая модель позволяет производить расчет деформаций в произвольной точке земной коры независимо от деформации в других точках. Это означает, что полученные в разных точках результаты могут быть несовместимы между собой. В работе [Allmendinger et al., 2007], где подобная математическая модель применялась для оценки деформаций других регионов, также отмечено, что при использовании данной модели не существует непротиворечивого способа выполнить условие совместимости (связности) деформаций в разных точках расчета.

При таком подходе для оценки распределения скорости деформации по поверхности земной коры необходимо покрыть регион расчета сеткой точек и произвести расчет в каждом узле этой сетки. В данной работе для рассмотренного региона задана равномерная прямоугольная сетка, оси которой параллельны осям координат.

Решение системы уравнений для получения тензора градиента скорости

Зададим в исследуемой области систему отсчета. Начало отсчета поместим в узле расчетной сетки (в дальнейшем будем называть его точкой расчета), а направления осей возьмем такие же, как и в той системе отсчета, в которой заданы исходные данные (скорости точек наблюдений). Теперь движение произвольной точки среды (а в частности — точки наблюдения) можно описать уравнением, основанным на линейной части разложения Тейлора функции скорости точки от ее радиус-вектора:

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

где U — вектор скорости в точке наблюдения, T — вектор скорости в начале отсчета, L — тензор градиента скорости в начале отсчета, ΔX — радиус-вектор точки наблюдения, E — остаточный член разложения Тейлора (рис. 3):

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

В уравнении (1) U и ΔX определяются исходным каталогом скоростей, а T и L — неизвестные. Объединив неизвестные уравнения (1) в векторе \overline{l} и рассматривая несколько точек наблюдений одновременно можно перейти к следующей форме записи уравнения (1):

$$\overline{u} = Al + \overline{e} , \qquad (2)$$

где

$$\overline{u} = \begin{bmatrix} u_{x(1)} \\ u_{y(1)} \\ u_{x(2)} \\ \dots \\ u_{y(2)} \\ \dots \\ u_{x(N)} \\ u_{y(N)} \end{bmatrix} - \text{вектор горизонтальных ком-} \quad \overline{l} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ L_{xx} \\ L_{xy} \\ L_{yx} \\ L_{yy} \end{bmatrix} - \text{вектор параметров, содержа-} \quad (3)$$

$$(3)$$

$$- \text{вектор параметров, содержа-} \\ \text{щий компоненты тензора гра-} \\ \text{диента скорости } L, \text{ которые} \\ \text{необходимо оценить,} \end{bmatrix}$$

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

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

ē — вектор невязок.

При этом следует помнить, что точность оценки скорости пункта GPS-наблюдения не очень высока, поэтому в вектор невязок \overline{e} в уравнении (2) входят не только компоненты остаточного члена E из уравнения (1), но и ошибки оценки исходных данных — вектора \overline{u} . Относительные ошибки оценки радиус-векторов точек наблюдений (Δx и Δy) пропорциональны отношению ошибок оценок положения точек наблюдений к расстоянию между ними — эти ошибки пренебрежимо малы.

Задача решения уравнения (2) является классической задачей линейной регрессии, для решения которой можно применить метод наименьших квадратов — МНК, минимизирующий компоненты вектора \bar{e} . При этом встает вопрос — каким образом (в каком соотношении) их следует минимизировать?

Так как для каждого пункта наблюдения известны не только оценки компонент вектора скорости \bar{u} , но и оценки среднеквадратических ошибок этих компонент $\bar{\sigma}$ (т. е. в исходных данных к этому исследованию матрица ковариации вектора \bar{u} диагональная), разумно будет применить взвешенный МНК, согласно которому вектор параметров находится в результате минимизации квадратичной формы

$$J = \overline{e}^{-T} W \overline{e} , \qquad (4)$$

где W — матрица весов, одним из сомножителей которой будет матрица W_{src} , обратная матрице ковариации вектора \bar{u} . В данной работе корреляция между компонентами скоростей пунктов наблюдений не учитывалась, таким образом:

$$W_{src} = diag \left(\sigma_{\bar{u}x(1)}^{-2} \cdot \sigma_{\bar{u}y(1)}^{-2} \cdot \sigma_{\bar{u}x(2)}^{-2} \cdot \sigma_{\bar{u}y(2)}^{-2} \cdots \sigma_{\bar{u}x(N)}^{-2} \cdot \sigma_{\bar{u}y(N)}^{-2} \right) .$$
(5)

Остаточный член E в уравнении (1) должен быть минимизирован в соответствии с дополнительными предположениями модели. Если в модели предполагается, что поле скорости деформации во всей исследуемой области однородно, то остаточный член в уравнении (1) по условию равен нулю. В этом случае значения T и L не зависят от выбора начала отсчета, и значение L будет характеризовать усредненную по всей исследуемой области скорость деформации.

Однако более обоснованным выглядит предположение, 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, в МНК одним из

Рис. 3. Пример расположения пунктов исходных данных для нахождения тензора градиента скорости.

Точки — пункты наблюдений, линии — значения радиусвекторов пунктов наблюдений (ΔX), стрелки — значения скорости перемещения точек среды (T и U) (не в масштабе).



сомножителей матрицы весов W должна быть матрица W_{dist} , одним из вариантов определения которой будет:

$$W_{dist} = diag \Big(f(d_{(1)}) \cdot f(d_{(1)}) \cdot f(d_{(2)}) \cdot f(d_{(2)}) \dots f(d_{(N)}) \cdot f(d_{(N)}) \Big), \tag{6}$$

$$d_{(i)} = \sqrt{\Delta x_{(i)}^{2} + \Delta y_{(i)}^{2}} , \quad i = 1 | N ,$$
(7)

где f(x) — некоторая убывающая функция. В [Shen et al., 1996] в качестве такой функции предложена

$$f = \exp\left(\frac{-2d}{d_0}\right),\tag{8}$$

где d_0 — постоянная величина расстояния, условно называемая радиусом сглаживания.

Таким образом, в данной работе производился расчет по взвешенному МНК с минимизацией квадратичной формы

$$J = \overline{e}^T W_{src} W_{dist} \overline{e} \ . \tag{9}$$

Согласно обобщенному МНК, итоговая формула для расчета вектора параметров примет вид

$$(\overline{l}) = (A^T W A)^{-1} A^T W \overline{u} .$$
⁽¹⁰⁾

Также обобщенный МНК позволяет оценить погрешности результатов посредством расчета матрицы ковариации вектора параметров:

$$D(\overline{l}) = (A^T W A)^{-1}.$$
⁽¹¹⁾

В данной работе ковариации между компонентами вектора параметров \overline{l} не рассматривались, поэтому из матрицы ковариации выделялась только главная диагональ:

$$D(\overline{l}) = \begin{pmatrix} \sigma_{lx}^{2} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \sigma_{ly}^{2} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \sigma_{Lxx}^{2} & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \sigma_{Lxy}^{2} & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \sigma_{Lyy}^{2} & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \sigma_{Lyx}^{2} \end{pmatrix}.$$
(12)

Для оценки погрешности расчета деформаций соответствующие среднеквадратические отклонения были выделены в отдельную матрицу

$$\sigma_{L} = \begin{pmatrix} \sigma_{Lxx} & \sigma_{Lxy} \\ \sigma_{Lyx} & \sigma_{Lyy} \end{pmatrix}.$$
 (13)

Нахождение тензора скорости деформации, его диагонализация и нахождение скалярных параметров деформации

Тензор градиента скорости L можно разложить на симметричную и косимметричную части, характеризующие соответственно скорость деформации Е и скорость вращения среды вокруг точки расчета Ω :

$$L = E + \Omega \quad \text{или} \quad L_{ij} = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij} = \left(\frac{L_{ij} + L_{ji}}{2}\right) + \left(\frac{L_{ij} - L_{ji}}{2}\right). \tag{14}$$

Аналогичным образом были вычислены среднеквадратические отклонения компонент тензора скорости деформации

$$\sigma_{\varepsilon ij} = \left(\frac{\sigma_{Lij} + \sigma_{Lji}}{2}\right). \tag{15}$$

Диагонализация тензора скорости деформации Е приводит к собственным векторам $v_{(k)}$ (направлениям) и собственным значениям $\lambda_{(k)}$, удовлетворяющим отношению

$$\forall k, (k \in \{1, 2\}): \quad \mathbf{E}\mathbf{v}_{(k)} = \mathbf{v}_{(k)}\lambda_{(k)} \quad (\text{или } \varepsilon_{ij}v_{j(k)} = v_{i(k)}\lambda_{(k)})$$
(16)

или в матричной форме

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{xx} & \boldsymbol{\varepsilon}_{xy} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{yx} & \boldsymbol{\varepsilon}_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{v}_{x(k)} \\ \boldsymbol{v}_{y(k)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{v}_{x(k)} \\ \boldsymbol{v}_{y(k)} \end{pmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{(k)},$$
(17)

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{x(1)} & v_{x(2)} \\ v_{y(1)} & v_{y(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{x(1)} & v_{x(2)} \\ v_{y(1)} & v_{y(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_{(1)} & 0 \\ 0 & \lambda_{(2)} \end{pmatrix},$$
(18)

$$\begin{pmatrix} \lambda_{(1)} & 0\\ 0 & \lambda_{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{x(1)} & v_{x(2)}\\ v_{y(1)} & v_{y(2)} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy}\\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{x(1)} & v_{x(2)}\\ v_{y(1)} & v_{y(2)} \end{pmatrix}.$$
(19)

Аналогично, оцененные ошибки (среднеквадратические отклонения) собственных значений тензора скорости деформации были вычислены приведением матрицы среднеквадратических отклонений компонент тензора скорости деформации к базису, заданному собственными векторами самого тензора:

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{\lambda 11} & \boldsymbol{\sigma}_{\lambda 12} \\ \boldsymbol{\sigma}_{\lambda 21} & \boldsymbol{\sigma}_{\lambda 22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{v}_{x(1)} & \boldsymbol{v}_{x(2)} \\ \boldsymbol{v}_{y(1)} & \boldsymbol{v}_{y(2)} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{\varepsilon xx} & \boldsymbol{\sigma}_{\varepsilon xy} \\ \boldsymbol{\sigma}_{\varepsilon yx} & \boldsymbol{\sigma}_{\varepsilon yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{v}_{x(1)} & \boldsymbol{v}_{x(2)} \\ \boldsymbol{v}_{y(1)} & \boldsymbol{v}_{y(2)} \end{pmatrix}.$$
(20)

$$\sigma_{\lambda(1)} = \sigma_{\lambda(1)}, \quad \sigma_{\lambda(2)} = \sigma_{\lambda(2)}. \tag{21}$$

Собственные значения $\lambda_{(k)}$ представляют собой главные значения тензора скорости деформации, обычно обозначаемые e_{\max} , e_{\min} . Соответствующие собственные вектора задают главные направления тензора скорости деформации.

На основе полученных главных значений тензора скорости деформации вычисляются скорость деформации изменения площади Δ_s , максимальная возможная скорость горизонтально-сдвиговой деформации Σ и «кажущаяся» скорость горизонтально-сдвиговой деформации $\Sigma_{apparent}$:

$$\begin{split} \Delta_{S} = e_{\max} + e_{\min} ,\\ \Sigma = e_{\max} - e_{\min} ,\\ \Sigma_{apparent} = \begin{cases} \min(|e_{\max}|, |e_{\min}|), & e_{\max} \cdot e_{\min} < 0\\ 0, & e_{\max} \cdot e_{\min} \geq 0 \end{cases} \end{split}$$

Общая погрешность результатов расчета скорости деформации оценивалась как

$$\sigma_{\Delta S} = \sigma_{\lambda(1)} + \sigma_{\lambda(2)} \,. \tag{22}$$

Разумеется, описанный в данной работе подход к оценке погрешностей скорости деформации не может считаться единственно верным и лучшим. Автор также не обладает сведениями о способах оценки ошибки деформации, приведенных в работе [Костюк, 2008] для территории Северного Тянь-Шаня и во многих других работах, использовавших подобную методику для анализа распределения деформаций в других регионах. Кроме того, в работе [Тега et al., 2008] приведена другая формула для расчета $D(\overline{l})$, не соответствующая классическому описанию ОМНК, однако никакого обоснования для ее использования не приводилось.

Оценка достоверности результатов

Нужно отметить, что при предположении о локальной однородности поля скорости деформации следует в первую очередь избегать экстраполяции и со скептицизмом относиться к результатам расчета в узлах, сильно удаленных от всех точек GPS-наблюдений. Для формализации этих требований в данной работе используется следующий подход.



Рис. 4. Примеры расположения пунктов наблюдений (точки) относительно точки расчета (в центре) и соответствующая значимость результата.

Показаны круг с центром в точке расчета и радиусом $k_{signif} \cdot d_0$, лучи, угол а. А — низкая значимость ($\alpha > 180^\circ$), Б — средняя значимость ($90^\circ < \alpha < 180^\circ$), В — высокая значимость ($\alpha < 90^\circ$).

Вводится критерий значимости результата расчета в произвольной точке: в проекции на плоскость рассматривается круг с центром в точке расчета и радиусом $k_{signif} \cdot d_0$. Из центра круга в направлении всех точек наблюдений, лежащих в этом круге, проводятся лучи. Затем находится максимальный угол а между двумя соседними лучами (т. е. угол, внутри которого нет других лучей). Результат расчета признается высокозначимым, если $\alpha < 90^\circ$, среднезначимым, если $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, и низкозначимым, если $\alpha > 180^\circ$ (рис. 4).

Предложенная методика оценки достоверности результатов наглядно показывает, что при большем радиусе сглаживания удается получить значимые результаты для больших территорий. Однако увеличение радиуса сглаживания приводит к «размыванию» локальных особенностей поля скорости деформации.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ПОЛЯ ДЕФОРМАЦИИ

Существуют несколько программных реализаций рассмотренной выше методики и ее различных модификаций. Кроме авторской реализации [Shen et al., 1996], наиболее известны программа, разработанная Т. Сагия [Sagiya et al., 2000], и программные пакеты GRID_STRAIN и GRID_STRAIN3 [Pesci, Tera, 2007]. Практический опыт автора данной работы с программными пакетами GRID_STRAIN и GRID_STRAIN3 (скомпилированные версии которых имеются в открытом доступе) позволил выявить в них ряд недостатков. Поэтому было принято решение о разработке собственного программного комплекса для расчета поля деформации. В данной работе приведены практические результаты, полученные с использованием разработанного автором программного комплекса SUR_GPS_STRAINS [A.c., 2016].

Подробное описание программного комплекса SUR_GPS_STRAINS представлено в работах [Мансуров, 2012, 2014], поэтому здесь приводится только общий алгоритм его работы.

1. Редакция исходных данных. Автоматически исключаются пункты наблюдений с ошибками, превышающими заданный пользователем порог, и пункты, явно указанные пользователем.

2. Пересчет координат пунктов наблюдений в декартову систему.

3. Формирование расчетной сетки. При этом используется цифровая модель рельефа региона, ее узлы прореживаются с заданным пользователем шагом, и их координаты пересчитываются в декартову систему.

4. Расчет тензора деформации в узлах полученной сетки по вышеприведенной методике с использованием заданного пользователем значения d_0 . Диагонализация полученного тензора для нахождения e_{\max} и e_{\min} , расчет скалярных параметров деформации и определение значимости результата.

5. Экспорт полученных результатов в текстовые файлы и автоматическая подача этих файлов на вход программам, входящим в пакет Generic Mapping Tools (GMT) [Wessel, Smith, 2009] для получения графических построений — карт региона расчета с нанесенными на них полями векторов скоростей или тензоров, или заливки, показывающей поле значений скалярных параметров деформации.

Перейдем к рассмотрению практических результатов, полученных с использованием программного комплекса SUR_GPS_STRAINS.

ПОСТРОЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПАМИРА И ТЯНЬ-ШАНЯ

В данной работе рассчитано поле скорости деформации земной коры региона, ограниченного 37.0° и 45.5° с. ш. и 68.0° и 88.5° в. д. Рельеф региона показан на рис. 5.

В качестве исходных данных для построения деформационной модели был взят каталог оценок скоростей 506 пунктов наблюдений Центрально-Азиатской GPS-сети, описанный выше. Расположение и скорости пунктов показаны на рис. 2. Данный каталог не содержит пунктов, для которых оцененные ошибки определения скорости превосходят 4 мм/год по горизонтальным компонентам и 8 мм/год по вертикальной компоненте. Исследуемый регион был покрыт равномерной сеткой точек с шагом 22.2 км по направлениям север—юг и восток—запад. При расчете использовался сглаживающий коэффициент $d_0 = 25$ км, что обусловлено наличием в регионе общирных областей с относительно редко расположенными пунктами наблюдений. Для оценки значимости был взят коэффициент $k_{signif} = 3.5$.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ

Как видно из рисунков 6–8, деформации распределены по исследуемому региону неоднородно, и картина этого распределения вполне согласуется с результатами, полученными в работах [Zubovich et al., 2010; Kreemer et al., 2014]. К сожалению, в работе [Kreemer et al., 2014] направления компонент тензора изображены лишь через четыре ячейки как по широте, так и по долготе, что не позволяет провести детальное сопоставление, а в работе [Zubovich et al., 2010] применена одномерная модель, показывающая только наиболее явные аспекты распределения скорости деформации.

Ниже приведено описание отдельных особенностей распределения скорости деформации по исследуемой территории, полученного в данной работе вместе со сравнением с результатами [Zubovich et al., 2010; Kreemer et al., 2014].

Для Тянь-Шаня в целом характерно сжатие по азимуту от -10° до -20° , наиболее сильно выраженное в крупнейших впадинах — Чуйской и Иссык-Кульской, что утверждается и в [Zubovich et al., 2010]. Вообще для Центрального Тянь-Шаня относительная деформация достигает максимальных значений в наиболее узкой его части — области между 76° и 80° в. д. Северо-Западный Тянь-Шань (70—73° в. д., 41—43° с. ш.) в настоящее время не испытывает существенных деформаций. Все эти соображения согласуются с распределением деформаций согласно [Kreemer et al., 2014].

Сильное сжатие отмечается в зоне сопряжения Тянь-Шаня и Таримской плиты. Наибольшее из достоверных значений скорости деформации находится в западной части этой зоны (76.0—77.5° в. д., 39—40° с. ш.), к югу от сопряжения хребтов Каратеке и Мейдантаг, что отмечается и в [Zubovich et al., 2010], и в [Kreemer et al., 2014]. Далее вдоль зоны сопряжения (на восток-северо-восток) до 81° в. д. значения скорости деформации не так велики, а после 81° в. д. они снова увеличиваются, однако уже не являются достоверными вследствие низкой плотности сети наблюдений в этой зоне.

В Восточном Тянь-Шане (85—88° в. д., 43—44° с. ш.) наиболее вероятным типом деформаций видится субмеридиональное растяжение. Особый интерес представляют деформационные процессы, протекающие на Памире и рядом с ним. Ниже приведена интерпретация общей картины современных деформаций в окрестностях Памира (рис. 9). Следует оговориться, что вследствие редкого расположения пунктов наблюдений и значительного сглаживания, примененного при расчете модели, проведенные на рис. 9 жирные линии «разломов» показывают лишь наиболее вероятное направление разрывов, но никак не их положение и пространственное распределение.

Северная часть Памира, непосредственно прилегающая к Тянь-Шаню, испытывает сильное сжатие по азимуту от -45° (на западе) до -20° с возможным небольшим правым сдвигом (на востоке), что соответствует описанию [Zubovich et al., 2010] и очевидно просматривается в [Kreemer et al., 2014]. То есть можно сказать, что вследствие взаимодействия Памира и Тянь-Шаня сейчас происходит интенсивное субмеридиональное сжатие Северного Памира.

Находящаяся к западу от Памира Таджикская депрессия на северо-востоке испытывает сдвиговые деформации (наиболее вероятен правый сдвиг по субширотным разрывам), а на юго-западе — субширотное сжатие. Эти особенности не видны на модели [Kreemer et al., 2014] и не отмечаются в [Zubovich et al., 2010]. Такое несоответствие можно объяснить тем, что каталог скоростей пунктов GPS-наблюдений, расположенных на территории Таджикистана (Памир и Таджикская депрессия), был существенно дополнен и уточнен в 2012—2014 гг. и не публиковался до завершения работы [Kreemer et al., 2014].

В зоне сопряжения Памира и Таримской плиты наблюдаются два режима деформаций. Северная часть этой зоны (севернее 38.75° с. ш.) — хребты Кингтау и Улугарттаг (обозначены на рис. 5 как Кингтальский хребет) — характеризуется сдвиговыми деформациями (наиболее вероятен правый сдвиг по разрывам по азимуту –45°), а южная часть — межгорье хребтов Конгурмузтаг (обозначен на рис. 5 как Кашгарский хребет) и Сарыкольского — субширотным растяжением. В [Zubovich et al., 2010] эти типы деформации представлены на одном профиле и не разделены в пространстве, а на модели [Kreemer et al., 2014] субширотное растяжение выражено слабо.





Оттенками серого цвета показана высота над уровнем моря (м) [GLOBE, NOAA]. Тонкие сплошные линии с подписями — водоразделы горных хребтов. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1.





Синий цвет — растяжение, красный — сжатие. Насыщенность цвета показывает значимость результатов (высокая и средняя). Цветом фона показано распределение оцененной погрешности деформации изменения площади в масштабе 10-9/год, согласно шкале внизу. В правом нижнем углу для сравнения приведена соответствующая часть модели [Kreemer et al., 2014]. Усл. обозн. см. на рис. 1.





Отрицательные значения — сжатие, положительные — растяжение. Насыщенность цвета показывает значимость результатов (высокая и средняя). Усл. обозн. см. на рис. 1.





Усл. обозн. см. на рис. 1.





Исходя из характера деформаций областей, окружающих Памир, можно предположить, что вследствие коллизии Памира (и, возможно, прилегающих к нему с юго-востока горных систем) с Таримской плитой, Памир постепенно меняет направление своего движения с северного на северо-западное, двигаясь при этом на запад по отношению к Таримской плите и южной части Таджикской депрессии. Это предположение может объяснить следующие характеристики поля деформаций:

• субширотное сжатие юго-запада Таджикской депрессии;

• правый сдвиг по субширотным разрывам на северо-востоке Таджикской депрессии;

отклонение осей сжатия деформации Северного Памира от меридиана к отрицательному азимуту;
 правый сдвиг по разрывам по азимуту –45° северной части зоны сопряжения Памира и Таримской плиты (где граница этих регионов проходит приблизительно по азимуту –45°);

• субширотное растяжение южной части зоны сопряжения Памира и Таримской плиты (где граница этих регионов направлена субмеридионально).

выводы

1. Успешно функционирующая GPS-сеть позволяет получить высокоточные оценки скоростей в отдельных точках Памиро-Тяньшаньского региона. Плотность пунктов наблюдений сети дает возможность построить детальные модели распределения современных деформаций земной коры. На сегодняшний день для данного региона наиболее перспективным выглядит использование непрерывных моделей.

2. Разработан подход к расчету непрерывной модели поля скорости современных деформаций земной коры, в основе которого лежит разложение в ряд Тейлора функции скорости точки на поверхности земной коры от ее радиус-вектора [Shen et al., 1996] и предложенный автором критерий оценки достоверности результатов моделирования. Методика построения деформационной модели заключается в том, что в каждой точке расчетной сетки, равномерно покрывающей поверхность Земли, посредством решения системы уравнений, описывающей движение точек поверхности, с помощью метода наименьших квадратов вычисляется тензор скорости деформации земной коры. При этом учитывается, что с увеличением расстояния между точкой, движение которой описывается, и точкой расчета тензора скорости деформации увеличивается вероятная суммарная неоднородность поля деформации между этими точками. Для оценки достоверности результата расчета определяется, насколько хорошо точка расчета окружена близлежащими соседними точками наблюдений.

3. Разработанная автором система с программной реализацией [Мансуров, 2012, 2013, 2014, 2015], состоящая из двух частей — SUR_GPS_GLOBK_PROCESSING и SUR_GPS_STRAINS, позволяет:

• находить ошибки в целостности базы данных GPS-наблюдений HC PAH;

• генерировать временные интервалы осреднения, распределять по ним полевые GPS-измерения (для недопущения «псевдоточек») и графически отображать это распределение для визуального контроля;

 автоматически запускать программы из пакета GLOBK для осуществления комбинирования GPS-данных и построения по результатам комбинирования графиков временных рядов координат реперов, нужных для визуального выделения и исключения выбросов и скачков в этих временных рядах;

• автоматически запускать программы из пакета GLOBK для осуществления итерационного расчета каталога скоростей реперов по результатам комбинирования GPS-данных и визуализировать полученный каталог скоростей;

• исключать из каталога скоростей реперы с превышающей заданный порог погрешностью оценки скорости и реперы, явно указанные пользователем;

• строить на заданном регионе расчетную сетку с заданным шагом по широте и долготе;

 производить в каждом узле расчетной сетки расчет тензора скорости деформации в диагонализованной форме, скалярных параметров деформации и скорости движения данного узла;

• оценивать достоверность результата расчета в каждом узле;

• автоматически запускать программы из пакета GMT для визуализации исходного каталога скоростей и всех результирующих полей (тензорного, векторного и скалярных) с возможностью автоматического наложения других графических построений.

4. Деформационная модель для территории Памира и Тянь-Шаня, построенная на основе каталога оценок скоростей пунктов Центрально-Азиатской GPS-сети с использованием программы SUR_GPS_STRAINS, характеризуется существенно неоднородным распределением скорости деформаций земной коры. Наиболее распространенным типом деформации является субмеридиональное сжатие, максимумы которого наблюдаются на Северном Памире, в Чуйской впадине, в Иссык-Кульской впадине. Зона сопряжения Памира и Тарима испытывает субширотное растяжение, а зона сопряжения Памира и Тарима, а кома и сопряжения Сопряжения Сопряжения Сопряжения и Тарима, а кома и сопряжение.

также зоны сопряжения Памира, Тянь-Шаня и Таджикской депрессии характерны горизонтально-сдвиговые деформации. Северо-Западный Тянь-Шань не испытывает существенных деформаций.

Автор выражает благодарность А.К. Рыбину за неоценимую помощь в составлении плана публикации, рассмотрение и обсуждение формулировок многих высказываний, лаборатории GPS HC PAH и ее заведующему С.И. Кузикову за предоставление данных измерений, на основании которых был получен каталог скоростей GPS-пунктов, а также Ю.Л. Ребецкому за отдельные рекомендации по улучшению данной работы.

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

ЛИТЕРАТУРА

А.с. 2016610153. Программа для расчета деформаций земной коры по данным GPS-наблюдений SUR GPS STRAINS : программа для ЭВМ / Мансуров А.Н. Опубл. в Б.И., 2016, № 2 (112).

Зубович А.В. Изучение поля скоростей современных движений земной коры Центрального Тянь-Шаня методами космической геодезии: Автореф. дис.... к.ф.-м. н. М., ИФЗ РАН, 2001, 95 с.

Зубович А.В., Мухамедиев Ш.А. Метод наложенных триангуляций для вычисления градиента скорости горизонтальных движений: приложение к Центрально-Азиатской GPS-сети // Геодинамика и тектонофизика, 2010, т. 1, № 2, с. 169—185.

Костюк А.Д. Деформационные изменения земной коры Северного Тянь-Шаня по данным космической геодезии // Вестник КРСУ, 2008, т. 8, № 3, с. 140—144.

Кузиков С.И., Мухамедиев Ш.А. Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS-сети // Физика Земли, 2010, № 7, с. 33—51.

Мансуров А.Н. Структурное проектирование автоматизированной системы расчета поля скорости деформации земной коры по данным GPS наблюдений // Проблемы автоматики и управления, 2012, № 2, с. 120—127.

Мансуров А.Н. Структурный анализ и автоматизация расчета оценок временных рядов и скоростей марок ЦА GPS-сети с использованием программного пакета GAMIT/GLOBK и базы данных лаборатории GPS HC PAH // Материалы V конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях» (НС РАН, Бишкек, 24—25 апреля 2013 г.). Бишкек, 2013, с. 50—55.

Мансуров А.Н. Развитие программного комплекса для расчета деформаций земной коры по данным GPS-наблюдений // Материалы VI конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях» (НС РАН, Бишкек, 26—27 марта 2014 г.). Бишкек, 2014, с. 112—118.

Мансуров А.Н. Улучшение обработки данных Центрально-Азиатской GPS-сети с помощью специально разработанного программного обеспечения // Материалы докладов VII Международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях» (НС РАН, Бишкек, 25—26 марта 2015 г.). Бишкек, 2015, с. 93—98.

Миди Б.Дж., 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.

Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Ред. В.И. Макаров. М., Научный мир, 2005, 400 с., 32 с. цв. вклейки.

GLOBE — The Global Land One-kilometer Base Elevation // National Centers for Environmental Information, NOAA — National Oceanic and Atmospheric Administration. Topographic data and images [http:// www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globeget.html].

Allmendinger R.W., Reilinger R., Loveless. J. Strain and rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia, and the Altiplano // Tectonics, 2007, v. 26, TC3013, doi:10.1029/2006TC002030.

Herring T.A., King B.W., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.35. EAPS, MIT, 2009, 45 p.

Kreemer C., Blewitt G., Klein E. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model // Geochem. Geophys. Geosyst., 2014, v. 15, p. 3849–3889, doi:10.1002/2014GC005407.

Pesci A., Teza G. Strain rate analysis over the central Apennines from GPS velocities: the development of a new free software // Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, 2007, v. 56, p. 69—88.

Sagiya T., Miyazaki S., Tada T. Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan // Pure Appl. Geophys., 2000, v. 157, № 11—12, p. 2303—2322, doi: 10.1007/PL00022507.

Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // J. Geophys. Res., 1996, v. 101, p. 27957—27980.

Shen Z.-K., Lu J., Wang M., Burgmann R. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau // J. Geophys. Res., 2005, v. 110, B11409, doi:10.1029/2004JB003421.

Teza G., Pesci A., Genevois R., Galgaro. A. Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation // Geomorphology, 2008, v. 97, p. 424–437.

Wessel P., Smith W.H.F. The Generic Mapping Tools (GMT) Version 4.5.0 Technical Reference & Cookbook, SOEST/NOAA, 2009, [http://gmt.soest.hawaii.edu/gmt4/gmt/html/GMT_Docs.html].

Zubovich A.V., Wang X., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., Li J., Kuzikov S.I., Herring T.A., Hamburger M.W., Hager B.H., Dang Y., Bragin V.D., Beisenbaev R.T. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // Tectonics, 2010, v. 29, TC6014, doi:10.1029/2010TC002772.

Рекомендована к печати 6 декабря 2016 г., М.И. Эповым Поступила в редакцию 30 июля 2015 г., после доработки — 1 августа 2016 г.