

УДК: 528.06

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-535-545

М.Д. Махмудов¹, Д.Ш. Фазилова^{2,3,4}

ПОСТРОЕНИЕ РЕГУЛЯРНОГО ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ТАШКЕНТСКОГО РЕГИОНА НА ОСНОВЕ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДАННЫХ ГНСС ПУНКТОВ

АННОТАЦИЯ

В Республике Узбекистан активно развивается сеть станций Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), которая является неотъемлемой частью национальной инфраструктуры пространственных данных страны. Особое внимание в республике в последнее время уделяется вопросам практического использования результатов измерения ГНСС и геоинформационного обеспечения безопасности в зонах с повышенной сейсмической опасностью, особенно рядом с объектами техногенной нагрузки. В работе рассмотрена территория Ташкентского региона — одного из наиболее сейсмически активных регионов республики. ГНСС измерения зачастую разрежены и распределены неравномерно, а для уточнения «блочной» или «непрерывной» тектонических моделей и выявления закономерностей современных движений данной области необходима пространственная модель скоростей, которая может быть получена на основе интерполяции дискретных точек на оставшуюся не охваченную измерениями территорию. В работе были использованы измерения на 14 ГНСС пунктах за период с 2018 по 2020 гг. Скорости пунктов, или т. н. модель скоростей, полученная в программе GAMIT/GLOBK, позволила выполнить оценку горизонтальных скоростей пунктов, диапазон которых варьирует от 21 мм/г до 33 мм/г. Относительно «стабильной» Евразийской тектонической плиты были вычислены также значения локальных смещений области, которые могут быть как следствием движения микроблоков, так и влиянием техногенных факторов (горнодобывающие работы в районе пунктов Ангрен и Алмалык). Для получения непрерывного поля распределения горизонтальных скоростей региона был использован метод связанной интерполяции двумерных векторов поля скоростей, реализованный в программе GMT (Generic Mapping Tools). Получено, что согласно геологическим данным области метод интерполяции позволяет достаточно точно определить основные тенденции движений земной коры региона. Выявлено вращательное движение вдоль Каржантаусской, Кумбельской и Чаткальской тектонических плит. Значения горизонтальных смещений точек достигли минимального значения 3 мм в равнинной части, а максимальные величины до 10 мм отмечались в горных областях региона. Средняя скорость станций региона составила 4 мм/г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сеть ГНСС, поле скоростей, GMT, интерполяция векторных данных

-
- ¹ Ташкентский университет информационных технологий, пр-т. Амира Темура, д. 108, Ташкент, Республика Узбекистан, 100084, *e-mail*: makhmudov0907@gmail.com
 - ² Национальный университет Республики Узбекистан им. Мирзо Улугбека, ул. Университетская, д. 4, Ташкент, Республика Узбекистан, 1000174, *e-mail*: dil_faz@yahoo.com
 - ³ Астрономический институт имени Улугбека Академии наук Республики Узбекистан, ул. Астрономическая, д. 33, Ташкент, Республика Узбекистан, 100052.
 - ⁴ Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, ул. Университетская, д. 2, Ташкент, Республика Узбекистан, 100095.

Mirshodjon D. Makhmudov¹, Dilbarkhon Sh. Fazilova^{2,3,4}

CONSTRUCTION THE VELOCITY FIELD IN A REGULAR GRID IN THE TASHKENT REGION ON THE BASIS INTERPOLATION OF GNSS PERMANENT STATIONS DATA

ABSTRACT

The Republic of Uzbekistan is actively developing a network of stations of the Global Navigation Satellite System (GNSS), which is an integral part of the country's national spatial data infrastructure. Particular attention in the republic has recently been paid to the practical use of the results of GNSS measurements and geoinformation security in areas with increased seismic hazard, especially near man-caused objects. The paper considers the territory of the Tashkent region — one of the most seismically active regions of the republic. GNSS measurements are often sparse and unevenly distributed, and to refine the “block” or “continuous” tectonic models and identify patterns of modern movements in this area, a spatial velocity model is needed, which can be obtained by interpolating discrete points to the remaining area not covered by measurements. The work used measurements at 14 GNSS points for the period from 2018 to 2020. Point velocities or the so-called velocity model obtained in the GAMIT/GLOBK program made it possible to estimate horizontal point velocities, the range of which varies from 21 mm/yr to 33 mm/yr. With respect to the “stable” Eurasian tectonic plate, the values of local displacements of the area were also calculated, which can be both a consequence of the movement of microblocks and the influence of technogenic factors (mining in the area of the Angren and Almalyk points). To obtain a continuous distribution field of the horizontal velocities of the region, the method of coupled interpolation of two-dimensional vectors of the velocity field was used, implemented in the GMT (Generic Mapping Tools) program. It was found that according to the geological data of the region, the interpolation method quite accurately allows to determine the main trends in the movements of the earth's crust in the region. A rotational movement along the Karzhantau, Kumbel and Chatkal tectonic plates has been revealed. The values of horizontal displacements of points reached a minimum value of 3 mm in the plain part, and maximum values of up to 10 mm were noted in the mountainous areas of the region. The average velocity of stations in the region was 4 mm/year.

KEYWORDS: GNSS network, velocity field, GMT, interpolation of vector data

ВВЕДЕНИЕ

Территория Узбекистана расположена в области перехода от горных массивов Тянь-Шаня к Туранской платформе, в зоне взаимодействия нескольких крупных литосферных плит — Европейской, Азиатской, Иранской, Индийской и Китайской и имеет уникальную пространственную картину распределения землетрясений в регионе [Артиков и др., 2018]. Особое внимание в республике в последнее время уделяется вопросам геоинформационного обеспечения безопасности в зонах с повышенной сейсмической опасностью, особенно рядом с объектами техногенной нагрузки. Актуальной задачей является

¹ Tashkent information technology university, 108, Amira Temura ave., Tashkent, 100084, Republic of Uzbekistan, *e-mail*: makhmudov0907@gmail.com

² National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, 4, Universitetskaya str., Tashkent, 1000174, Republic of Uzbekistan, *e-mail*: dil_faz@yahoo.com

³ Ulugh Beg Astronomical Institute of Uzbek Academy of Sciences, 33, Astronomicheskaya str., Tashkent, 100052, Republic of Uzbekistan.

⁴ Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, 2, Universitetskaya str., Tashkent, 100095, Republic of Uzbekistan.

«проведение картографического мониторинга с использованием данных и материалов аэрокосмической съемки, топографических, геодезических и картографических изысканий и исследований, а также дистанционного зондирования земли и геодинамических исследований»¹. Одной из таких наиболее сейсмически активных территорий республики является Ташкентский регион [*Giardini et al.*, 2003]. Характерными объектами данной территории являются Ташкентский геодинамический полигон, расположенный рядом с водохранилищем Чарвак. Ангрено-Алмалыкский горнорудный район — один из самых известных и развитых промышленных регионов страны. Для него характерна высокая концентрация предприятий угледобывающей и горнодобывающей промышленности, строительной индустрии и электроэнергетики, объектов промышленного и гражданского строительства, ирригационных систем (Ангренский угольный разрез, Джигиристанский карьер, Наугарзанский и Апартакский угольные карьеры). Всего в 50 км к юго-востоку от столицы Ташкента находится Алмалыкский горно-металлургический комбинат, который является базой производства цветных металлов. Территория относится к зоне максимальной отрицательной дилатации (сжатия), которая также усиливается за счет повышенной обводненности территории [*Rebetsky et al.*, 2020; *Fazilova, Sichugova*, 2021].

Наблюдения с помощью сети пунктов Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), высокая точность и разрешение которых позволяют определять самые малые изменения в геоцентрических координатах наземных пунктов на коротких интервалах времени, являются основой для развития национальной инфраструктуры пространственных данных Республики Узбекистан². В стране создана геодезическая сеть ГНСС, измерения которой используются для решения таких задач, как построение национальной системы координат, исследования деформаций земной коры и определения геоида [*Фазилова и Магдиев*, 2021; *Fazilova*, 2022]. Измерения на более чем 50 постояннодействующих пунктах в республике становятся также базой для наблюдений в области геонаук, в частности построения пространственной модели скоростей Евразийской плиты в регионе и получения информации о геодинамических деструктивных явлениях в кратчайшие сроки в режиме реального времени [*Hofmann-Wellenhof, Moritz*, 2006]. Отдельные исследования были ранее выполнены для определения поля скоростей в регионе [*Уломов*, 2004; *Хамидов*, 2016; *Abdrakhmatov et al.*, 1996; *Zubovich et al.*, 2010]. Но для уточнения «блочной» или «непрерывной» тектонических моделей необходимо иметь более плотную сеть измерений. В этом случае интерполяция дискретных точек на оставшуюся территорию, не охваченную измерениями, для получения непрерывной скоростной модели является важной задачей. В данной работе рассмотрен метод связанной интерполяции двумерных векторов поля скоростей постоянных пунктов Ташкентского региона за период 2018 по 2020 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа в работе были выбраны измерения спутниковой государственной сети (СГС) на 14 пунктах ГНСС, выполненные с 2018 по 2020 гг. (рис. 1). Всего за данный период были выполнены 6 измерительных кампаний. Продолжительность каждого варьируется от одного до четырех месяцев (табл. 1). Программный комплекс GAMIT/GLOBK версии 10.71 использован для вычисления координат пунктов [*Herring et al.*, 2018]. Вычисление координат и скоростей пунктов выполнялось в три этапа согласно [*Dong et al.*, 1998] с

¹ О мерах по кардинальному совершенствованию системы ведения учета земли и государственных кадастров. Указ Президента Республики Узбекистан. № УП-6061. 7.09.2020 г. Электронный ресурс: <https://lex.uz/docs/-4985026> (дата обращения 02.02.2023).

² О пространственных данных. Закон Республики Узбекистан. № ЗРУ-702. 23.07.2021 г. Электронный ресурс: <https://lex.uz/ru/docs/5522838> (дата обращения 02.02.2023).

использованием моделей и стандартов международной службы вращения Земли IERS2010 [IERS, 2010]. Результаты приведены на эпоху опорной системы координат ITRF2014 [Altamimi et al., 2016]. Ошибка повторяемости горизонтальных координат составила 1.0–3.2 мм и 3.2–6.5 мм для высоты. Средняя ошибка горизонтальной скорости составляет около 0.2–0.6 мм/г.

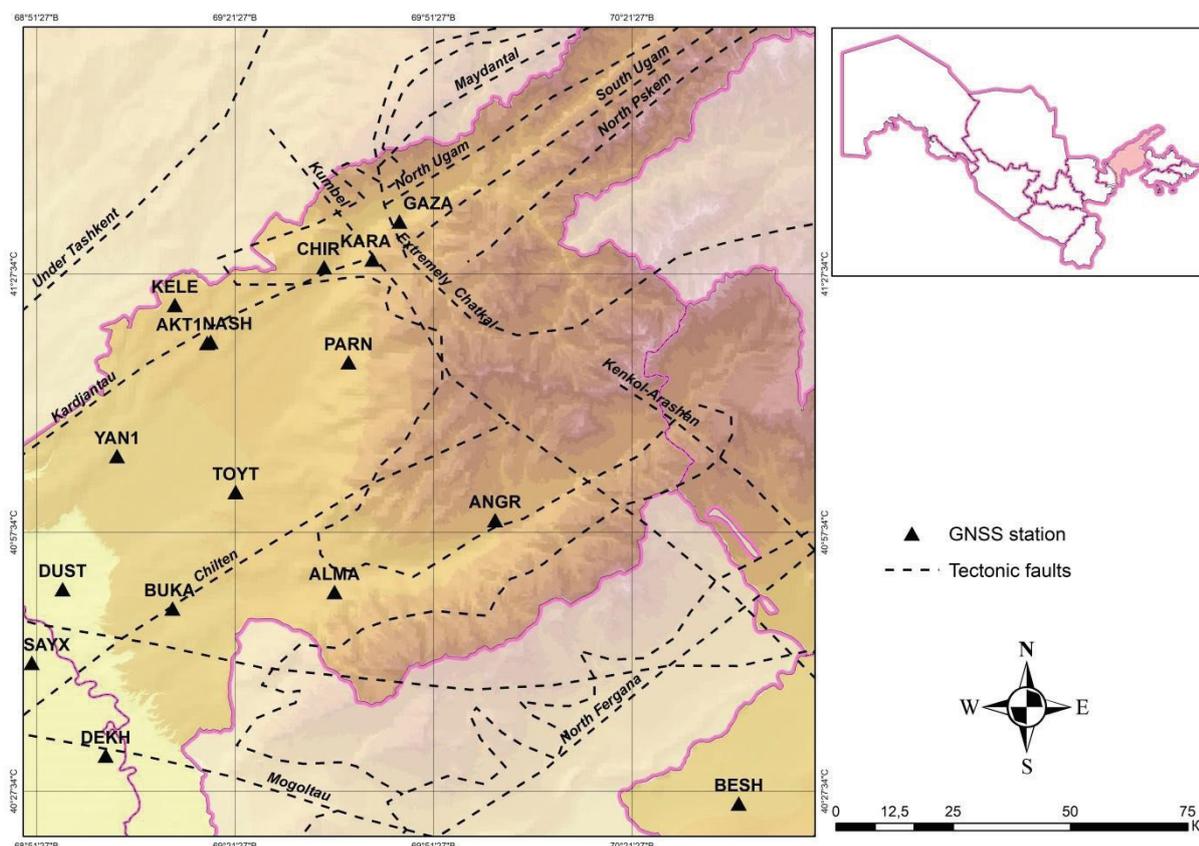


Рис. 1. Сеть ГНСС Ташкентского региона
 Fig. 1. GNSS network in the territory of the Tashkent region

Табл. 1. Периоды (дни месяцев) наблюдений, использованные для анализа
 Table 1. Periods (days of months) of observations used for analysis

| | январь | февраль | март | апрель | июль | август | сентябрь | октябрь |
|-------------|--------|---------|------|--------|------|--------|----------|---------|
| 2018 | – | – | – | – | – | – | – | 1–26 |
| 2019 | 10–31 | 1–28 | 1–31 | 1–30 | – | – | 29–30 | 1–26 |
| 2020 | 1–31 | – | – | 1–30 | 1–31 | 1–31 | 1–30 | 1–31 |

Скорости пунктов или т. наз. модель скоростей, полученная в программе GAMIT/GLOBK, позволяет описать движение Евразийской плиты в районе исследования. Путем «фиксирования Евразийской плиты» в программе можно вычислить смещения, определяющие характеристики движения локальных разломов области или действие техногенных нагрузок. Но для получения более информационной модели кинематики региона необходимо построить непрерывную скоростную модель путем интерполяции полученных дискретных значений на всю оставшуюся область. Различные авторы

использовали такие методы интерполяции как метод наименьших квадратов, использующий ковариационную функцию [Kahle et al., 2000], метод ближайшего соседа, метод взвешенных обратных расстояний [Allmendinger et al., 2007], метод минимальной кривизны [Smith, Wessel, 1990], кригинг [Bogusz et al., 2014] и др. Однако эти методы интерполяции требуют много времени, а сам процесс относительно сложен. Универсальный картографический инструмент GMT (Generic Mapping Tools) — одна из наиболее широко используемых бесплатных картографических программ с открытым исходным кодом в науках о Земле с мощными функциями картирования и обработки данных. Для обработки данных в GMT реализованы функции скрининга данных, повторной выборки, фильтрации временных рядов, фильтрации двумерной сетки, интерполяции трехмерной сетки, полиномиальной аппроксимации, регрессионный анализ и т. д. Кроме того, GMT можно использовать для быстрой и удобной интерполяции и расчета скорости деформации [Wessel et al., 2019]. В данной работе был использован метод связанной интерполяции двумерных векторов поля скоростей, использующий функцию Грина и реализованный в GMT с помощью алгоритма *gpsgridded* [Sandwell, Wessel, 2016]. Интерполяция двумерных векторных данных с использованием ограничений упругости — это метод, позволяющий создавать гладкое представление разреженных векторных данных. Метод основан на физических принципах упругости, где деформация материала определяется действующими на него силами. Он заключается в построении матрицы уравнений, которая связывает наблюдаемые точки данных с неизвестными точками данных с ограничениями уравнения упругости. Затем матрица решается с использованием линейного или нелинейного оптимизационного алгоритма для поиска наилучшей оценки пропущенных точек данных, которая удовлетворяет ограничениям. Ограничения упругости, используемые в этом методе, обычно выводятся из уравнений Навье-Стокса, которые описывают движение жидкости и действующие на нее силы. Эти уравнения используются для расчета тензора деформации, который описывает деформацию жидкости в каждой точке сетки. Тензор деформации затем используется для расчета действующих на жидкость напряжений, которые уравниваются действующими на нее силами. Ограничения упругости используются для интерполяции векторных данных на регулярной сетке. Это делается путем подгонки гладкой функции к данным, которая удовлетворяет ограничениям. Затем гладкая функция применяется для оценки пропущенных точек данных. Метод использует двумерную упругую модель для обеспечения связи между двумя компонентами горизонтальной скорости ГНСС пунктов: широтным (N) и долготным (E). Предполагается, что в каждой точке действует векторная сила. Эти силы приводят к деформации упругого тела, в результате которого возникает поле векторной деформации. Для любой точки области вычисляется вектор скорости, а величина и направление действующей силы корректируются до тех пор, пока они не будут равны заданному значению вектора скорости. Связная интерполяция реализует реакцию эластичного тела в двумерном пространстве на действующую деформацию на основе анализа функции Грина. Различные состояния эластичности (от упругости до полного сжатия) регулируются с помощью коэффициента Пуассона. Размер сетки выбирается таким образом, чтобы в каждой ячейке был хотя бы один пункт наблюдения [Hackl et al., 2009]. Расстояние между пунктами — 30–50 км, поэтому была выбрана сетка с размером ячейки 1° для интерполяции компонентов поля скоростей. Коэффициент Пуассона был принят 0.5, соответствующий типичной эластичности [Bian et al., 2020].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках представлено распределение скоростей региона как относительно Евразийской плиты (рис. 2), так и локальные смещения, полученные путем «стабилизации

плиты» (рис. 3). В пределах изучаемой территории все пункты указывают на значительные горизонтальные перемещения с доверительной вероятностью 95 %. По северо-восточному направлению, соответствующему движению Евразии, тектонические смещения находятся в диапазоне от 21 мм/г до 33 мм/г (рис. 2). Локальные подвижки, очевидно, имеют зональные характеристики, обусловленные тектоническими разломами области, и достигают значений от 1.82 мм/г до 6.04 мм. Средняя скорость станций региона составляет примерно 4 мм/г для рассмотренного в работе периода с 2018 по 2020 гг. (рис. 3). Результаты метода связанной интерполяции для построения модели горизонтальных скоростей региона представлены на рис. 4. Согласно геологическим данным территория Ташкентского региона относится к орогенической области, подвижной и активной в тектоническом отношении. Серия северо-восточных разломов палеозойского основания г. Ташкента (Ташкентский, Каракамышский, Чирчикский и др.) составляет основную часть Каржантаусского разлома. Последний со своей флексурно-разрывной зоной располагается на границе участков различного движения поднятий и Ташкентско-голодностепского прогиба, посередине которой пролегает р. Чирчик (рис. 1). Анализ пространственного распределения измеренного поля скоростей горизонтального движения земной коры в Ташкентском регионе, несмотря на разреженную плотность пунктов, выявил тенденции неравномерного распределения скорости, которая подтверждается геологическим строением области. В зоне пересечения тектонических плит Каржантауской, Кумбельской и Чаткальской видна тенденция к вращательному движению. Установлено, что диапазон значений горизонтальных смещений точек колеблется от 3 мм в равнинной части до 10 мм в горной части района.

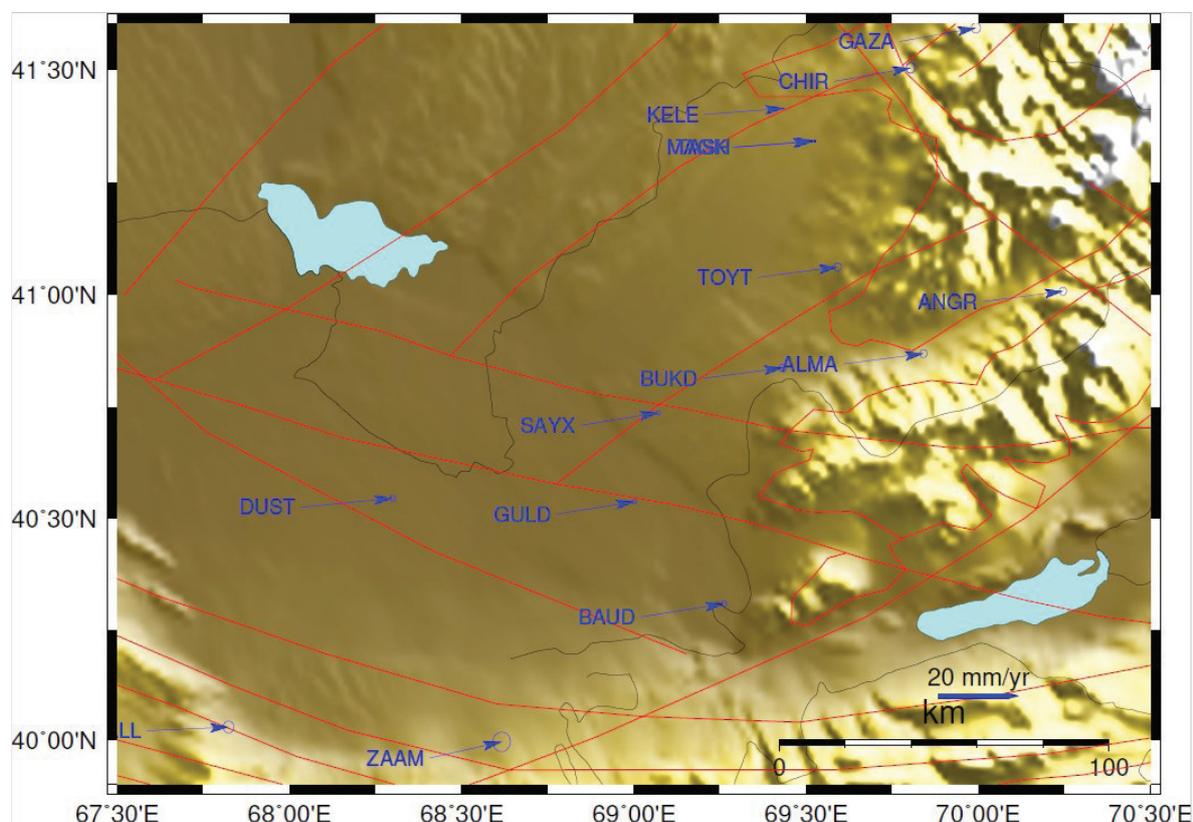


Рис. 2. Горизонтальное поле скоростей региона относительно Евразийской плиты
Fig. 2. Horizontal velocity field of the region relative to the Eurasian plate

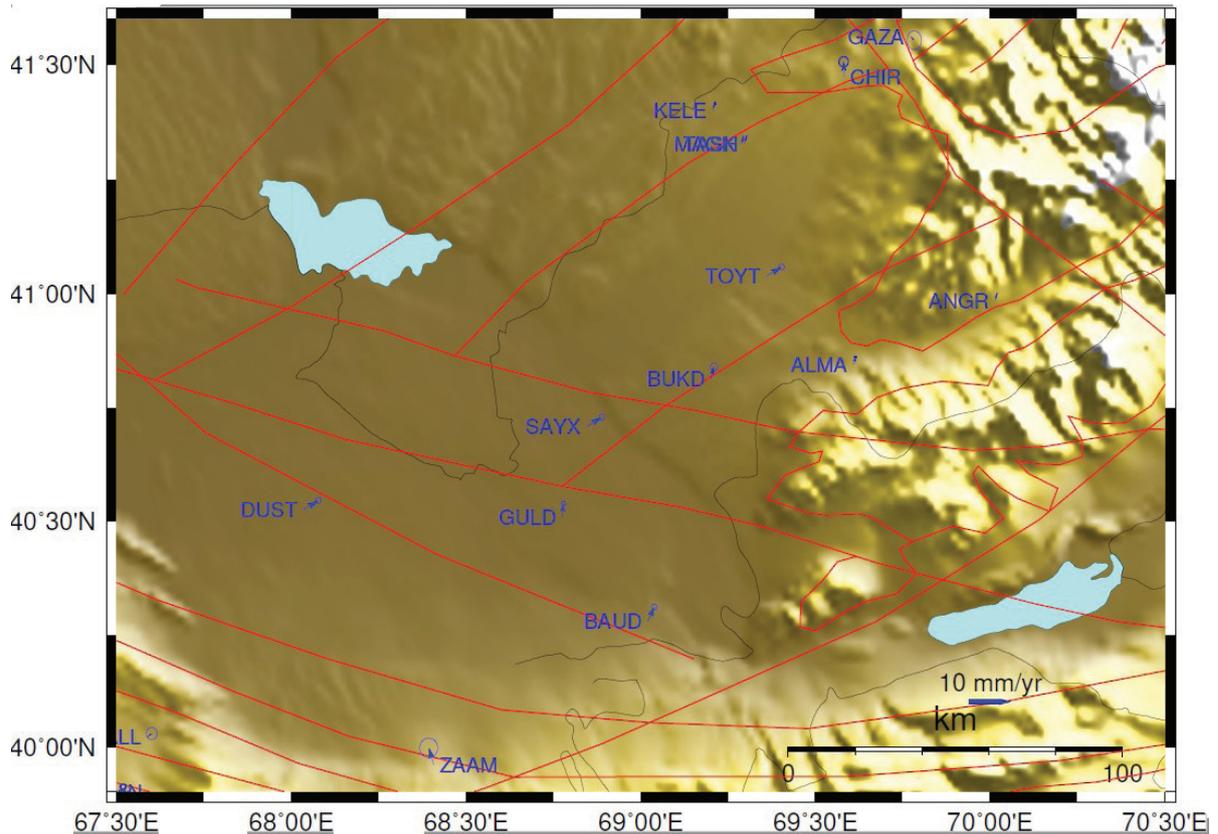


Рис. 3. Горизонтальное поле локальных смещений при «фиксированной Евразии»
Fig. 3. Horizontal velocity field of the local displacements with “fixed Eurasia”

Оценка измеренных и интерполированных числовых значений скоростей подтверждает, что значение скоростей на востоке области больше, чем в западной части. Общая тенденция направления вращательного движения исследуемой области определяется поворотом по часовой стрелке с запада на восток. Поле скоростей на западе увеличивается с юга на север. В восточном же поле скоростей численные значения принимают максимальные значения до 10 мм/г. С другой стороны, с точки зрения анализа направления движения, на востоке наблюдается постоянное движение с юга на северо-восток, а на западе движение чередуется с вращательными блоками.

ВЫВОДЫ

В данной работе выполнено исследование пространственного поля скоростей пунктов ГНСС Ташкентского региона по наблюдениям с 2018 по 2020 г. Скорости пунктов или так называемая модель скоростей, полученная в программе GAMIT/GLOBK, позволила выполнить оценку горизонтальных скоростей 14 пунктов, расположенных в данной области, диапазон которых варьирует от 21 мм/г до 33 мм/г. Относительно «стабильной» Евразийской тектонической плиты были вычислены значения локальных смещений области, которые могут быть как следствием движения микроблоков, так и влиянием техногенных факторов (горнодобывающие работы в районе пунктов Ангрэн и Алмалык). Для получения непрерывного поля распределения горизонтальных скоростей региона был использован метод связанной интерполяции двумерных векторов поля скоростей, базированный на функции Грина и реализованный в картографической программе GMT. При этом отмечается общая тенденция неравномерного распределения скорости. Были выявлены вращательные движения вдоль Каржантауской, Кумбельской и Чаткальской

тектонических плит. Направление движения при этом имеет тенденцию по часовой стрелке с запада на восток. Установлено, что диапазон значений горизонтальных смещений точек при этом достиг минимального значения 3 мм в равнинной части, а максимальные величины до 10 мм отмечались в горных областях региона. Средняя скорость станций региона составляет примерно 4 мм/г. Методы и результаты данного исследования могут быть использованы как для оценки техногенных факторов, оказывающих влияние на смещения земной поверхности при горнодобывающих работах региона и являющихся следствием высокой наведенной сейсмичности области, так и для реализации динамического опорного датума новой национальной геоцентрической системы координат республики.

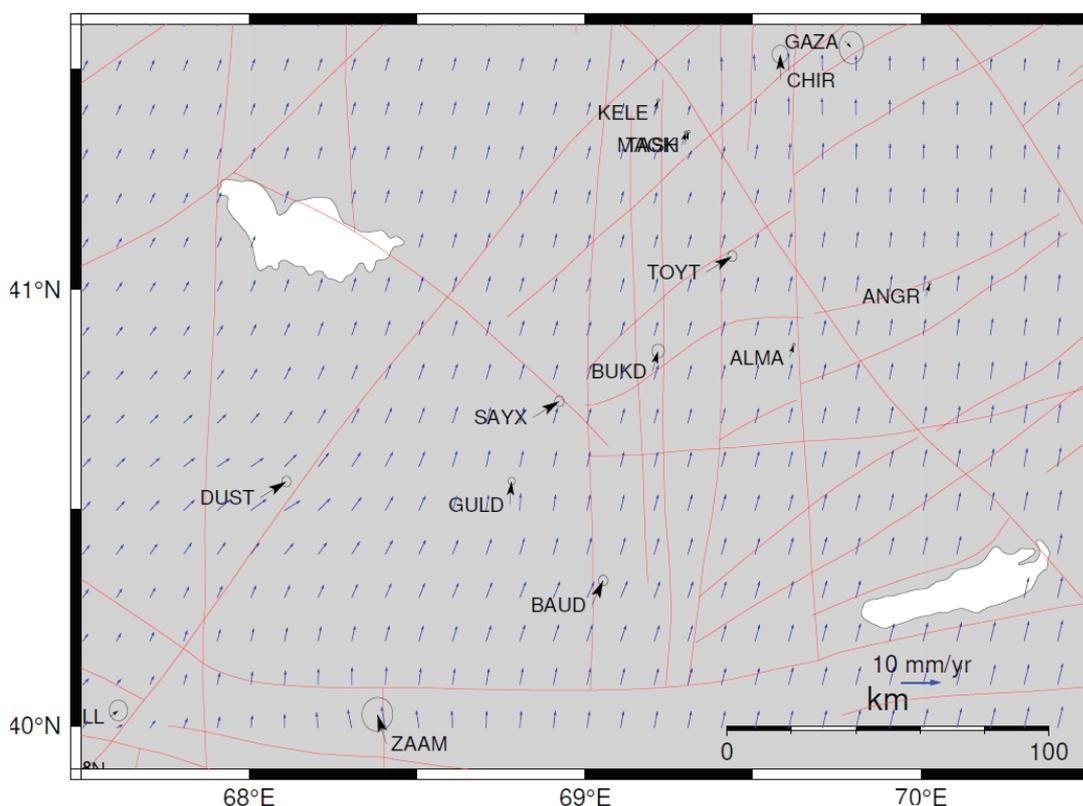


Рис. 4. Пространственное распределение поля горизонтальных скоростей региона (черные стрелки представляют исходное поле скоростей, синие — результаты интерполяции)

Fig. 4. Spatial distribution of the field of horizontal velocities of the region (black arrows represent the original velocity field, blue — results of the interpolation)

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного бюджетного финансирования Академии наук Республики Узбекистан. Авторы благодарят рецензентов за их многочисленные конструктивные комментарии и предложения.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the State Budget Foundation of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. We would also like to thank reviewers for their many constructive comments and suggestions.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Кучкаров К.И., Мирзаев М.А.* Количественные характеристики сейсмической опасности территории Узбекистана в максимальных значениях скоростей колебаний грунта и в их спектральных амплитудах. *Геодинамика и тектонофизика*, 2018. Т. 9. № 4. С. 1173–1188. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0389.
- Уломов В.И.* О роли горизонтальных тектонических движений в сейсмогеодинамике и прогнозе сейсмической опасности. *Физика Земли*, 2004. № 9. С. 14–30.
- Фазилова Д.Ш., Магдиев Х.Н.* Создание и обновление высотной основы топографических карт в национальной пространственной системе координат: на примере Ферганской долины ИнтерКарто. *ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ*, 2021. Т. 27. Ч. 2. С. 155–164. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-155-164.
- Хамидов Х.Л.* Сейсмодислокации на поверхности земли в результате сильных землетрясений на западном Тянь-Шане. *Геодинамика*, 2016. № 1 (20). С. 119–132.
- Abdrakhmatov K., Aldazhanov S.A., Hager B.H., Hamburger M.W., Herring T., Kalabaev K.B., Makarov V.I., Molnar P.H., Panasyuk S.V., Prilepin M.T., Reilinger R., Sadybakasov I.S., Souter B.J., Trapeznikov Y.A., Tsurkov V., Zubovich A.* Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, 1996. V. 384. P. 450–453. DOI: 10.1038/384450A0.
- Allmendinger R., Reilinger R., Loveless J.* Strain and rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia, and the Altiplano. *Tectonics*, 2007. V. 26. Iss. 3. TC3013. DOI: 10.1029/2006TC002030.
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X.* ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016. V. 121. No. 8. P. 6109–31. DOI: 10.1002/2016jg013098.
- Bian W., Wu J., Wu W.* Recent crustal deformation based on interpolation of GNSS velocity in continental China. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. P. 3753. DOI: 10.3390/rs12223753.
- Bogusz J., Kłos A., Grzempowski P., Kontny B.* Modelling the velocity field in a regular grid in the area of Poland on the basis of the velocities of European permanent stations. *Pure Appl. Geophys.*, 2014. 171. P. 809–833. DOI: 10.1007/s00024-013-0645-2.
- Dong D., Herring T.A., King R.W.* Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. *J. Geod.*, 1998. V. 72. P. 200–214. DOI: 10.1007/s001900050161.
- Fazilova D.* Uzbekistan coordinate system transformation from CS42 to WGS84 using deformation grid model. *Geodesy and Geodynamics*, 2022. V. 13. Iss. 1. P. 24–30. DOI: 10.1016/j.geog.2021.10.001.
- Fazilova D., Sichugova L.* Deformation analysis based on GNSS measurements in Tashkent region. *E3S Web Conf.* 227 04002, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202122704002.
- Giardini D., Grünthal G., Shedlock K.M., Zhang P.* The GSHAP Global Seismic Hazard Map. *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology. International Geophysics Series 81 B.* Amsterdam: Academic Press, 2003. P. 1223–1239.
- Hackl M., Malservisi R., Wdowinski S.* Strain rate patterns from dense GPS networks. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2009. No. 9. P. 1177–1187. DOI: 10.5194/nhess-9-1177-2009.
- Herring T.A., King R.W., Floyd M., McClusky S.C.* Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology, 2018. Web resource: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf (accessed 10.09.2022).

Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. Physical Geodesy. 2nd edition. Wien: Springer, 2006. 403 p. DOI: 10.1007/978-3-211-33545-1.

IERS Conventions (2010). IERS Technical Note 36. Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.

Kahle H.G., Cocard M., Peter Y., Geiger A., Reilinger R., Barka A., Veis G. GPS-derived strain rate field within the boundary zones of the Eurasian, African, and Arabian Plates. *Journal of Geophysical Research*, 2000. 105(B10): 23. P. 23353–23370. DOI: 10.1029/2000JB900238.

Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A. Stress state of Uzbekistan's seismoactive areas. *Seismic Instruments*, 2020, V. 56, No. 6, P. 679–700. DOI: 10.3103/S0747923920060079.

Sandwell D.T., Wessel P. Interpolation of 2-D vector data using constraints from elasticity. *Geophys. Research Letters*, 2016. No. 43. P. 10703–10709. DOI: 10.1002/2016GL070340.

Smith W.H.F., Wessel P. Gridding with continuous curvature splines intension. *Geophysics*, 1990. No. 55 (3). P. 293–305. DOI: 10.1190/1.1442837.

Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H.F., Tian D. The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019. V. 20. P. 5556–5564. DOI: 10.1029/2019GC008515.

Zubovich A.V., Wang X.Q., 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. GPS velocity field for the Tianshan and surrounding regions. *Tectonics*, 2010. V. 29. TC6014. P. 23. DOI: 10.1029/2010TC002772.

REFERENCES

Abdrakhmatov K., Aldazhanov S.A., Hager B.H., Hamburger M.W., Herring T., Kalabaev K.B., Makarov V.I., Molnar P.H., Panasyuk S.V., Prilepin M.T., Reilinger R., Sadybakasov I.S., Souter B.J., Trapeznikov Y.A., Tsurkov V., Zubovich A. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, 1996. V. 384. P. 450–453. DOI: 10.1038/384450A0.

Allmendinger R., Reilinger R., Loveless J. Strain and rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia, and the Altiplano. *Tectonics*, 2007. V. 26. Iss. 3. TC3013. DOI: 10.1029/2006TC002030.

Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016. V. 121. No. 8. P. 6109–31. DOI: 10.1002/2016jb013098.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Kuchkarov K.I., Mirzaev M.A. Quantitative assessment of seismic hazard for the territory of Uzbekistan according to the estimated maximum ground oscillation rates and their spectral amplitudes. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018. V. 9. No. 4. P. 1173–1188 (in Russian). DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0389.

Bian W., Wu J., Wu W. Recent crustal deformation based on interpolation of GNSS velocity in continental China. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. P. 3753. DOI: 10.3390/rs12223753.

Bogusz J., Kłos A., Grzempowski P., Kontny B. Modelling the velocity field in a regular grid in the area of Poland on the basis of the velocities of European permanent stations. *Pure Appl. Geophys.*, 2014. 171. P. 809–833. DOI: 10.1007/s00024-013-0645-2.

Dong D., Herring T. A., King R. W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. *J. Geod*, 1998. V. 72. P. 200–214. DOI: 10.1007/s001900050161.

Fazilova D. Uzbekistan coordinate system transformation from CS42 to WGS84 using deformation grid model. *Geodesy and Geodynamics*, 2022. V. 13. Iss. 1. P. 24–30. DOI: 10.1016/j.geog.2021.10.001.

Fazilova D.Sh., Magdiev Kh.N. Creating and updating of topographic maps height base in the new national spatial coordinate system: case Fergana valley. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 2. P. 155–164 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-155-164.

Fazilova D., Sichugova L. Deformation analysis based on GNSS measurements in Tashkent region. *E3S Web Conf.* 227 04002, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202122704002.

Giardini D., Grünthal G., Shedlock K.M., Zhang P. The GSHAP Global Seismic Hazard Map. *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology. International Geophysics Series 81 B*. Amsterdam: Academic Press, 2003. P. 1223–1239.

Hackl M., Malservisi R., Wdowinski S. Strain rate patterns from dense GPS networks. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2009. No. 9. P. 1177–1187. DOI: 10.5194/nhess-9-1177-2009.

Herring T.A., King R.W., Floyd M., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology, 2018. Web resource: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf (accessed 10.09.2022).

Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. *Physical Geodesy*. 2nd edition. Wien: Springer, 2006. 403 p. DOI: 10.1007/978-3-211-33545-1.

IERS Conventions (2010). IERS Technical Note 36. Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.

Kahle H.G., Cocard M., Peter Y., Geiger A., Reilinger R., Barka A., Veis G. GPS-derived strain rate field within the boundary zones of the Eurasian, African, and Arabian Plates. *Journal of Geophysical Research*, 2000. 105(B10): 23. P. 23353–23370. DOI: 10.1029/2000JB900238.

Khamidov H.L. The dislocations on the surface of the earth as a result of the strong earthquakes in the Western Tien Shan. *Geodynamics*, 2016. No. 1 (20). P. 119–132 (in Russian).

Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A. Stress state of Uzbekistan's seismoactive areas. *Seismic Instruments*, 2020, V. 56, No. 6, P. 679–700. DOI: 10.3103/S0747923920060079.

Sandwell D.T., Wessel P. Interpolation of 2-D vector data using constraints from elasticity. *Geophys. Research Letters*, 2016. No. 43. P. 10703–10709. DOI: 10.1002/2016GL070340.

Smith W.H.F., Wessel P. Gridding with continuous curvature splines intension. *Geophysics*, 1990. No. 55 (3). P. 293–305. DOI: 10.1190/1.1442837.

Ulomov V.I. On the role of horizontal tectonic movements in seismogeodynamics and seismic hazard prediction. *Physics of the Earth*, 2004. No. 9. P. 14–30 (in Russian).

Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H.F., Tian D. The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019. V. 20. P. 5556–5564. DOI: 10.1029/2019GC008515.

Zubovich A.V., Wang X.Q., 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. GPS velocity field for the Tianshan and surrounding regions. *Tectonics*, 2010. V. 29. TC6014. P. 23. DOI: 10.1029/2010TC002772.