

Развитие геоцентрической системы координат Республики Узбекистан

© Д. Ш. Фазилова¹, М. Д. Махмудов², Б. Т. Халимов¹

¹АИ АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

²ТУИТ, г. Ташкент, Республика Узбекистан

Реферат

К настоящему моменту на большей части территории Республики Узбекистан с развитой инфраструктурой построена спутниковая геодезическая сеть (СГС), базирующаяся на измерениях ГНСС, включающая сеть референциальных геодезических пунктов, спутниковую геодезическую сеть нулевого класса (СГС-0) и спутниковую геодезическую сеть первого класса (СГС-1). Значительные улучшения в технологии позиционирования, позволяющие определять координаты на сантиметровом уровне точности, ведут к постановке задачи модернизации системы координат страны для постоянно расширяющейся базы пользователей в сфере геодезии, картографирования, проектирования, сельского хозяйства и других областей. Одно из направлений исследований — создание полудинамической системы координат, в которой заданы координаты на определенную эпоху и известна модель современных тектонических движений земной поверхности. Целью данной работы является определение локального поля горизонтальных скоростей движений земной коры региона.

Данные наблюдений GPS-пунктов за период 2005–2018 гг. обрабатывались с помощью пакета программ GAMIT/GLOBK v.10.71. Анализ включал три основных шага: оценку координат и скоростей станций с использованием суточных фазовых измерений и стандартных моделей, рекомендованных IERS Conventions (2010), ([IERS conventions, 2010](#)), привязку региональной сети к глобальной системе отсчета ITRF2014 ([Altammimi, 2016](#)) с помощью фильтра Калмана и определение локальных смещений относительно «стабильной» Евразийской плиты с использованием угловой скорости вращения плиты по ITRF2014.

Ошибка повторяемости горизонтальных координат получена на уровне 1.0–3.2 мм и 3.2–6.5 мм для высоты. Общее движение пунктов относительно Евразийской плиты в ITRF2014 составило около 27 мм/год на северо-восток. Построено локальное поле векторов горизонтальных скоростей. Значения скоростей в регионе находятся в диапазоне от 2.3–11.0 мм в год. Причем зоны максимальных смещений расположены вдоль Западного Тянь-Шанского линеамента и в Ферганской долине.

Ключевые слова: спутниковая геодезическая сеть, GPS, ITRF2014, скорости пунктов.

Контакты для связи: Фазилова Дилбар Шамуратовна (dil_faz@yahoo.com).

Для цитирования: Фазилова Д. Ш., Махмудов М. Д., Халимов Б. Т. Развитие геоцентрической системы координат Республики Узбекистан // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 59. С. 19–25.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.59.19-25>

Development of the Geocentric Coordinate System of the Republic of Uzbekistan

D. Sh. Fazilova¹, M. D. Makhmudov², B. T. Khalimov³

¹Astronomical Institute of the Uzbek Academy of Sciences, Tashkent, Republic of Uzbekistan

²Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al-Khwarizmi, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Abstract

To date, in most of the territory of the Republic of Uzbekistan with a developed infrastructure, a satellite geodetic network (SGS) has been built, based on measurements of global navigation satellite systems, including a network of reference geodetic points (RGP), a satellite geodetic network of zero class (SGS-0) and a first-class satellite geodetic network (SGS-1). Significant improvements in positioning technology, which allow determining coordinates at the centimeter level of accuracy, have set the task of modernizing the country's coordinate system for an ever-expanding user base in the field of geodesy, mapping, design, agriculture and other fields. One of the areas of research is the creation of a semi-dynamic coordinate system in which coordinates are given for a certain epoch and a model of modern tectonic movements of the Earth's surface is known. The purpose of this work is to determine the local field of horizontal velocities of movements of the Earth's crust in the region.

Observation data of GPS points for the period 2005–2018 were processed using the GAMIT / GLOBK v.10.71 software package. The analysis included three main steps: estimating the coordinates and velocities of stations using daily phase measurements and standard models recommended by IERS Conventions (2010) ([IERS conventions, 2010](#)), connect-

ing the regional network to the ITRF2014 global reference system using the Kalman filter, and determining local displacements with respect to the “stable” Eurasian plate using the rotated ITRF2014 EURA frame using the ITRF2014 angular velocity.

The repeatability error of the horizontal coordinates was obtained at the level of 1.0–3.2 mm and 3.2–6.5 mm for the height. The total motion of points relative to the Eurasian plate in ITRF2014 ([Altammimi, 2016](#)) was about 27 mm/year to the northeast. Local field of vectors of horizontal velocities was constructed. The velocity values in the region are in the range from 2.3 mm to 11.0 mm per year. Moreover, the zones of maximum displacements are located along the Western Tien Shan lineament and in the Fergana Valley.

Keywords: satellite geodetic network, GPS, ITRF2014, station velocity.

Contacts: Dilbar Sh. Fazilova (dil_faz@yahoo.com).

For citation: Fazilova D. Sh., Makhmudov M. D., Khalimov B. T. Development of the geocentric coordinate system of the Republic of Uzbekistan // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 59. P. 19–25.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.59.19-25>

Введение

Повышение эффективности координатного обеспечения может быть обеспечено за счет перехода к высокоточной системе позиционирования ITRS (International Terrestrial Reference System). Но реализации таких систем, как глобальная система отсчета ITRF2014, ввиду ограниченного количества пунктов, их реализующих, не могут быть использованы при решении задач науки и экономики той или иной страны ([Кафтан и др., 2015](#)). Большинство высокоразвитых стран, имеющих значительные территории, принимая активное участие в международных проектах и программах по созданию единой общеземной геоцентрической системы координат, создают также национальные (государственные) системы координат, ориентированные на сохранение и развитие геодезического и картографического потенциала, уже созданного к этому времени ([Горобец и др., 2013](#); [Collier, 2002](#); [Андреев и др., 2013](#); [Blick, et al., 2009](#); [Janssen, 2017](#); [Bond, 2017](#)). Одним из направлений исследований этих работ является создание полудинамической системы координат, в которой заданы координаты на определенную эпоху и известна модель современных тектонических движений земной коры ([Haasdyk, et al., 2014](#)).

На территории Республики Узбекистан, расположенной в зоне активных тектонических движений земной коры, доходящих до 3–5 см/год, до настоящего времени действует статическая система отсчета СК-42. Вертикальные координаты относятся к Балтийской системе высот 1977 г. Значительные улучшения в технологии позиционирования, позволяющие определять координаты на сантиметровом уровне точности с помощью таких методов, как ГНСС, привели к постановке задачи модернизации системы координат страны для постоянно расширяющейся базы пользователей в сфере геодезии, картографирования, проектирования, сельского хозяйства и других областей ([Постановление КМ РУз, 2017](#)). К настоящему моменту на территории страны построена СГС, включающая около 200 пунктов. К основным за-

дачам, решаемым при создании геоцентрической системы координат республики, относятся: обеспечение возможности использования широкого спектра информации о местоположении, которая может быть получена на основе различных видов данных и, следовательно, является привязанной к национальной (СК-42) и глобальной (ITRF2014) системам отсчета, поддержание пространственной инфраструктуры данных на основе динамического координатного кадастра, а именно четырехмерной системы координат, в которой дополнительным параметром является скорость движения опорных пунктов и, наконец, введение трехмерной системы координат путем корректного учета аномалий высот области ([Фазилова и др., 2019](#); [Фазилова и Магдиев, 2021](#)). Целью данной работы является обработка полученных за период 2005–2018 гг. измерений СГС для моделирования горизонтального поля скоростей движений земной коры региона.

Основная часть

СГС развивалась на территории республики поэтапно с 2005 по 2015 гг., и большей частью пункты устанавливались в областях с развитой инфраструктурой для создания координатной базы Национальной геоинформационной системы. В настоящий момент СГС включает 3 подсети: сеть референтных геодезических пунктов (РГП), спутниковую геодезическую сеть 0-го класса (СГС-0) и спутниковую геодезическую сеть 1-го класса (СГС-1). Сеть покрывает восточную часть территории страны (рис. 1). С 2018 г. на 50 пунктах сети были начаты непрерывные наблюдения в режиме дифференциальной коррекции. Измерения проведены в основном только с использованием системы GPS. Частота дискретизации данных — 30 с, а угол отсечки над горизонтом — 10°. Основные характеристики сети СГС — период наблюдений, длина сессий — приведены в таблице.

Данные наблюдений GPS-пунктов обрабатываются с помощью пакета программ GAMIT/GLOBK v. 10.71 ([Herring, et al., 2018](#)), обработка

Таблица

Основные характеристики сети СГС

Подсеть	Количество пунктов	Расстояние между пунктами, км	Период измерений	Длительность сессии
РГП	4 MAGK (Ташкент) FARG (Фергана) JARQ (Джаркурган) URGA (Ургенч)	500–800	9.09.05–9.11.05 15.08.06–28.09.06 2010–2015 гг.	от 2 до 20 дней
СГС-0	15	100–300	13.09.05–31.10.05 17.08.06–26.09.06 2010–2015 гг.	3 дня
СГС-1	145	30–150	2010–2015 гг.	2 сессии с продолжительностью минимум по 6 ч

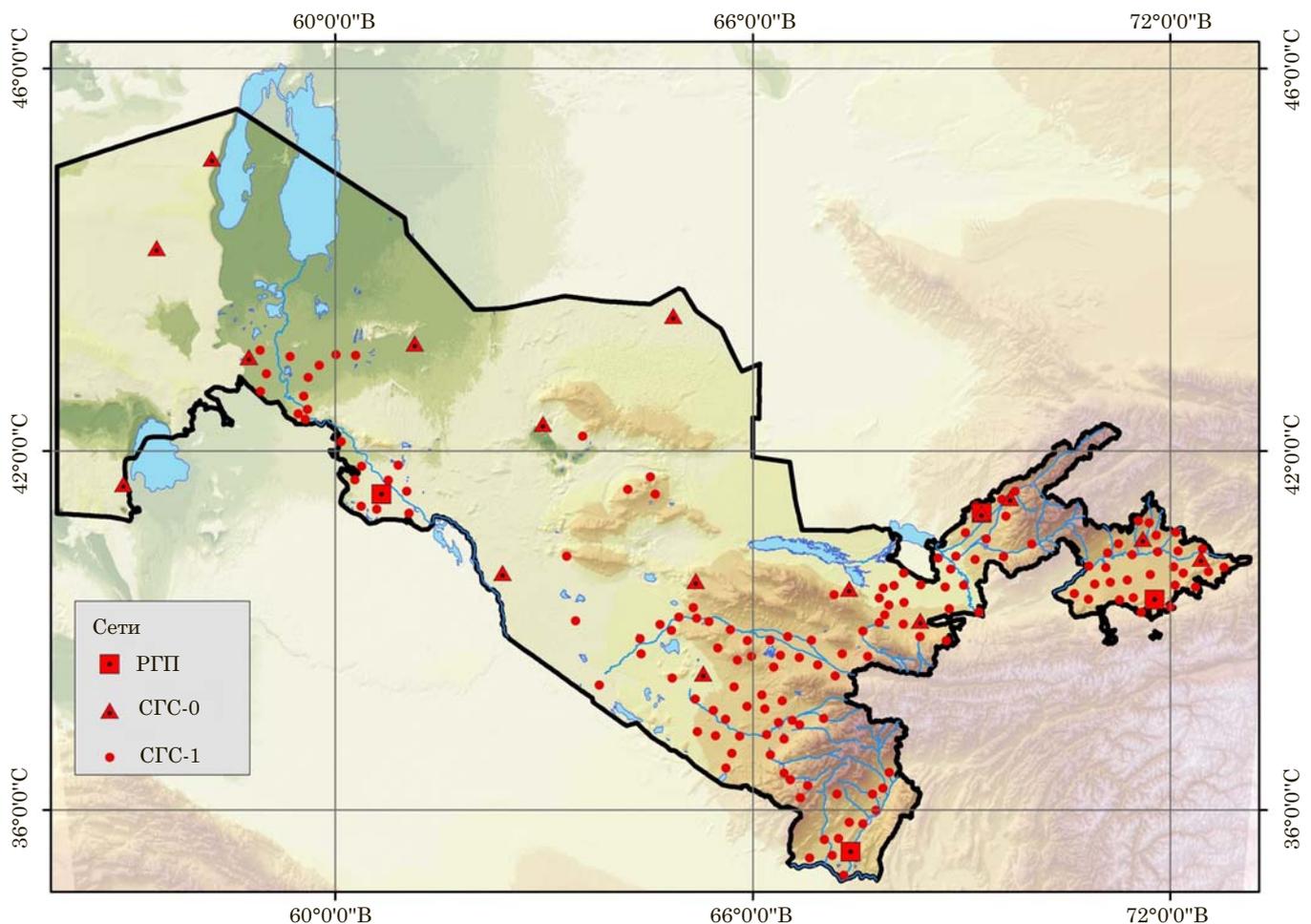


Рис. 1. Спутниковая геодезическая сеть Республики Узбекистан

включает 3 этапа (Dong, et al., 1998). На первом этапе суточные фазовые измерения используются для оценки координат станций и зенитной задержки атмосферы на каждой станции, а также параметров орбит спутников и ориентации Земли. Автоматическая итерация в блоке GAMIT, основанная на методе наименьших квадратов, выпол-

няется до получения значений остатков a-priori-заданных и оцениваемых координат до уровня миллиметра. При этом в программе autcln восстанавливаются или удаляются циклические сдвиги с использованием двойных или тройных разностей наблюдений. Для всех решений используются высокоточные геоцентрические орбиты спутников

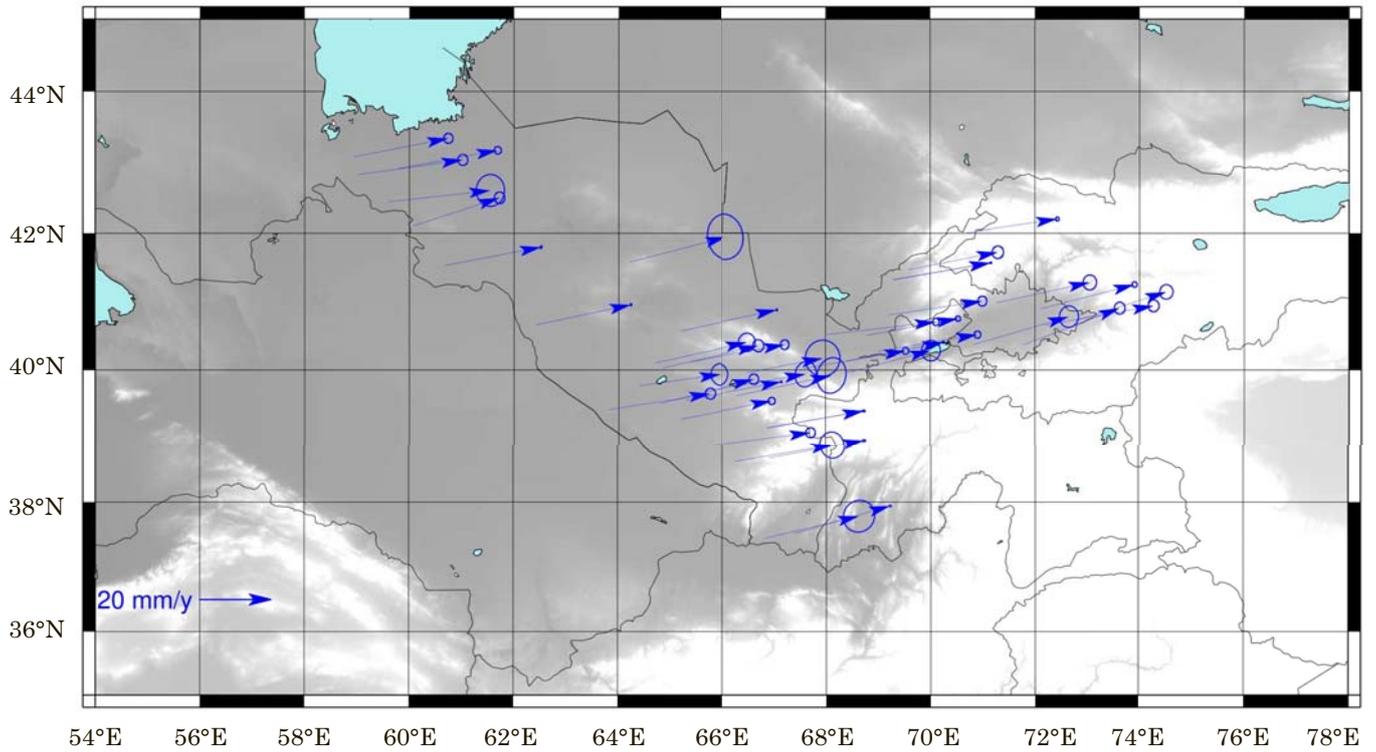


Рис.2. Скорости пунктов сети относительно Евразийской плиты

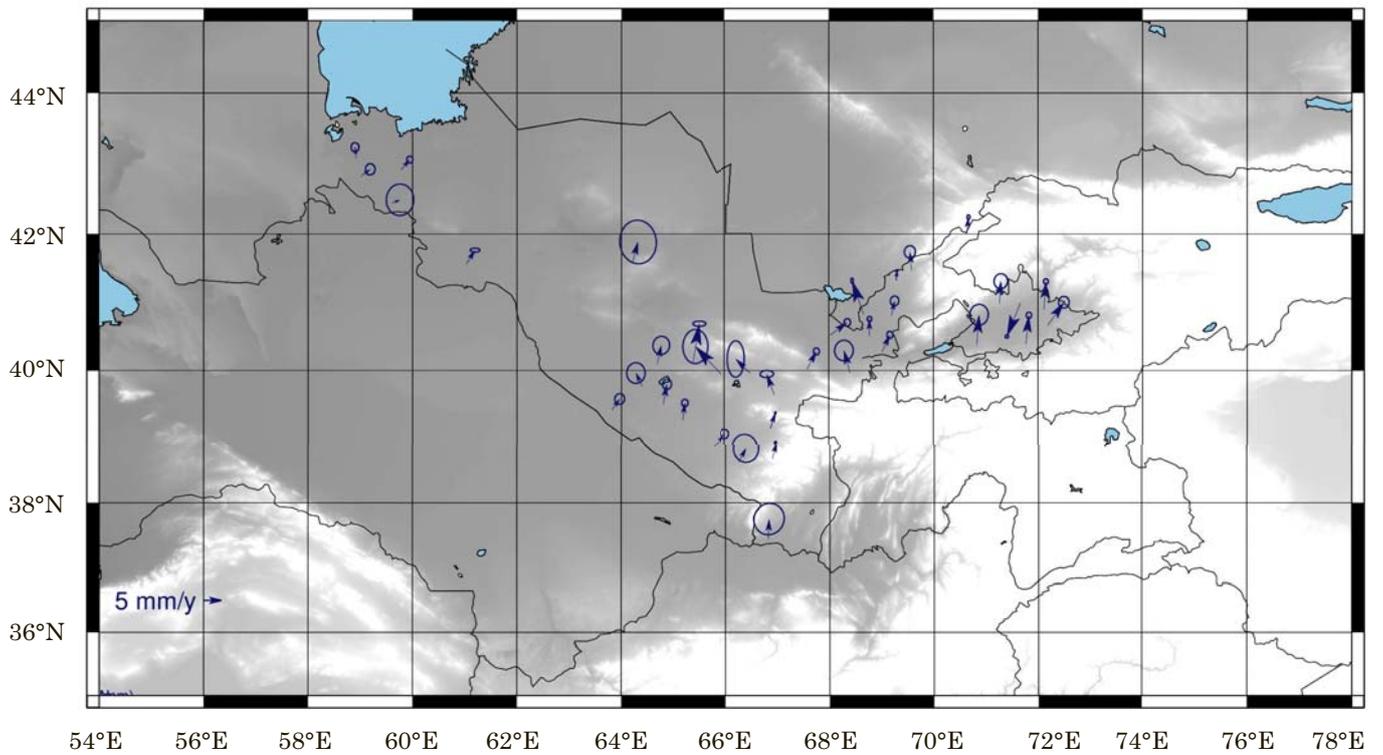


Рис. 3. Значения остатков горизонтальных внутри плитных скоростей после удаления жесткого вращения Евразийской плиты

IGS. Для каждого из спутников выполняется оценка широкополосной неоднозначности на уровне 95 % с помощью комбинации Мельбурна-Вуббена ([Dubbini, et al., 2010](#)) и данных по смещению кода задержки спутников. Кроме того, для анализа выбраны стандартные модели: гравитационного поля IERS-1992 ([IERS conventions, 2010](#)), модель негравитационных ускорений спутников ([Beutler, et al., 1994](#)), модель Саастамойнена — для оценки сухой и влажной частей атмосферных задержек ([Saastamoinen, 1971](#)), модель глобального давления и температуры GPT2 ([Boehm, et al., 2006](#)) — для коррекции зенитной задержки и модель океанической приливной нагрузки FES2004 ([Lyard, et al., 2006](#)). Для соединения региональной сети с глобальной системой отсчета в обработку включено 11 непрерывно работающих станций международной сети IGS (ARTU, BADG, CHUM, GUAO, HYDE, IISC, IRKT, KIT3, MDVJ, POL2, TASH). На втором этапе суточные файлы объединяются в свободные ограниченные решения для каждой сессии региональной кампании. И, наконец, на третьем этапе, полученные с помощью фильтра Кальмана в модуле GLOBK ([Herring, et al., 2010](#)) отдельные решения используются для оценки согласованного набора координат и скоростей пунктов в Международной наземной системе отсчета ITRF2014 ([Altamimi, et al., 2016](#)). Реализация системы отсчета применяется с использованием набора глобально распределенных ограничивающих станций и решения для смещения, вращения и масштабного коэффициента.

Качество исходных данных оценивается по значениям СКО отклонений для каждого спутника и станции. Диапазон ошибок для лучших станций составляет от 4.0 мм до 5.3 мм, а для худших — от 8.0 мм до 12.4 мм. Согласно данным разработчиков программы, уровень ошибки более 10 мм является высоким, но приемлемым, и может быть обусловлен внешними источниками шума (например, плохое качество наблюдения, многопутность сигнала) ([Herring, et al., 2018](#)). В нашем решении для худших станций выполняется повторная обработка с использованием скорректированных априорных значений координат. При оценке корректности и точности решения для полученных временных рядов координат используются 2 критерия: количество разрешенных неопределенностей базисов (ambiguity resolution) и его нормализованное среднеквадратическое значение (квадратный корень из χ^2 на степень свободы). Процент решения для неоднозначностей составляет 97 % — для Wide Lane и 91 % — для Narrow Lane полос. Это подтверждает хорошее

качество исходных данных для получения надежного решения, отсутствие зашумленных псевдодальностей, хороший размер и конфигурацию сети, продолжительность сеанса, качество орбит и априорных координат, а также атмосферные условия. Нормализованное среднеквадратичное значение для решения с ограничениями без неоднозначностей, с ограничениями с устраненными неоднозначностями, свободного без неоднозначностей и свободного с устраненными неоднозначностями составляет порядка 0.19 мм для всех сеансов наблюдений. Ошибка повторяемости горизонтальных координат получена на уровне 1.0–3.2 мм и 3.2–6.5 мм для высоты. На эту ошибку могли повлиять короткие 6-часовые сеансы для станций сети СГС-1.

Определение системы отсчета и привязка к глобальной системе отсчета выполнены с использованием ежедневных комбинированных решений путем стабилизации с использованием априорно заданных скоростей в ITRF2014 (рис. 2). Полученный результат подтверждает очевидное общее движение Евразийской плиты на северо-восток со скоростью ~ 27 мм в год с эллипсами достоверности 95 %. Среднее значение скорости пунктов составило 26.18 ± 0.66 мм в год и 5.85 ± 1.19 мм в год по долготе и широте соответственно.

Локальная система отсчета определялась путем оценки семи параметров (три компонента скорости, сдвиг и три параметра вращения) относительно глобального фрейма путем минимизации горизонтальных скоростей стабильных пунктов международных станций IGS относительно системы ITRF2014 с использованием угловой скорости вращения плиты по ([Altamimi, et al., 2016](#)) (рис. 3). Среднее значение локальных смещений пунктов составило 5.0 ± 0.06 мм в год и 4.3 ± 0.7 мм в год по долготе и широте соответственно.

Для более наглядного представления и интерпретации горизонтальных перемещений региона нами построено поле векторов скоростей интерполированием на восточную область территории, где количество пунктов наибольшее (рис. 4). Значения скоростей пунктов в регионе относительно «стабильной» Евразии находятся в диапазоне от 2.3 мм до 11.0 мм в год. Как видно, наиболее крупномасштабные эффекты и максимальные смещения сосредоточены в зонах понижения рельефа, таких как граница Западного Тянь-Шанского линеймента и Ферганская долина. На южной и восточной части территории величины скоростей составили около 5 мм в год, причем северо-восточное направление векторов может быть следствием вращательного движения.

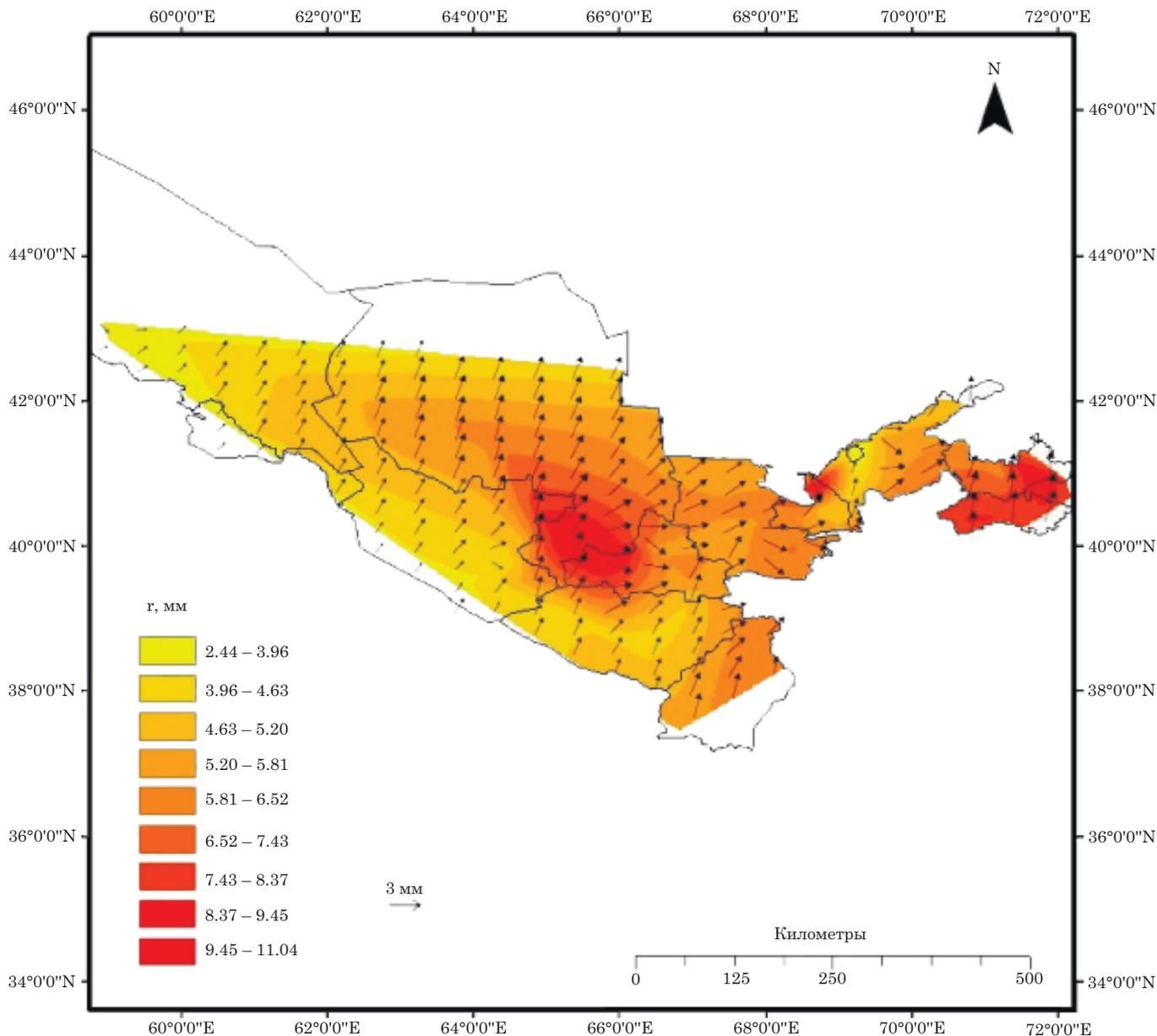


Рис. 4. Поле векторов скоростей восточной части территории республики

Заключение

В данной работе выполнена обработка данных GPS-сети Республики Узбекистан для определения горизонтального поля скоростей региона. По результатам обработки в программе GAMIT/GLOBK можно сделать вывод, что качество исходных данных, выбранные модели обработки, конфигурация сети, продолжительность сеансов являются достаточным для получения надежного решения. Ошибка повторяемости горизонтальных координат получена на уровне 1.0–3.2 мм и 3.2–6.5 мм для высоты. Ряд ограничений, такие как доступность измерений, отсутствие на некоторых пунктах циклических измерений, не позволили провести более детальный анализ. Для определения региональной и медленной деформации региона, согласно классическим принципам, вы-

полнена адаптация данных всего периода анализа к Международной системе отсчета ITRF2014. Полученный результат подтвердил общее движение Евразийской плиты на северо-восток со скоростью ~27 мм/год с эллипсами достоверности 95 %. Построена локальная система отсчета путем минимизации горизонтальных скоростей стабильных пунктов международных станций IGS с использованием угловой скорости вращения плиты по модели ITRF2014. Построенное поле векторов скоростей согласовано с результатами геологических моделей. Величина изменения позиций станций колеблется от 2.3 мм до 11.0 мм в год. Причем максимальные смещения происходят вдоль Западного Тянь-Шанского линеамента и в Ферганской долине.

Благодарность

Работа выполнена в рамках базового финансирования фундаментальных исследований Астрономического института АН РУз. GPS измерения были выполнены Агентством по кадастру при ГНК РУз. Авторы также благодарят группу разработчиков программы GAMIT/GLOBK за предоставленное программное обеспечение.

Литература

- Андреев В. К., Джанпейсов М. Э., Новиков Е. В. и др. Состояние и актуальные проблемы модернизации ГГС Республики Казахстан // Геопрофи. 2013. № 1. С. 13–16.
- Горобец В. П., Демьянов Г. В., Побединский Г. Г., Яблонский Л. И. Государственная геоцентрическая система координат Российской Федерации // Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2013. IX Международный научный конгресс: сб. материалов. Новосибирск: СГГА, 2013. Т2. С. 76–94.
- Кафтан В. И., Малкин З. М., Побединский Г. Г., Столяров И. А. Отсчетные основы // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле». 2015. № 3. С. 9–21.
- «О применении и открытом использовании на территории Республики Узбекистан международных геодезических систем координат». Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан. № 1022. 26.12.2017 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lex.uz/docs/3481466> (дата обращения: 18.09.2021).
- Фазилова Д. Ш., Кузин С. П., Махмудов М. Д. Исследование основных компонентов временных рядов изменения координат станций GNSS и DORIS в Китае // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 49. С. 69–77.
- Фазилова Д. Ш., Магдиев Х. Н. Создание и обновление высотной основы топографических карт в национальной пространственной системе координат: на примере Ферганской долины // InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories. Proceedings of the International conference. Moscow, Faculty of Geography MSU. 2021. Vol. 27. Part 2. P. 155–164. doi: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-155-164.
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X. ITRF2014: A new release of the International terrestrial reference frame modelling nonlinear station motions // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2016. Vol. 121. Iss. 8. P. 6109–6131. doi:10.1002/2016JB013098.
- Beutler G., Brockmann E., Gurtner W., et al. Extended orbit modeling techniques at the CODE Processing Center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS): Theory and initial results // Manuscr. Geod. 1994. Vol. 19, no. 6. P. 367–386.
- Boehm J., Niell A., Tregoning P., Schuh H. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data // Geophys. Res. Lett. 2006a. Vol. 33. Iss. 7. L07304. doi:10.1029/2005GL025546.
- Bond J. Migrating from ATS77 to NAD83 (CSRS) in Nova Scotia // Geomatica. 2017. Vol. 71, no. 2. P. 75–87. doi: 10.5623/cig2017-201.
- Blick G., Donnelly N., Jordon A. The Practical Implications and Limitations of the Introduction of a Semi-Dynamic Datum — A New Zealand Case Study // Geodetic Reference Frames, International Association of Geodesy Symposia. 2009. Vol. 134. P. 115–120.
- Collier P. Development of Australia's national GDA94 transformation grids, Consultant's report to the Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping. Univ. of Melbourne, Australia, 2002.
- Dong D., Herring T. A., King R. W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data // J. Geod. 1998. Vol. 72. P. 200–214. doi:10.1007/s001900050161.
- Dubbini M., Cianfarra P., Casula G., et al. Active tectonics in northern Victoria Land (Antarctica) inferred from the integration of GPS data and geologic setting // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115, B12421. doi:10.1029/2009JB007123.
- Haasdyk J., Donnelly N., Harrison C., et al. Options for modernizing the geocentric datum of Australia: CEUR Work-shop Proceedings, 2014. №1142. P.72–85.
- Herring T. A., King R. W., Floyd M., McClusky S. C. Introduction to GAM-IT/GLOBK. Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology. 2018 [Электронный ресурс]. URL: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf (дата обращения: 12.03.2021).
- Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, GLOBK Reference Manual, Release 10.5. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA. 2010b [Электронный ресурс]. URL: http://chandler.mit.edu/~simon/gt/gk/GLOBK_Ref.pdf (дата обращения: 12.03.2021).
- IERS Conventions 2010 (IERS Technical Note 36) / ed. by G. Petit, B. Luzum. Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. 2010. 179 p.
- Janssen V. GDA2020, AUSGeoid2020 and ATRF: An Introduction // Proceedings of the 22nd Association of Public Authority Surveyors Conference (APAS2017) 20–22 March 2017. Shoal Bay, New South Wales, Australia. 2017. P. 3–20.
- Lyard F., Lefèvre F., Letellier T., Francis O. Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004 // Ocean Dynamics. 2006. Vol. 56. P. 394–415.
- Saastamoinen J. Int. symp. on the use of artificial satellite // Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellite. Washington, 1971 P. 247–251.