УДК: 528.93

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-155-164

Д.Ш. Фазилова¹, Х.Н. Магдиев²

СОЗДАНИЕ И ОБНОВЛЕНИЕ ВЫСОТНОЙ ОСНОВЫ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ В НАЦИОНАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ: НА ПРИМЕРЕ ФЕРГАНСКОЙ ДОЛИНЫ

АННОТАЦИЯ

Использование высокоточной технологии глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) поставили задачу разработки основ создания и использования новой национальной открытой системы координат в Республике Узбекистан. Для геодезических работ в республике используется система координат СК42, базированная на эллипсоиде Красовского. В качестве высотной основы принята Балтийская нормальная система высот (1977), привязанная к среднему уровню моря с нулевой отметкой Кронштадтского футштока.

Учитывая, что для территории страны нет информации о точном геоиде, определенным современными методами, построение высотной отсчетной основы является актуальной задачей. Результаты GPS-измерений представляются обычно в системе координат относительно эллипсоида WGS-84, и должны быть преобразованы в национальные, местные системы координат для решения практических задач. И, если горизонтальные координаты GPS могут напрямую использоваться для вычислительных работ, то, получаемые геодезические высоты, должны быть преобразованы в ортометрические (или нормальные) высоты для заданной территории.

В данной работе проводилось исследование методов обновления высотной отсчетной основы топографических карт масштаба 1 : 200 000 с использованием матрицы деформаций между двумя опорными системами координат на примере территории Ферганской долины. Для преобразования между геодезическими и нормальными высотами между системами координат СК42 и WGS84 создана матрица вертикальных деформаций в формате GTX Национального управления океанических и атмосферных исследований Канады (NOAA).

Исходными данными для исследования были выбраны результаты классических нивелирных и спутниковых GPS измерений на 144 «общих» точках геодезической сети республики с известными координатами в двух системах. Разница между «реальными» значениями геодезических высот, полученными по GPS измерениям и «смоделированными» колеблется в пределах от -0,13 м до 0,67 м. Выявлено, что максимальные расхождения высот находятся в районе Ферганской впадины и, могут быть следствием как аномального гравитационного поля в данной части территории, так и

¹ Астрономический институт имени Улугбека Академии наук Республики Узбекистан, ул. Астрономическая, д. 33, 100052, Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: dil_faz@yahoo.com

² Агентство по кадастру, ул. Чупоната, д.5, 100097, Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: hasan.magdiiev@gmail.com

недостаточной плотности станций сети GPS в северо-восточной части исследуемой области. Аномалии высот геоида по глобальной геопотенциальной модели EGM2008 выбраны для вычисления величин нормальных высот для обновленной топографической карты в WGS84. Расхождения между значениями нормальных высот в СК42 и WGS84 находится в пределах -3,93 м и 0,31 м.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СК42, WGS84, преобразование координат, GPS, матрица деформаций высот, система отсчета высот.

Dilbarkhon Sh. Fazilova¹, Khasan N. Magdiev²

CREATING AND UPDATING OF TOPOGRAPHIC MAPS HEIGHT BASE IN THE NEW NATIONAL SPATIAL COORDINATE SYSTEM: CASE FERGANA VALLEY

ABSTRACT

The use of high-precision technology of the global navigation satellite system (GNSS) has put forward the task of developing the methods for the creation and the use of a new national open coordinate system in the Republic of Uzbekistan. In the country, up to now the CS42 coordinate system, based on the Krasovsky ellipsoid used for geodetic works. The Baltic normal system of heights (1977), tied to the mean sea level with the zero mark of the Kronstadt tide gauge, was adopted as a height datum.

Due to lack geoid information for the territory of the country determined by modern methods, the realization of a height reference datum becomes an urgent task. The results of GPS measurements usually presented in a coordinate system relative to the WGS-84 ellipsoid, and have to convert to national, local coordinate systems to solve practical problems. The horizontal GPS coordinates can directly use for computational work, but the geodetic heights have to convert to orthometric (or normal) heights for a given area using geoid information.

In this work, a study was made of methods for updating the height reference datum of topographic maps at a scale of 1 : 200,000 using a deformation matrix between two reference coordinate systems for the territory of the Fergana Valley. To convert between geodetic and normal heights between the CS42 and WGS84 coordinate systems, a vertical deformation matrix in the GTX format of the National Oceanic and Atmospheric Administration of Canada (NOAA) have created.

To create a file of elevation displacements, the results of classical leveling and satellite GPS measurements have used at 144 "common" points of the entire network of the country with known coordinates in two systems. The difference between the "real" values of geodetic heights obtained from GPS measurements and "modeled" ranges from -0.13 m to 0.67 m. It has revealed that the maximum differences in heights are in the area of the Fergana basin itself and may be a consequence of both an anomalous gravitational field in this part of the territory, and an insufficient density of stations of the GPS network in the northeastern part of the area. The normal height values for the updated topographic map in WGS84 have computed using the EGM2008 high precision geopotential model. The discrepancy between the values of heights in CS42 and WGS84 is in the range of -3.93 m and 0.31 m.

¹ Ulugh Beg Astronomical Institute of Uzbek Academy of Sciences, Astronomicheskaya str., 33, 100052, Tashkent, Republic of Uzbekistan, *e-mail: dil_faz@yahoo.com*

² Agency for cadastre, Chupon ota str., 5, 100097, Tashkent, Republic of Uzbekistan, *e-mail: hasan.magdiev@gmail.com*

KEYWORDS: CS42, WGS84, coordinate transformation, GPS, vertical deformation matrix, vertical datum.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодняшний уровень развития геодезических и информационно-коммуникационных технологий в Республике Узбекистан стал основой создания Национальной географической информационной системы (НГИС) для оперативного предоставления пространственных данных, принятия решений с целью достижения максимальной эффективности в решении задач устойчивого использования природных и экономических ресурсов, исследования изменений окружающей среды, управления чрезвычайными ситуациями, контроля территорий, развития культурно-социальной среды и др. Для комплексного представления и анализа информации о территории, природных ресурсах, техногенных объектах, их динамике в НГИС прежде всего необходимо решить задачу модернизации опорной координатной системы (датума). Это обеспечит пользователям на основе высокоточного позиционирования возможность согласовать на необходимом уровне точности с физическим миром соответствующие пространственные данные. В Республике Узбекистане до настоящего времени используется система координат СК42, базированная на эллипсоиде Красовского и в качестве высотной основы принята Балтийская нормальная система высот (1977), привязанная к среднему уровню моря с нулевой отметкой Кронштадтского футштока. Методы реализации СК42, ее ориентация в пространстве и, особенно, региональные геодезические особенности привели к различию в определении положения объектов в этих геодезических системах от нескольких до сотен метров [Макаренко и др., 2000]. Широкое использование спутниковых методов, таких как Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), высокая точность, разрешение которых, позволяют определять малые изменения в геоцентрических координатах наземных пунктов на коротких интервалах времени, стали основой для развития НГИС и поставили задачу разработки основ создания и использования новой национальной открытой системы координат и в Республике Узбекистан¹. В 2005 году в стране стартовала программа по созданию государственной геодезической сети (ГГС) на основе измерений ГНСС. Достигнуты значительные результаты по созданию Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), совершенствованию методов ее построения и повышению точности координат за счет внедрения новых технологий измерений и совмещения с существующими станциями Международной сети GNSS (Китаб, Ташкент, Майданак и Майдантал) [Fazilova et al., 2018]. Результаты GPS-измерений представляются обычно в системе координат относительно эллипсоида WGS84, и должны быть преобразованы в национальные, местные системы координаты для решения практических задач. Геодезические широты и долготы GPS могут напрямую использоваться для вычислительных работ и форма поверхности в системе WGS84 в полученной долготно-широтной сетке такая же, как и региональная эллипсоидальная поверхность. А получаемые геодезические высоты должны быть преобразованы в ортометрические (или нормальные) высоты для заданной территории. Разница между локальным и глобальным эллипсоидами, обусловленная их взаимным расположением, включает разность этих высот. И основной задачей координатного преобразования является

¹ О применении и открытом использовании на территории Республики Узбекистан международных геодезических систем координат. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 26.12.2017 №1022. Электронный ресурс: http://www.lex.uz/pages/getpage.aspx?lact_id=3481466 (дата обращения 24.03.2021).

определение размеров и формы нового эллипсоида, наилучшим образом удовлетворявшего для заданной территории. Применение классических методов преобразования координат, таких как 7-параметрический метод Бурша требует высокоточного определения геодезической высоты в СК42 и точной модели геоида. Для улучшения точности конформных преобразований координат во многих странах (США, Канада, Австралия, Хорватия и др.) используют так называемые файлы сеток деформаций (модели преобразования на основе сеток) [Dewhurst, 1990; Junkins, 1990; Collier, 2002; Grgic et al., 2015]. Сетка обеспечивает более точное моделирование преобразований, адаптированное к плотности станций сети. В данной статье рассмотрено построение матрицы деформаций высот формата (GTX) Национального управления океанических и атмосферных исследований Канады (NOAA) между локальной СК42 и пространственной системы координат, базированной на эллипсоиде WGS84 для территории Ферганской долины в Узбекистане.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сетка (грид) вертикальных смещений была сформирована на основе данных измерений классической нивелирной и спутниковой GPS сетей для всей территории республики с использованием следующих данных:

- 1) Государственная нивелирная сеть (высотная основа) Республики Узбекистан является фрагментом общей сети на территории СНГ и включает линии нивелирования I класса (протяженность 11791 км, 3888 пунктов) и II класса (протяженность 6409 км, 2132 пункта). 975 пункта были восстановлены в 2013–2017 годах при развитии GPS сети.
- 2) Спутниковая государственная сеть (СГС) GPS была создана в стране на основе наличия инфраструктуры и географических потребностей и, следовательно, не охватывает всю страну (рис. 1). Формирование СГС из более 200 станций проводилось с 2005 по 2015 год. На сегодняшний день функционируют: сеть постояннодействующих референчных пунктов (РГП), спутниковые геодезические сети нулевого (СГС0) и первого (СГС1) классов. Развивается также сеть 50 станций, работающих в режиме дифференциальной коррекции. Измерения на станциях государственной сети выполнялись ранее только с использованием глобальной навигационной системы GPS, поэтому далее будет рассматриваться обработка только данных только этой системы. Для определения координат исследуемых станций использовался программный комплекс GAMIT/GLOBK версии 10.71, разработанный в MIT (Massachusetts Institute of Technology), Harvard-Smithsonian Center of Astrophysics и Scripps Institution of Oceanography [Herring et al., 2018]. Для получения устойчивого решения и точной привязки региональных измерений к международной опорной системе координат ITRF2014 [Altamimi et al., 2016], кроме пунктов KIT3, TASH, в обработку были включены еще 9 станций международной службы GNSS для геодинамики IGS (ARTU, BADG, CHUM, GUAO, HYDE, IISC, IRKT, MDVJ, POL2). Угол отсечки по высоте был взят 15°. Обработка выполнялась согласно рекомендациям и стандартам международной службы вращения Земли IERS2010 [IERS, 2010].

Рис. 1. GPS сеть на территории Республики Узбекистан
 Fig. 1. GPS network in the territory of the Republic of Uzbekistan

На сегодняшний день 144 пункта являются пунктами обоих датумов. Для каждой из «общих точек» на основе вычисленной разницы широт, долгот и высот геоида сформированы сетки (гриды) смещений с использованием алгоритма «Minimal Curvature» программы Golden Software Surfer. Разрешение сетки высот геоида (und.grd) было выбрано $2.5' \times 2.5'$. Полученный грид был конвертирован в матрицу вертикальных деформаций в формате NOAA GTX. Далее использованы утилиты библиотеки GDAL для трансформирования координат из СК42 в систему WGS84. Исследование полученных матриц деформаций проводилось по двум направлениям: оценка точности самого файла смещений на основе сравнения с результатами реальных измерений на GPS станциях и обновление высотной основы карт масштаба 1: 200 000 для территории Ферганской долины.

Территория Ферганской долины в Узбекистане была выбрана для обновления топографических карт масштаба 1: 200 000 (рис. 2). Бассейн является крупнейшей межгорной впадиной в Центральной Азии, между горными системами Тянь-Шаня на севере и Гиссаро-Алая на юге. Долина имеет длину около 300 км и ширину до 70 км, образуя территорию площадью 22 000 квадратных километров. Выбор этой области обусловлен несколькими причинами. Во-первых, первые работы по топографическому обеспечению региона Центральной Азии начались в начале XX века, и большая часть измерений для создания единой системы триангуляции, исследования геоида проводилась здесь. С другой стороны, регион относится к районам с развитой инфраструктурой на территории респуб-

лики, для которых пока сеть GPS-станций имеет хорошую плотность. И, наконец, разнообразный рельеф местности от равнинной до гористых частей является хорошей моделью для тестирования сетки смещения и оценки точности процедуры преобразования между локальной СК42 и геоцентрической WGS84 системами координат и оценки аномалий высот геоида исследуемой области.

Рис. 2. Фрагмент топографической карты масштаба 1:200 000 Ферганской долины

Fig. 2. Fragment of a topographic map at a scale of 1:200,000 of the Fergana Valley

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе анализа нами выполнена оценка точности созданного файла смещений высот, использованного далее для обновления топографических карт. На рис. 3 показан созданный грид смещений высот между системами СК42 и WGS84. Полученное смещение между высотами двух систем определяет значения аномалий высот геоида данного региона, которые колеблются от -38,86 м до -49,03 м.

Значения вычисленных геодезических высот в WGS84 сравнивались с результатами GPS измерений 27 станций сети СГС, расположенных на территории Ферганской долины. Разница «вычисленных» и «измеренных» геодезических высот в системе WGS84 меняется от -0,13 м до 0,67 м (рис. 4). Как видно из рис. 3–4 максимальные значения аномалий высот преимущественно на территории самой впадины и, как следствие, расхождение геодезических высот для данной области достигает тоже максимума.

Рис. 3. Аномалии высот геоида для территории Ферганской долины
Fig. 3. Geoid heights anomalies for the territory of the Fergana Valley

Рис. 4. Разница «вычисленных» и «измеренных» (в метрах) значений геодезических высот в WGS84
Fig. 4. The difference between "calculated" and "measured" (in meters) values of geodetic heights in WGS84

Для трансформирования сетки карт выбирались точки преимущественно на узлах сетки (шаг сетки $1^\circ \times 40''$). Общее количество точек, использованных для преобразования составило 50. Для перехода от полученных геодезических высот к нормальным высотам в системе WGS84 была выбрана модель геоида EGM2008, оценка точности которой выполнялась авторами ранее [Fazilova, Magdiev, 2017]. Значения аномалий высот геоида для EGM2008 определялись с помощью онлайн сервиса International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [Barthelmes, Köhler, 2016]. Результаты трансформирования карт представлены на рис. 5. Значения расхождений высот между СК42 и WGS84 при трансформировании колеблются от -3,93 м до 0,31 м. Однако, как видно из полученных результатов для северо-восточной части исследуемой области преобразование не выполняется в виду отсутствия данных в созданном файле смещений. Выявленные ранее аномалии высот геоида в районе самой Ферганской впадины привели к максимальным расхождениям также между значениями высот.

Рис. 5. Изолинии высот топографических карт в СК42 (красная линия) и в WGS84 (серая пунктирная линия)

Fig. 5. Heights contour lines of topographic maps in CS42 (red line) and in WGS84 (gray dashed line)

ВЫВОДЫ

В данной работе проводилось создание и обновление высотной отсчетной основы топографических карт для территории Ферганской долины в Узбекистане. Учитывая, что на сегодняшний день не проводятся гравиметрические исследования и отсутствует информация о точном геоиде территории страны, в работе был рассмотрен вариант преобразования между геодезическими и нормальными высотами с использованием файла сетки вертикальных деформаций (GTX) Национального управления океанических и атмосферных исследований Канады (NOAA) между системами координат СК42 и WGS84. К настоящему моменту инсталлированы более 200 станций спутниковой государственной сети, базированной на измерениях навигационной системы GPS. Но, в виду того, что сеть СГС развивалась только для районов с развитой инфраструктурой, она не покрывает полностью всю территорию республики. Поэтому исследование проводилось на примере территории Ферганской долины. Оценка точности полученной матрицы преобразования высот показала разницу между реальными значениями высот, полученных по GPS измерениям и смоделированными колеблется в пределах от -0,13 м до 0,67 м. Выявлено, что максимальные расхождения высот находятся в районе самой Ферганской впадины и могут быть обусловлены как аномальным гравитационным полем в данной области, так и недостаточной плотностью станций сети СГС в северо-восточной части исследуемой области. В результате полученные высоты для обновленной топографической карты в WGS84 имеют расхождения с высотами в СК42 от -3,93 м до 0,31 м и максимальные отклонения находятся преимущественно в данной области Ферганской котловины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Макаренко Н.Л., Демьянов Г.В., Новиков Е.В. и др.* Единая государственная система геодезических координат 1995 года (СК-95). Под ред. А.А. Дращюка. М.: Федерал. служба геодезии и картографии России, 2000. 34 с.
2. *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. <https://doi.org/10.1002/2016jb013098>.
3. *Barthelmes F., Köhler W.* International Centre for Global Earth Models (ICGEM), in: Drewes, H., Kuglitsch, F., Adám, J. et.al. *The Geodesists Handbook*, *Journal of Geodesy*, 2016. V. 90. No 10. P. 907–1205. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-3511>.
4. *Collier P.* Development of Australia's National GDA94 Transformation Grids. Consultant's Report, Dept. of Geomatics, The University of Melbourne, Australia, 2002, 36 p. Электронный ресурс: https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/natgrids_0.pdf (дата обращения: 25.03.21).
5. *Dewhurst WT.* NADCON: The application of minimum-curvature-derived surfaces in the transformation of positional data from the North American Datum of 1927 to the North American Datum of 1983, 1990. NOAA Technical Memorandum NOS NGS 50. Электронный ресурс: www.geodesy.noaa.gov/PUBS_LIB/NOSNGS-50.pdf (дата обращения: 25.03.21).
6. *Fazilova D., Ehgamberdiev Sh, Kuzin S.* Application of time series modeling to national reference frame realization. *Geodesy and Geodynamics*. Elsevier: China, 2018. V. 10, Issue 4. P. 281–287. DOI: 10.1016/j.geog.2018.04.003.
7. *Fazilova, D., Magdiev, H.* Comparative study of interpolation methods in development of local geoid. *International Journal of Geoinformatics*, 2018. V. 14. No 1. P. 29–33.

8. *Grgic, M., Varga M. and T. Bašić.* The empirical comparison of coordinate transformation models and distortion modeling methods based on a case study of Croatia. *Survey Review*, 2015. No 49 (353). P. 15–27. DOI 10.1080/00396265.2015.1104092.
9. *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. Электронный ресурс: http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf (дата обращения: 10.09.20).
10. *IERS Conventions.* IERS Technical Note 36. Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
11. *Junkins, D.R.* The National Transformation for Converting Between NAD27 and NAD83 in Canada. In D.C. Barnes (ed.), *Moving to NAD'83: The New Address for Georeferenced Data in Canada.* The Canadian Institute of Surveying and Mapping, Ottawa, 1990. P. 16–40.

REFERENCES

1. *Makarenko N.L. Demyanov E.V., Novikov G.V. et al.* Unified State System of Geodetic Coordinates 1995 (SK-95). Drazhnyuk A.A. (ed.). Moscow: Federal service of geodesy and cartography of Russia, 2000. 34 p. (in Russian).
2. *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. <https://doi.org/10.1002/2016jb013098>.
3. *Barthelmes F. and Köhler W.* International Centre for Global Earth Models (ICGEM), in: Drewes, H., Kuglitsch, F., Adám, J. et.al. *The Geodesists Handbook*, *Journal of Geodesy*, 2016. V. 90. No 10. P. 907–1205. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-3511>.
4. *Collier P.* Development of Australia's National GDA94 Transformation Grids, 2002. Consultant's Report, Dept. of Geomatics, The University of Melbourne, Australia, 36 p. Web resource: https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/natgrids_0.pdf (accessed 25.03.21).
5. *Dewhurst WT.* NADCON: The application of minimum-curvature-derived surfaces in the transformation of positional data from the North American Datum of 1927 to the North American Datum of 1983, 1990. NOAA Technical Memorandum NOS NGS 50. Web resource: www.geodesy.noaa.gov/PUBS_LIB/NOSNGS-50.pdf (accessed 25.03.21).
6. *Fazilova D., Ehgamberdiev Sh, Kuzin S.* Application of time series modeling to national reference frame realization. *Geodesy and Geodynamics*. Elsevier: China, 2018. V. 10, Issue 4. P. 281–287. DOI: 10.1016/j.geog.2018.04.003.
7. *Fazilova, D., Magdiev, H.* Comparative study of interpolation methods in development of local geoid. *International Journal of Geoinformatics*, 2018. V. 14. No 1. P. 29–33.
8. *Grgic, M., Varga M. and T. Bašić.* The empirical comparison of coordinate transformation models and distortion modeling methods based on a case study of Croatia. *Survey Review*, 2015. No 49 (353). P. 15–27. DOI: 10.1080/00396265.2015.1104092.
9. *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 10.09.20).
10. *IERS Conventions.* IERS Technical Note 36. Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
11. *Junkins, D.R.* The National Transformation for Converting Between NAD27 and NAD83 in Canada. In D.C. Barnes (ed.), *Moving to NAD '83: The New Address for Georeferenced Data in Canada.* The Canadian Institute of Surveying and Mapping, Ottawa, 1990. P. 16–