

УДК 528.2:629.78

М. В. Ищенко

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины,
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143
marina@mao.kiev.ua

Определение деформации земной коры в северном регионе Украины по результатам анализа ГНСС-наблюдений

В Центре анализа ГНСС-данных Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины определена деформация земной коры для северного региона Украины с применением метода треугольников, вершинами которых являются ГНСС-станции. Расчет деформации земной коры был выполнен с помощью программного обеспечения «GPS Triangle Strain Calculator», разработанного UNAVCO.

ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ЗЕМНОЇ КОРИ У ПІВНІЧНОМУ РЕГІОНІ УКРАЇНИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ ГНСС-СПОСТЕРЕЖЕНЬ, Іщенко М. В. — У Центрі аналізу ГНСС-даних Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України визначена деформація земної кори для північного регіону України із застосуванням методу трикутників, вершинами яких є ГНСС-станції. Розрахунок деформації земної кори виконано за допомогою програмного забезпечення «GPS Triangle Strain Calculator», розробленого UNAVCO.

DETERMINATION OF CRUSTAL STRAIN IN THE NORTH REGION OF UKRAINE BASED ON THE GNSS OBSERVATIONS ANALYSIS RESULTS, by Ishchenko M. V. — At the GNSS data analysis centre of the Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine crustal strain were obtained with the use method of triangles, whose vertices are the GNSS stations. Crustal strain estimations was carried out using the GPS Triangle Strain Calculator, developed by UNAVCO software.

Деформации земной коры обусловлены не только тектоникой литосферных плит (глобальные деформации), но и локальными изменения

ми в самих плитах (локальные деформации). Последние могут быть вызваны как природными, так и техногенным факторами. К природным факторам, как наиболее значимым, могут быть отнесены: микро-разломы, подводные течения, регулярные оползни. К техногенным факторам можно отнести создание искусственных водных бассейнов, чрезмерное добывание полезных ископаемых или выкачивание воды из недр Земли.

С момента появления глобальных навигационных спутниковых систем прошло уже более 30 лет. Улучшалось аппаратное оборудование и программные комплексы обработки наблюдений. Уточнялись различные модели и схемы обработок спутниковых наблюдений, а возможность ведения непрерывных наблюдений на перманентных станциях, не зависящих от погодных условий, позволила накопить длительные периоды наблюдений. Все это привело к получению высокоточных координатных рядов и значений скоростей смещений ГНСС-станций. Кроме того, стали создаваться ГНСС-сети как глобальных и региональных масштабов, так и локальных, что позволило проводить геодинимические исследования на локальном уровне.

Метод изучения деформации земной коры с использованием метода треугольников, вершинами которых являются ГНСС-станции, был разработан в Институте по изучению границ плит (Plate Boundary Observatory) совместно с Консорциумом университетов (UNAVCO, США), в первую очередь для мониторинга геодинимически активных регионов Северной Америки, таких как разлом Сан-Андреас. Математические выкладки и более детальную информацию по данному методу можно найти на сайте UNAVCO¹. В дальнейшем этот метод стали использовать для оценки деформации земной коры не только в геодинимически активных регионах [1, 3].

В Центре анализа ГНСС-наблюдений ГАО НАН Украины было выполнено два вида работ:

— репроцессинг для GPS-недель 935—1399 (7 декабря 1997 г.—4 ноября 2006 г.);

— регулярная обработка для GPS-недель 1400—1832 (5 ноября 2006 г.—20 февраля 2015 г.).

Выполнение этих двух видов работ позволило получить согласованные координатные ряды, лишённые эффектов, привносимых изменениями в моделях данных и алгоритмах расчетов.

Были использованы наблюдения ГНСС-спутников на 207 ГНСС-станциях, расположенных на территории Восточной Европы, 193 из которых — на территории Украины.

Для получения решений использовался программный комплекс «Bernese GNSS Software ver. 5.2» [2], разработанный в Астрономическом институте Бернского университета (Швейцария), позволяющий обрабатывать как кодовые, так и фазовые наблюдения с высокой точностью.

¹ <https://www.unavco.org/education/resources/modules-and-activities/majors-gps-strain/majors-gps-strain.html>

Регулярная обработка и репроцессинг выполнялись в соответствии с рекомендациями Центрального Бюро Европейской перманентной ГНСС-сети¹. Использовались продукты регулярной обработки и результаты, полученные Европейским центром определения орбит (CODE) [12] в рамках второй кампании репроцессинга IGS, — точные орбиты ГНСС-спутников, параметры вращения Земли и оценки кодовых разностей. Были использованы абсолютные калибровки фазовых центров антенна — купол в формате ANTEX². Для учета океанических нагрузок и атмосферного давления использовались модель FES2004 [7] и коэффициент $S1/S2$ ³ соответственно. Для учета гравитационных эффектов были использованы гравитационная модель JGM3 и солнечно-лунные эфемериды DE405 [11], а также нутационная модель IAU2000 [8]. Для задания системы координат были использованы координаты и скорости априорных станций на эпоху 2005.0, взятые из каталога IGB08⁴. Фиксация координатной сети производилась с помощью условия «No-net translation» [6], которое было наложено на координаты 18 ГНСС-станций (четыре из которых расположены на территории Украины). Фазовые неоднозначности решались различными методами в зависимости от сформированных длин баз [2]. Для оценки тропосферной задержки использовались: модель сухого компонента Саастамойнена [10] с опцией DRY_NIELL и опция для расчета влажного компонента — WET_NIELL [9]. Для минимального угла наблюдений от 0° использовался тропосферный градиент [2].

В результате были получены согласованные координатные ряды в системе координат IGB08 для 207 ГНСС-станций. Полученные файлы в форматах SINEX и TROPX в свободном доступе размещены на ftp-сервере ГАО НАН Украины⁵.

Скорости перманентных ГНСС-станций были оценены с помощью модуля «Combine Normal Equation System» (ADDNEQ2), входящего в программный комплекс «Bernese GNSS Software ver. 5.2». Для расчета были использованы следующие данные:

- файлы нормальных уравнений для каждого дня,
- априорные координаты и скорости в единой координатной системе,
- список станций, задающих опорную сеть.

Файлы нормальных уравнений были взяты из результатов репроцессинга и регулярной обработки для всего обработанного периода, составившего 17 лет.

В качестве априорных координат были использованы координаты двух типов. В первом случае координаты были взяты из каталога IGB08 на эпоху 2005.0 (для опорных станций). А во втором координаты были получены в результате репроцессинга и регулярной обработ-

¹ http://www.epncb.oma.be/_documentation/guidelines/

² <ftp://igs.org/pub/station/general/antex14.txt>

³ <http://geophy.uni.lu/ggfc-atmosphere/tide-loading-calculator.html>

⁴ Каталог IGB08_R.CRD, эпоха 2005.0 // <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER52/STA/>

⁵ <ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gnss/products/IGb08/>

Таблица 1. Скорости ГНСС-станций, полученные с помощью Bernese GNSS Software (V_{tot}) и в рамках модели движения тектонических плит по модели NUVEL-1A (V_{plate})

Станция	Северный компонент, мм/год		Восточный компонент, мм/год	
	V_{tot}	V_{plate}	V_{tot}	V_{plate}
GLSV	9.82	9.98	24.31	22.93
KVDA	9.91	10.66	22.94	24.24
CNIV	10.63	9.76	23.73	22.88
PRYL	11.75	9.50	24.42	23.14
MALN	9.18	10.24	23.72	22.71
SHEV	10.29	9.73	24.62	23.12
SKVR	10.08	10.13	25.12	22.90

ки и приведены к эпохе 2005.0, координатная реализация — IGB08.

В качестве априорных значений скоростей использовались значения, рассчитанные с помощью модели NUVEL-1A [4, 5]. Несмотря на то что все выбранные для анализа станции расположены на Евразийской литосферной плите, значения их скоростей варьируют в зависимости от региональной структуры плиты. Модельные значения скоростей для северного и восточного компонентов приведены в табл. 1 (V_{plate}). Поэтому для анализа деформации было решено использовать скорости, включающие в себя и движение Евразийской плиты, и локальные смещения ГНСС-станций. Похожий подход также использовался авторами в работах [1, 2].

Важно отметить, что для дальнейшей геодинамической интерпретации не все станции, находящиеся на территории Украины и включенные в обработку, удовлетворяли необходимому минимальному периоду наблюдений в три года без существенных разрывов в наблюдениях. Поскольку большинство станций на территории Украины было установлено в 2012 г., было решено провести исследование в одном из регионов Украины — в северном.

В целом данный регион является спокойным в геодинамическом понимании. Но можно выделить несколько особенностей. Первой особенностью служит искусственное создание Киевского водохранилища в 1966 г. площадью в 912 км². Вторая особенность — по реке Днепр проходит граница северо-восточного склона Украинского кристаллического щита, граничащая с Днепроовско-Донецкой впадиной.

Для формирования схемы треугольников отбор ГНСС-станций проводился по следующим критериям:

- минимальный период наблюдений на станциях должен составлять три года;
- треугольники должны быть максимально приближены к равносторонним;
- минимальные значения углов треугольника должны превышать 30°.

Расположение ГНСС-станций и векторы их скоростей приведены на рис. 1.

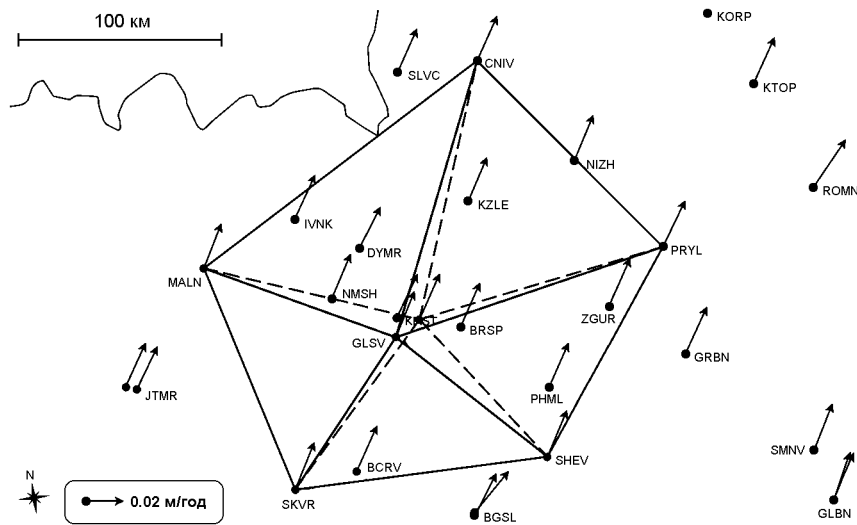


Рис. 1. Векторы скоростей ГНСС-станций и конфигурация треугольников для северного региона Украины

Как было сказано выше, в районе реки Днепр проходит разделение двух разных по типам геологических структур. Поэтому было решено дополнительно проанализировать возможное изменение расчетов деформации треугольников с учетом замены только центральной станции. После анализа возможных вариантов выбора двух ГНСС-станций были выбраны станции «Киев/Голосеево» (GLSV) и «Киев/Дарница» (KVDA), которые имеют различные характеристики. Станции расположены на расстоянии 14 км друг от друга, их характеристики приведены ниже.

Особенности ГНСС-станции «Киев/Голосеево»:

- период наблюдений с 7 декабря 1997 г. по 20 февраля 2015 г.,
- расположена на Киевских холмах, высота над уровнем моря 226.31 м,
- находится на территории Северо-восточного склона Украинского кристаллического щита,
- расположена на территории искусственно высушенных болот,
- с конца 2007 г. наблюдаются сезонные вариации северного компонента, вызванные сменой ГНСС-оборудования¹.

Особенности ГНСС-станции «Киев/Дарница»:

- период наблюдений с 19 декабря 2011 по 20 февраля 2015 г.,
- расположена на высоте 169.98 м,
- находится на территории Днепровско-Донецкой впадины.

На рис. 1 приведена финальная конфигурация сформированных треугольников. Для каждого полученного треугольника были выполнены соответствующие расчеты. Характеристикой деформации служат: вектор смещения, вращение и эллипс искривления. Третий ком-

¹ http://gnss.mao.kiev.ua/sites/default/files/igb08/GLSV_N.png

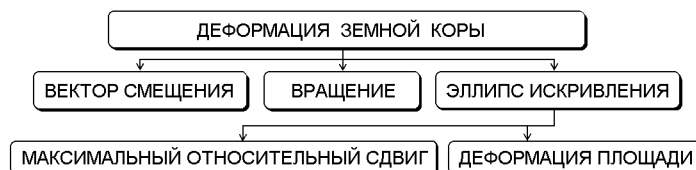


Рис. 2. Определяемые компоненты деформации земной коры

Таблица 2. Конфигурация треугольников, значения компонент и вектора смещений

Треугольник	Значение вектора смещения			
	Северный компонент, мм/год	Восточный компонент, мм/год	Вектор смещения, мм/год	
1	g GLSV-CNIV-PRYL	10.7	24.2	26.46
	k KVDA-CNIV-PRYL	10.0	24.1	26.32
2	g GLSV-PRYL-SHEV	10.6	24.5	26.70
	k KVDA-PRYL-SHEV	10.9	24.4	26.75
3	g GLSV-SHEV-SKVR	10.1	24.7	26.68
	k KVDA-SHEV-SKVR	10.3	24.6	26.74
4	g GLSV-SKVR-MALN	0.97	24.4	24.42
	k KVDA-SKVR-MALN	9.97	24.3	26.32
5	g GLSV-MALN-CNIV	0.99	23.9	23.92
	k KVDA-MALN-CNIV	10.2	23.9	25.96

понент, эллипс искривления, определяется двумя параметрами: максимальным относительным сдвигом и деформацией площади (рис. 2).

Значения северного и восточного компонентов, а также вектора смещений для каждого треугольника приведены в табл. 2, средняя квадратичная погрешность расчетов составила 0.004 мм/год.

Для расчетов деформации земной коры было использовано программное обеспечение «GPS Triangle Strain Calculator», разработанное UNAVCO для оценки деформации земной коры. В табл. 3 приведены результаты определения деформации земной коры для каждого из треугольников по каждому ее типу.

В первую очередь были рассчитаны параметры эллипсов, то есть длины полуосей. Величины являются безразмерными. Стрелками указан тип смещения — расширение или сужение. Из рис. 3 можно видеть, что только треугольники GLSV-CNIV-PRYL и KVDA-CNIV-PRYL показывают одинаковое направление искривления. Возможной причиной может служить расположение ГНСС-станций «Чернигов» и «Прилуки» на левом берегу от Днепра (Днепровско-Донецкая впадина), а ГНСС-станции MALN, SKVR и SHEV находятся на Северо-восточном склоне Украинского щита. Территория, определяемая треугольником GLSV-MALN-CNIV, имеет положительную тенденцию к расширению на примере обеих осей, тогда как в конфигурации со станцией «Киев/Дарница» — только KVDA-PRYL-SHEV. Треуголь-

Таблица 3. Результаты расчетов деформации земной коры

Номер треуголь- ника	Вращение		Эллипс искривления			
	Угол поворота против ч. с., град/год		Большая полуось, 10^{-9}	Малая полуось, 10^{-9}	Максимальная деформация сдвига, 10^{-9}	Деформация площади, 10^{-9}
1	g	9.8574	5.1971	-3.9922	9.1894	1.2051
	k	7.2475	2.7983	-4.6998	7.4981	-1.9015
2	g	8.2791	8.8508	-2.0494	10.9000	6.8016
	k	5.6452	5.6452	1.4917	8.8980	11.8814
3	g	5.3326	-0.9362	-7.8909	6.9547	-8.8271
	k	4.7725	7.2480	-4.6778	11.9758	2.6201
4	g	8.1130	2.7399	-8.6061	11.3460	-5.8662
	k	12.6663	1.1198	-3.9033	5.0231	-2.7835
5	g	7.1361	4.7091	2.0581	2.6509	6.7672
	k	10.9288	5.0149	-5.9139	10.9288	-0.8989

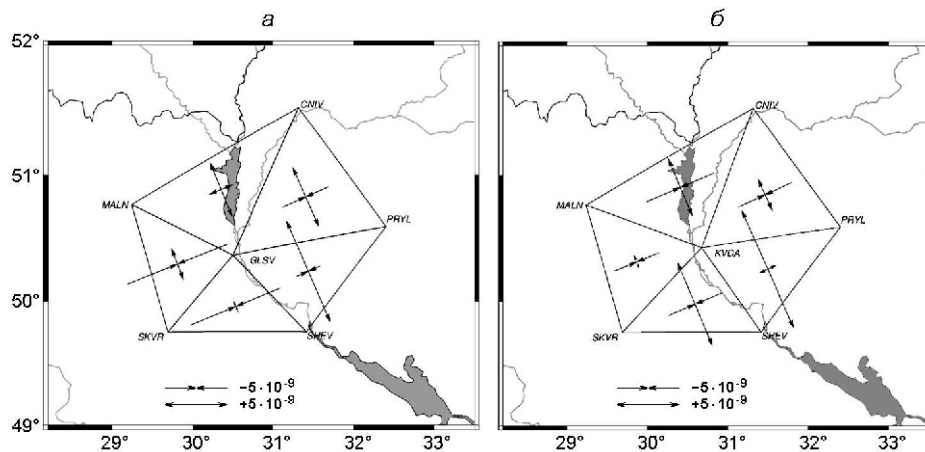


Рис. 3. Деформация земной коры (эллипсы искривления): а — с центральной ГНСС-станцией GLSV, б — с центральной ГНСС-станцией KVDA

ник GLSV-SKVR-SHEV имеет полностью отрицательное искривление, тогда как в конфигурации со станцией «Киев/Дарница» отрицательного искривления по обеим осям нет. Остальные треугольники в обеих конфигурациях имеют положительное искривление по направлению север — юг и отрицательное — по направлению запад — восток.

На втором шаге была определена величина вращения — разность полуосей деформированного и начального треугольников. На рис. 4 приведены углы поворотов каждого из треугольников, имеющие направления против часовой стрелки. Стоит отметить, что для обеих конфигураций сохраняется одинаковое направление поворота.

На рис. 5 представлен максимальный относительный сдвиг, определяемый разностью двух полуосей эллипса. Данная величина являет-

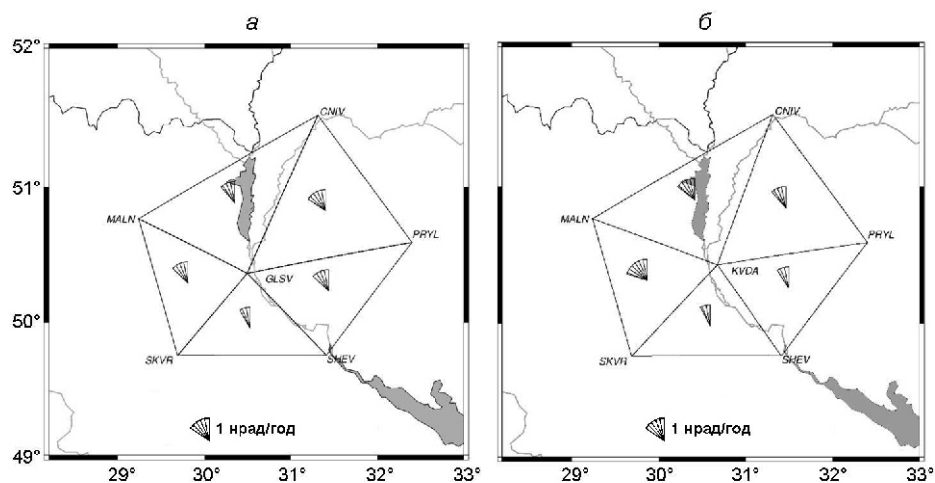


Рис. 4. Деформация земной коры (вращение против часовой стрелки): а — с центральной ГНСС-станцией GLSV, б — с центральной ГНСС-станцией KVDA

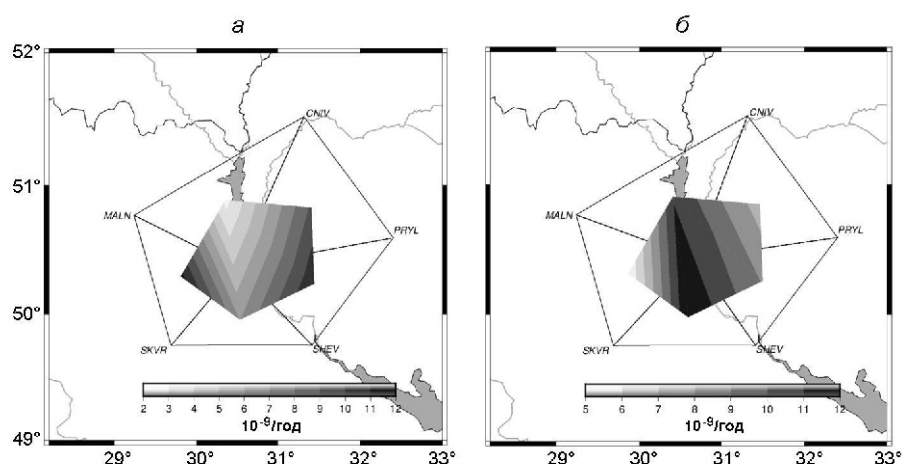


Рис. 5. Деформация земной коры (максимальный относительный сдвиг): а — с центральной ГНСС-станцией GLSV, б — с центральной ГНСС-станцией KVDA

ся индикатором геодинамических изменений в земной коре в районе исследуемого треугольника. Видно, что изо всех треугольников с центральной станцией «Киев-Голосеево» наиболее активными являются треугольники GLSV-PRYL-SHEV и GLSV-MALN-SKVR. А треугольник GLSV-CNIV-MALN, покрывающий Киевское водохранилище, — наиболее спокойный. В то же время в треугольниках с центральной станцией «Киев/Дарница» наблюдается наибольшая активность в KVDA-MALN-CNIV та KVDA-SKVR-SHEV, а треугольник KVDA-SKVR-MALN — самый спокойный.

На рис. 6 показана динамика изменения деформации площади. Позитивное значение говорит об увеличении площади треугольника,

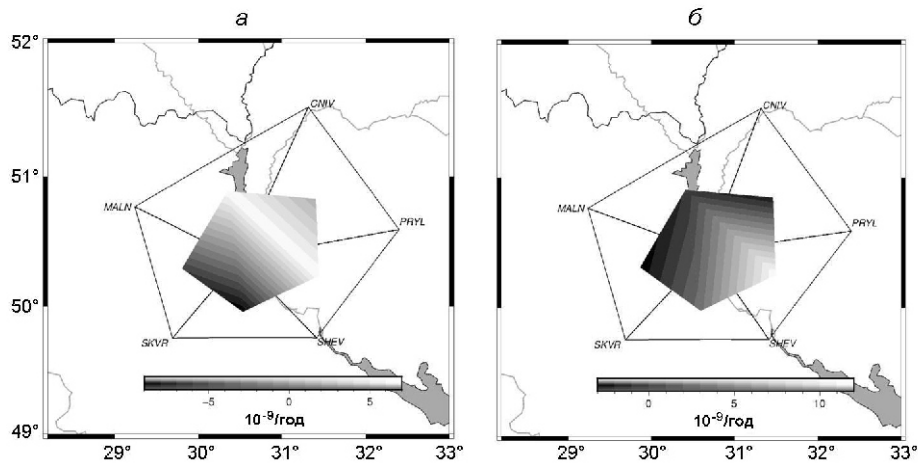


Рис. 6. Деформация земной коры (деформация площади): а — с центральной ГНСС-станцией GLSV, б — с центральной ГНСС-станцией KVDA

отрицательное — об уменьшении. Видно, что соседние треугольники GLSV-MALN-SKVR и GLSV-SKVR-SHEV демонстрируют уменьшение площади, а треугольники GLSV-CNIV-MALN и GLSV-SHEV-PRYL — увеличение. А во втором варианте уменьшение площади демонстрируют: KVDA-SKVR-MALN, KVDA-MALN-CNIV и KVDA-CNIV-PRYL, а два других — увеличение.

Создание и последующее развитие локальных ГНСС-сетей на территории Украины сделало возможным проведение исследования по деформации земной коры. Данный вид деформации был определен с помощью метода треугольников, вершинами которых являются ГНСС-станции. Для анализа был выбран северный регион Украины и составлены две конфигурации треугольников. Полученные результаты показали различную геодинамическую картину, в зависимости от геологической структуры и техногенных факторов. Однако явных активных геодинамических процессов на данной территории не выявлено. Кроме того, анализ результатов показал необходимость более скрупулезного выбора ГНСС-станций для формирования треугольников, в особенности следует уделить внимание наличию у станций каких-либо эффектов, не связанных с геодинамикой.

Автор благодарит компанию Частное акционерное общество «Систем Солюшнс» за предоставление данных наблюдений с ГНСС-станций.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы «Определение и анализ изменений параметров вращения Земли (ПВЗ), региональных и локальных движений и деформаций (РТД) на геодинамических полигонах Украины по данным аэрокосмических наблюдений».

1. *Abdel-Monem S. Mohamed, Hosny A., Abou-Aly N., Saleh M., Rayan A.* Preliminary crustal deformation model deduced from GPS and earthquakes' data at Abu-Dabbab area, Eastern Desert, Egypt // *NRIAG J. Astron. and Geophys.*—2013.—Vol. 2.—P. 67—76.
2. *Bernese GNSS Software Version 5.2* Eds. R. Dach, S. Lutz, P. Walser, P. Fridez — Berne: Astronomical Institute, University of Berne.—2015.—884 p.
3. *Bogusz J., Klos A., Figurski M., Jarosinski M., Kontny B.* Investigation of the reliability of local train analysis by means of the triangle modelling // *Acta Geodyn. Geomater.*—2013.—10, N 3 (171).—P. 293—305.—DOI: 10.13168/AGG.2013.0029
4. *DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F., Stein S.* Current plate motions // *Geophys. J. Inter.*—1990.—101.—P. 425—478.
5. *DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F., Stein S.* Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions // *Geophys. Res. Lett.*—1994.—21.—P. 2191—2194.
6. *Dreves H.* How to fix the geodetic datum for reference frames in geosciences applications? // *Geodesy for Planet Earth.*—2011.—36.—P. 67—76.—DOI 10.1007/978-3-642-20338-1_9
7. *Lyard F., Lefvire F., Letellier T., Francis O.* Modeling the global ocean tides: a modern insight from FES2004 // *Ocean Dynamics.*—2006.—56.—P. 394—415.
8. *McCarthy D., Petit G.* IERS Conventions // *IERS Technical Note 32.*—Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.—2004.
9. *Niell A.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelenghts // *J. Geophys. Res.*—1996.—N 101.—P. 3227—3246.
10. *Saastamoinen J.* Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // *The use of artificial satellites for Geodesy*, Vol. 15 of *Geophysics Monogram Series*, AGU.—1972.—P. 244—251.
11. *Standish E. M.* JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405 // *JPL propulsion laboratory, Interoffice Memorandum* — 1998.—IOM 312-98-048.
12. *Steigenberger P., Hugentobler U., Lutz S., Dach R.* CODE contribution to the 2nd IGS reprocessing [Электронный ресурс] // *IGS Workshop.*—23-27 June 2014.—Pasadena.—Режим доступа <http://www.igs.org/workshop/posters>

Статья поступила в редакцию 19.12.16