

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЙ УКЛОНЕНИЙ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ НА НЕСКОЛЬКИХ ПУНКТАХ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Елена Геннадьевна Гиенко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, тел. (383) 361-01-59 e-mail: elenagienko@yandex.ru

Виктор Мартынович Тиссен

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г.Новосибирск, ул.Димитрова, 4, кандидат технических наук, начальник сектора траекторных измерений отдела № 8 СВЧ, тел. (383) 210-14-94 e-mail: tissen@mail.ksn.ru

Константин Валерьевич Трат

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры космической и физической геодезии, тел. (383)361-01-59, e-mail: trat95@mail.ru

В статье дан краткий обзор современных методов определения уклонений отвесной линии, основанных на совместном использовании результатов ГНСС-измерений, астрономических определений и модели гравитационного поля земли. Приведены результаты экспериментов по определению уклонений отвесной линии разными способами на нескольких астрономических пунктах Новосибирской области.

Ключевые слова: уклонения отвесной линии, ГНСС-измерения, глобальные модели гравитационного поля Земли, астрономические определения координат

COMPARISON OF RESULTS OF A VERTICAL DEFLECTIONS DETERMINING BY DIFFERENT METHODS AT SEVERAL POINTS OF NOVOSIBIRSK REGION

Elena G. Gienko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., associate professor at the Department of space and physical geodesy, tel. (383)361-01-59, e-mail: elenagienko@yandex.ru

Victor M. Tissen

The Siberian research Institute of Metrology, 630004, Novosibirsk, 4 Dimitrova St., Ph. D., the chief of the trajectory measurements Department №8 of the service of time and frequency, тел. (383) 210-14-94 e-mail: tissen@mail.ksn.ru

Konstantin V. Trat

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., undergraduate of the Department of space and physical geodesy, tel. (383)361-01-59, e-mail: : trat95@mail.ru

The article gives a brief review of modern methods of a vertical deflections determining, based on the combined use of GNSS measurements results, astronomical definitions and models of the earth gravitational field. The article presents the results of experiments to vertical deflections determine in different ways on several astronomical points of Novosibirsk region.

Key words: plumb deviations, GNSS measurements, the global model of the Earth gravitational field, the astronomical definition of coordinates

Введение. Краткий обзор методов получения уклонений отвесной линии

Современные методы получения уклонений отвесной линии (УОЛ) основаны как на наземных астрономических или гравиметрических измерениях, так и на вычислениях по моделям гравитационного поля Земли. Направление нормали к общеземному эллипсоиду в заданной точке определяется с высокой точностью по ГНСС-измерениям; направление отвесной линии может быть непосредственно получено из астрономических или гравиметрических измерений, а также с помощью геометрического нивелирования, которое выполняется относительно направления вертикали.

Астрономо-геодезические УОЛ вычисляются по известным формулам [1]:

$$\begin{aligned}\xi &= \phi - B, \\ \eta &= (\lambda - L) \cos \phi,\end{aligned}\quad (1)$$

где ξ , η - составляющие УОЛ в плоскостях меридиана и первого вертикала, ϕ , λ - астрономические широта и долгота пункта, B , L - геодезические широта и долгота пункта.

Традиционные астрономические определения координат – трудоемкий процесс; возможности его автоматизации изложены в [2,3]. В настоящее время в нашей стране и за рубежом разрабатываются приборы и методы для оперативного получения УОЛ, в основе которых лежит принцип определения положения астрономического зенита по наблюдениям звезд [4,5].

В статье [6] предлагается определять УОЛ по разности геодезических и астрономических зенитных расстояний, где астрономические зенитные расстояния вычисляются по данным геометрического нивелирования, а геодезические зенитные расстояния берутся из обработки ГНСС-измерений. Результаты экспериментов показали, что потенциальная точность данного способа может быть на уровне 0.1" и выше.

С другой стороны, УОЛ есть трансформанты возмущающего потенциала силы тяжести T , [7]:

$$\xi = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial T}{\partial B}, \quad \eta = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial T}{\partial L \cos B}, \quad (2)$$

где γ – нормальное ускорение силы тяжести в точке наблюдения.

Возмущающий потенциал может определяться различными математическими моделями гравитационного поля Земли, охватывающими глобальную, региональную или локальную территории.

Современные глобальные модели геопотенциала, как правило, задаются в виде разложения в ряд по сферическим функциям, [7]:

$$T = \frac{fM}{r} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r} \right)^n (c_{nm} \cos m\lambda + s_{nm} \sin m\lambda) P_{nm} \sin \Phi \right]. \quad (3)$$

Коэффициенты разложения (3) доступны на специализированных сайтах, например, на сайте Потсдамского научно-исследовательского института наук о Земле, [8]. Для аналитического вычисления УОЛ в заданных точках по коэффициентам разложения потенциала в ряд по сферическим функциям сотрудниками кафедры космической и физической геодезии СГУГиТ разработан программный комплекс GeoUnd [9].

В большинстве программных обеспечений (ПО) обработки ГНСС-измерений есть возможность подключения так называемых «сеточных» моделей геоида, где в узлах регулярной сетки рассчитаны высоты геоида над эллипсоидом. К таким моделям прилагается математический аппарат интерполяции, с помощью которого вычисляются высоты геоида над эллипсоидом в заданных точках. В этом случае для вычисления УОЛ можно использовать численный метод, [10]:

$$\xi'' = 206265'' \cdot \Delta\zeta_B / \Delta B, \quad \eta'' = 206265'' \cdot \Delta\zeta_L / (\Delta L \cos B), \quad (4)$$

где $\Delta\zeta_B$, $\Delta\zeta_L$ – малые приращения аномалий высоты вдоль меридиана и первого вертикала, в метрах,

ΔB , ΔL – длины дуг меридиана и первого вертикала, для которых определены приращения аномалий высоты, в метрах.

На сайте [8] в свободном доступе выложено программное обеспечение, позволяющее получать высоты геоида над эллипсоидом и аномалии силы тяжести в заданной точке с использованием коэффициентов выбранной модели геопотенциала. Функций непосредственного вычисления УОЛ здесь нет, однако, их значения также можно получить численным методом (4) по известным приращениям аномалий высот.

Для ограниченных участков земной поверхности (например, для локальной спутниковой геодезической сети) подходящими являются локальные и региональные математические модели геоида (квазигеоида), параметры которых определяются на основании данных ГНСС-измерений, геометрического нивелирования, астрономических и гравиметрических измерений. Концепция комплексного определения трансформант гравитационного поля Земли на локальной области изложена в [11], а результаты экспериментальных исследований – в [12].

В ряде ПО обработки ГНСС-измерений есть опция «калибровка по высоте», где вычисляются параметры локальной модели геоида (квазигеоида) на основании данных геометрического нивелирования в нескольких точках спутниковой сети. Такую локальную модель определяют три параметра: высота геоида (квазигеоида) над эллипсоидом a_{00} и два наклона геоида к эллипсоиду в плоскостях меридиана и первого вертикала a_{10} , a_{01} (УОЛ) для начальной точки спутниковой сети с координатами x_0 , y_0 в некоторой картогра-

фической проекции:

$$a_{00} + a_{10}(x_i - x_0) + a_{01}(y_i - y_0) = H_i - H_i^y, i = 1..n, n - \text{количество точек}, \quad (5)$$

где x_i, y_i, H_i, H_i^y – плоские координаты, геодезическая и нормальная высоты i -ой точки спутниковой сети.

В настоящем исследовании были выполнены экспериментальные определения уклонов отвесной линии на трех пунктах Новосибирской области. Между собой сравнивались следующие методы определения УОЛ:

- астрономо-геодезический, формула (1);
- аналитический, с коэффициентами разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям глобальной модели EGM2008 [13], ПО GeoUnd;
- численный, формула (4) с глобальной моделью EGM2008 и ПО Trimble Business Center;
- калибровка по высоте, ПО Trimble Business Center, формула (5);
- локальная модель квазигеоида, [12];
- разность астрономического и геодезического зенитных расстояний, [6].

Выполненные работы и обсуждение результатов

В качестве исходных данных для выполнения экспериментальных исследований были взяты результаты астрономических определений широты, долготы и азимута на пунктах Лапласа 1 класса Алексеевка и Кремлевка в Новосибирской области (средняя квадратическая погрешность (СКП) определения астрономических координат 0.3"). Геодезические координаты этих пунктов в системе координат WGS-84 были получены по результатам уравнивания ГНСС-измерений, выполненных на пунктах Новосибирского эталонного пространственного полигона, [14], с СКП 2-3 см.

Одна из задач настоящего исследования заключалась в определении УОЛ на астрономическом столбе Сибирского НИИ Метрологии (СНИИМ). На пункте СНИИМ с марта 1998 по декабрь 2010 г. проводились регулярные астрономические наблюдения звездных прохождений через местный меридиан на 10 сантиметровом пассажном инструменте фирмы Carl Zeiss. По результатам обработки этих наблюдений определялись поправки часов, необходимые для перехода от равномерной шкалы атомного времени к шкале Всемирного времени, связанной с суточным вращением Земли. Всего за указанный период было определено более 600 поправок часов. Такой объем данных позволил уточнить астрономические координаты пункта СНИИМ по долготе до 0.05", а по широте до 0.2".

Для вычисления УОЛ на астрономическом столбе СНИИМ авторами впервые были выполнены ГНСС-измерения относительно пункта сети Международной ГНСС-службы (IGS) NOVМ, расположенного на крыше 11-этажного главного корпуса Сибирского НИИ Метрологии на расстоянии 28 метров. При обработке измерений координаты пункта NOVМ были взяты в системе ITRF2014, и координаты астрономического столба (центра объектива трубы пассажного инструмента, направленной в зенит) были получены в

системе ITRF2014 с СКП 1 мм в плане и 2 мм по высоте.

Для трех пунктов с известными астрономическими координатами (СНИИМ, Алексеевка, Кремлевка) по формулам (1) были получены астрономо-геодезические УОЛ, значения которых были далее выбраны как опорные для сравнения между собой остальных методов, перечисленных выше.

В таблице приведены разности значений УОЛ, определенных несколькими методами, с результатами астрономо-геодезических определений на трех пунктах (СНИИМ, Алексеевка, Кремлевка), а также СКП исходных данных.

Таблица

Разности значений УОЛ, определенных несколькими методами, с результатами астрономо-геодезических определений

Пункты	Алексеевка (WGS-84)		Кремлевка (WGS-84)		СНИИМ (ITRF2014)			
	СКП, ":	модель EGM2008	ГНСС-измерения	астрономические координаты	СКП, ":	модель EGM2008	ГНСС-измерения	астрономические координаты
Метод	$\Delta\xi$ "	$\Delta\eta$ "	$\Delta\xi$ "	$\Delta\eta$ "	$\Delta\xi$ "	$\Delta\eta$ "		
1. Аналитический (EGM2008), ПО GeoUnd	-0.24	+0.50	+0.07	+0.17	+0.55	+0.13		
2. Численный (EGM2008), ПО Trimble Business Center	-0.16	+1.00	+0.06	+0.28	+0.52	+0.04		
3. Калибровка по высоте, ПО Trimble Business Center	-0.23	-0.15	+0.13	-0.17	+1.36	+0.03		
4. Локальная модель квазигеоида, [12]	- 0.15	+0.55	+0.14	+3.34	не определялись			
5. Разность геодезических и астрономических зенитных расстояний [6]	в среднем, 0.2				не определялись			

По результатам, приведенным в таблице, можно сделать вывод, что расхождения значений УОЛ, определенных с использованием глобальной модели геопотенциала EGM2008 (методы 1 и 2), попадают в доверительный интервал, определяемый, в основном, погрешностью этой модели (1"). Результаты аналитического и численного методов (1 и 2), вопреки ожиданиям, не соответствуют друг другу по величине отклонений.

Большинство расхождений соответствует погрешности астрономических определений 1 класса. Два «выброса» в методах 3 и 4 объясняются неоднородностью данных геометрического нивелирования, использованных при построении локальных моделей квазигеоида.

Выбор того или иного метода получения УОЛ зависит от требуемой точности, исходных данных, удобства использования. Перспективным представляется метод непосредственного аппаратного измерения направления отвесной линии по наблюдениям звезд.

Для подробного экспериментального исследования методов необходимы данные для большего количества пунктов, расположенных на различных по характеру геоида территориях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пеллинен Л.П. Высшая геодезия. – М.: Недра, 1978. – 264 с.
2. Глазунов А.С. Новые технологии астрономических определений для оперативного наблюдения за уклонением отвесных линий//Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2006. – Т.3 – №2. – С.198 – 202.
3. Глазунов А.С., Голдобин Д.Н. Оперативное определение уклонений отвесных линий из астроопределений на полевом оптико-электронном астрономическом комплексе// Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2007. – №17. – С.218 –222.
4. Hirt C. Modern Determination of Vertical Deflections using Digital Zenith Cameras//Journal Surveying Engineering. – Feb.2010. – Vol.136. – Issue 1. – pp.1–12.
5. Мурзабеков М.М., Копаев А.В., Фатеев В.Ф. Метрологические характеристики астрогеодезического измерителя уклонений отвесной линии на основе цифрового зенитного телескопа//Геодезия и картография. – 2016. – №4. – С.10–17.
6. Гиенко Е.Г., Елагин А.В. Определение уклонения отвесной линии и астрономических координат по наземным и GPS-измерениям//Вестник СГУГиТ. – 2000. – № 5. – С.16-19.
7. Шимбирев Б.П. Теория фигуры Земли. – М.:Недра, 1978. – 264 с.
8. Сайт Потсдамского научно-исследовательского института наук о Земле. Электронный ресурс. Режим доступа: http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime.
9. Программа GeoUnd 1.0, свидетельство о государственной регистрации №2015661197. Соавторы: И.Г. Ганагина, Д.Н. Голдобин, Н.С. Косарев.
10. Гиенко Е.Г., Решетов А.П., Струков А.А. Исследование точности получения нормальных высот и уклонений отвесной линии на территории Новосибирской области с помощью глобальной модели геоида EGM2008//Сб.материалов междунар. Научн.конгресса ГЕО-Сибирь-2011. – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т.1. – Ч.2. – С.181–186.
11. Сурнин Ю.В. Определение астрономических, гравиметрических и геодезических трансформант внешнего гравитационного поля на локальном участке земной поверхности //Вестник СГУГиТ. – 2006. – № 11. – С. 3–8.
12. Гиенко Е.Г, Кузьмин В.И., Сурнин Ю.В. Некоторые результаты определения локального гравитационного поля на поверхности Земли// Вестник СГУГиТ. – 2006. – № 11. – С.8–13.
13. Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008//EGU General Assembly 2008. Vienna, Austria, April 13–18, 2008.
14. Антонович К.М., Ащеулов В.А., Сурнин Ю.В. Пространственный эталонный полигон для метрологической аттестации GPS-аппаратуры (опыт создания)// Вестник СГУ-ГиТ. – 1999. – № 4. – С. 8 – 13.

© Е. Г. Гиенко, В. М. Тиссен, К. В. Трат, 2017