

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ

Снежана Евгеньевна Якимова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плехотного, 10, магистрант кафедры космической и физической геодезии, e-mail: sneg96.69@mail.ru

Ирина Геннадьевна Ганагина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плехотного, 10, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой космической и физической геодезии, e-mail: gam0209@yandex.ru

Рассматриваются результаты сравнения составляющих уклонений отвесной линии, полученных с помощью данных глобальных моделей гравитационного поля Земли и в результате наземных (астрономо-геодезических) измерений на территории Новосибирской области.

Ключевые слова: характеристики гравитационного поля Земли, уклонения отвесной линии, глобальная модель геопотенциала, автономная навигация.

DETERMINATION OF ACCURACY CHARACTERISTICS OF THE EARTH'S GRAVITATIONAL FIELD FOR THE PURPOSES OF AUTONOMOUS NAVIGATION

Snezhana E. Yakimova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Space and Physical Geodesy, e-mail: sneg96.69@mail.ru

Irina G. Ganagina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Head of Department of Space and Physical Geodesy, e-mail: kaf.astronomy@ssga.ru

The article discusses the results of comparing the component deviations of a plumb line obtained with using data from global models of the Earth's gravitational field and as a result of ground-based (astronomic-geodesic) measurements in the territory of the Novosibirsk Region.

Key words: characteristics of the gravitational field of the Earth, plumb line deviations, global geopotential model, autonomous navigation.

Введение

Научное и практическое решение проблем повышения точности характеристик гравитационного поля Земли (ГПЗ) состоит в разработке новых методов, технологий, систем и средств для автономной навигации.

Разработка оперативных и экономически оправданных методов определения уклонения отвесных линий (УОЛ) является одной из актуальных задач геодезии, картографии, гравиметрии, спутникового мониторинга, авиации и мореходства, баллистики, а также для задач военных целей.

Точность выработки координат подвижного объекта навигационным комплексом, работающим на основе использования инерциальной навигационной системы (ИНС) определяется, в частности, погрешностями учета составляющих ускорения силы тяжести по осям координат ИНС и погрешностью учета отклонения отвесных линий.

Для обеспечения автономной навигации информация об ускорении силы тяжести и отклонении отвесных линий может быть получена в виде цифровых моделей этих параметров, построенных по результатам предварительной высокоточной и подробной гравиметрической съемки или в результате определения характеристик ГПЗ по данным современных глобальных моделей геопотенциала [1–4].

Целью исследования является рассмотрение результатов сравнения составляющих отклонений отвесной линии, полученных с помощью данных глобальных моделей гравитационного поля Земли и в результате астрономо-геодезических измерений на территории Новосибирской области.

Методы определения составляющих УОЛ

Уклонение отвесной линии – это угол между направлением вектора силы тяжести и нормалью к эллипсоиду в заданной точке. В геодезии используют две составляющие уклонения отвесной линии:

- уклонение отвесной линии в плоскости меридиана ξ ;
- уклонение отвесной линии в плоскости первого вертикала η .

Полное уклонение отвесной линии u может быть вычислено по формуле:

$$u = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}. \quad (1)$$

Разложение потенциала притяжения в ряд по сферическим функциям – наиболее традиционный способ представления гравитационного поля Земли.

Глобальные модели геопотенциала представляют в виде разложения геопотенциала в ряд Фурье по системе сферических функций геоцентрических координат – геоцентрического радиуса-вектора r , широты φ , и долготы λ , ограниченной степенью N [5, 6]:

$$V(\varphi, \lambda, r) = \frac{fM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^N \left(\frac{a_e}{r} \right)^n \cdot \sum_{m=0}^n \left(\overline{C}_{nm} \cos m\lambda + \overline{S}_{nm} \sin m\lambda \right) \cdot P_{nm}(\sin \varphi) \right], \quad (2)$$

где fM – геоцентрическая гравитационная постоянная;

a_e – экваториальный радиус Земли;

r – радиус вектор точки наблюдения (φ, λ, r);

\overline{C}_{nm} и \overline{S}_{nm} – безразмерные нормированные гармонические коэффициенты геопотенциала степени n и порядка m ;

$P_{nm}(\sin \varphi)$ – присоединенные функции Лежандра.

Для вычисления составляющих уклонения отвесной линии используются гармонические коэффициенты возмущающего потенциала $(\Delta \bar{C}_{nm}, \Delta \bar{S}_{nm})$, получаемые путем вычитания гармонических коэффициентов нормального поля из гармонических коэффициентов геопотенциала.

Методика определения составляющих уклонений отвесной линии ξ, η на астрономических пунктах расположенных в точке с полярными пространственными координатами φ, λ, r осуществляется по следующим формулам [4]:

$$\eta'' = - \left[fM \sum_{n=2}^{N_0} \frac{a_e^n}{r^{n+1}} \sum_{m=0}^n m (-\Delta \bar{C}_{nm} \sin m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \cdot \bar{P}_{nm} \sin \varphi \right] \cdot \sec \varphi \cdot \frac{\rho''}{N}; \quad (3)$$

$$\xi'' = - \left[fM \sum_{n=2}^{N_0} \frac{a_e^n}{r^{n+1}} \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \cdot \frac{d\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)}{d\varphi} \right] \cdot \frac{\rho''}{M}, \quad (4)$$

где $\rho'' = 206\,265$;

$\Delta \bar{C}_{nm} = \bar{C}_{nm} - \bar{C}_{nm}^0$ – разность нормированных коэффициентов сферических функций реального и нормального поля силы тяжести;

\bar{C}_{nm}^0 – коэффициенты нормального поля силы тяжести (например, общеземного эллипсоида WGS-84);

N – радиус-кривизны в первом вертикале;

M – радиус-кривизны в меридиане.

Полярные пространственные координаты φ, λ, r для каждого определяемого пункта преобразуют из геодезических координат B, L, H общеземного эллипсоида WGS-84.

Радиусы-кривизны в первом вертикале и меридиане вычисляются по формулам:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 B}}; \quad M = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{\left(\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 B}\right)^3}. \quad (5)$$

В формулах (5) a и e – большая полуось и эксцентриситет общеземного эллипсоида WGS-84 [7–9].

Результаты

Для вычисления характеристик ГПЗ использована информация, которая содержится в наборе гармонических коэффициентов глобальной модели геопотенциала EIGEN-6C4. Эта модель опубликована на сайте Международного центра глобальных моделей геопотенциала Земли [10].

В результате вывода модели EIGEN-6C4 получен полный набор гармонических коэффициентов геопотенциала до 2190-й степени. Как следствие, точность модели зависит от погрешностей определения гармонических коэффициентов и от предельной степени учитываемых сферических гармоник [11, 12].

На каждом пункте Лапласа на территории Новосибирской области выполнены определения геодезических координат B, L, H в государственной системе СК-95 [13, 14].

Геодезические координаты пунктов Лапласа преобразованы в общеземную координатную систему отсчета WGS-84. Преобразование координат выполнено согласно стандарту Справочного документа «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) [15].

С помощью программного обеспечения, используя данные глобальной модели EIGEN-6C4, вычислены составляющие абсолютных уклонений отвесных линий (отнесенных к эллипсоиду WGS-84) в плоскости меридиана и первого вертикала на каждом пункте Лапласа (ξ_{WGS-84} и η_{WGS-84}).

Составляющие абсолютных уклонений отвесных линий в плоскости меридиана и первого вертикала ξ_{WGS-84} и η_{WGS-84} , полученные по формулам (3), (4), преобразуют в составляющие относительных уклонений отвесных линий в плоскости меридиана и первого вертикала по формулам:

$$\xi_{CK-95}^{MOD} = \xi_{WGS-84} + (B_{WGS-84} - B_{CK-95})''; \quad (6)$$

$$\eta_{CK-95}^{MOD} = \eta_{WGS-84} + (L_{WGS-84} - L_{CK-95})'' \cdot \cos(B_{WGS-84}). \quad (7)$$

Разности составляющих уклонений отвеса, вычисленных по формулам (6), (7) и полученных из астрономо-геодезических измерений на исследуемой территории, получают по формуле [16–19]:

$$\Delta\xi'' = \xi_{CK-95}^{MOD} - \xi_{CK-95}'', \Delta\eta_{CK-95}^{MOD} = \eta_{CK-95}^{MOD} - \eta_{CK-95}''. \quad (8)$$

Основные условия оценки точности определения составляющих уклонений отвесной линии на исследуемой территории по данным современной глобальной модели гравитационного поля Земли для целей автономной навигации можно сформулировать следующим образом:

– разность между вычисленным значением уклонения отвесной линии в плоскости меридиана (ξ) и измеренным на пункте должна быть менее 1 угловой секунды:

$$|\Delta\xi''| < 1''; \quad (9)$$

– разность между вычисленным значением уклонения отвесной линии в плоскости первого вертикала (η) и измеренным на пункте должна быть менее 1 угловой секунды:

$$|\Delta\eta''| < 1'' \quad (10)$$

Для визуализации полученных результатов разностей составляющих уклонений отвесной линии $\Delta\xi''$ и $\Delta\eta''$ построены картосхемы, представленные на рис. 1, 2.

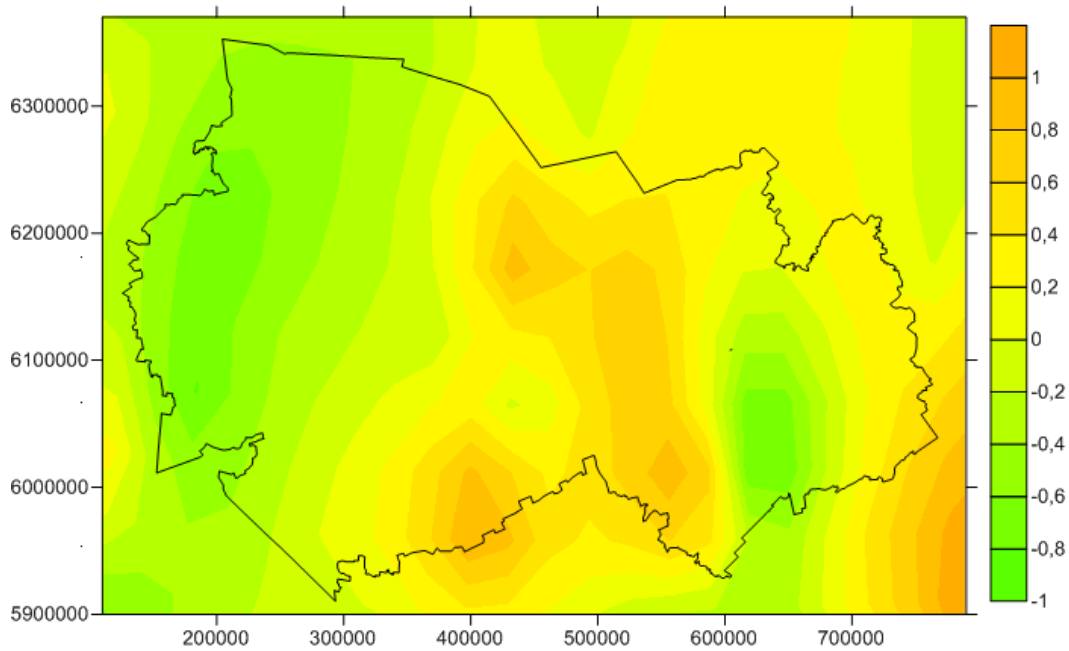


Рис. 1. Разности УОЛ в плоскости меридиана на территории Новосибирской области

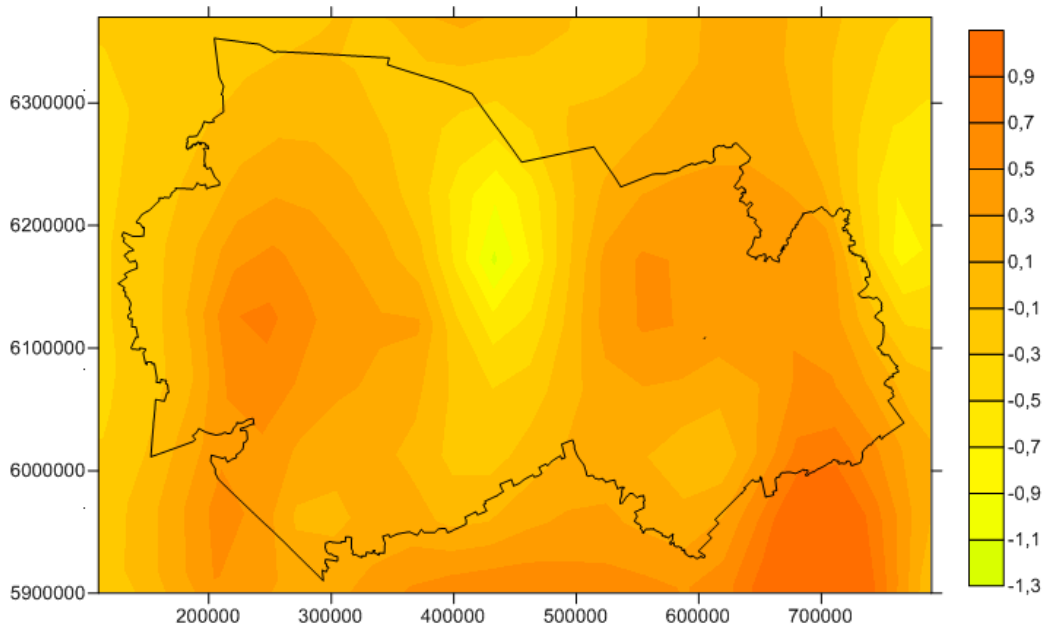


Рис. 2. Разности УОЛ в плоскости первого вертикала на территории Новосибирской области

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

– на территории Новосибирской области значения УОЛ в плоскости меридиана, полученные по данным современной глобальной модели гравитационного поля Земли, имеют расхождения с наземными измерениями в пределах $\pm 1''$;

– на территории Новосибирской области значения УОЛ в плоскости меридиана, полученные по данным современной глобальной модели гравитационного поля Земли, имеют расхождения с наземными измерениями в целом в пределах $\pm 1''$, но имеется одно значение $-1,3''$;

– необходимо провести анализ результатов наземных измерений и выполнить отбраковку данных.

Заключение

На конкретном практическом примере определены значения составляющих уклонений отвесной линии, на территории Новосибирской области. Значения УОЛ, полученные по данным современной глобальной модели гравитационного поля Земли, имеют расхождения с наземными измерениями в пределах $-1,3''$.

Результат работы может в дальнейшем послужить для создания функционально полной, высокотехнологичной и эффективной системы обеспечения координатно-навигационного обеспечения территории современными средствами геодезической, гравиметрической и навигационной информацией в цифровом виде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Возможности коррекции инерциальных навигационных систем на основе гравиметрических карт земли / В. В. Попадъев, А. И. Сорока, А. И. Полубехин, В. Ю. Цыганков, С. Г. Брайткрайц, Р. Н. Акиншин, А. В. Хрущев // Научный вестник МГТУ. – 2015. – № 222.
2. Пешехонов В. Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 1. – С. 3–16.
3. Селиванова Л. М., Шевцова Е. В. Инерциальные навигационные системы : учеб. пособие. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 46 с.
4. Фридлендер Г. О. Инерциальные системы навигации. – М. : Физ-матгиз, 1961. – 156 с.
5. Огородова Л. В., Шимбирев Б. П., Юзефович А. П. Гравиметрия. – М. : Недра, 1978. – 325 с.
6. Шимбирев Б. П. Теория фигуры Земли. – М. : Недра, 1975. – 432 с.
7. Селезнёв В. П. Основы космической навигации. – Изд. 3-е. – М. : Книжный дом «Либроком», 2013. – 480 с.
8. Jekeli C. Accuracy Requirements in Position and Attitude for Airborne Vector Gravimetry and Gradiometry // Gyroscopy and Navigation. – 2011. – Vol. 2, No. 3. – P. 164–169.
9. Задача авиационной гравиметрии. Некоторые результаты испытаний / Ю. В. Болотин, А. А. Голован, П. А. Кручинин, Н. А. Парусников, В. В. Тихомиров, С. А. Трубников // Вестник Московского университета. Сер. 1. Математика. Механика. – 1999. – № 2. – С. 36–41.
10. International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://icgem.gfz-potsdam.de/>.

11. Современные глобальные модели гравитационного поля Земли и их погрешности / В. Н. Конешов, В. Б. Непоклонов, Р. А. Сермягин, Е. А. Лидовская // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1. – С. 107–118.
12. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли : монография / В. Ф. Канушин, А. П. Карпик, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, А. М. Косарева, Н. С. Косарев. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 270 с.
13. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек. – М. : Стандартинформ, 2009. – 19 с.
14. Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95). ГКИНП (ГНТА)-06-278-04. – М. : ЦНИИГАиК, 2004.
15. Параметры Земли 1990 (ПЗ 90.11). Справочное руководство. – М. : Научно-исследовательский центр топогеодезического и навигационного обеспечения «27 ЦНИИ» Минобороны России, 2014. – 52 с.
16. Кашеев Р. А. Современные методы спутниковой гравиметрии : конспект лекций. – Казань : Казан. ун-т, 2015. – 45 с.
17. Сарайский Ю. Н. Геоинформационные основы навигации : учебное пособие. – СПб. : СПбГУГА, 2010. – 245 с.
18. Лысенко Л. Н. Наведение и навигация баллистических ракет. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 669 с.
19. Непоклонов В. Б. Методики определения составляющих уклонений отвесных линий и высот квазигеоида по гравиметрическим данным // Гравиметрия и геодезия. – М. : Научный мир, 2010. – С. 455–464.

© С. Е. Якимова, И. Г. Ганагина, 2019