

Н. С. КОСАРЕВ, В. Ф. КАНУШИН, В. И. КАФТАН, И. Г. ГАНАГИНА,
Д. Н. ГОЛДОБИН, Г. Н. ЕФИМОВ

О РЕЗУЛЬТАТАХ СРАВНЕНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УКЛОНЕНИЙ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В настоящее время актуальным является получение информации об отклонениях отвесной линии (УОЛ) путем привлечения современных моделей геопотенциала.

Авторами получены модельные значения УОЛ на территории Западной Сибири, представлен анализ результатов сравнения их составляющих, вычисленных по данным глобальной модели геопотенциала EIGEN-6C4 и результатам астрономо-геодезических измерений, выполненных на территории Западной Сибири.

По результатам исследований установлено, что на равнинных территориях стандартные отклонения модельных значений УОЛ от наземных, полученных традиционным астрономо-геодезическим методом, не превышают 1".

Ключевые слова: уклонения отвесной линии, астрономо-геодезический метод, гармонические коэффициенты геопотенциала, современные глобальные модели геопотенциала.

Введение

Уклонения отвесной линии являются одной из наиболее важных характеристик гравитационного поля Земли [1]. Данные об УОЛ необходимы для решения целого комплекса научных и практических задач высшей геодезии и высокоточной навигации. В высокоточной автономной навигации знание УОЛ необходимо для коррекции выходных навигационных параметров инерциальных навигационных систем (ИНС) [2]. В геодезии УОЛ используются для связи геодезических и астрономических координат, для обеспечения инженерно-геодезических работ при строительстве крупных гидросооружений, тоннелей, ускорителей элементарных частиц и других уникальных технических объектов [3–5].

Косарев Николай Сергеевич. Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры космической и физической геодезии, Сибирский государственный университет геосистем и технологий (СГУ ГиТ, г. Новосибирск)

Канушин Вадим Федорович. Кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, СГУ ГиТ.

Кафтан Владимир Иванович. Доктор технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН Геофизический центр РАН, профессор Российского университета дружбы народов (г. Москва).

Ганагина Ирина Геннадьевна. Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой космической и физической геодезии, СГУ ГиТ.

Голдобин Денис Николаевич. Инженер кафедры космической и физической геодезии, СГУ ГиТ.

Ефимов Геннадий Николаевич. Старший научный сотрудник ФГБУ «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» (г. Москва)

Уклонения отвесной линии классифицируют по двум основным признакам [3–4, 6]:

- по выбору поверхности относимости (общеземной эллипсоид или референц-эллипсоид);
- по выбору измеряемых величин [1].

В зависимости от выбора поверхности относимости выделяют абсолютные и относительные уклонения отвесной линии. Геометрические и физические (гравиметрические) УОЛ определяются выбором измеряемых величин.

Полное уклонение отвесной линии u состоит из двух составляющих (ξ и η) и может быть вычислено по формуле [6]

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

где ξ и η – составляющие УОЛ в плоскости меридиана и плоскости первого вертикала соответственно.

Для определения УОЛ разработаны различные традиционные методы, требующие выполнения трудоемких высокоточных астрономических, геодезических и гравиметрических измерений [7–17]. Успехи в области совершенствования и разработки новых средств и методов изучения характеристик гравитационного поля Земли (ГПЗ) позволили создать новое поколение его глобальных моделей с улучшенными параметрами по точности определения гармонических коэффициентов геопотенциала и высокой пространственной разрешающей способностью. Современные глобальные модели позволили решать задачи определения характеристик ГПЗ на качественно более высоком уровне [17–19].

Целью статьи является анализ результатов сравнения УОЛ, вычисленных по данным современных глобальных моделей геопотенциала и полученных в результате традиционных астрономо-геодезических измерений на территории Западной Сибири.

Исходные данные

Исходной информацией для вычисления УОЛ послужила ультравысоко-степенная глобальная модель геопотенциала EIGEN-6C4, представленная на сайте Немецкого научно-исследовательского центра наук о Земле (ICGEM) в виде гармонических коэффициентов геопотенциала до 2190 степени. Модель EIGEN-6C4 создана с использованием следующих типов данных [20]:

- гармонические коэффициенты геопотенциала степени от 2 до 30, полученные в результате лазерных траекторных наблюдений спутников Lageos за период с 1985 по 2010 гг.;
- гармонические коэффициенты геопотенциала степени от 2 до 130, полученные в результате межспутниковых измерений проекта GRACE за период с 2003 по 2012 гг.;
- гармонические коэффициенты геопотенциала до степени 235, полученные по данным GOCE-SGG, включая компоненты градиента силы тяжести T_{xx} , T_{yy} , T_{zz} и T_{xz} [21];

- наземные данные, обеспечившие наполнение ряда гармонических коэффициентов до степени 370 путем использования модели океанического геоида DTU12 [22–23] и высот геоида EGM-2008;
- данные для полярных областей, полученные с использованием гравитационного поля модели EIGEN-6C3stat.

На рис. 1 показана схема комбинации различных типов данных при создании модели EIGEN-6C4.

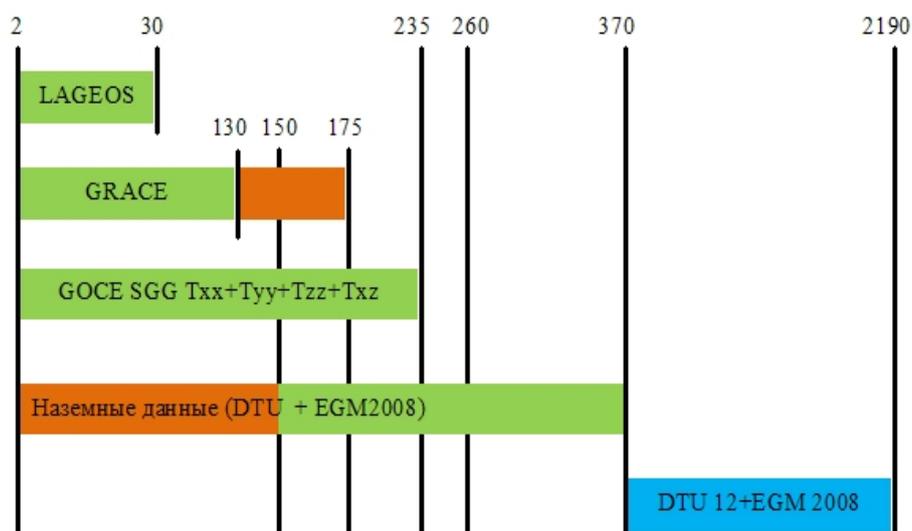


Рис. 1. Схема комплексирования различных типов данных при создании модели EIGEN-6C4 [20] (2, 30, ...2190 – степени учитываемых гармонических коэффициентов геопотенциала)

На территории Западной Сибири в разные годы при построении Государственной геодезической сети (ГГС) выполнены астрономические измерения на пунктах Лапласа. Исходные наземные данные дают возможность осуществить сопоставление с современными определениями уклонений отвеса с учетом уровня точности определений прежних лет и временного фактора.

Из общего количества пунктов Лапласа было отобрано 320. Из них 180 относятся к пунктам 1-го класса, остальные – ко 2-му классу. При отборе старались обеспечить их более-менее равномерное распределение, а также разнообразие физико-географических условий. На каждом пункте Лапласа выполнены определения геодезических координат B , L , H в государственной системе СК-95 [24].

Для корректного использования результатов наземных измерений геодезические координаты пунктов Лапласа преобразованы в общеземную координатную систему отсчета WGS-84. Трансформирование координат выполнено по стандартным элементам, приведенным в справочном документе «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) [25].

В соответствии со значениями нормальных высот пунктов Лапласа массив наземных данных был разделен на два: первый массив составляют точки по нормальным высотам в диапазоне от 0 до 500 м (равнинные районы), второй – все остальные точки, значения высот которых выше 500 м (горные районы).

Следует отметить, что наземные данные использовались без отбраковки, хотя очевидно, что в них содержатся ошибки как методические, так и системати-

ческие и случайные. Отбраковка данных не проводилась в связи со сложностью обоснования выбора ее критерия.

Методика вычисления составляющих УОЛ по данным глобальных моделей геопотенциала

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

Определяя производные возмущающего потенциала путем гармонического синтеза по коэффициентам, можно вычислить составляющие УОЛ в плоскости меридиана (ξ) и первого вертикала (η) в точке с полярными пространственными координатами ϕ , λ , r по следующим формулам:

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

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

где $\rho'' = 206265$; η'' и ξ'' – составляющие уклонения отвесной линии в первом вертикале и в плоскости меридиана соответственно; \bar{C}_{nm} и \bar{S}_{nm} – нормированные коэффициенты сферических функций поля силы тяжести; fM – гравитационная постоянная Земли; $\Delta\bar{C}_{nm} = \bar{C}_{nm} - \bar{C}_{nm}^0$ – 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); a_e – большая полуось; N – радиус кривизны в первом вертикале; M – радиус кривизны в меридиане; ϕ – географическая широта; λ – географическая долгота; r – радиус-вектор пункта.

Программный комплекс для вычисления составляющих УОЛ по данным глобальных моделей геопотенциала

Вычисления уклонений отвесных линий по данным глобальных моделей геопотенциала выполнены с помощью программного комплекса «ProjGraviS». Программный комплекс «ProjGraviS» разработан в лаборатории физической геодезии Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ). Он позволяет вычислять характеристики гравитационного поля Земли по данным современных глобальных моделей геопотенциала. Пользовательский интерфейс представлен на рис. 2.

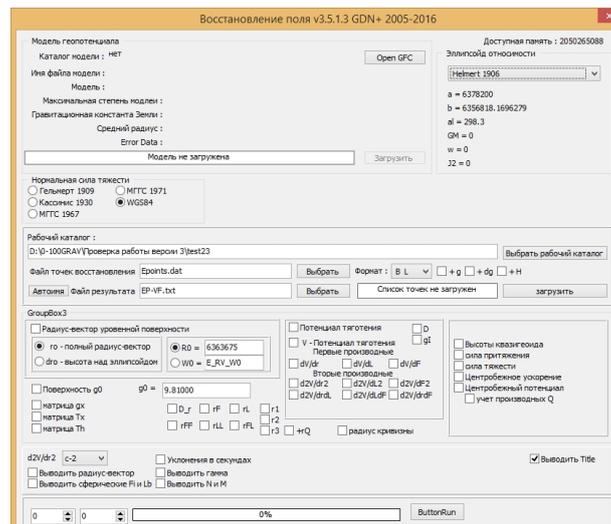


Рис. 2. Пользовательский интерфейс «ProjGraviS»

Программный комплекс «ProjGraviS», используя данные, представленные в формате .GFC, позволяет вычислять следующие величины для различных эллипсоидов относимости, параметры которых известны:

- высоты квазигеоида и поправку Брунса;
- аномалии силы тяжести в свободном воздухе (смешанные и чистые);
- силу притяжения, силу тяжести, центробежное ускорение;
- центробежный потенциал и его производные (первые, вторые по радиусу-вектору и широтные);
- полный гравитационный потенциал и его производные (первые, вторые по радиусу-вектору, широтные и долготные);
- потенциал притяжения и его производные (первые, вторые по радиусу-вектору, широтные и долготные);
- уклонения отвесной линии (в плоскости меридиана, в плоскости первого вертикала);
- аномальные вертикальный и горизонтальные градиенты;
- радиус-вектор уровенной поверхности (полный и над эллипсоидом относимости) и его производные (первые, вторые широтные и долготные);
- радиусы кривизны.

Для учета нормального значения силы тяжести в программе «ProjGraviS» используются формулы Гельмерта 1909 г., Кассиниса 1930 г., МГТС 1967 и 1971 гг., WGS-84.

Результаты

С помощью программного комплекса «ProjGraviS» и данных модели EIGEN-6C4 вычислены составляющие абсолютных УОЛ (отнесенных к эллипсоиду WGS-84) в плоскости меридиана и первого вертикала на каждом пункте Лапласа (ξ_{WGS-84} и η_{WGS-84}).

Составляющие абсолютных УОЛ в плоскости меридиана и первого вертикала ξ_{WGS-84} и η_{WGS-84} , полученные по формулам (1, 2), преобразуют в состав-

ляющие относительных УОЛ в плоскости меридиана и первого вертикала по формулам:

$$\xi_{CK-95}^{MOD} = \xi_{WGS-84}'' + (B_{WGS-84} - B_{CK-95})'', \quad (3)$$

$$\eta_{CK-95}^{MOD} = \eta_{WGS-84}'' + (L_{WGS-84} - L_{CK-95})'' \cdot \cos(B_{WGS-84}). \quad (4)$$

Относительные УОЛ, полученные по формулам (3, 4), сравнили с наземными измерениями УОЛ, выполненными на территории Западной Сибири. Получили разности:

$$\Delta\xi'' = \xi_{CK-95}^{MOD} - \xi_{CK-95}'', \quad \Delta\eta'' = \eta_{CK-95}^{MOD} - \eta_{CK-95}''. \quad (5)$$

В формулах (3–5):

B_{WGS-84} и L_{WGS-84} – геодезические широта и долгота в координатной системе отсчета WGS-84; B_{CK-95} и L_{CK-95} – геодезические широта и долгота в системе координат СК-95; ξ_{CK-95}'' и η_{CK-95}'' – составляющие УОЛ в системе координат СК-95, полученные по наземным данным; ξ_{WGS-84}'' и η_{WGS-84}'' – составляющие УОЛ в координатной системе отсчета WGS-84, полученные по модели EIGEN-6C4; ξ_{CK-95}^{MOD} и η_{CK-95}^{MOD} – составляющие УОЛ в системе координат СК-95, полученные по модели EIGEN-6C4; $\Delta\xi''$ и $\Delta\eta''$ – разности составляющих УОЛ, полученные по наземным данным и по модели EIGEN-6C4.

Результаты вычислений разности УОЛ по наземным данным и модели EIGEN-6C4 в 320 пунктах Лапласа на территории Западной Сибири представлены на рис. 3 и 4, на рис. 5 – гистограммы распределения этих разностей.

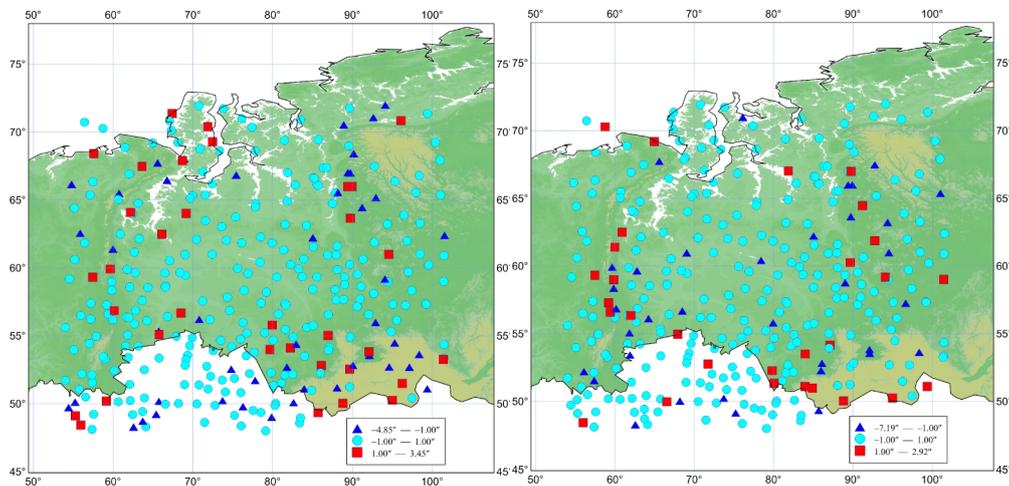


Рис. 3. Разности составляющих УОЛ в плоскости меридиана, полученные по наземным данным и модели EIGEN-6C4 в 320 пунктах Лапласа на территории Западной Сибири

Рис. 4. Разности УОЛ в плоскости первого вертикала, полученные по наземным данным и модели EIGEN-6C4 в 320 пунктах Лапласа на территории Западной Сибири

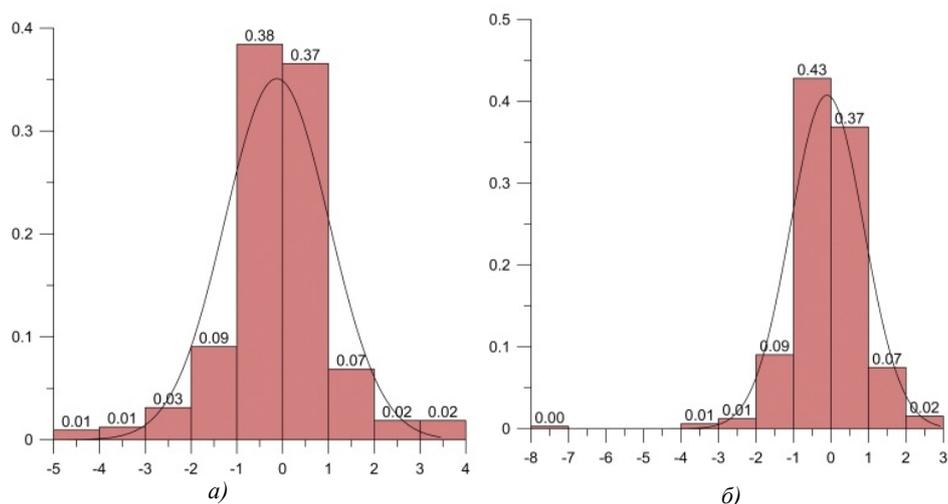


Рис. 5. Гистограммы распределения разностей УОЛ, полученных по наземным данным и модели EIGEN-6С4 в 320 пунктах Лапласа на территории Западной Сибири: а) в плоскости меридиана, б) в плоскости первого вертикала (по оси ординат – доля количества, по оси абсцисс – разность уклонений в секундах)

В табл. 1 приведены статистические параметры распределения разностей составляющих УОЛ в 320 пунктах Лапласа на территории Западной Сибири, полученных по наземным данным и модели EIGEN-6С4.

Т а б л и ц а 1

Статистические параметры распределения разностей $\Delta\xi''$ и $\Delta\eta''$ в 320 пунктах Лапласа на территории Западной Сибири

Параметры	$\Delta\xi''$	$\Delta\eta''$
Минимальная разность	-4,85	-7,19
Максимальная разность	3,45	2,92
Диапазон	8,30	10,10
Средняя	-0,13	-0,10
Дисперсия	1,29	0,96
Стандартное отклонение	1,14	0,98
Асимметрия	-0,41	-1,42
Экцесс	3,03	9,28

В табл. 2 приведены статистические параметры распределения разностей составляющих УОЛ, полученных по наземным данным и модели EIGEN-6С4 для двух массивов данных на территории Западной Сибири: 251 пункт Лапласа (равнинные районы) и 69 пунктов Лапласа (горные районы).

Статистические параметры распределения разностей $\Delta\xi''$ и $\Delta\eta''$ для двух массивов данных на территории Западной Сибири

Параметры	0–500 м		от 500 и выше	
	$\Delta\xi''$	$\Delta\eta''$	$\Delta\xi''$	$\Delta\eta''$
Количество точек	251	251	69	69
Минимальная разность	-3,23	-3,62	-4,85	-7,19
Максимальная разность	3,19	2,02	3,45	2,92
Диапазон	6,41	5,64	8,30	10,10
Средняя	-0,08	-0,03	-0,29	-0,36
Дисперсия	0,69	0,57	3,45	2,28
Стандартное отклонение	0,83	0,76	1,86	1,51
Асимметрия	0,04	-0,49	-0,24	-1,17
Эксцесс	2,03	2,51	0,06	4,83

На рис. 6 и 7 показаны гистограммы распределения разностей составляющих УОЛ, полученных по наземным измерениям и модели EIGEN-6С4 для этих двух массивов данных.

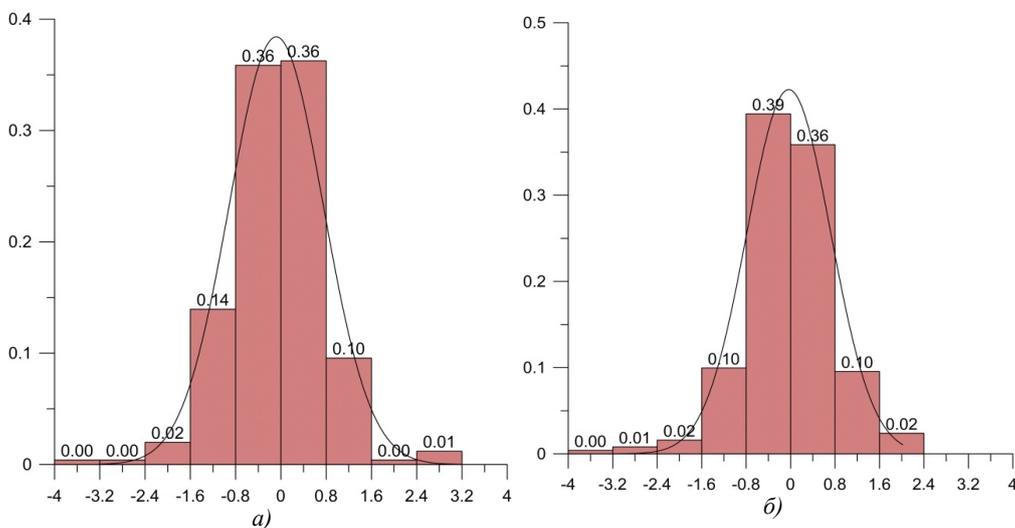


Рис. 6. Гистограммы распределения разностей составляющих УОЛ, полученных по наземным данным и модели EIGEN-6С4 в пунктах с высотами до 500 м: а) в плоскости меридиана, б) в плоскости первого вертикала (по оси ординат – доля количества, по оси абсцисс – разность уклонений в секундах)

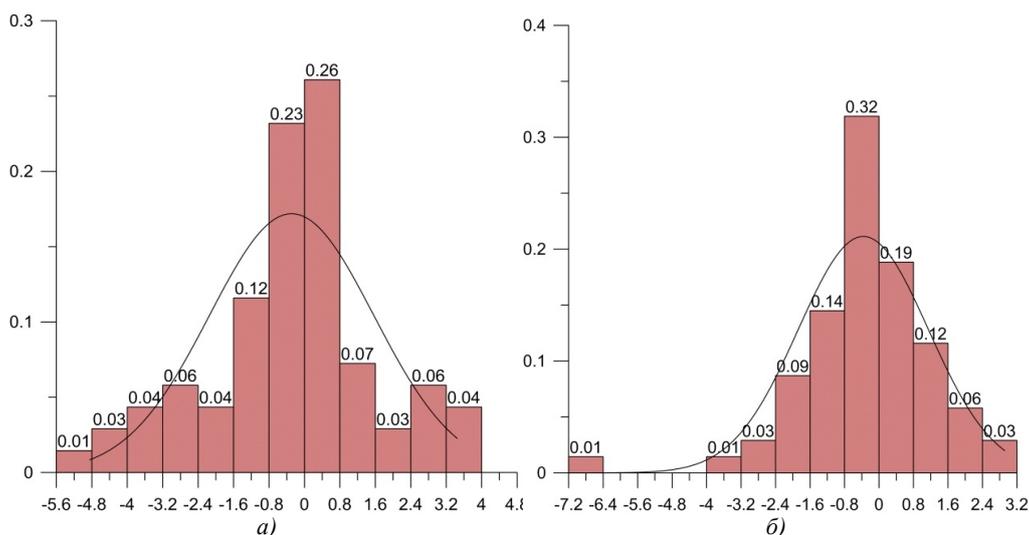


Рис. 7. Гистограммы распределения разностей, полученных по наземным данным и модели EIGEN-6C4 для горных районов: а) в плоскости меридиана, б) в плоскости первого вертикала (по оси ординат – доля количества, по оси абсцисс – разность уклонов в секундах)

Выводы

Анализируя статистические параметры распределения разностей $\Delta\xi''$ и $\Delta\eta''$ в 320 пунктах Лапласа на территории Западной Сибири, полученных по наземным данным и глобальной ультравысокостепенной модели геопотенциала EIGEN-6C4, можно сделать следующие выводы:

- стандартное отклонение разностей УОЛ соответствует $\Delta\xi''=1,14$, $\Delta\eta''=0,98$ при среднем значении $-0,13''$ и $0,10''$ соответственно;
- представленные гистограммы имеют распределение с небольшой отрицательной асимметрией и небольшим эксцессом;
- гистограммы распределения разностей, приведенные на рис. 5 и 6, имеют распределение, близкое к нормальному.

Приведенные рисунки 5–7 показывают, что при выделении исходной наземной информации с учетом значений нормальной высоты пунктов Лапласа до 500 м стандартное отклонение разностей УОЛ соответствует $\Delta\xi''=0,83$, $\Delta\eta''=0,76$ при среднем значении $-0,08''$ и $0,03''$, а от 500 м и выше – $\Delta\xi''=1,86$, $\Delta\eta''=1,51$ при среднем значении $-0,29''$ и $-0,36''$.

При отбраковке грубых по точности наземных данных сходимость с модельными УОЛ может улучшиться в 1,5-2 раза. На данный момент авторы предполагают, что наибольший вклад в полученные разности вносят ошибки астрономических наземных определений, выполненных при построении АГС на протяжении многих десятилетий. Это предположение требует дополнительных исследований. Кроме того, не следует забывать, что УОЛ, вычисленные по моделям геопотенциала, содержат также присущие им ошибки. Влияние ошибок создания современных глобальных моделей геопотенциала на полученные результаты тоже требует дальнейших исследований.

Уклоны отвесных линий, полученные по модели геопотенциала EIGEN-6C4 для равнинных областей (высота менее 500 м), показывают удо-

влетворительную сходимость с наземными данными, что позволяет использовать ультравысокостепенные модели геопотенциала для получения УОЛ с точностью до 1" для целей геодезии и навигации.

УОЛ, полученные по модели геопотенциала EIGEN-6C4 для горных районов (высота более 500 м), показывают неудовлетворительную сходимость с наземными данными (погрешность более 1"), поэтому их вычисление требует дополнительных исследований.

Проведение дополнительных исследований при наличии дополнительной информации о наземных данных позволит использовать ультравысокостепенные модели геопотенциала для контроля и анализа координатной основы – геодезических и астрономических координат.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Конешов В.Н.** Об оценке точности глобальных моделей гравитационного поля Земли // Физика Земли. 2014. № 1. С. 129–138.
2. **Дмитриев С.П.** Инерциальные методы в инженерной геодезии. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 1997. 208 с.
3. **Машимов М.М.** Высшая геодезия. М.: ВИА, 1991. 552 с.
4. **Закатов П.С.** Курс высшей геодезии. М.: Недра, 1976. 511 с.
5. **Глазунов А.С.** Современные тенденции в геодезической астрономии // ГЕО-СИБИРЬ-2008 : сб. материалов IV Междунар. науч. конгр, 22–24 апр. 2008 г., Новосибирск. Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 1: Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия, ч. 1. С. 183–188.
6. **Телеганов Н.А. Елагин А.В.** Высшая геодезия и основы координатно-временных систем: учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2004. 216 с.
7. **Шимбирев Б.П.** Теория фигуры Земли. М.: Недра, 1975. 432 с.
8. **Рожков Ю.А.** О возможности применения результатов аэрогравиметрических измерений для вычисления уклонений отвесной линии в труднодоступных районах // Физика Земли. 2005. № 2. С. 84–87.
9. **Конешов В.Н. Осика И.В., Степанова И.Э.** Методика расчета уклонения отвесной линии на основе S-аппроксимаций // Физика Земли. 2007. № 6. С. 19–25.
10. **Боярский Э.А.** К вычислению уклонений отвесной линии и превышений геоида по гравитационным аномалиям // Физика Земли. 2010. № 6. С. 80–85.
11. **Конешов В.Н.** Апробация новой методики расчета уклонения отвесной линии на основе S- и R-аппроксимаций в Атлантике // Физика Земли. 2015. № 1. С. 128–139.
12. **Гиенко Е.Г. Струков А.А., Решетов А.П.** Исследование точности получения нормальных высот и уклонений отвесной линии на территории Новосибирской области с помощью глобальной модели геоида EGM2008 // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 1. № 2. С. 186–191.
13. **Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Августов Л.И.** Оценка информативности аномального гравитационного поля Земли для экстремальной навигации // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 3. С. 22–29.
14. **Цуриков А.А.** Исследование точности определения астрономо-геодезических уклонений отвеса с применением GPS/ГЛОНАСС-технологий / А.А. Цуриков // Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотограмметрия. 2012. №2. С. 13–16.
15. **Hirt C.** Modern determination of vertical deflections using digital zenith cameras / C. Hirt [et al.] // Journal Surveying Engineering. 2010. Vol. 136, issue 1. P. 1–12.
16. **Непоклонов В.Б.** Методики определения составляющих уклонений отвесных линий и высот квазигеоида по гравиметрическим данным // Гравиметрия и геодезия (отв. ред. Б.В. Бровар). М.: Научный мир, 2010. С. 455–464.
17. **Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли //** Под общей ред. акад. В.Г. Пешехонова; науч. ред. д.т.н. О.А. Степанов. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
18. **Карпик А.П.** Исследование спектральных характеристик глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученных по космическим миссиям CHAMP, GRACE и GOCE // Гироскопия и навигация. 2014. № 4 (87). С. 34–44.

19. **Karpik A.P.** Evaluation of recent Earth's global gravity field models with terrestrial gravity data // Contributions to Geophysics and Geodesy. 2016. Vol. 46, No. 1. P. 1–11.
20. **Förste C.** EIGEN-6C4: The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse / – Режим доступа: <http://icgem.gfzpotdam.de/getmodel/doc/7fd8fe44aa1518cd79ca84300aef4b41ddb2364ae9e82b7cdaabdb60a9053f1>
21. **Shako R.** EIGEN-6C: A High-Resolution Global Gravity Combination Model Including GOCE Data // In Observation of the System Earth from Space - CHAMP, GRACE, GOCE and future missions. Science Report. 2014. No. 20. P. 155–161.
22. **Andersen O.B.** DNSC08 mean sea surface and mean dynamic topography models / O.B. Andersen, P. Knudsen, P. Berry // Journal of Geophysical Research. 2009. Vol. 114. DOI: 10.1029/2008JC005179.
23. **Andersen O.B.** The DTU10 Gravity field and Mean sea surface, Second international symposium of the gravity field of the Earth (IGFS2) / O.B. Andersen. Режим доступа: http://www.space.dtu.dk/english/Research/Scientific_data_and_models/Global_Marine_Gravity_Field.
24. **Руководство пользователя** по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95). ГКИНП (ГНТА)-06-278-04. М.: ЦНИИГАиК, 2004.
25. **Параметры Земли 1990** (ПЗ 90.11). Справочное руководство. М.: Научно-исследовательский центр топогеодезического и навигационного обеспечения «27 ЦНИИ» Минобороны России, 2014. 52 с.

Kosarev N.S., Kanushin V.F. (Siberian State University of Geosystems and Technologies (SGU G&T), Novosibirsk, Russia), **Kaftan V.I.** (FPFIS Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences; the RUDN University (Moscow, Russia), **Ganagina I.G., Goldobin D.N.** (SGU G&T), Novosibirsk, Russia), **Efimov G.N.** (FSBI Federal Research and technical Center of Geodesy, Cartography and SDI (Moscow, Russia).

Results of comparison of deflections of the vertical identified in the Western Siberia region. *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2017. Vol. 25. №4. P. 72–83.

Abstract. At present, the information on the deflection of the vertical (DOV) is obtained by means of modern geopotential models. The authors have obtained the DOV model values in the Western Siberia Region; the results of their components comparison are analyzed in the paper. The said components have been calculated on the basis of global geopotential model EIGEN-6C4, as well as of the results of astrogeodetic measurements taken in the Western Siberia Region. The survey results showed that in plane areas standard deviations of model DOV from the on-ground values obtained by traditional astrogeodetic method, do not exceed 1 arc sec.

Keywords: deflection of the vertical, astrogeodetic method, geopotential harmonic factors, modern global geopotential models

REFERENCES

1. **Koneshov, V.N. et al.**, Accuracy estimation of the global Earth gravity field models, *Fizika Zemli*, 2014, no. 1, pp. 129–138.
2. **Dmitriev, S.P.**, *Inertsial'nye metody v inzhenernoi geodezii* (Inertial Methods in Engineering Geodesy), St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 1997.
3. **Mashimov, M.M.**, *Vyshshaya geodeziya* (Higher Geodesy), Moscow: BIA, 1991.
4. **Zakatov, P.S.**, *Kurs vysshei geodezii* (Course of Higher Geodesy), Moscow: Nedra, 1976.
5. **Glazunov, A.S.**, Modern trends in geodetic astronomy, GEO-SIBIR'-2008, Sb. materialov IV Mezhdunar. nauch. kongressa (GEO-SIBIR'-2008, Proc. IV Int. Scientific Congress), April 22–24, 2008, Novosibirsk: SGGA, 2008, vol. 1: Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheideriya (Geodesy, geoinformatics, cartography, mine surveying), part 1, pp. 183–188.

6. **Teleganov, N.A. and Elagin, A.V.**, Vysshaya geodeziya i osnovy koordinatno-vremennykh sistem: ucheb. posobie (Higher geodesy and the fundamentals of coordinate-time systems), Novosibirsk: SGGa, 2004.
7. **Shimbirev, B.P.**, Teoriya figury Zemli (Theory of the Figure of the Earth), Moscow: Nedra, 1975.
8. **Rozhkov, Yu.A. et al.**, Using the results of aerogravimetric measurements to calculate deviations of vertical in hard-to-reach areas, *Fizika Zemli*, 2005, no. 2, pp. 84–87.
9. **Koneshov, V.N., Osika, I.V., and Stepanova, I.E.**, Methods for calculating the deviation of vertical using S-approximations, *Fizika Zemli*, 2007, no. 6, pp. 19–25.
10. **Boyarskii, E.A. et al.**, Calculation of vertical deviations and the geoid excess based on gravity anomalies, *Fizika Zemli*, 2010, no. 6, pp. 80–85.
11. **Koneshov, V.N. et al.**, Approbation of new methods to calculate deviations of vertical based on S- and R-approximations in the Atlantic, *Fizika Zemli*, 2015, no. 1, pp. 128–139.
12. **Gienko, E.G., Strukov, A.A., and Reshetov A.P.**, Studying the accuracy of normal heights and vertical deviations on the territory of the Novosibirsk region using the global geoid model EGM2008, *Interesko GEO-Sibir'-2011*, vol. 1, no. 2, pp. 186–191.
13. **Koneshov, V.N., Nepoklonov, V.B., and Avgustov, L. I.**, Estimating the navigation informativity of the Earth's anomalous gravity field for extreme navigation, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2016, no. 3, pp. 22–29.
14. **Tsurikov, A.A.**, Studying the accuracy of determining the astronomical and geodetic deviations of the vertical with the use of GPS/GLONASS, *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2012, no. 2, pp. 13–16.
15. **Hirt, C.**, Modern determination of vertical deflections using digital zenith cameras, *Journal Surveying Engineering*, 2010, vol. 136, issue 1, 1–12.
16. **Nepoklonov, V.B.**, Methods for determining deviations of the vertical and quasigeoid heights using gravity data, In *Gravimetriya i geodesia (Gravimetry and Geodesy)*, Brovar, B.V., Ed., Moscow: Nauchnyi mir, 2010, pp. 455–464.
17. **Peshkhonov, V.G., Stepanov, O.A., Evstifeev, M.I. et al.**, *Sovremennye metody i sredstva izmereniya parametrov gravitatsionnogo polya Zemli (Modern Methods and Means of Measuring the Parameters of the Earth's Gravitational Field)*, St. Petersburg: Elektrotibor, 2017.
18. **Karpik, A.P., Kanushin, V.F., Ganagina, I.G., Goldobin, D.N., and Mazurova, E.M.**, Analyzing spectral characteristics of the global earth gravity field models obtained from the CHAMP, GRACE and GOCE space missions, *Gyroscopy and Navigation*, 2015, Vol. 6, No. 2, pp. 101–108.
19. **Karpik, A.P. et al.**, Evaluation of recent Earth's global gravity field models with terrestrial gravity data, *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 2016, vol. 46, no. 1, pp. 1–11.
20. **Förste, C. et al.**, EIGEN-6C4: The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse, <http://icgem.gfzpotdam.de/getmodel/doc/7fd8fe44aa1518cd79ca84300aef4b41ddb2364aef9e82b7cdaabdb60a9053f1>
21. **Shako, R. et al.**, EIGEN-6C: A high-resolution global gravity combination model including GOCE Data, In *Observation of the System Earth from Space - CHAMP, GRACE, GOCE and Future Missions*. Science Report, 2014, no. 20, pp. 155–161.
22. **Andersen, O.B., Knudsen, P., and Berry, P.**, DNSC08 mean sea surface and mean dynamic topography models, *Journal of Geophysical Research*, 2009, vol. 114. DOI: 10.1029/2008JC005179.
23. **Andersen, O.B.**, The DTU10 gravity field and mean sea surface, Second International Symposium of the Gravity Field of the Earth (IGFS2). Режим доступа: http://www.space.dtu.dk/english/Research/Scientific_data_and_models/Global_Marine_Gravity_Field.
24. **Rukovodstvo pol'zovatelya po vypolneniyu rabot v sisteme koordinat 1995 goda (SK-95). GKINP (GNTA)-06-278-04.** (User's Handbook for Working in the Coordinate System SK-95). Moscow: TsNIIGAiK, 2004.
25. **Parametry Zemli 1990 (PZ 90.11).** Spravochnoe rukovodstvo (Parameters of the Earth 1990) (PZ 90.11). Reference Guide, Moscow: Nauchno-issledovatel'skii tsentr topogeodezicheskogo i navigatsionnogo obespecheniya "27 TsNII Minoborony Rossii, 2014.

Материал поступил 12.09.2017