

И. Г. Ганагина^{1}, О. А. Шевченко²*

Опыт создания модели высот геоида на территорию Республики Казахстан

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологии, г. Новосибирск,
Российская Федерация
*e-mail: gam0209@yandex.ru

²Высший колледж геодезии и картографии, г. Семей, Республика Казахстан
*e-mail: 20olesya20@mail.ru

Аннотация. По данным глобальных моделей гравитационного поля Земли EIGEN-6C4 и XGM2019e_2159 созданы модели геоида на участок территории Республики Казахстан. Вычисление аномалий высот реализуется с помощью веб-интерфейса, представленного в свободном доступе на сайте Международного центра глобальных моделей Земли (ICGEM). Для оценки точности полученных результатов выполнено сравнение модельных значений с наземными данными, полученными из геометрического нивелирования и ГНСС-измерений на пунктах государственной геодезической сети, расположенных на исследуемом участке. Максимальное расхождение значений разности модельных и наземных данных составляет 0,0376 м, минимальное расхождение значений разности – 0,001 м. Выполненное исследование позволяет сделать вывод о необходимости продолжения исследований глобальных моделей геопотенциала на территории Республики Казахстан.

Ключевые слова: региональная модель геоида, современные модели геопотенциала, модель EIGEN-6C4, модель XGM2019e_2159

I. G. Ganagina^{1}, O. A. Shevchenko²*

Experience in creating a model of geoid heights on the territory of the Republic of Kazakhstan

¹Siberian State University of Geosystems and Technology, Novosibirsk,
the Russian Federation
*e-mail: gam0209@yandex.ru

²Higher College of Geodesy and Cartography, Semey Republic of Kazakhstan
*e-mail: 20olesya20@mail.ru

Abstract. According to the data of the global models of the Earth's gravitational field EIGEN-6C4 and XGM2019e_2159, geoid models were created for a section of the territory of the Republic of Kazakhstan. Height anomaly calculations are implemented using a web interface, which is freely available on the website of the International Center for Global Earth Models (ICGEM). To assess the accuracy of the results obtained, the model values were compared with ground data obtained from geometric leveling and GNSS measurements at points of the state geodetic network located in the study area. The maximum discrepancy between the values of the difference between model and ground data is 0,0376 m, the minimum discrepancy between the difference values is 0,001 m. The performed study allows us to conclude that it is necessary to continue researching global geopotential models on the territory of the Republic of Kazakhstan.

Keywords: regional geoid model, modern geopotential models, EIGEN-6C4 model, XGM2019e_2159 model

Введение

Создание региональных и локальных моделей геоида позволяет заменить трудоемкое геометрическое нивелирование спутниковым и является востребованной задачей. Особое значение приобретает оценка точности полученных моделей, которая, как правило, выполняется по наземным геодезическим измерениям, выполненным на изучаемой территории. При создании модели геоида на ограниченную территорию с высокой точностью появляется возможность решения не только прикладных, но и фундаментальных задач геодезии [21].

Точность моделирования высот геоида зависит от геодезической и гравиметрической изученности исследуемой территории. Национальные проекты Республики Казахстан (РК) [5–9, 11] предусматривают разработку единой государственной системы координат Казахстана QTRS QazTRS 22, что подразумевает наличие модели геоида высокой точности [4, 13, 16].

На сайте Международного центра глобальных моделей Земли (ICGEM) представлены более 170 моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ), представленных коэффициентами разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям [21, 22]. Модели геопотенциала позволяют получить характеристики ГПЗ и провести оценку результатов по наземным данным. Для оценивания результатов моделирования высот геоида используют наземные измерения, выполненные методами геометрического нивелирования и ГНСС-нивелирования на исследуемой территории.

Отечественные и зарубежные авторы, используя данные глобальных моделей геопотенциала, провели оценивание вычисленных высот геоида для территорий России, Германии, США, Канады, Мексики, Австралии, Японии, Бразилии. Анализ создания региональных моделей геоида за период с 2015г. по 2022 г. позволяет сделать выводы, что средние квадратические погрешности моделирования при сравнении с наземными данными на исследуемые территории находятся в пределах от 1 см до 7–10 см [1, 10, 12, 17]. Применение современных моделей геопотенциала EIGEN-6C4, SGG-UGM-2, GECO, EGM2008, XGM2019e_2159 позволяет получить наименьшую среднюю квадратическую погрешность моделирования высот регионального геоида [2].

Цель данной работы представить опыт создания модели геоида на участок территории Республики Казахстан по данным современных глобальных ультравысокостепенных моделей геопотенциала EIGEN-6C4 и XGM2019e_2159.

Материалы и методы

Исходными данными для создания региональной модели геоида для участка территории РК являются коэффициенты разложения геопотенциала современные модели EIGEN-6C4 и XGM2019e_2159.

Модель геопотенциала EIGEN-6C4 получена из последовательно созданных гравитационных моделей EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, содержит гармонические коэффициенты геопотенциала до $n=2190$ [2].

Модель геопотенциала XGM2019e_2159 находится в открытом доступе в трех вариантах: до сферической гармоники степени $N=5540$ (XGM2019e), до

$N = 2190$ (XGM2019e_2159) и до $N = 760$ (XGM2019). Исходной информацией для создания модели XGM2019e_2159 служит модель GOCO06s, полученная по спутниковым данными и наземным измерениям. Наземные измерения представлены аномалиями силы тяжести на суше и дополнены топографической моделью EARTH2014. Спутниковая альтиметрия дополняет информацию над океанами DTU13 [1, 2].

Сравнительная оценка точности моделей геоида выполнялась по независимым данным на нескольких участках территории Республики Казахстан:

- Акмолинская область;
- Туркестанская область;
- Абайская область.

На участке территории РК (рис. 1) находится 12 пунктов $P(\varphi, \lambda)$, в которых выполнено геометрическое нивелирование II класса и получены нормальные высоты $H^{\nu}(P)$. На этих же пунктах в рамках развития государственной геодезической сети Республики Казахстан выполнены спутниковые измерения и получены геодезические высоты $H^G(P)$. Средние квадратические погрешности геодезических высот получены из уравнивания спутниковой сети и находятся в пределах 5 мм [3, 14, 15].

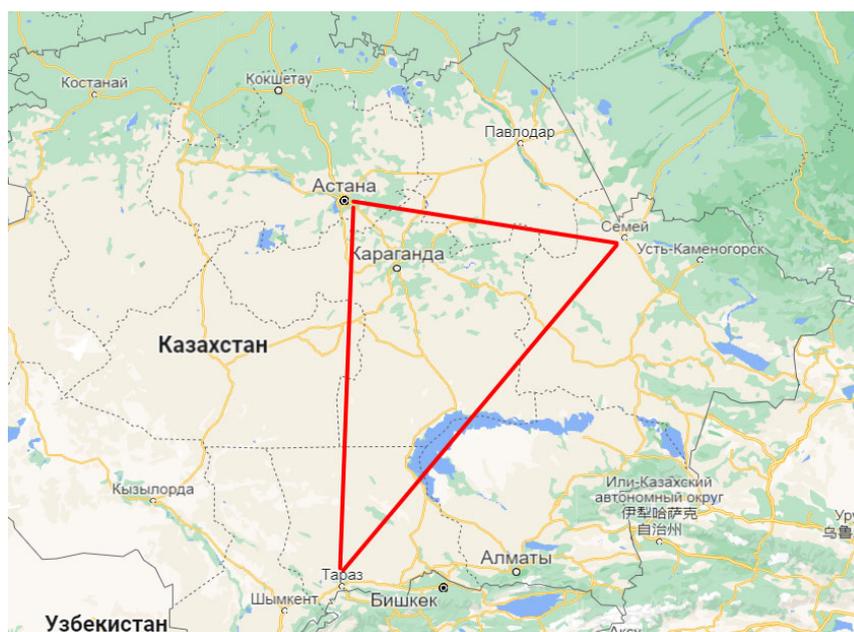


Рис.1. Участок исследуемой территории Республики Казахстан

Результаты

Вычисление аномалий высот реализуется с помощью веб-интерфейса, представленного в свободном доступе на сайте ICGEM [18 – 22].

Авторами выполнено сравнение $\Delta\zeta$ полученных модельных результатов определения аномалий высот ζ по коэффициентам исследуемых моделей с наземными данными (таблица 1).

Результаты модельных вычислений и их сравнение с наземными измерениями

Название пункта	Модель EIGEN6с4 ζ , м	Модель XGM2019e_2159 ζ , м	Модель EIGEN-6C4 $\Delta\zeta$, м	Модель XGM219e_2159 $\Delta\zeta$, м
1	-31.940	-31.937	0.0065	0.0065
2	-31.951	-31.949	0.0038	0.0038
3	-31.955	-31.954	-0.0088	-0.0088
4	-43.892	-43.919	-0.0154	0.0227
5	-43.896	-43.923	-0.0139	0.0241
6	-43.920	-43.944	-0.0175	0.0179
7	-40.838	-40.808	-0.0112	-0.0303
8	-40.634	-40.606	0.0232	0.0062
9	-40.695	-40.666	-0.0009	-0.0189
10	-40.754	-40.724	-0.0096	-0.0285
11	-40.820	-40.789	0.0076	-0.0117
12	-40.777	-40.746	0.0376	0.0185

Результаты, представленные в табл. 1, позволяют сделать вывод, что наименьшая разность между модельными данными и наземными измерениями составляет меньше одного сантиметра, что хорошо согласуется с результатами исследований, выполненных на территории Европы, Северной и Южной Америки [17]. Для всей исследуемой территории наименьшие значения получены по данным модели EIGEN-6C4. Результаты сравнения значений аномалий высоты, полученные по модели EIGEN-6C4, и наземными измерениями представлены на графике (рис. 2).

Максимальные разности между значениями модельных и наземных данных приходятся на территорию Туркестанской области и соответствуют 0,0376 м, минимальные – на территорию Акмолинской области.

В полученных результатах разности модельных и наземных данных высот геоида $\Delta\zeta$ содержат 3 типа погрешностей: ГНСС-измерения, геометрического нивелирования и глобальной модели геопотенциала. Величина погрешности создания глобальных моделей геопотенциала вносит наибольшее влияние на итоговый результат [13].

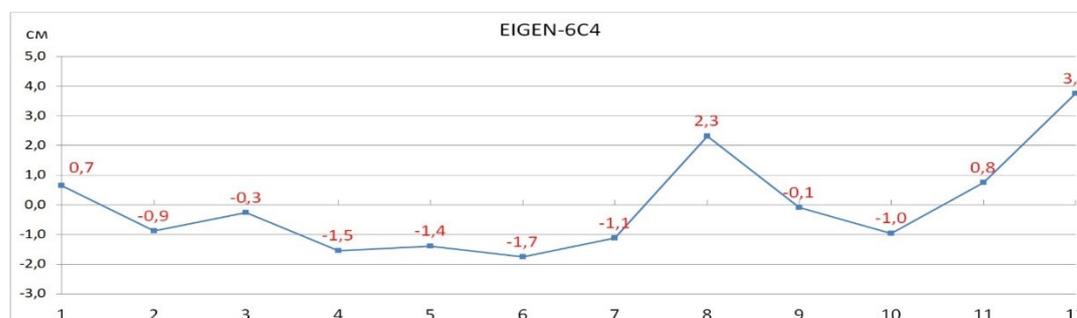


Рис. 2. График разности модельных и наземных значений высот геоида на участок Республики Казахстан

Отклонения высот геоида, полученных по наземным измерениям, от значений, полученных по данным модели XGM219e_2159, не превышают 3,0 см, и согласуются с выводами, сделанными ее создателями [10, 23].

Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о необходимости дальнейшего исследования моделей EIGEN-6C4 и XGM219e_2159 для создания региональной модели геоида на территорию Республики Казахстан. Использование модельных данных существенно улучшает методы изучения характеристик гравитационного поля Земли.

Представленные в работе результаты наметили ряд направлений дальнейшего исследования возможностей использования глобальных моделей геопотенциала для создания региональной модели высот геоида на участок территории Республики Казахстан. Кроме увеличения контрольных точек, на которых выполнены наземные измерения, необходимо оценивать их качество с учетом моментов выполнения наблюдений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ данных чистых и смешанных аномалий силы тяжести, полученных по результатам работы космических гравиметрических миссий GRACE, GOCE [Текст] / И. Г. Ганагина, В. Ф. Канушин, Д.Н. Голдобин, И.В. Зверев // «ГЕО-Сибирь 2022» сб. материалов XVIII Международн. науч. конгр., 18–20 мая, 2022 г. – Новосибирск: СГУГИТ, 2022 г. с. 130-137.

2. Modeling of quasigeoid heights in the earth's local surface areas based on the results of the expansion in a generalized fourier series, - Kanushin V.F., Ganagina I.G., Goldobin D.N. Gyroscopy and Navigation. 2021. Т. 12. № 1. С. 61.

3. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов / Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан Әділет [Режим доступа]: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2300032090>.

4. Моделирование региональногеоида на основе последних глобальных гравиметрических моделей GOCE [текст] / Д.А. Шоганбекова, Т. П. Пентаев// Сборник трудов международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и проекты в горно-металлургическом комплексе, их научное и кадровое сопровождение», – Алматы, 2014, – с. 418–422.

5. Началась разработка современной государственной системы координат Казахстана [Электронный ресурс]. – [Режим доступа]: <https://profit.kz/news/61798/Nachalas-razrabotka-sovremennoj-gosudarstvennoj-sistemi-koordinat-Kazahstana>.

6. О геодезии, картографии и пространственных данных Закон Республики Казахстан от 21 декабря 2022 года № 166-VII ЗРК. [Электронный ресурс]. Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан Әділет– Режим доступа: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z2200000166>.

7. Об установлении единых государственных систем координат, высот, гравиметрических и спутниковых измерений, а также масштабного ряда государственных топографических карт и планов : постановление Правительства Республики Казахстан от 28.12.2002 № 1403 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://geoid.kz/Resolution_of_the_Government_RK_December_28_2002_№1403. – Загл. с экрана.

8. Об утверждении национального проекта «Технологический рывок за счет цифровизации, науки и инноваций» [Электронный ресурс]. Постановление Правительства Республики Казахстан от 12 октября 2021 года № 727. [Режим доступа]: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2100000727>.

9. Об утверждении инструкций, правил, регламентирующих порядок создания, обновления, использования Национальной инфраструктуры пространственных данных [Текст]. Приказ Министра цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан от 29 апреля 2020 года № 163/НК. [Режим доступа]: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2000020535>.
10. Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T. et al. The combined global gravity field model XGM2019e. *J Geod* 94, 66 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0>.
11. Реализуемые проекты [Электронный ресурс]/ РГП на ПХВ «НЦГПИ» [Режим доступа]: <https://qazgeodesy.kz/o-predpriyatii/realizuemye-proekty>.
12. Современное состояние цифровых моделей геоида в континентальных районах [текст] Геодезия, гравиметрия и геодинамика В.Б. Непоклонов, М.В. Абакушина / Материалы междунар. науч.-практ. конф., Новополюцк: ПГУ, – 2016 г. – Ч. 1. – 228 с.
13. Состояние и актуальные проблемы модернизации ГГС Республики Казахстан [Текст]. /Андреев В. К., Джанпейсов М. Э., Новиков Е. В., Сагындык М. Ж., Самратов У. Д., Филатов В. Н., Хасенов К. Б., Хвостов В. В. // Геопрофи. – 2012. – № 6. – с. 12–17.
14. Цифровой нивелир Leica DNA03 [Электронный ресурс]/ Компания ООО «ГЕО-НДТ» официальный сайт [Режим доступа]: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-4401-cifrovoy-nivelir-leica-dna03.htm?t=1>.
15. Центры и реперы государственной геодезической и нивелирной сетей Республики Казахстан ГКИНП (ГНТА)-19-024-09 [текст]/Агентство Республики Казахстан по управлению земельными ресурсами / – Астана. 2009. стр. – 46.
16. Шоганбекова Д. А. Разработка алгоритмов вычисления аномалий высот и моделирование гравиметрического геоида Республики Казахстан [текст] диссертация/ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева. Алматы. – 2015 г. – с.122 с.
17. Barthelmes F. Definition of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models Theory and formulas used by the calculation service of the International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/Scientific Technical Report STR09/02 Revised Edition, January 2013](http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ScientificTechnicalReportSTR09/02RevisedEdition,January2013http://icgem.gfz-potsdam.de/str-0902-revised.pdf) <http://icgem.gfz-potsdam.de/str-0902-revised.pdf>.
18. Calculation of Gravity Field Functionals on Ellipsoidal [Электронный ресурс]/ [Режим доступа]: <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcgrid>.
19. Calculation Расчет аномалии высоты по модели EIGEN-6C4 [Электронный ресурс]/ [Режим доступа]: <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcstat/c755950b6ef1f43621ce748cc06765a910f3cd3daa9df3d2560e8b830c35e771>.
20. Calculation of Gravity Field Functionals on User-Defined Points [Электронный ресурс]/ [Режим доступа]: <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints>.
21. ICGEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans, Earth System Science Data E. Sinem Ince, F. Barthelmes, S. Reißland, K. Elger, C.Förste, F.Flechtner, and H. Schuh – [Электронный ресурс]. [Режим доступа]: <https://essd.copernicus.org/articles/11/647/2019/>.
22. International Centre for Global Earth Models (ICGEM) Международный центр глобальных моделей Земли (ICGEM): официальный сайт. – [Электронный ресурс]. [Режим доступа] <http://icgem.gfz-potsdam.de/home>.
23. Zingerle, Philipp; Pail, Roland; Gruber, Thomas; Oikonomidou, Xanthi (2019): The experimental gravity field model XGM2019e. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/ICGEM.2019.007>.

© И. Г. Ганагина, О. А. Шевченко, 2023