

ГЕОДЕЗИЯ, ГРАВИМЕТРИЯ И ГЕОДИНАМИКА

УДК 528.22

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕОИДА В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РАЙОНАХ¹

д-р техн. наук В.Б. НЕПОКЛОНОВ, М.В. АБАКУШИНА

*(Московский государственный университет геодезии и картографии,
Россия)*

Представлено современное состояние работ в области создания региональных и национальных цифровых моделей геоида в районах суши по гравиметрическим данным. Рассмотрены четыре региональные модели континентального масштаба (Европа, Африка, Южная Америка, Австралия) и аналогичные национальные модели для территории России и ряда зарубежных стран, имеющих достаточно большие размеры (США, Канада, Мексика, Китай, Монголия, Казахстан, Иран, Украина, Польша). Описаны основные методы создания и валидации указанных моделей. Проведен сравнительный анализ их разрешающей способности и точностных характеристик. Отмечены первоочередные задачи для улучшения моделей геоида на территории России.

***Ключевые слова:** гравитационное поле Земли, высота геоида, модель, гравиметрическая информация, спутниковое нивелирование, точностные характеристики.*

Одной из актуальных задач современной геодезии является создание высокоточных моделей геоида на суше. Такие модели нужны как для решения различных научных задач, так и для практических целей, в частности, для замены геометрического нивелирования, трудоемкого и дорогостоящего, высокопроизводительным спутниковым нивелированием на основе ГЛОНАСС/GPS [1]. Федеральной целевой программой «Поддержка, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» предусмотрено к 2020 году определение высот геоида (ВГ) на территории

¹ Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-05-00720).

Российской Федерации с погрешностью 0,05 м [2]. Создание моделей геоида такой высокой точности является сложной научно-технической задачей, выполнению которой может способствовать учет отечественного и зарубежного опыта решения подобных задач.

Наиболее распространенной разновидностью моделей геоида на сегодняшний день являются цифровые модели (карты) в виде совокупности дискретных значений высот геоида в узлах равномерной сетки меридианов и параллелей (далее – ЦМГ) [1]. Основным видом исходной информации для вычисления высот геоида на суше были и остаются данные площадных гравиметрических съемок. Доклад посвящен оценке современного состояния ЦМГ для районов суши. Представлен анализ современного состояния работ в области построения региональных и национальных ЦМГ по гравиметрическим данным на примере 4 региональных моделей континентального масштаба (Европа, Африка, Южная Америка, Австралия) и аналогичных национальных моделей для территории России и ряда зарубежных стран, имеющих достаточно большие размеры (США, Канада, Мексика, Китай, Монголия, Казахстан, Иран, Украина, Польша) [3–6].

В общем случае технологический процесс создания ЦМГ сводится к уточнению и детализации глобальных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) в конкретных районах и состоит из двух основных этапов (стадий). Сначала осуществляется создание ЦМГ с использованием детальной гравиметрической информации и цифровой модели рельефа (ЦМР). Для контроля используются ВГ, полученные по схеме обратного спутникового нивелирования (ОСН) – как разности геодезических (спутниковых) и абсолютных (нивелирных) высот. Затем, в случае необходимости, выполняется уравнивание ЦМГ с данными ОСН. В результате на основе гравиметрической модели формируется так называемая комбинированная или гибридная модель геоида.

Точностные характеристики региональных и национальных ЦМГ зависят от изученности соответствующих территорий в гравиметрическом и геодезическом отношении. В настоящее время она продолжает оставаться неравномерной. К регионам, относительно хорошо обеспеченным исходной гравиметрической и геодезической информацией, можно отнести Европу, Северную Америку, Австралию. В отличие от этого, значительная часть районов, расположенных в Азии (включая Россию), Африке, Южной Америке, Антарктиде, по-прежнему не имеет покрытия гравиметрическими съемками требуемой точности, полноты и подробности.

Существенный вклад в общее повышение точности региональных и национальных ЦМГ внесло использование в составе исходной информации

результатов изучения фигуры и гравитационного поля Земли с помощью современных космических методов, в том числе новых планетарных моделей ГПЗ повышенной точности, полученных с использованием данных спутниковой альтиметрии, измерений по линии «спутник–спутник», спутниковой градиентометрии, а также детальных ЦМР, созданных по данным дистанционного зондирования Земли, в первую очередь, модели SRTM.

Помимо исходной информации, на точность ЦМГ влияют методические особенности ее обработки. Наибольшее распространение получили два подхода к созданию ЦМГ: интегральный и статистический.

В рамках интегрального подхода ВГ вычисляются по интегральным формулам физической геодезии, в основном, с использованием формулы Стокса и ее модификаций. При этом применяются различные методики преобразования аномалий силы тяжести (АСТ) в ВГ, в т.ч. методика UNB (Университет Нью-Брунсвика, Канада), использующая модифицированный интеграл Стокса в сочетании с техникой «удаления-восстановления» и методика КТН (Королевский технологический университет, Стокгольм), реализующая классическую схему вычисления модифицированного интеграла Стокса. Для каждой методики возможны различные варианты реализации. Они различаются выбором планетарной модели ГПЗ, способа модификации интеграла Стокса, размеров области учета детальной гравиметрической информации. При современных требованиях к точности ЦМГ необходим учет топографии. Для этого могут использоваться различные алгоритмы, в том числе алгоритмы, основанные на известных формулах топографической редукции и методе Молоденского.

В рамках статистического подхода ВГ вычисляются путем статистического прогноза, реализуемого на базе метода наименьшей квадратической коллокации. При этом также могут использоваться различные вычислительные схемы, в том числе схемы с глобальными и локальными моделями ковариационных функций АСТ и ВГ [7].

С повышением требований к точности ЦМГ повышаются требования к методам оценки их точностных характеристик. В настоящее время точностные характеристики ЦМГ оценивают с использованием различных методов, в том числе методов априорной и апостериорной оценки точности. Априорные оценки, базирующиеся на использовании определенных моделей погрешностей преобразования исходных аномалий силы тяжести в ВГ, наиболее широко применяются при проектировании ЦМГ. Основной областью применения апостериорных оценок являются этапы экспериментальной отработки ЦМГ, их верификации и валидации. При этом используются

два типа оценок – внутренние (по внутренней сходимости) и внешние. Первые не дают полного представления о точностных характеристиках ЦМГ, так как обычно они ограничиваются точностью определения узловых значений ВГ. Поэтому окончательные выводы о точности ЦМГ делаются на основе внешних оценок, получаемых путем сравнения модели с контрольными данными. Это позволяет оценить суммарное влияние различных источников погрешностей ЦМГ, включая погрешности интерполяции узловых значений ВГ в промежуточные точки.

В качестве контрольных данных для оценки точности используют:

- значения ВГ и (или) их градиентов (уклонений отвесной линии), вычисленных по глобальной модели ГПЗ, условно принимаемой за эталон;
- значения ВГ и (или) разностей ВГ, полученных с использованием технологии ОСН;
- значения ВГ, полученные по данным спутниковой альтиметрии (в прилегающих морях, попадающих в область действия модели);
- данные аналогичной модели геоида для соседнего региона (в зоне перекрытия);
- значения составляющих уклонений отвесной линии, полученных астрономо-геодезическим методом и (или) вычисленных независимо по гравиметрической информации.

Основным способом внешней оценки точности ЦМГ на сегодняшний день является сравнение модели с данными ОСН. При этом необходимо учитывать, что эффективность данного метода зависит от количества контрольных ВГ, их точностных характеристик и площадного распределения. Количество и плотность задания контрольных значений ВГ могут существенно меняться от района к району.

Внешние оценки точности ЦМГ по данным ОСН, характеризующие зависимость точностных характеристик и детальности ЦМГ от их географического положения и национальной принадлежности, представлены в таблице 1 (на примере зарубежных моделей).

В Российской Федерации создание и обновление ЦМГ рассматривается как одно из ключевых условий создания высокоэффективной системы геодезического обеспечения, как это предусмотрено Концепцией развития отрасли геодезии и картографии до 2020 г. За последние 20 лет российскими специалистами созданы и доведены до практической реализации две ЦМГ на территорию своей страны.

Одна из них – это модель «Российский гравиметрический геоид», созданная в 2000 году (РГГ-2000) при поддержке Российского фонда фун-

даментальных исследований в экспериментальных целях (рис. 1). Ее основные характеристики: исходная информация – опорная модель ГПЗ EGM-96 (до 360-й степени), средние АСТ и высоты по трапециям $5' \times 5'$ (на основе гравиметрических карт масштаба 1:1 000 000); шаг фиксированный – $5'$; границы – по широте от 40° до 80° , по долготе от 26° до 192° . Узловые значения ВГ вычислены по формуле Стокса с использованием техники «исключения-восстановления». Расхождение модели РГГ-2000 с аналогичной моделью европейского гравиметрического геоида 1997 года характеризуется средним значением 0,40 и стандартным отклонением 0,42 м. Относительно данных ОСН погрешности модели РГГ-2000 характеризуются следующими локальными оценками [8–9]: на территории Альметьевского геодинамического полигона (Республика Татарстан) – средним значением – 0,36 м и стандартным отклонением 0,38 м (по 20 пунктам); в зоне проектируемого трубопровода протяженностью 70 км на территории Восточной Сибири – средним значением 0,05 м и стандартным отклонением 0,08 м (по 11 пунктам).

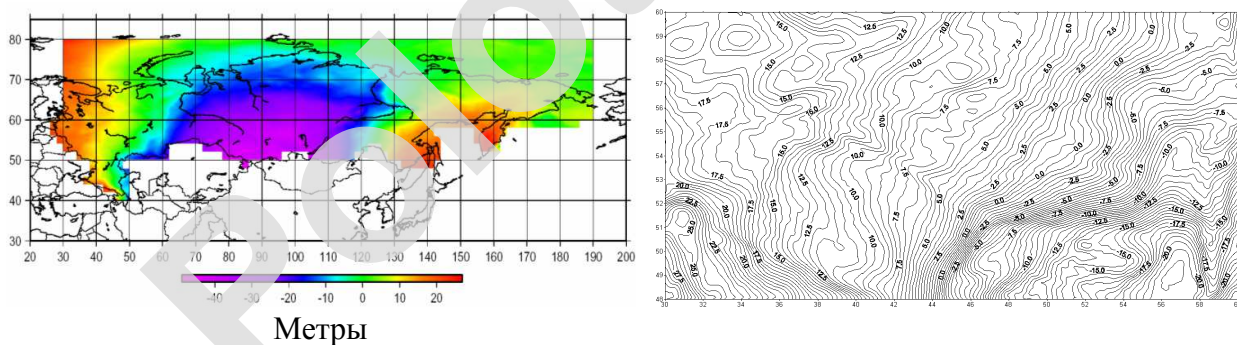
Таблица

Характеристики современных зарубежных ЦМГ

Регион (страна)	Наименование модели	Шаг сетки (угл. мин)	Опорная модель ГПЗ (порядок)	Точностные харак- теристики (относи- тельно данных ОСН)	
				Среднее	Ср. кв. откл.
1	2	3	4	5	6
Европа	Европейский гравиметрический гео-ид 2007 (EGG07)	$1 \times 1,5$	EIGEN-GLO4C	-0,06	0,06
Африка	Африканский проект геоида 2007 (AGP2007)	5×5	EIGEN-GL04C (120)	нет данных	0,21
Южная Америка	GEOID2014	5×5	EIGEN-6C3stat (200)	0,17	0,52
Австралия	AUSGeoid09	1×1	EGM2008 (2160)	нет данных	0,05
США (24...58° с.ш.; 60...130° з.д.)	Гравиметрический геоид США 2012 (USGG2012)	1×1	EGM2008 (2160); GOCO02S	0,01	0,06
Канада (10...90° с.ш., 10...170° з.д.)	Канадский гравиметрический геоид 2013 (CGG2013)	2×2	EIGEN-6C3stat	-0,19	0,13

Окончание табл.

1	2	3	4	5	6
Мексика (14...33° с.ш.; 86...119° в.д.)	Мексиканский гравиметрический геоид 2005(GGM05)	2,5 × 2,5	EIGEN2	нет данных	0,20
Китай	Национальный гравиметрический геоид 2011 (CNGG2011)	2 × 2	EIGEN-CG03C	-0,16	0,13 (Тибет – 0,22)
Казахстан (40...56° с.ш., 46...88° в.д.)	KazGM2010	5 × 5	ITG-GRACE2010S (180)	нет данных	0,18
Монголия	Национальный гравиметрический геоид 2007	5 × 5	EGM96 (360), GGM02S (160)	-1,14	0,20
Иран (24...40° с.ш., 44...62° в.д.)	Иранский квазигеоид 2009 (IRQG09)	1,5×1,5	EGM2008	нет данных	0,28
Украина (44...53° с.ш., 22...41° в.д.)	Ukrainian Gravimetric Geoid 2013 (UGG2013)	1,5×1,5	EGM2008 (360)	нет данных	0,10
Польша (47...57° с.ш., 11...47° в.д.)	Гравиметрический квазигеоид Польши 2013 (GDQM-PL13)	1,5×3,0	EGM2008 (360)	0,10	0,02



а

б

Рис. 1. Высоты квазигеоида на территории России данным модели РГГ-2000:

а – общая схема; б – детализация для европейской части страны,
линии равных высот проведены через 0,5 м

Вторая – ЦМГ, созданная в ЦНИИГАиК под руководством Г.В. Демьянова. Последняя версия условно датируется 2012 годом. В качестве исходной информации использовались – последняя российская глобальная гравитационная модель ГАО2012, средние значения АСТ и высот

рельефа, подготовленные с использованием гравиметрических карт масштаба 1:200 000. Особенностью данной ЦМГ является то, что она состоит из трех блоков, схематично показанных на рисунке 2. В блоках 1 и 2 сетка ВГ имеет шаг $5' \times 7,5'$, в блоке 3 – шаг $5' \times 5'$. Расхождения модельных ВГ с данными ОСН (для контроля использовались 835 пунктов ФАГС, ВГС и СГС-1 на территории России), схематично показаны на рисунке 3. Статистически эти расхождения характеризуются средним значением 0,15 м и стандартным отклонением 0,42 м.

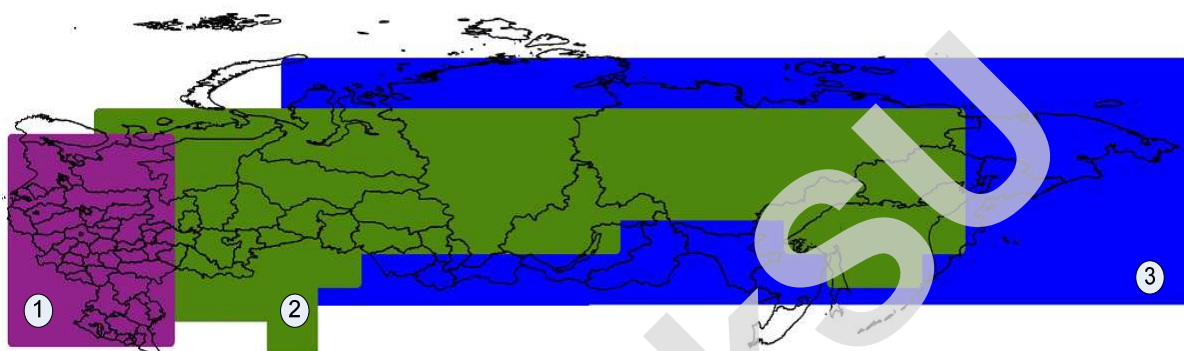


Рис. 2. Структура новой ЦМГ (ЦНИИГАиК) на территорию России

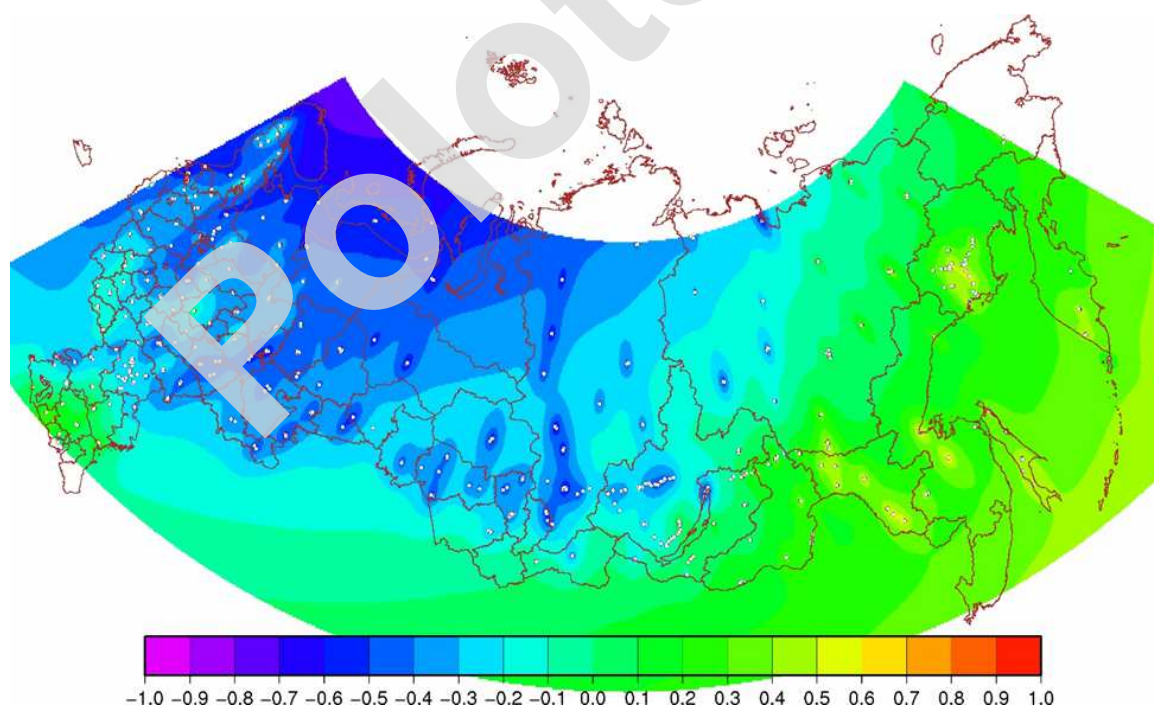


Рис. 3. Разности высот квазигеоида, полученных по данным ОСН и ЦМГ (ЦНИИГАиК)

Таким образом, проведен анализ результатов реализации ряда проектов по созданию региональных и национальных моделей геоида. На основании проведенного анализа могут быть сделаны следующие основные выводы.

Развитие исследований в области создания ЦМГ в континентальных районах обусловлено:

а) внедрением спутниковых геодезических технологий;

б) повышением точности и детальности глобальных моделей ГПЗ по новым данным космической геодезии (альтиметрия, межспутниковые измерения, градиентометрия);

в) общим улучшением гравиметрической изученности Земного шара.

Практически все развитые и многие развивающиеся страны обеспечены национальными ЦМГ высокой точности. Созданы региональные модели геоида на территории Европы, Африки, Южной Америки, Австралии. Современные региональные и национальные ЦМГ имеют следующие характеристики: разрешающая способность (детальность) – от 5' до 1–2'; точность (ср. кв. погрешность) – от нескольких дециметров (Африка, Азия, Южная Америка, Россия) до нескольких сантиметров (Европа, США, Канада).

Применяются различные методические подходы и схемы преобразования аномалий силы тяжести в высоты геоида, в том числе интегральный и статистический, теоретически обеспечивающих сантиметровый уровень точности. Это создает предпосылки для повышения надежности создаваемых моделей путем комплексирования различных методик.

В условиях России актуальна задача выхода на субдециметровый уровень точности определения высот геоида (к 2020 г. – 5 см). Зарубежный опыт свидетельствует о ее реалистичности. Для решения этой задачи в первую очередь необходимо модернизировать базу данных исходной гравиметрической информации, создать цифровую модель аномалий силы тяжести с шагом 1' и существенно увеличить количество пунктов ОСН (на порядок) и равномерность их распределения по территории страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гравиметрия и геодезия. – М. : Научный мир, 2010. – 723 с.
2. Комплексные исследования по обоснованию путей создания, принципов построения, определению проектного облика космической системы глобального геодезического мониторинга / В.Е. Косенко [и др.] / Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО–2013) : тезисы докладов Пятой Всероссийской конф., Санкт-Петербург, 15–19 апр. 2013 г. – СПб. : ИПА РАН, 2013. – С. 15–17.
3. Непоклонов, В.Б. Современные зарубежные цифровые модели геоида в континентальных районах / В.Б. Непоклонов, В.С. Моисеева, М.В. Абакушина // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 4. – (в печати).

4. Russian gravimetric geoid-2000. – Режим доступа: <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/gps/rgg/html>.
5. Szelachowska, M. GDQM-PL13 – the new gravimetric quasigeoid model for Poland / M. Szelachowska, J. Kryński // Geoinformation Issues. – 2014. – Vol. 6. – № 1 (6). – P. 5–19.
6. Kiamehr, R. The new quasi-geoid model IRQG09 for Iran / R. Kiamehr // Journal of Applied Geophysics. – 2011. – Vol. 73. – Issue 1. – P. 65–73.
7. Мориц, Г. Современная физическая геодезия / Г. Мориц ; пер. с англ. – М. : Недра, 1983. – 392 с.
8. Komarov, R.V. Geoid Determination by GPS/Levelling Method in the Republic of Tatarstan / R.V. Komarov, R.A. Kascheev, R.V. Zagretdinov // Georesources. – 2007. – 2(10). – P. 43–45.
9. Сидоренко, А.И. Некоторые результаты применения модели геоида EGM2008 в сопоставлении с другими моделями / А.И. Сидоренко // Земля и недвижимость Сибири. – 2009. – 5 (19). – С. 31–33.

THE CURRENT STATE OF DIGITAL GEOID MODEL IN CONTINENTAL AREAS

B. NEPOKLONOV, M. ABAKUSHINA

The current state of work in the field of regional and national digital geoid models in the areas of land from gravity data presented. Four regional models of the continental scale (Europe, Africa, South America, Australia) and similar national models for the territory of Russia and foreign countries with quite large size (US, Canada, Mexico, China, Mongolia, Kazakhstan, Iran, Ukraine, Poland) considered. Basic methods of creation and validation of these models are described. Their resolution and accuracy characteristics compared. Priorities for improvement of the geoid models in Russia are marked.

Keywords: *Earth's gravitational field, the height of the geoid, model, the gravimetric data, satellite (GPS) leveling, accuracy characteristics.*

УДК 528.56, 550.831

СОВРЕМЕННАЯ МОРСКАЯ ГРАВИМЕТРИЯ²

д-р техн. наук Л.К. ЖЕЛЕЗНЯК, В.Н. СОЛОВЬЕВ, П.С. МИХАЙЛОВ
(Институт физики Земли РАН, Россия)

Рассмотрены основные принципы выполнения гравиметрических измерений на море, построения гравиметрической аппаратуры, особенно-

² Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (грант №16-35-00434).