

DOI: 10.12737/article_590878fa8faec6.43371585

Кононова О.Ю., ст. препод.,
Андреева Н.В., канд. физ.-мат. наук, доц.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С РЕДУКЦИЯМИ В ПРОГРАММНОМ ПРОДУКТЕ SURFER

oksana171289@mail.ru

Определение ускорения силы тяжести на поверхности Земли и ее аномалии является довольно трудоемким процессом (измерение силы тяжести, обработка данных, учет аномалий, учет требований к снятию показаний приборов, учет климатических и погодных условий, учет техногенных факторов и т.п.). Моделирование в программе SURFER позволяет представить физическую поверхность Земли с учетом аномалий силы тяжести и редукации аномалий силы тяжести по полученным на практике экспериментальным данным. Строительство современных высотных зданий и прецизионных сооружений требует проведения геодезических работ высокой точности. Повышенная точность требуется и при мониторинге деформации таких сооружений при повреждениях зданий и не только. Определение координат точек требует определенной точности, в связи с чем необходимо учитывать неоднородность гравитационного поля. Накопление и учет подобных данных позволяет отслеживать долгопериодические и короткопериодические процессы, влияющие на вид и форму физической поверхности Земли, а также возможный прогноз деформационных явлений. В работе представлен расчет редукации аномалий силы тяжести на малом количестве расчетных точек Белгородской области и города Белгорода с представлением 3D карты поверхности.

Ключевые слова: моделирование, сила тяжести, аномалии силы тяжести, физическая поверхность Земли, прикладная геодезия

Силу тяжести на поверхности Земли можно представить как равнодействующую двух сил: силы притяжения (направлена к центру массы Земли), и центробежной силы (направлена перпендикулярно к оси вращения Земли). Форма тела Земли представляет собой эллипсоид вращения. Сила притяжения у полюсов больше, чем в других местах, и уменьшается к экватору, в связи с тем, что Земля сплюснута вдоль оси вращения. Центробежная сила противодействует силе притяжения, вследствие чего сила тяжести на поверхности Земли уменьшается при переходе от полюсов к экватору. Разница в ускорении силы тяжести между географическими полюсами и экватором составляет $g_{90} - g_0 = 983,2 - 978,0 = 5,2 \text{ см/с}^2$. Около 2/3 этой разности возникает за счет центробежного ускорения на земном экваторе и около 1/3 – за счет сплюснутости Земли [1, 2].

Результаты измерений ускорения силы тяжести (ускорения свободного падения) в различных точках земной поверхности показывают отклонения (возмущения) силы тяжести по сравнению с ее нормальным ходом, соответствующим эллипсоиду. Это есть аномалии силы тяжести и объясняются они тем, что строение земной коры неоднородно по вертикальной (видимые наружные масс: горные массивы, котлованы добычи полезных ископаемых и т.п.) и горизонтальной составляющей силы тяжести (различие состава земных пород, их плотностей и т.п.) [1, 2]. Поэтому сила тяжести и вызываемое

ею ускорение свободного падения на полюсе больше, чем на экваторе ($g = 9,832 \text{ м/с}^2$ на полюсе и $g = 9,780 \text{ м/с}^2$ на экваторе).

Строительство современных высотных зданий и прецизионных сооружений требует проведения геодезических работ высокой точности. Повышенная точность требуется и при мониторинге деформации таких сооружений при повреждениях зданий и не только [2]. Определение координат точек требует определенной точности, в связи с чем необходимо учитывать неоднородность гравитационного поля [5]. Современные методы измерения ускорения силы тяжести делятся на две категории: статистические и динамические методы. В статических методах тело, участвующее в измерениях, находится в момент измерения, т.е. в момент фиксации соответствующего отсчета, в покое; измеряются смещение тела или давление, вызванное весом тела [2, 4]. Приборы, служащие для измерения силы тяжести статическим методом, называются гравиметрами. Следует заметить, что измерения ускорения силы тяжести относятся к числу весьма точных измерений, требующих исключительно внимательного подхода при их выполнении и учете воздействия разнообразных факторов (температуры, влажности, и т.п.), которые могут оказывать влияние на точность результатов наблюдений [5].

В динамических методах наблюдают движение тела в гравитационном поле. К таким методам относятся маятниковые измерения. Маят-

никовые измерения - относительный метод, позволяющий определить ускорение силы тяжести между гравиметрическими пунктами. Он основан на наблюдении свободных колебаний одного и того же маятника на разных пунктах. Преимуществами таких измерений являются: независимость результатов измерений, точность, независимость от продолжительности гравиметрического рейса и от сложности поля [2]. Маятниковый способ используется для эталонирования статистических гравиметров, для создания редкой сети опорных пунктов с целью осуществления контроля измерений [3]. Экспериментально ускорение свободного падения таким способом можно определить при помощи математических и физических маятников в любых условиях в виду доступности оборудования.

Для сбора данных можно использовать математический маятник, представляющий собой

шарик, подвешенный на нерастяжимой нити. Нить подвеса должна быть также невесомой и ее длина должна быть много больше линейных размеров тела, которое будет колебаться на нити. Определить период колебаний, а соответственно и ускорение свободного падения можно по формуле (1), которая справедлива при отклонениях подвеса на угол 5–7 градусов [2, 4].

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (1)$$

Это обусловлено тем, что значение синуса малого угла практически равно значению самого угла.

Измерения ускорения силы тяжести, произведенные при разных произведенные при разных длинах маятника (1,21 м и 1,77 м), в различных высотных точках представлены в (табл. 1) [2].

Таблица 1

Числовые значения длины маятника, высотной точки и соответствующего ускорения свободного падения

L, м	H, м	g, м/с ²	Δg, %
1,224	177,0	9,8007	0,0078
0,679	177,0	9,2154	0,0239
1,224	200,0	9,9141	0,8018
0,679	200,0	9,3399	1,0564

Анализ данных показывает, что при уменьшении высоты над поверхностью земли ускорение свободного падения тоже уменьшается. При равной длине нити (L=1,224м) на высоте 200 м над уровнем моря имеем $g=9,9141 \text{ м/с}^2$ и $g=9,8007 \text{ м/с}^2$ на высоте 177 м; такую же зависимость имеем при меньшей длине нити (L=0,679м) на высоте 200 м над уровнем моря получили значение $g=9,3399 \text{ м/с}^2$ и $g=9,2154 \text{ м/с}^2$ на высоте 177 м.

При уменьшении длины нити маятника наблюдается уменьшение ускорения свободного падения. На высоте 200 м над уровнем моря, при длине нити равной 1,224 м мы получаем $g=9,9141 \text{ м/с}^2$, а при длине нити в 0,679 м $g=9,3399 \text{ м/с}^2$; на высоте 177 м над уровнем моря, при длине нити 1,224 м имеем $g=9,8007 \text{ м/с}^2$ и соответственно при длине нити 0,679 м $g=9,2154 \text{ м/с}^2$. Исходя из этих данных мы можем сделать вывод о том, что изменение длины нити

и изменение величины ускорения свободного падения находятся в прямой зависимости [2].

На тела на поверхности Земли, движущиеся вокруг нее, движущиеся вокруг Солнца и т.д. действует сила тяжести. По определению, сила тяжести на поверхности планеты складывается из гравитационного притяжения планеты и центробежной силы инерции, вызванной суточным вращением планеты. Принимая Землю равновесным эллипсоидом вращения, значение силы тяжести можно вычислить по формуле, в которой постоянные нужно считать известными. Для того чтобы карты гравитационных аномалий, полученных разными авторами, можно было сравнивать и анализировать, необходимо, чтобы гравитационные аномалии вычисляли по одинаковым методикам [9]. По этой причине в августе 1971 года Международный Геофизический и Геодезический утвердил формулу 2 для нормальной силы тяжести [11]:

$$\gamma = 978031,85(1 + 0,0053024\sin^2\varphi - 0,0000059\sin^22\varphi) \quad (2)$$

При этом аномалии силы тяжести можно вычислить как разность между величинами действительной (измеренной) g и нормальной силы тяжести γ_0 в пункте наблюдений.

Сила тяжести зависит от высоты точки наблюдения (все сухопутные определения силы

тяжести выполняются на разных высотах), что было показано в опыте выше, масс, лежащих между эллипсоидом и геоидом. Поверхность эллипсоида не совпадает с поверхностью уровня моря, поэтому развита теория приведения грави-

тационной аномалии (редукции) к одной и той же поверхности [9, 11].

Для учета поправок используют различные редукции (редукция Фая, редукция Буге, поправка за рельеф [7, 11, 12]. Аномалии в редукции Буге таковы, что в идеальном случае должны отражать только плотностные неоднородности в Земле. Однако есть свидетельства о том, что существует корреляция между средними аномалиями Буге и средними значениями высотных отметок. Более того, такой зависимости

не наблюдается для аномалий в свободном воздухе, то есть для аномалий Фая [10].

Смоделировать экспериментальные и расчетные данные можно в программном пакете Surfer [13], где можно по имеющимся данным (табл. 2 и табл. 3) построить карты изолиний высот (рис. 1) или же изолиний аномалий силы тяжести (рис 2 и рис 3). Возможно построение 3D модели поверхности, что облегчает наглядное представление изучаемой физической поверхности Земли (рис 4, рис.5 и рис 6).

Таблица 2

Вычисление аномалий силы тяжести в редукции за свободный воздух

№ т	В	H', м	h _ю , м	(H'+h), м	g, мГал	γ ₀	δg ₁ , мГал	γ, мГал	δg ₃ , мГал	Δg _{св.в.} , мГал
1	55,9167	129	0	129	981584,2	981567,1	-39,8	981606,9	-	56,9
2	43,3000	3210	0	3210	979473,1	980448,2	-990,5	981438,7	-	15,4
3	67,9833	0	-3712	-3712	982508,6	982469,5	0,0	982469,5	160,2	39,2
4	19,1500	0	-250	-250	978639,4	978571,4	77,2	978494,2	10,8	1,6
5	43,5833	351	150	501	980465,5	980473,8	46,3	980427,5	-	-54,5
6	6,9333	7	-28	-21	978098,5	978091,2	-2,2	978093,3	3,1	12,6

Таблица 3

Вычисление аномалий силы тяжести в редукции Буге

№ т	H', м	h, м	Δg _{св.в.} , мГал	δg ₂ , мГал	Δg _Б , мГал
1	129	0	56,9	-14,43466	42,5
2	3210	0	15,4	-359,1881	-343,8
3	0	-3712	39,2	255,12764	294,3
4	0	-250	1,6	17,182627	18,8
5	351	150	-54,5	-39,27571	-93,8
6	7	-28	12,6	-0,783276	11,9

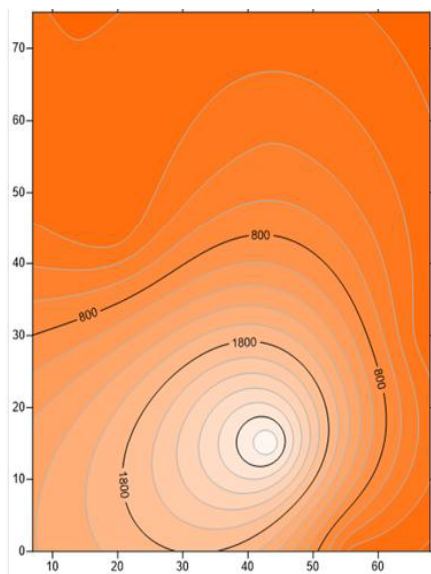


Рис. 1. Карта высот

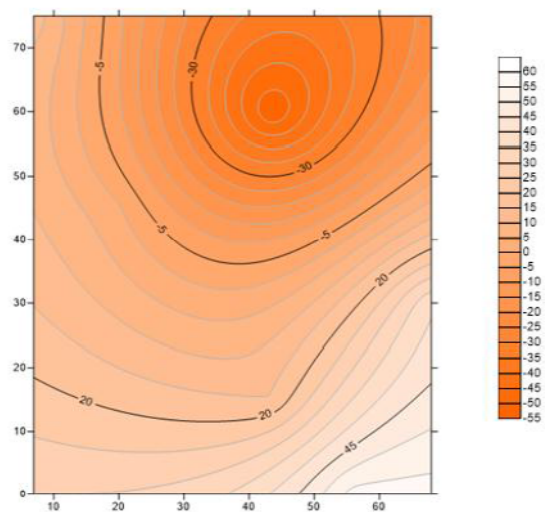


Рис. 2. Карта аномалий силы тяжести с редукциями в свободном воздухе

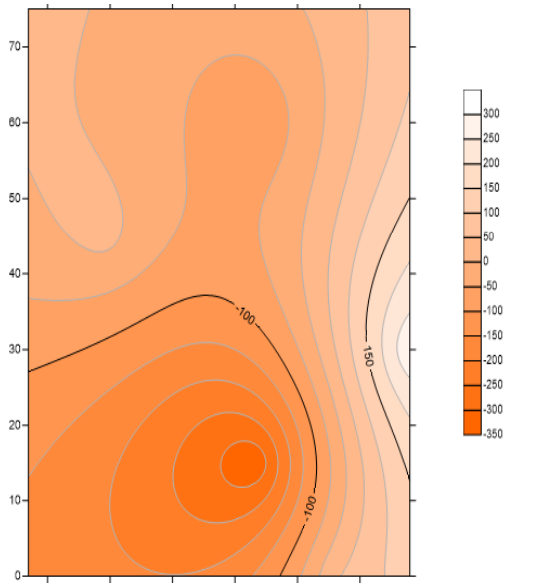


Рис. 3. Карта аномалий силы тяжести с редукциями в свободном воздухе

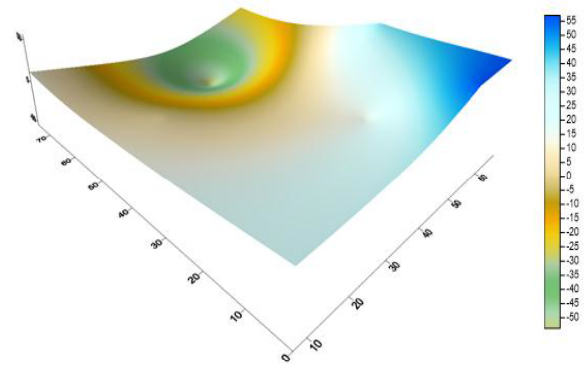


Рис. 5. 3D поверхность карты аномалий силы тяжести с редукциями в свободном воздухе

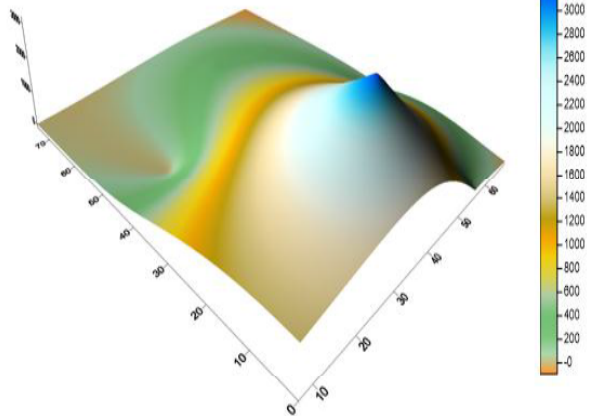


Рис. 4. 3D поверхность высот

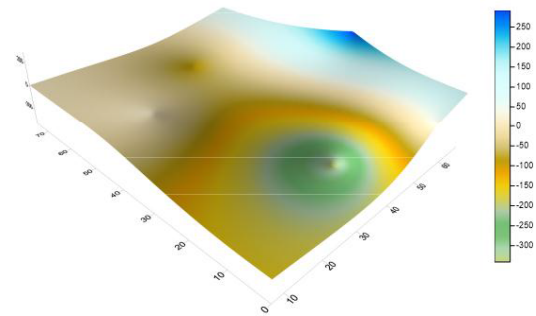


Рис. 6. 3D поверхность карты аномалий силы тяжести с редукциями Буге

Был произведен расчет аномалий силы тяжести с редукциями Буге и в свободном воздухе в точках рельефа Белгородской области и города Белгорода для того, чтобы проанализировать и отследить влияние рельефа на величину искомым поправок.

В таблице 4 представлены результаты вычисления поправок за редукцию Буге и в свободном воздухе. Для их вычисления нами были выбраны характерные точки рельефа города Белгорода.

Таблица 4

Поправки за редукцию Буге и в свободном воздухе для г. Белгорода

	Название	В	L	$g + \Delta_{св} в$	$g + \Delta_{буге}$
	ул. Урицкого, 33А	50,646528	36,524201	983571,3414	983569,0821
	Белгород	50,646637	36,573061	983576,8322	983574,3594
	ул. Магистральная, 58	50,574189	36,533164	983771,7815	983770,4405
	п. Дубовое	50,532396	36,574593	98913,0516	983910,59
	ул. Дзержинского, 108	50,619180	36,654487	983645,748	983644,0642
	ул. Н. Островского, 25	50,607142	36,585375	983680,5774	983679,0038

С топографической карты были взяты координаты и вычислены высоты (методом интерполяции). Аналогичным путем были вычислены и занесены в таблицу данные для Белгородской области (табл. 5) [12].

Полученные результаты предполагается использовать в плане накопления статистических данных и дальнейшего сравнения с действительной физической поверхностью Земли в исследуемом районе. Построение карт изолиний показывает распределение силы тяжести в ис-

следуемом районе с учетом аномалий и реду- ции имеющихся аномалий.

Таблица 5

Поправки за редукцию Буге и в свободном воздухе для Белгородской области

Город	B	L	H _y	g м/с ²	g св.в	g буге
Белгород	50.6106	36.58	173	9.8112176	981176.19	981174.25
Ст.Оскол	51.2967	37.8417	139	9.8118258	981226.51	981224.95
Грайворон	50.4767	35.6772	139	9.8110986	981153.80	981153.80
Валуйки	50.2033	38.1067	90	9.8108553	981086.59	981086.59
Алексеевка	50.6308	38.6903	106	9.8112357	981157.32	981156.13
Шебекино	50.4167	36.9167	105	9.8110452	981137.97	981136.79

По полученным данным, с помощью программного продукта Surfer, мы построили трехмерные поверхности, наглядно отражающие зависимость редукций Буге и свободного воздуха от рельефа местности. На рисунке 7 представлены цифровая модель рельефа участка Белгородской области и гравиметрическая карта для этого же участка, построенная по редукциям Буге и в свободном воздухе. На рисунке 8 изображена

цифровая модель рельефа города Белгорода, с наложенными на нее построениями редукций. Схемы наглядно отображают зависимость изменения аномалий силы тяжести от рельефа, которая имеет обратный характер: чем больше высота точки над уровнем моря, тем меньше значение аномалии, и наоборот, чем меньше высотная отметка, тем больше значение аномалии. Здесь прослеживается принцип изостазии [7].

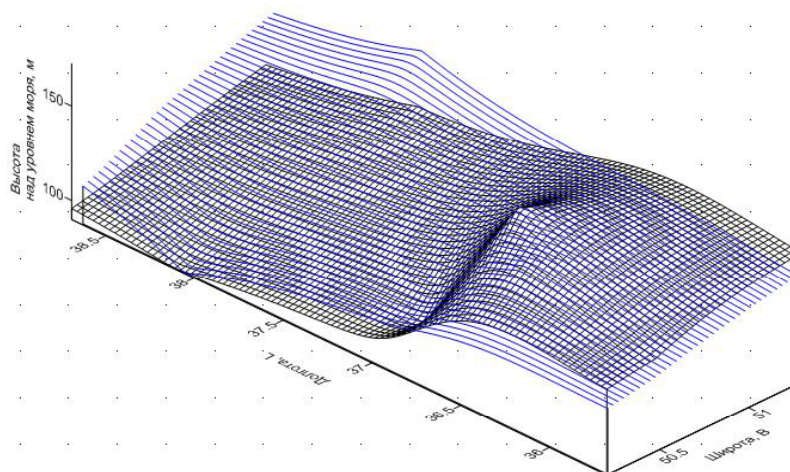


Рис. 7. Цифровая модель

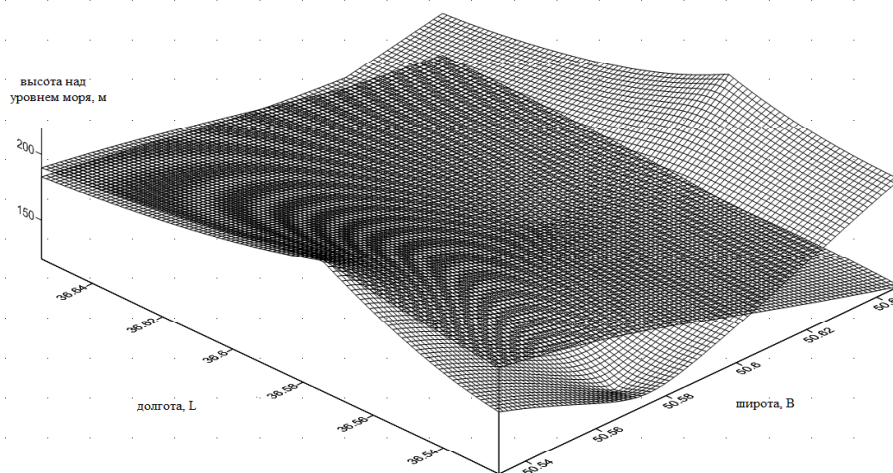


Рис. 8. Цифровая модель

При изучении земного поля силы тяжести установлена закономерная связь региональных аномалий Буге с наиболее крупными формами рельефа земной поверхности. Причем связь эта имеет обратный характер: над высокогорными областями материков аномалии обычно отрицательные, т. е. неожиданно фиксируют «недостаток масс» и достигают почти 500 мГал, а над глубоководными океаническими впадинами – положительные, т. е. фиксируют «избыток масс» и достигают также почти 500 мГал. Данный принцип продемонстрирован в статье на примере данных города Белгорода и Белгородской области [12].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петренко А.Н., Андреева Н.В. Суточное изменение ускорения свободного падения // Физика конденсированного состояния: материалы XXI международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 18-19 апреля 2013г., Гродно: ГрГУ, 2013. С.211–213.
2. Андреева Н.В., Баранова Я.Ю., Козлова Е.Р., Корнейчук М.А., Мартынова Н.С., Празина Е.А. Определение ускорения свободного падения маятниковым способом // Материалы VII международной научно-практической конференции: фундаментальные прикладные науки сегодня, 21-22 декабря 2015г. North Charleston, USA, Том 3, С. 133–146.
3. Шароглазовой Г.А.. Учеб.-метод. комплекс для студ. спец. 1-56 01 02 «Геодезия» / Новополюк: ПГУ, 2006 – 196 с.
4. Александров Н.В., Яшкин А.Я. Курс общей физики. Механика. М.: Просвещение, 1978, С. 334–335.
5. Андреева Н.В., Зимица Д.А., Панченко П.А., Потапова А.С., Сорокоум Д.В., Фомина Н.Ю., Юнусов А.Д. Интеграция гравиметрии с задачами геодезии и геофизики // Материалы VI международной научно-практической конференции 21 век: фундаментальная наука и технологии, 20-21 апреля 2015г. North Charleston, USA, Том 2, С. 139–142.
6. Короновский Н.В. Изостазия // Соросовский образовательный журнал. 2001. Том 7. С. 73–78.
7. Кузьмин В.И. Гравиметрия: учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2011. 163 с.;
8. Огородова, Л. В., Шимбирев, Б. П., Юзефович, А. П. Гравиметрия. М.: «Недра», 1978, 325 с.;
9. Пантелеев, Л.В. Физика Земли и Планет: курс лекций. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2001г.;
10. Утёмов Э.В. Гравиразведка: пособие для самостоятельного изучения лекционного курса слушателей курсов повышения квалификации специальности «Геофизика». Казань: Казанский государственный университет, 2009. 25 с.
11. Юзефович А.П., Огородова, Л.В. Гравиметрия: Учебник для вузов. М.: Недра, 1980. 320 с.
12. Андреева Н.В., Баранова Я.Ю., Козлова Е.Р., Корнейчук М.А., Мартынова Н.С., Празина Е.А. Аномалии силы тяжести с редукциями Буге и в свободном воздухе в Белгороде и Белгородской области // Международная научно-практическая конференция. Наука и образование: отечественный и зарубежный опыт, Белгород, 2016 г.
13. Инструкция использования программного продукта Surfer.

Kononova O.Yu., Andreyeva N.V. DETERMINATION AND SIMULATION OF ANOMALIES OF GRAVITY WITH REDUCTIONS IN THE SOFTWARE PRODUCT OF SURFER

Determination of an acceleration of gravity on the Earth's surface and its anomaly is quite labor-intensive process (measurement of gravity, data handling, the accounting of anomalies, the accounting of requirements to removal of indications of instruments, the accounting of climatic and weather conditions, the accounting of technogenic factors, etc.). Simulation in the SURFER program allows to provide the physical Earth's surface taking into account anomalies of gravity and a reduction of anomalies of gravity on the experimental data obtained in practice. Construction of the modern high-rise buildings and precision constructions requires carrying out geodesic operations of high accuracy. Enhanced accuracy is required also when monitoring deformation of such constructions in case of damages of buildings and not only. Determination of coordinates of points requires a certain accuracy in this connection it is necessary to consider non-uniformity of gravitational field. Accumulation and the accounting of similar data allows to monitor the long-period and short-period processes influencing by sight and the form of the physical Earth's surface, and also the possible forecast of the deformation phenomena. In operation calculation of a reduction of anomalies of gravity on small quantity of estimated points of the Belgorod region and the city of Belgorod about submission of the 3D map of a surface is provided.

Key words: simulation, gravity, anomalies of gravity, physical Earth's surface, application-oriented geodesy.

Кононова Оксана Юрьевна, старший преподаватель кафедры городского кадастра и инженерных изысканий.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: oksana171289@mail.ru

Андреева Наталья Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры городского кадастра и инженерных изысканий.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: natzlobina@yandex.ru