

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

УДК 550.831:528.02/.08(571.14)
DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-6-5-14

Анализ гравиметрической изученности территории Новосибирской области по данным наземных измерений

И. Г. Ганагина¹, Н. Н. Кобелева^{1}, Д. Н. Голдобин¹, И. В. Зверев¹*

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Аннотация. Цель работы – анализ гравиметрической изученности территории Новосибирской области по данным наземных измерений, представленных в виде смешанных аномалий силы тяжести, позволяющий оценить достоверность и качество информации о характеристиках гравитационного поля Земли и использовать ее для решения задач экономики и обороноспособности государства с учетом востребованности и точностного диапазона. Результаты измерений ускорения силы тяжести на территорию Новосибирской области и на ее ближайшие окрестности (в стокилометровой зоне – территория Томской, Омской, Кемеровской областей и Алтайского края) получены из архивов ФБУ «ТФГИ по Сибирскому федеральному округу». Архивные данные результатов гравиметрических съемок переведены в цифровой вид, систематизированы и проанализированы. Особое внимание уделено гравиметрической изученности территории Новосибирской области. Результаты анализа гравиметрической информации представлены в виде картограмм. В работе выполнено сравнение наземной гравиметрической информации на исследуемую территорию с данными современной глобальной модели геопотенциала XGM2019e_2159. Средняя квадратическая погрешность (СКП) расхождения модельных данных и наземной информации составляет 3,8 мГал в диапазоне разностей от +14 до –12 мГал. Результаты исследования позволяют сделать вывод о возможности использования наземных гравиметрических измерений, полученных на исследуемой территории, для регионального моделирования характеристик гравитационного поля.

Ключевые слова: наземные гравиметрические измерения, аномалии силы тяжести, картограммы гравиметрической изученности, региональное моделирование

Введение

Высокоточное определение гравитационного поля Земли, его вариаций во времени и в пространстве является одной из основных задач современной геодезии. В настоящее время характеристики гравитационного поля необходимы при высокоточном позиционировании и навигации, в геофизике и геодинاميке, метрологии и гидрологии, при космических исследованиях и исследованиях, связанных с изменением климата и окружающей среды [1–6].

При развитии и совершенствовании технологий определения гравитационного поля Земли с высокой точностью и стабильностью Международная ассоциация геодезистов (IAG) рекомендует использовать данные наземной, воздушной и морской гравиметрической съемки, модели рельефа и современные глобальные модели геопотенциала для моделирования высокочастотной составляющей спектра гравитационного поля. Такая комбинация разнородных данных считается обязательной для уменьшения погрешностей моделирования характеристик гло-

бального и регионального гравитационного поля [7]. Особое внимание IAG уделяет созданию региональных и локальных моделей характеристик гравитационного поля на основе наземных гравиметрических наблюдений, привлекая для этого различные теории регионального гравитационного моделирования.

На территории Российской Федерации развитие технологий определения гравитационного поля связано с созданием на основе наземной гравиметрической информации высокоточных региональных цифровых моделей аномалий высоты, аномалий силы тяжести и уклонений отвесной линии, сопоставимых по уровню точности с нивелирными и спутниковыми данными.

Высокая точность и стабильность моделирования характеристик гравитационного поля зависит от гравиметрической изученности территории и типа используемых геопространственных данных.

На территории Российской Федерации накоплен большой объем гравиметрической информации, представленной в виде смешанных аномалий силы тяжести, полученных по данным наземных гравиметрических измерений при выполнении геодезических и геофизических исследований.

Территориальные особенности России – большая площадь, разная точность и плотность расположения пунктов съемки – требуют проведения анализа имеющейся гравиметрической информации и оценки ее точности, а также согласованности наблюдений друг с другом.

Целью данной работы является анализ гравиметрической изученности территории Новосибирской области и близлежащих территорий по данным наземных измерений. Результат исследования – оценка возможности использования наземных гравиметрических измерений для создания высокоточной цифровой модели гравитационного поля на исследуемую территорию.

Материалы и методы исследования

Результаты гравиметрических наблюдений, полученные различными инструментальными методами на территории Россий-

ской Федерации, предоставляются Федеральным фондом пространственных данных ФГБУ «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» (ЦГКИПД) [8] и ФГБУ «Росгеолфонд» [9].

Архив геофизических гравиметрических данных содержит каталог гравиметрических пунктов, включающий систематизированный список гравиметрических пунктов, содержащий для каждого пункта его название, описание его местоположения, ускорение силы тяжести и среднюю квадратическую погрешность его определения, плановые координаты и высоту пункта над уровнем моря, материалы поисковых геофизических исследований.

Картографические материалы гравиметрических съемок, выполненных на территории Российской Федерации, представлены по федеральным округам в масштабах: 1 : 10 000; 1 : 25 000; 1 : 50 000; 1 : 100 000; 1 : 200 000; 1 : 500 000 и 1 : 1 000 000.

Сотрудниками Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ) получены результаты наземных гравиметрических измерений на территорию Новосибирской области и на ее ближайшие окрестности (в стокилометровой зоне – территория Томской, Омской, Кемеровской областей и Алтайского края) из архивов ФБУ «Территориальный фонд геологической информации (ТФГИ) по Сибирскому Федеральному округу» (г. Новосибирск) [10] и отделений ТФГИ субъектов РФ в соответствии с соглашением «О предоставлении в пользование геологической информации о недрах, полученной в результате государственного геологического изучения недр».

На территории субъектов РФ по Сибирскому федеральному округу: Новосибирской, Томской, Омской, Кемеровской областей и Алтайского края за период с 1954 по 2010 гг. силами разных организаций выполнено свыше 100 съемок масштаба от 1 : 1 000 000 до 1 : 10 000.

Гравиметрические съемки исследуемой территории выполнены для прогноза глубинного геологического строения территории Западно-Сибирской плиты и ее обрамления.

Данные гравиметрических исследований масштабов 1 : 200 000 и 1 : 100 000 выполнены в комплексе с материалами других геофизических методов для решения задач федерального уровня в области геодезии и обороны. Небольшой объем исследований в масштабах 1 : 50 000 и 1 : 25 000 проведен в пределах месторождений полезных ископаемых и направлен на поиск и уточнение границ рудоносных структур и залежей углеводородов.

Результаты наземных гравиметрических измерений, предоставленных ТФГИ по Сибирскому федеральному округу, оцифрованы для дальнейшей систематизации и анализа.

Оценка возможности использования результатов наземных гравиметрических измерений для создания высокоточной цифровой модели гравитационного поля на территорию Новосибирской области основана на их сравнении с модельными данными, вычисленными по коэффициентам современной глобальной модели геопотенциала XGM 2019e_2159 [11, 12].

Высокостепенная глобальная модель геопотенциала XGM2019e_2159 опубликована в 2019 г. на сайте Немецкого научно-исследовательского центра наук о Земле в городе Потсдаме (ICGEM) [13]. Модель XGM2019e_2159 – комбинированная модель геопотенциала, гармонические коэффициенты которой предварительно определены в области сфероидальных гармоник, а затем, для соответствия стандарту ICGEM, преобразованы в сферические гармоники.

На сайте ICGEM модель геопотенциала XGM2019e_2159 доступна до сферической гармоники степени $N = 2190$.

Определение аномалий силы тяжести по данным модели геопотенциала XGM2019e2159 выполнено по формуле (1) [14]

$$\Delta g = \gamma \sum_{n=2}^N (n-1) \times \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi), \quad (1)$$

где $\Delta \bar{C}_{nm} = \bar{C}_{nm} - \bar{C}_{nm}^0$;

γ – нормальное значение силы тяжести;

\bar{C}_{nm}^0 – нормированные коэффициенты нормального потенциала;

$\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ – нормированные присоединенные функции Лежандра.

Сравнение модельных данных с наземными гравиметрическими измерениями аномалий силы тяжести выполнено по формуле (2) [15]

$$\delta \Delta g(P) = \Delta g_H(P) - \Delta g_{\text{мод}}(P), \quad (2)$$

где $\Delta g_H(P)$ – значения аномалий силы тяжести, измеренные в пункте $P(\varphi, \lambda)$ на земной поверхности;

$\Delta g_{\text{мод}}(P)$ – значения аномалий силы тяжести, вычисленные в пункте $P(\varphi, \lambda)$ по модельным данным XGM2019e_2159 с помощью ряда Фурье по шаровым функциям (1).

Результаты исследования

Анализ результатов наземных гравиметрических измерений на территории Новосибирской области. Анализ гравиметрической изученности выполнен по результатам измерений ускорений силы тяжести, которые содержатся в 197 отчетах гравиметрических партий, выполнивших гравиметрические съемки исследуемой территории. Оцифрованная информация систематизирована по областям, номенклатурным листам, масштабам съемки. Особое внимание уделено качеству выполненных гравиметрических работ.

Анализ материалов отчетов о выполнении гравиметрических работ на территорию Новосибирской области и ее ближайшие окрестности (в стокилометровой зоне – территория Томской, Омской, Кемеровской областей и Алтайского края) представлен в виде картограммы (рис. 1).

Анализ материалов отчетов о выполнении гравиметрических работ на территории Новосибирской области представлен на рис. 2.

Гравиметрические работы, выполненные в разное время, отличаются по качеству, точности, аппаратуре и топографо-геодезическому обеспечению.

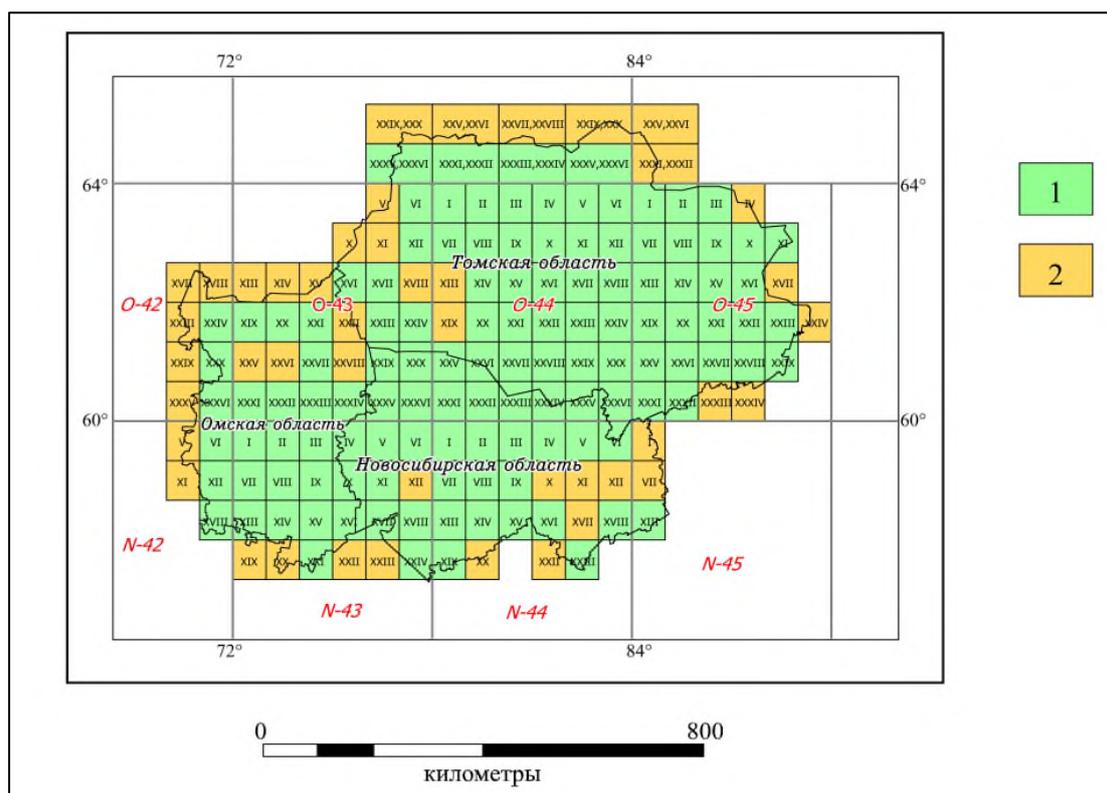


Рис. 1. Картограмма гравиметрической изученности исследуемой территории: 1 – высокое качество гравиметрических результатов гравиметрических съемок; 2 – качество гравиметрической съемки не соответствует современным требованиям

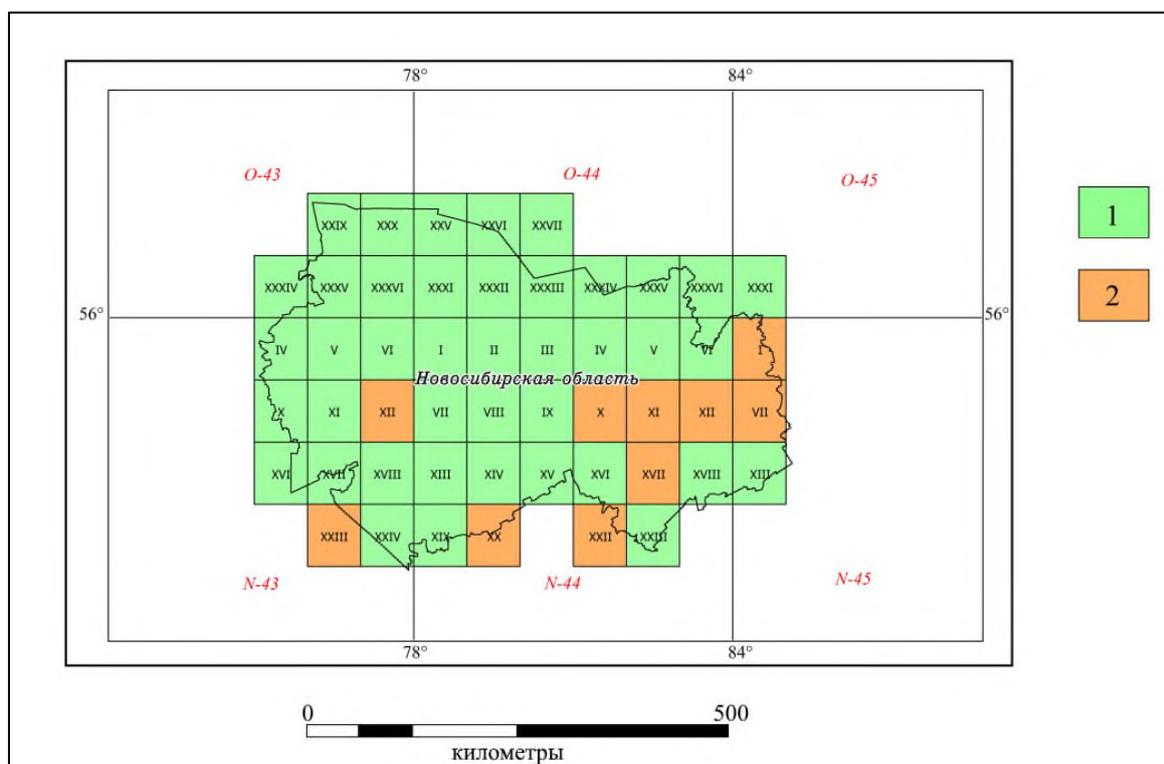


Рис. 2. Картограмма гравиметрической изученности Новосибирской области: 1 – высокое качество гравиметрических результатов гравиметрических съемок; 2 – качество гравиметрической съемки не соответствует современным требованиям

Гравиметрические съемки масштабов 1 : 200 000, 1 : 100 000 и крупнее, выполненные с 1960-х гг. и до 2010 г., опираются на пункты государственных опорных сетей I и II класса и согласуются между собой. Съемки выполнены по современным методикам, надежными приборами. Их качество не подвергается сомнению.

Гравиметрические съемки 1950-х гг. к настоящему времени представляют только исторический интерес (например, маршрутные работы начала 1950-х гг.) и не соответствуют требованиям современных инструкций по точности гравиметрических и топографо-геодезических измерений. Между тем многие из них, проведенные в период с 1954 по 1963 гг., использовались при подготовке к изданию листов Государственной гравиметрической карты масштаба 1 : 200 000.

В ряде случаев координаты и высоты гравиметрических пунктов определялись с использованием топографических карт масштаба 1 : 100 000. Однако, как показывают исследования, проведенные сотрудниками СНИИГГиМС [16], погрешность определения координат по картам масштаба 1 : 100 000 для этих условий составляет $\pm 250\text{--}300$ м (2,5–3,0 мм в масштабе карты).

Безусловно, что точность в положении нечетко выраженных контуров для этих условий будет значительно ниже, поэтому применение топографических карт для определения координат гравиметрических пунктов недопустимо уже при съемках точностью $\pm 0,8$ мГал. Для карт масштаба 1 : 100 000 точность определения высот интерполированием между горизонталями составляет 6,5–13 м (для плоскоравнинной залесенной местности с углами наклона до 2–4°).

Топографо-геодезическое обеспечение гравиметрической съемки соответствующего масштаба не соответствует современным требованиям, предусматривающим гораздо более жесткие нормы погрешности определения высот и координат пунктов. Как результат, не соответствуют требованиям и значения СКП определения аномалий силы тяжести.

Прекращение финансирования наземных гравиметрических измерений не позволило довести плотность сети гравиметрических

пунктов на номенклатурных листах N-44-VII, VIII, X, XIII до требуемого значения.

Высоты пунктов гравиметрических съемок на листах O-43-XXXI получены техническим или высокоточным геометрическим нивелированием по нечетным профилям, а по четным – интерполяцией между значениями на нечетных профилях. Это обстоятельство снижает качество исходной гравиметрической информации, представленной на данном номенклатурном листе.

Отклонения от требований современных инструкций выполнения гравиметрических работ относятся к съемкам с использованием гравиметра-высотомера ГВ-52.

При анализе гравиметрической информации в цифровом виде выявлены грубые ошибки в значениях ускорения силы тяжести, аномалий силы тяжести и координат пунктов сети, что может свидетельствовать об опечатках в процессе набора отчетных материалов сотрудниками гравиметрических партий.

Основными особенностями гравиметрической изученности исследуемой территории являются:

- около 30 тыс. км² покрыто съемками масштаба 1 : 50 000 и крупнее (в том числе около 800 км² – высокоточных, направленных на выявление залежей углеводородов), около 40 тыс. км² – съемками масштаба 1 : 100 000;
- до 30 % территории покрыто съемками масштаба 1 : 200 000, выполненными в шестидесятые годы прошлого столетия, которые не соответствуют современным требованиям выполнения гравиметрических работ;
- 35 % гравиметрических съемок масштаба 1 : 100 000 и крупнее выполнено без соблюдения требований к топографо-геодезическому обеспечению, предусматривающему жесткие нормы погрешности определения значений высот и координат пунктов;
- в ряде гравиметрических съемок в качестве опорных пунктов использованы рядовые точки.

Результаты сравнения наземных гравиметрических измерений с данными глобальной модели геопотенциала. Для сравнения результатов наземных гравиметрических измерений на территорию Новосибирской области с модельными данными, вычисленными по

коэффициентам современной глобальной модели геопотенциала XGM2019e_2159, выбраны 3 500 опорных пунктов гравиметрических сетей 2-го и 3-го классов, на которых выполнены измерения за последние 40 лет. Точность определения силы тяжести составляет 0,03–0,05 мГал.

Для сравнения результатов наземных гравиметрических измерений на территорию Новосибирской области с модельными данными, вычисленными по коэффициентам современной глобальной модели геопотенциала XGM2019e_2159, выбраны 3 500 опор-

ных пунктов гравиметрических сетей 2-го и 3-го классов, на которых определены значения силы тяжести с погрешностью от $\pm 0,03$ до $\pm 0,05$ мГал.

Планово-высотное обеспечение гравиметрических работ на опорных пунктах выполнено в соответствии с требованиями инструкции по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России [17].

Расположение опорных гравиметрических пунктов на исследуемой территории приведено на рис. 3.

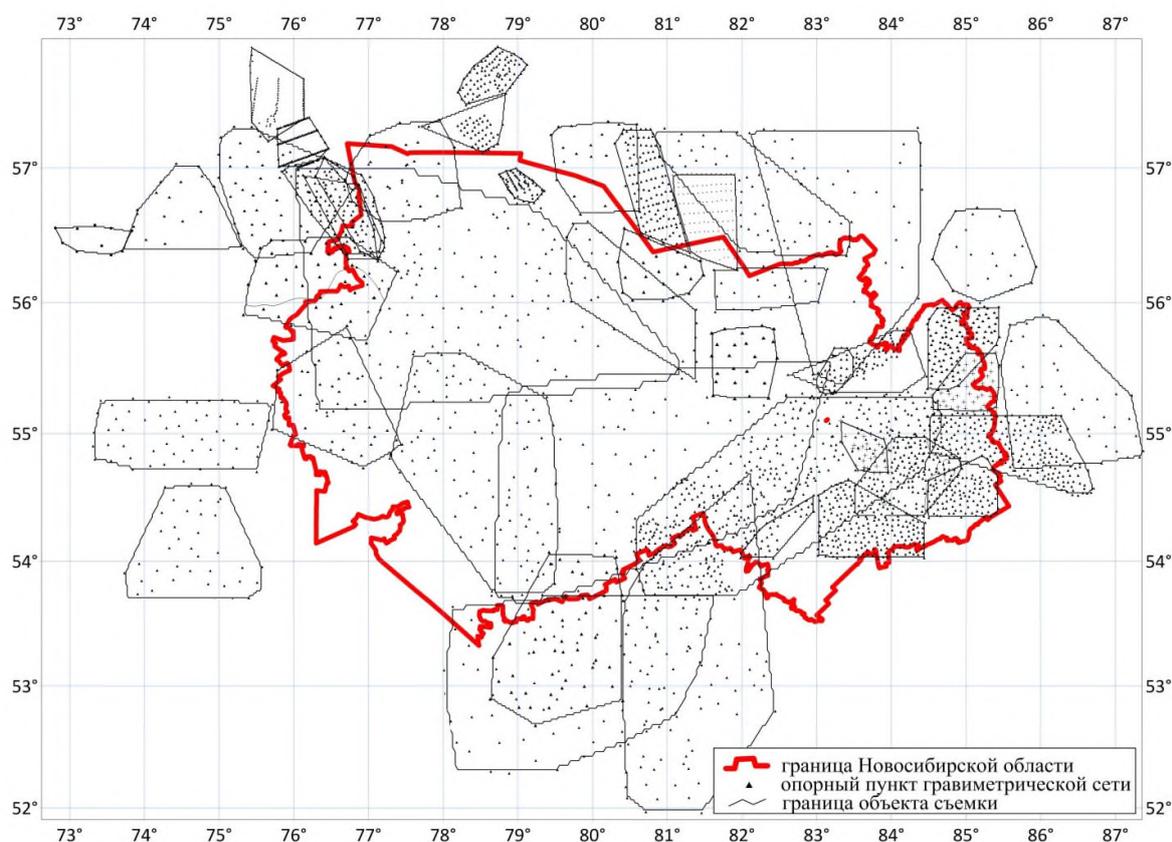


Рис. 3. Расположение опорных пунктов гравиметрических сетей 2-го и 3-го классов на территории Новосибирской области и прилегающих территорий

Плотность опорных гравиметрических пунктов на исследуемой территории неравномерная, есть зоны без покрытия пунктов. Плотность гравиметрических пунктов увеличивается к юго-востоку, что соответствует требованиям проведения гравиметрических работ на территориях с горным и предгорным рельефом. На юге и юго-западной части территории преобладает равнинный рельеф, что

сказывается и на плотности пунктов – их количество уменьшается. На севере Новосибирской области, на границе с Томской областью расположены зоны разведки полезных ископаемых, поэтому при гравиметрических исследованиях выполнена более детальная гравиметрическая съемка.

Результаты сравнения наземных гравиметрических измерений на территорию Но-

новосибирской области с модельными данными, вычисленными по коэффициентам современной глобальной модели геопотен-

циала XGM 2019e_2159, приведены в виде картограммы на рис. 4.

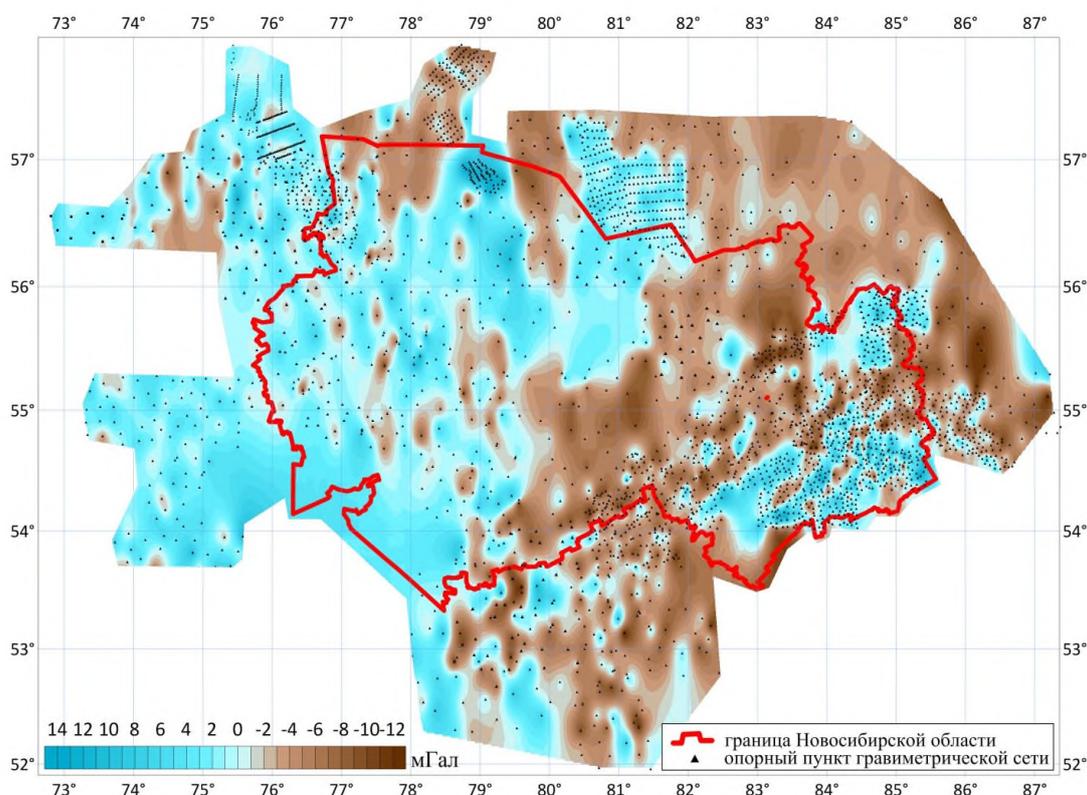


Рис. 4. Поле разностей наземной гравиметрической информации и данными глобальной модели геопотенциала XGM 2019e_2159

Анализ разностного поля, представленного на рис. 4, позволяет сделать следующие выводы:

- разность модельных данных аномалий силы тяжести, вычисленных по коэффициентам глобальной модели геопотенциала XGM 2019e_2159, и результатов наземных измерений растет в области горного и предгорного рельефа;

- средняя квадратическая погрешность разности наземной и модельной гравиметрической информации составляет 3,8 мГал в диапазоне разностей от +14 до -12 мГал.

Выводы

Анализ гравиметрической изученности территории Новосибирской области и ее ближайшего окружения по данным наземных измерений и оценка возможности использова-

ния наземных гравиметрических измерений для создания высокоточной цифровой модели гравитационного поля на исследуемую территорию позволяют сделать следующие выводы:

- геофизические гравиметрические исследования на территории Новосибирской, Томской, Омской, Кемеровской областей и Алтайского края в процессе анализа качества наземных измерений позволяют получить смешанные аномалии силы тяжести, соответствующие требованиям точности гравиметрической съемки масштабов 1 : 200 000 и 1 : 100 000;

- гравиметрическая изученность территории Новосибирской области и прилегающих территорий, представленная в виде смешанных аномалий силы тяжести, полученных по данным наземных гравиметрических измерений, позволяет получить достоверную и каче-

ственную информацию о характеристиках гравитационного поля Земли;

– результаты наземных гравиметрических измерений, полученных на исследуемой территории, возможно использовать для улучше-

ния подходов к региональному моделированию характеристик гравитационного поля, позволяющих решать задачи экономики и обороноспособности государства с учетом востребованности и точностного диапазона.

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-Квант» с целью создания высокоточных моделей геопотенциального поля Земли и его характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимофеев В. Ю., Валитов М. Г., Дюкарм Б., Ардюков Д. Г., Наумов С. Б., Тимофеев А. В., Кулинич Р. Г., Колпащикова Т. Н., Прошкина З. Н., Сизиков И. С., Носов Д. А. Приливные эффекты по гравиметрическим и уровнемерным наблюдениям, океанические приливные модели // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 36–47.
2. Клюйков А. А. Технология определения параметров гравитационного поля Земли по градиентометрическим измерениям 6. Вычисление компонент тензора гравитационного потенциала в земной пространственной прямоугольной системе координат // Геодезия и картография. – 2021. – № 7. – С. 2–8. – DOI 10.22389/0016-7126-2021-973-7-2-8.
3. Конешов В. Н., Непоклонов В. Б., Августов Л. И. Оценка навигационной информативности аномального гравитационного поля Земли // Гироскопия и навигация. – 2016. – № 2 (93). – С. 95–106.
4. Трубаев Н. А. О построении гравитационной модели Земли и геоида // Геодезия и картография. – 2017. – № 11. – С. 11–15. – DOI 10.22389/0016-7126-2017-929-11-11-15.
5. Канушин В. Ф., Карпик А. П., Голдобин Д. Н., Ганагина И. Г., Гиенко Е. Г., Косарев Н. С. Определение разности потенциалов силы тяжести и высот в геодезии посредством гравиметрических и спутниковых измерений // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 53–69.
6. Тимофеев В. Ю., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В., Валитов М. Г., Сизиков И. С., Носов Д. А., Стусь Ю. Ф. Гравиметрические исследования на научном полигоне «Мыс Шульца» // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 31–44.
7. SC 2.2: Geoid, Physical Height Systems and Vertical Datum Unification [Electronic resource] // IAG – Mode of access: <https://com2.iag-aig.org/sub-commission-22> (accessed 01.08.2022).
8. Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных (ЦГКИПД) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cgkipd.ru/fsdf/> (дата обращения 11.08.2022).
9. Единый фонд геологической информации о недрах. Реестр первичной и интерпретированной геологической информации [Электронный ресурс] // ФГБУ «Росгеолфонд». – Режим доступа: <https://efgi.ru/> (дата обращения: 01.08.2022).
10. Федеральное агентство по недропользованию [Электронный ресурс] // Сибирское отделение ФГБУ «Росгеолфонд». – Режим доступа: www.geol.irk.ru (дата обращения: 01.08.2022).
11. Zingerle P., Pail R., Gruber T., Oikonomidou X. The combined global gravity field model XGM2019e // Journal of Geodesy. – 2020. – Vol. 94, No. 7. – P. 1–12. – DOI 10.1007/s00190-020-01398-0.
12. Zingerle P., Pail R., Gruber T., Oikonomidou X. The experimental gravity field model XGM2019e. GFZ Data Services, 2019.
13. ICGEM – International Center for Global Gravity Field Models [Electronic resource]. – Mode of access: <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html/> (accessed 01.08.2022).
14. Канушин В. Ф., Карпик А. П., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н., Косарева А. М., Косарев Н. С. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 270 с.
15. Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н., Мазурова Е. М., Косарев Н. С., Косарева А. М. Сравнение спутниковых моделей проекта GOCE с различными наборами независимых наземных гравиметрических данных // Вестник СГУГиТ. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 21–34.
16. Прихода А. Г. Методы геодезического обоснования гравиметрических съемок. – М. : Недра, 1974. – С. 62–68.
17. ГКИНП (ГНТА)-04-122-03. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. – Введ. 2004–01–02. – М. : ЦНИИГАиК, 2004. – 220 с.

Об авторах

Ирина Геннадьевна Ганагина – кандидат технических наук, зав. кафедрой космической и физической геодезии.

Наталья Николаевна Кобелева – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Денис Николаевич Голдобин – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры космической и физической геодезии.

Илья Васильевич Зверев – магистрант.

Получено 31.08.2022

© И. Г. Ганагина, Н. Н. Кобелева, Д. Н. Голдобин, И. В. Зверев, 2022

Gravimetric knowledge analysis of the Novosibirsk region territory according to ground measurements data

I. G. Ganagina¹, N. N. Kobeleva^{1}, D. N. Goldobin¹, I. V. Zverev¹*

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Abstract. The aim of the work is the analysis of the gravimetric knowledge of the Novosibirsk Region territory based on ground-based measurements presented as mixed gravity anomalies makes it possible to assess the reliability and quality of information about the characteristics of the Earth's gravitational field and use it to solve problems of the economy and the defense capability of the state, taking into account the demand and accuracy range. The results of gravity acceleration measurements on the territory of the Novosibirsk region and its immediate surroundings (in the hundred-kilometer zone – the territory of the Tomsk, Omsk, Kemerovo regions and Altai Territory) were obtained from the archives of the Federal State Institution "TFGI for the Siberian Federal District". Archival data of the gravity surveys results were digitized, systematized and analyzed. Particular attention is paid to the gravimetric study of the territory of the Novosibirsk region. The results of the gravimetric information analysis are presented in the form of cartograms. The paper compares ground-based gravimetric information for the study area with the data of the modern global geopotential model XGM2019e_2159. The root mean square error of the discrepancy between the model data and ground information is 3.8 mGal in the range of differences from +14 to -12 mGal. The results of the study allow us to conclude that it is possible to use ground-based gravimetric measurements obtained in the study area for regional modeling of the characteristics of the gravitational field.

Keywords: ground-based gravity measurements, gravity anomalies, gravimetric knowledge cartograms, global geopotential model

REFERENCES

1. Timofeev, V. Yu., Valitov, M. G., Dyukarm, B., Ardyukov, D. G., Naumov, S. B., Timofeev, A. V., Kulinich, R. G., Kolphashchikova, T. N., Proshkina, Z. N., Sizikov, I. S., & Nosov, D. A. (2016). Tidal effects from gravimetric and level measurements, oceanic tidal models. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 36–47 [in Russian].
2. Klyuykov, A. A. (2021). Technology for determining the parameters of the Earth's gravitational field by gradiometric measurements 6. Calculation of the components of the gravitational potential tensor in the Earth's spatial rectangular coordinate system. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 7, 2–8. doi : 10.22389/0016-7126-2021-973-7-2-8 [in Russian].
3. Koneshov, V. N., Nepoklonov, V. B., & Avgustov, L. I. (2016). Estimating the navigation quality of the earth's anomalous gravity field. *Giroskopiya i navigatsiya [Gyroscopy and Navigation]*, 2(93), 95–106 [in Russian].
4. Trubaev, N. A. (2017). On the construction of a gravitational model of the Earth and the geoid. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 11, 11–15. doi : 10.22389/0016-7126-2017-929-11-11-15 [in Russian].

5. Kanushin, V. F., Karpik, A. P., Goldobin, D. N., Ganagina, I. G., Gienko, E. G., & Kosarev, N. S. (2015). The definition of gravity potential and heights differences in geodesy by gravimetric and satellite measurements. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(31), 53–69 [in Russian].
6. Timofeev, V. Yu., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., Valitov, M. G., Sizikov, I. S., Nosov, D. A., & Stus', Yu. F. (2022). Gravimetric studies at the scientific site "Cape Schultz". *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(4), 31–44 [in Russian].
7. SC 2.2: Geoid, Physical Height Systems and Vertical Datum Unification (n. d.). Retrieved from <https://com2.iag-aig.org/sub-commission-22> (accessed August 01, 2022) [in Russian].
8. Federal Scientific and Technical Center for Geodesy, Cartography and Spatial Data Infrastructure (TsG-KIPD) (n. d.). Retrieved from <https://cgkipd.ru/fsdf/> (accessed August 11, 2022) [in Russian].
9. Unified Fund of Geological Information on Subsoil. Register of Primary and Interpreted Geological Information. (n. d.). In Federal State Budgetary Institution "Rosgeolfond". Retrieved from <https://efgi.ru/> (accessed August 01, 2022) [in Russian].
10. Federal Agency for Subsoil Use. (n. d.). In Federal State Budgetary Institution "Rosgeolfond". Retrieved from <https://geol.irk.ru> (accessed August 01, 2022) [in Russian].
11. Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T., & Oikonomidou, X. (2020). The combined global gravity field model XGM2019e. *Journal of Geodesy*, 94(7), 1–12. doi: 10.1007/s00190-020-01398-0.
12. Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T., & Oikonomidou, X. (2019). The experimental gravity field model XGM2019e. GFZ Data Services.
13. ICGEM – International Center for Global Gravity Field Models (n. d.). Retrieved from <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html/> (accessed August 01, 2022) [in Russian].
14. Kanushin, V. F., Karpik, A. P., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Kosareva A. M., & Kosarev, N. S. (2015). *Issledovanie sovremennykh global'nykh modeley gravitatsionnogo polya Zemli [Study of modern global models of the Earth's gravitational field]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 270 p. [in Russian].
15. Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., Kosarev, N. S., & Kosareva A. M. (2014). Comparison of satellite models of the GOCE project with various sets of independent ground-based gravity data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(27), 21–34 [in Russian].
16. Prikhoda, A. G. (1974). Methods of geodetic substantiation of gravimetric surveys (pp. 29–33). Moscow: Nedra Publ. [in Russian].
17. Geodetic, Cartographic Instructions, Norms and Regulations. (2004). GKINP (GNTA)-04-122-03. Instructions for the development of a high-precision state gravimetric network in Russia. Moscow: TSNIIGAiK Publ., 220 p. [in Russian].

Author details

Irina G. Ganagina – Ph. D., Associate Professor, Head of Department of Space and Physical Geodesy.
Natalia N. Kobeleva – Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.
Denis N. Goldobin – Ph. D., Senior Lecturer, Department of Space and Physical Geodesy.
Ilya V. Zverev – Graduate.

Received 31.08.2022

© I. G. Ganagina, N. N. Kobeleva, D. N. Goldobin, I. V. Zverev, 2022