УДК: 912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-141-154

И.А. Рыльский¹, Р.В. Груздев², Т.В. Котова³

РАСЧЕТ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОПРАВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Расчет поправок в гравитационные измерения является одним из важнейших этапов, определяющих качество проведения подобных работ в целом. Неправильный учет поправок в конечном итоге может сказаться на неверной интерпретации полученных измерений и привести к ложной их интерпретации.

Для достижения высокоточных результатов необходимо учитывать не только высоту, но и непосредственно весь массив сведений о рельефе. Подробность отображения рельефа при этом становится критически важной в том случае, если работы выполняются в районе с высокой степенью расчлененности рельефа и большим количеством вертикально развитых скальных формаций (останцы, скальные сбросы, крутые склоны с перегибами, и тому подобное).

В настоящее время используемые на государственном уровне методики основаны на использовании ранее созданных материалов картографических фондов (топографические карты масштаба 1:100 000 – 1:25 000). Возможно также и использование открытых (бесплатных) моделей рельефа. Эти материалы имеют ряд недостатков, например – низкая детальность отображения микрорельефа и крутых наклонных поверхностей (склонов, стен, сбросов, врезов), оказывающих значительное влияние на значения, измеряемые гравиметрами, размещенными на малой дистанции от подобных форм.

Имеющиеся методы не предполагают возможности вычислений с значительной плотностью высотных отметок. Эти недостатки приводит к недостаточно полному учету поправок при проведении гравиметрических измерений. Однако, технически несложно (при использовании современных методов дистанционного зондирования) в короткие сроки получить высокоточную цифровую модель рельефа на участках большой площади. Наилучшие возможности для этого предоставляет метод воздушного лазерного (лидарного) сканирования. В этой работе рассмотрены различия, возникающие при использовании в расчетах при использовании как материалов воздушного лазерного сканирования рельефа, так и прочих видов данных (топокарты 1:25 000, открытые модели данных), а также выполнен расчет итоговых поправок и сравнение полученных результатов между собой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъёмка, гравитационная съемка, дистанционное зондирование, лидар, лазерное сканирование, геоинформационные данные.

¹ Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail:* **rilskiy@mail.ru**

² Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail:* rogruzdev@mail.ru

³ Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail:* tatianav.kotova@yandex.ru

Ilya A. Rylskiy¹, Roman V. Gruzdev², Tatiana V. Kotova³

CALCULATION OF GRAVITATIONAL CORRECTIONS USING AIRBORN LASER SCANNING DATA

ABSTRACT

Calculation of corrections to gravity measurements is one of the most important stages that determine the whole quality of research. Wrong corrections can lead to incorrect interpretation of the obtained measurements and lead to their false interpretation.

To achieve highly accurate results, it is necessary to take into account not only the height, but also the entire array of information about the relief. In this case, level of detail of relief model becomes critically important, especially in case of working with rugged terrain with large number of vertically developed rock formations (outliers, rock faults, steep slopes).

Now the methods normally used are based on the use of previously created materials from cartographic archives (topographic maps at a scale of 1: 100,000 \mathbb{P} 1:25,000). It is also possible to use open (free) terrain models. These materials have a number of drawbacks, for example, low detail of the microrelief and steep inclined surfaces (slopes, walls, faults, incisions) that have a significant effect on the values measured by gravimeters located at a small distance from such forms.

The available methods do not assume ability to work with dense terrain models. These shortcomings lead to wrong corrections during gravimetric measurements. However, using of modern remote sensing methods makes possible to obtain a high-precision terrain models easily. The best opportunities are provided by LIDAR technology. Here we describe differences between using LIDAR data and other types of data (1:25 000 maps, open data models), and make comparison between corrections, calculated using different data sources.

KEYWORDS: airborne imagery, gravity measurements, remote sensing, GIS, LIDAR.

введение

Гравитационная разведка является одним из важнейших этапов при разработке новых месторождений (в том числе – рудных). Результат этих исследований влияет на итоговую оценку таких параметров как объем запасов, этапность освоения, объем доразведки и т.п.). Наилучшие результаты могут быть получены с использованием наземных гравиметров, выполняющих статические измерения поля на территориях в несколько тысяч га. Количество измерений может составить до 10–12 тысяч и более. По завершении работ, для каждого пикета необходимо ввести ряд поправок, важнейшая из которых – за рельеф местности. Поправка должна учитывать не только абсолютную высоту, но и прилегающие структуры рельефа; в идеале – должно учитываться гравитационное влияние горных формаций на всех дистанциях вплоть до нескольких десятков километров.

Величины поправок за высоту и рельеф порой составляют десятки процентов от измеренных значений, и могут в несколько раз превышать искомые величины гравитационных аномалий. По этой причине проведение высокоточных гравиразведочных работ на месторождении невозможно без всестороннего расчета влияния рельефа.

¹ M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:***rilskiy@mail.ru**

² M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* rogruzdev@mail.ru

³ M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* tatianav.kotova@yandex.ru

В зависимости от целевого масштаба и типа местности, требуемый выход за пределы исследуемой территории может составлять от 1-3 до 30-90 километров (изредка – более). Несомненно, что учет столь большого количества информации требует использования мощной вычислительной техники и длительных расчетов.

Обеспечение подобных расчетов соответствующей им по точности и полноте информацией о рельефе представляет собой проблему. В настоящее время для использования (с определенными оговорками) доступны как открытые модели данных (матрицы высот ASTER DEM, SRTM DTED-1, детальность на уровне 1:100 000 – 1:200 000), так и данные из существующих фондов отечественной картографии – оцифрованные топокарты 1:25000 – 1:50000.

При работе на равнинных участках упомянутые материалы достаточны для решения большинства задач. Однако при работе в горной местности, где рельеф расчленен, наличествуют в изобилии микроформы рельефа и объекты, не отображаемые в масштабах карты или на выбранной для работы модели рельефа общего пользования, необходимы иные, более детальные источники информации. По некоторым оценкам, для получения необходимого уровня точности гравиразведки (50 микрогал и лучше) необходима работа с матрицей высот, обладающей шагом 1[®]2 м и точностью по высоте на уровне 30–100 см.

Средства дистанционного зондирования пассивного типа в большинстве случаев непригодны для решения этой задач. Космические съемки обеспечивают нужную точность только при использовании снимков с разрешением 30 см (что крайне затруднительно и дорого). И космические, и аэрофотоаппараты не могут обеспечить получение сведений о рельефе на лесопокрытых территориях – это при том, что 95% всех проектов по новому освоению местрождений попадает в залесенные районы. Возможность наземных съемок с указанным качеством и полнотой на практике также исключена по техническим и экономическим причинам.

В этом случае представляется, что воздушное лазерное (лидарное) сканирование является наилучшим, и в то же время – безальтернативным методом [Lohr, 1997]. В последние 20 лет на территории РФ именно он являлся основой для получения данных 1:2000-1:500 при выполнении крупных объемов съемок и реализации крупных национальных проектов (ВСТО, Сила Сибири, Олимпиада в Сочи и т.п.). Точность метода подтверждена сотнями научных работ и тысячами случаев практического применения, оборудование внесено в Реестр средств измерений (в отличие от фотокамер). Лидарное сканирование – активный метод, и его результаты никак не зависят от освещенности. Принципиальное преимущество метода – проникновение части импульсов сквозь кроны деревьев. Это дает возможность создать модель именно поверхности грунта, а не видимой поверхности растительности (как при классической аэрофотосъемке). Производительность (до 500 км² на одну съемочную систему в сутки) обеспечивается одновременно с высокой точностью (погрешность по высоте – не хуже 0,1–0,3 м.

Поэтому в данной работе была поставлена задача оценить степень сходства и качества полученных с использованием различных моделей рельефа поправок в гравитационные измерения, и степень их влияния на итоговые результаты геологоразведочных работ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Способы вычисления поправок в гравиметрические измерения.

Прежде всего, необходимо отметить, что и понижения рельефа (недостаток масс ниже точки наблюдения), и повышения рельефа (избыток масс выше точки наблюдения) приводят к уменьшению наблюденного значения силы тяжести. Таким образом, поправка за влияние рельефа дневной поверхности всегда положительна. Также хотелось бы упомянуть об отсутствии унифицированной терминологии и строгих границ для ближней, средней (промежуточной) и дальней зон учета поправки за рельеф [Долгаль, 2010]. Термин «центральная зона», воспринимается и трактуется многими авторами по-разному. В нашем исследовании центральная зона выделяется внутри ближней зоны на расстоянии радиусом до 50 м от пункта наблюдения. Таким образом, полагаем, что центральной зоне следует уделять особое внимание, поэтому ее будем рассматривать в составе ближней зоны, которой традиционно приписывали радиус до 100–300 м.

Обычно используется ряд способов учета влияние рельефа. Они отличаются моделью апрроксимации реальной поверхности грунта вокруг точки, где производятся измерения. Фактическую поверхность описывают набором квадратов разной величины, или сетью узловых точек со значениями высот рельефа. Известные нецифровые методы: Лукавченко, Немцова-Пришивалко, Дергачева, Березкина, Коваля, Мудрецовой, Маловичко. Применение Этих способов сводится к вычислению поправок с использованием соответствующих формул, специальных номограмм и палеток, рассчитанных на основе топокарт. Среди упомянутых способов расчета поправок наилучшие результаты дает способ Маловичко. Общим недостатком всех указанных способов является трудоемкость и невысокая точность определения поправок за влияние рельефа.

В наши дни применяются автоматизированные алгоритмы расчета в нескольких зонах и подзонах вокруг каждой точки измерений, выполняемые на основе регулярной матрицы высот (GRID), детальность которой определяет точность вычислений. При таком подходе возможно использование нескольких зон: центральная, ближняя, средняя и дальняя. Для каждой зоны могут применяться свои алгоритмы расчета и разная степень детальности. Так, для центральной и ближней зон расчеты проводятся с использованием максимально детальной информации, по мере удаления от точки наблюдения (средняя и дальняя зоны) расчеты могут оптимизироваться за счет загрубления детальности исходного GRID и снижения количества расчетов. В результате вычислений полученные поправки во всех зонах для расчетной гравиметрической точки суммируются. На сегодняшний день такой подход является наиболее оптимальным для точного вычисления поправок за рельеф. Во всех случаях крайне важной является точность и детальность цифровой модели рельефа, на основе которой производится вычисление поправок.

При высокоточных гравиметрических работах наиболее важно вычислить точное значение поправок в ближней (условно до 100–300 м) и в центральной зоне на удалении до 50 м от гравиметрического пункта. Гравитационное влияние любых формаций в этих зонах превалирует над более удаленными участками.

Именно по этой причине основным недостатком существующего подхода к расчету поправок за рельеф является производство цифровой модели рельефа по данным топокарт 1:25000 и 1:50000. Учитывая сказанное выше, необходимо в центральной и ближней зонах применять детальные (с ячейкой 1–3 м) цифровые модели рельефа на основе данных, не подвергавшихся генерализации (как в ходе съемки, так и в ходе составления карт). В других зонах (средняя и дальняя) возможно применять группировку ячеек с целью оптимизации и ускорения вычислений, либо работать по данным фондовых материалов. Для дальних зон, где не проводилось лазерное сканирование, рационально использовать модели SRTM DTED-1 (шаг 90 × 90 м).

Описание территории выполнения работ

Территория работ, на которой проводилась апробация различных источников данных и методик расчетов поправок в гравиметрические измерения расположена в восточной части Забайкальского края, в пределах одного из рудных месторождений. Территория расположена в низкогорной местности на высотах 450–850 м. Рельеф

местности сильно расчлененный, основная масса форм рельефа представлена долинными комплексами (с преобладанием аккумулятивных пойменных процессов), окруженными возвышенностями с крутыми, до 45 градусов склонами с развитыми обвально-осыпными процессами. В ряде участков представлены скальные стены высотой до 60–70 м. Территория расположена в таежной зоне и на 70% покрыта древесно-кустарниковой растительностью. Территория не населена, в районе съемки нет населенных пунктов. Дорожная сеть представлена грунтовыми и полевыми дорогами.



Puc. 1. Карта высот исследуемой территории Fig. 1. Digital elevation model of the territory

В рамках программы геологоразведочных работ были выполнены площадные высокоточные гравиметрические исследования, количество измерений – свыше 2000 штук (физических точек). Основная сеть наблюдений проведена по сетке с шагом 200 x 100 м, в аномальных интервалах выполнено сгущение сетки до 100 x 50 м. Среднеквадратическая погрешность определения наблюденных значений аномалии силы тяжести составила ± 11 мкГал. Привязка точек осуществлялась с помощью ГНСС-приемников (погрешность планового и высотного определения положения ± 12 см). Для учета влияния рельефа местности на участке гравиразведочных работ и за его пределами в радиусе более 2 км выполнено воздушное лазерного сканирование под масштаб 1:2000.

Лазерное сканирование выполнялось с высоты 600 м (+/– 70 м) с одновременной аэрофотосъемкой в видимом диапазоне, продольное перекрытие 60%, поперечное – 30% [Руководство..., 1986]. Плотность лазерного сканирования составила 4,2 точек на 1 м², среднее расстояние между прямыми измерениями координат облучаемой поверхности – 48 см. Оценочная среднеквадратическая погрешность лазерно-локационной съемки по высоте (по данным наземного контроля по 26 контрольным точкам, определенным методом статических ГНСС-наблюдений) составила 12,5 см, и 24,2 см – в плане [Gorgens, 2017].

Время выполнения сканирования – 3 часа. По результатам лазерного сканирования была выполнена классификация точек лазерных отражений (классы «Земля», «Растительность», «Прочее») с использованием средств автоматизации с последующей визуальной проверкой построенной модели [Korpela, 2008]. Из точек класса «Земля» методом триангуляции Делоне (средняя длина ребра – 1,2–1,8 м в зависимости от типа рельефа) была построена TIN-модель местности. Эта модель позднее преобразованная в регулярно-ячеистую модель данных (формат ArcINFO GRID) с шагом 1 м [Holmgren, 2004]. Именно эта модель позднее была использована в расчетах.

В качестве альтернативной модели была использована векторизованная топографическая карта 1:25000 с шагом горизонталей 20 м (шаг изолиний 5 м по высотам) (ожидаемая точность – на уровне 1/3 сечения рельефа, то есть 6,6 м). Построение производилось методом триангуляции Делоне с последующей конвертацией [*Капралов,* 2004] данных в регулярно-ячеистую модель данных (формат ArcINFO GRID) с шагом 5 м.

Подходы к вычислению поправок за рельеф в гравитационные измерения

Для вычисления гравитационного влияния рельефа использовался метод, при котором каждая ячейка GRID с шагом 1 м представлялась как материальный стержень сечение 1х1 м с высотой, равной перепаду высот. Полная поправка за рельеф получалась за счет суммирования вклада поправок в каждой ячейке. Общее количество ячеек – 70 000 000 для модели рельефа по данным лазерного сканирования, около 3000 000 ячеек – для модели рельефа по данным топокарты (шаг сетки 5 × 5 м).

При вычислении поправок за гравитационное влияние [Министерство..., 1980] ячейки рельефа местности с высотой z (x, y), глубины кромок стержня принимают значения: $\xi_1 = z$ и $\xi_2 = z_0$, где z_0 – высота точки наблюдения. Формула расчета поправки приобретает вид:

$$\Delta g = G\lambda K \left[\frac{1}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \right]$$
(1)

Объёмную плотность σ для условий исследуемой территории можно принять 2600 $\frac{\kappa r}{m^3}$. При размере сетки GRID 1 м х 1 м в этом случае $\lambda = 2600 \frac{\kappa r}{m}$.

По формуле (1) необходимо рассчитать GRID $\Delta g(x, y)$, совпадающий по геометрии с исходным GRID рельефа местности. Просуммировав все значения Δg получим итоговое значение поправки за гравитационное влияние рельефа местности в точке x_0, y_0, z_0 :

$$\Delta G(x_0, y_0, z_0) = \sum \Delta g(x, y) \tag{2}$$

Построение поверхностей поправок

Общий расчет величины ΔG невозможен без средств автоматизации. Для этого, используя среду разработки ArcView, было написано программное обеспечение (среда Avenue) для автоматизации расчетов. Расчеты выполнялись в полностью автоматическом режиме для каждой из 2000 точек гравиметрических измерений. Общее количество

машинного времени, потраченное на расчет – около 8500 минут (около 6 суток), среднее время расчет поправок по всему массиву данных лидарной модели рельефа – 4,25 минуты на один гравиметрический пункт. Для вычислений использовался персональный компьютер (процессор Intel i7, 32 Гб RAM, без использования видеокарты для расчетов поправок).



Puc. 2. Распределение по территории величин гравитационных поправок, рассчитанных по данным лазерного сканирования. На заднем плане – карта углов наклона территории Fig. 2. The distribution over the territory of the values of gravity corrections, calculated using LIDAR data. In the background is a map of the slope angles of the territory

Аналогичным образом был проведен расчет гравитационного влияния поправок с использованием топографических карт 1:25000. Время расчетов – около 6 часов, среднее время расчета одного пикета – около 10 секунд.

Полученные при расчете значения заносились в ГИС-слой (точечный SHP-файл) в соответствующие поля – Gvls и Gtopo (для поправок, рассчитанных по данным лазерного сканирования и топокарт соответственно). Средствами картографической алгебры были вычислены дельты полученных значений, и записаны в третье поле – Gvls-Gtopo.

На приведенных иллюстрациях легко заметить, что районы максимальных отличий полученных поправок приурочены к участкам со значительными (более 15 градусов) углами наклона, а также к участкам, вблизи которых расположены резкие перепады высот. Это хорошо согласуется с теоретическими предположениями о значимом влиянии подобных объектов в случае их расположения в ближней или центральной зоне гравитационного пункта. В то же время, на плоских участках значения различаются крайне незначительно, и могут расцениваться как равноточные.

Отметим, что статистика вычисленных поправок (по данным лидара и топокарты выглядит следующим образом:

Таблица	I. Статистика поправ	ок, рассчитанных по с	данным лидара и то	покарт 1:25000
Table 1.	Statistics of corrections	calculated using LIDAI	R data and topograph	ic maps 1: 25000

Параметр	Поправки по данным LIDAR	Поправки по топо 1:25000	
Среднее значение (мкГал)	582	651	
Минимум (мкГал)	86	175	
Максимум (мкГал)	3120	3213	
Разброс ((мкГал)	3033	3038	
Стандартное отклонение	468	440	
((мкГал)			



Puc. 3. Схема разности поправок за рельеф, полученных по данных лазерного сканирования и топокартам 1:25000) Fig. 3. Difference between gravity corrections, calculated using LIDAR data and topographic data (1:25000)

Оценка достоверности результатов расчета поправок.

Традиционно (ручным способом) оценка точности нахождения поправок за влияние рельефа определялась по результатам повторных вычислений поправок при различном расположении узлов, в которых определяются высоты, или же другими равноценными по точности методами.

Оценка точности определения поправок за влияние рельефа дневной поверхности при компьютерном расчете возможна на основе генерации случайных смещений местоположения гравиметрических пунктов по координатам X и Y. Подобный способ рассмотрен в пособии. Амплитуда смещения определялась на основе точности привязки гравиметрических пунктов и плановой точности данных лазерного сканирования. Для генерации случайных отклонений координат в плане (X и Y) принято значение ± 1 м (округлили до размера 1 ячейки модели ЦМР). В результате вычислений разность поправок

за рельеф между фактическими и случайными смещениями изменяются в диапазоне от -38 мкГал до 42 мкГал и характеризуются среднеквадратической погрешностью ± 5 мкГал (в сопоставлении участвовало 800 гравиметрических точек). Следует отметить, что при относительно небольшом смещении координат точки наблюдения (± 1 м), значение разности поправок на некоторых пунктах составили – -38 и 42 мкГал.

Для сопоставления результатов полученных поправок за рельеф по данным лазерного сканирования и топоданным рассчитаем модель их разности (рис. 3). Статистические показатели GRID разности поправок:

- минимум -418,03 мкГал;
- максимум 1164,35 мкГал;
- среднее арифметическое значение -70,33 мкГал;
- медиана -92,45 мкГал;
- стандартное отклонение 129,65 мкГал.

На рис. 3 наглядно представлено, что максимальные отклонения наблюдаются на крутых склонах и резких перепадах рельефа местности, где значения поправки достигают более 200 мкГал, а на отдельных участках около 1000 мкГал. Последнее является неприемлемым при производстве высокоточных гравиметрических работ.





Fig. 5. Distribution of differences in height between elevation models (LIDAR and topographic map 1: 25000) in comparison with the spatial distribution of differences in the calculations of gravimetric corrections using the same elevation models

Для подтверждения выдвинутой гипотезы выполним расчет аномалии силы тяжести на примере фрагмента гравиметрического профиля, проходящего через крутой участок рельефа, где разница высотных отметок на склоне по результатам лазерного сканирования и топоданным достигает около 15 м. Разность поправок за влияние рельефа дневной поверхности на этом участке (ПК 190–200) достигает около 800 мкГал (рис. 3, более длинный чем остальные, профиль в центре участка).

В связи с некорректным рельефом на участке ПК 190–200 имеем ложный гравитационный эффект около -500 мкГал, обусловленный не учтенными массами «вышениже» точки наблюдения. Напомним, что для горных районов при масштабе 1: 25 000 при гравиметрической съемке допускается погрешность определения аномалии силы тяжести в редукции Буге ± 250 мкГал, соответственно вклад только поправки за рельеф по топоданным превышает требуемую точность работ.

Таким образом, вполне очевидно, что использование поправки за рельеф на основе топоданных на участке ПК 190–200 не укладывается в требования гравиметрической съемки масштаба 1:25 000.

Проверка полученных результатов и сравнение их с альтернативными источниками данных

Полученные модели гравитационных поправок явно различаются, причем принципиально. Какая из них является более правильной? Для этого решим обратную задачу гравиразведки, восстановив строение верхнего участка недр. Для этого произведем моделирование на основе двумерной инверсии в специализированном комплексе ZondMag2D. Параметры инверсии для обоих источников данных примем одинаковыми. В результате решения обратной задачи получены разрезы эффективной избыточной плотности (рис. 4, 5).



Рис. 5. Результаты двумерной инверсии (вверху – использован рельеф по картам 1:25000, внизу – по данным лазерного сканирования)

Fig. 5. Results of 2D-inversion along profile (up – calculated using topographic maps 1:25000, below – using LIDAR)

Сравнивая рис. 4 и 5, очевидно значимое расхождение в результатах интерпретации. Форма идентифицируемых аномалий различна, как и значения избыточной плотности в центрах аномалий. Таким образом, геологическая интерпретация полученных плотностных разрезов неоднозначна. Однако при сравнении с имеющейся геологической информацией по интерпретационному профилю (рис. 6) видно, что результаты на основе данных лазерного сканирования показывают хорошую сходимость с эталоном (на уровне структурных форм и плотностей пород), чего нельзя сказать о результатах, полученных по данным моделирования с топокарт.



Рис. 6 Схематический геологический разрез по линии интерпретационного профиля, полученный традиционными методами) Fig. 6. Geological profile, reconstructed using traditional methods

Как видим, вычисление гравитационных поправок по модели рельефа на базе топокарт 1:25000 не обеспечивает возможность точно интерпретировать собственно гравиметрические измерения: налицо явные противоречия с контрольными данными по профилю, подтвержденными другими методами (в том числе бурением). Напротив, применение в расчетах поправок модели рельефа по данным лидарной съемки дает схожие с контрольными данными результаты. В целом, это закономерный результат, ибо в случае с использованием модели рельефа с топокарт профиль был интерпретирован по недостаточно полным материалам, что дало неверные поправки за рельеф. В результате, при некорректном рельефе мы получаем неверные поправки и как следствие – ложные гравитационные аномалии, которые не поддаются адекватной геологической интерпретации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам созданного программного обеспечения и комплексного расчета гравитационных поправок удалось решить следующие задачи:

- выполнить расчет поправок с использованием модели рельефа по данным лазерного сканирования и топокарт 1:25000;
- сравнить полученные результаты на 2000 пикетов и картографировать разницу поправок;
- сравнить итоговые модели подземных структур с данными профилирования, полученными другими (традиционными) методами и сделать вывод о значительном превосходстве в качестве расчетов, использующих модель рельефа по данным лазерного сканирования на расчетами по топокартам;

Отметим, что благодаря возможностям современной вычислительной техники, расчеты удалось произвести без их загрублений с целью оптимизации времени расчетов. Например, при расчетах по матрице высот по данным лазерного сканирования для каждого пункта гравиметрических измерений выполнялись отдельные расчеты гравитационного влияния каждой из 70 миллионов ячеек (шаг 1×1 м); данная операция была повторена для каждого из 2000 гравиметрических пунктов. При расчетах с использованием модели рельефа по топокартам 1:25000 использовались 3 миллиона ячеек размером 5×5 м – создание матрицы высот по карте 1:25000 не представляется сколько-нибудь обоснованным.

Ранее исследователями отмечалась нецелесообразность использования компьютерных технологий для вычисления поправок за рельеф в «центральной» зоне, охватывающей пункт гравиметрических наблюдений и его ближайшие окрестности. Последнее аргументировалось, главным образом, трудоемкостью создания ЦМР на основе топоданных и относительно не высокой точностью самих топографических карт 1:25 000 масштаба. Данное исследование опровергает подобный вывод. Кроме того, отметим, что большинство топографических карт не обновляются, поэтому современные техногенные изменения в них не учтены (отработанные россыпи, карьеры, любое нарушение рельефа, которое влечет за собой перемещение масс).

В исследовании наглядно показано, что полученные результаты расчета поправок по данным лазерного сканирования являются наиболее точными, и принципиально превосходят результаты расчетов, произведенных с использованием цифровых моделей рельефа по любым топографическим картам.

Единственным недостатком использования метода лазерного сканирования может являться его стоимость. Тем не менее, при более детальном исследовании рынка (речь идет о работе по площадям более 300 км²) оказывается, что стоимость создания модели рельефа по лидарным данным составляет 12–18 тысяч рублей за 1 км². Стоимость создания модели рельефа на территорию площадью в 300 км² в этом случае составит от 3,6 до 5,4 миллиона рублей. Принимая во внимание стоимость потенциальной ошибки, это несущественные затраты.

Прочие источники данных дешевле. Так, стоимость космической стереофотосъемки и ее последующей обработки может составлять до 9000 рублей за 1 км², а аэрофотосъемки – до 6000 рублей за 1 км². При этом получаемые по данным пассивной аэрокосмической съемки модели рельефа не выдерживают никакой критики ни в части передачи микрорельефа, ни в части точности под пологом деревьев. Несомненно, при использовании топокарт 1:25000 стоимость производства 1 км² модели рельефа еще ниже, но не будем забывать – все эти карты создавались также по данным аэрофосъемки, недостатки которой

перечислены выше. Использовать для решения крайне важной задачи заведомо непригодную для этого информацию – не лучший способ экономии.

выводы

Использование технологий лидарной съемки для получения высокоточных моделей рельефа при выполнении гравиразведочных работ с каждым годом будет становиться все более необходимым этапом информационного обеспечения проектов по добыче рудных ископаемых. Сильная сторона лидарных съемок – это высокая производительность и низкая стоимость получения высокоточных данных о рельефе местности (по сравнению с другими методами); в значительном количестве случаев метод не имеет альтернатив. Именно поэтому отработка способов использования этих данных при обработке гравиметрических измерений является важной задачей и представляет прямой практический интерес.

Нерешенным остается вопрос целесообразности использования цифровых моделей рельефа, построенных по данным лидарной съемки, на участках равнинного типа или смешенных видов рельефа. Также представляется разумным выполнение съемок не только на территорию всего объекта исследования, но и со значительным запасом по буферу – до 8-10 км. Следует отметить, что для достижения описанных в данной работе результатов на практике достаточно выполнить сканирование территории с плотностью на уровне 1,2-1,5 точек на 1 м^2 , что позволяет значительно снизить затраты на съемки [*Chen*, 2007] за счет использования более высоких залетов (с меньшим летным временем и стоимостью).

Помимо высокой значимости данных лазерного сканирования для решения вопросов в части гравиразведки, указанные наборы данных имеют значительный потенциал использования на всех последующих стадиях жизненного цикла разработки месторождения. Так, уже стало нормой создание топографических планов масштаба 1:2000 на территории лицензионных участков в рамках создания проекта разработки месторождения. Помимо этого, данные сканирования местности до начала работ могут быть использованы как базовая поверхность, от которой рассчитываются объемы извлеченной породы (при открытых разработках).

На сегодняшний момент необходимо отметить, что совмещение вычисления поправок за рельеф, рассчитанных компьютерным способом по топокарте (1:25 000 масштаба, расчет для дальней зоны) и воздушного лазерного сканирования (для ближней зоны) показало себя актуальным и оптимальным по точности и себестоимости.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках госбюджетной тематики исследований Регионального центра Мировой системы данных (Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова) при содействии АО «Арк-он».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed within the framework of a state budget theme of Regional Center of World Data System (Geographical Faculty of Moscow State University) in a collaboration with JSC «Ark-on»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Долгаль А.С.* Гравиразведка: способы учета влияния рельефа местности. Учебное пособие. Пермь: Пермский государственный университет, 2010. 88 с.
- 2. *Капралов Е.Г., Кошкарёв А.В., Тикунов В.С.* Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 480 с.
- Руководство по аэрофотосъёмочным работам. Министерство гражданской авиации. М.:, 1986. 176 с.
- 4. Министерство геологии СССР. Инструкция по гравиразведке. Л.: Недра, 1980. 89 с.
- 5. *Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007. P. 109–112.
- 6. *Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L.* A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Volume, 2017. P. 343–350.
- 7. *Holmgren A., Persson J.* Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. Remote Sensing of Environment, 2004. P. 415–423.
- 8. *Korpela I.* Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 2008. P. 3891–3897.
- 9. *Lohr U.* Digital elevation models by laser scanning: Principle and applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

REFERENCES

- 1. *Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007. P. 109–112.
- 2. *Dolgal A.S.* Gravitation surveys: methods of accounting for influence of relief. Perm: Perm State University, 2010. 88 p. (in Russian).
- 3. *Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L.* A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Volume, 2017. P. 343–350.
- 4. Guidance aerial photography for cartographic purposes. Military topographic administration of High Command. Moscow, Redaktsionno-izdatelskiy otdel, 1986. 176 p. (in Russian).
- Ministry of geology of USSR: Instruction for gravitation surveys. Leningrad.: Nedra, 1980.
 P. 1–89 (in Russian).
- 6. *Holmgren A., Persson J.* Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. Remote Sensing of Environment, 2004. P. 415–423.
- 7. *Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S.* Osnovy geoinformatiki. Moscow, Akademia, 2004. 480 p. (in Russian).
- 8. *Korpela I.* Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 2008. P. 3891–3897.
- 9. *Lohr U.* Digital elevation models by laser scanning: Principle and applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.