

# Науки о Земле

УДК 553.3 (571.55)  
DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-2-6-18

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИДАРОВ В ВЫСОКОТОЧНОЙ ГРАВИРАЗВЕДКЕ (НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ)

### THE USE OF AIRBORNE LIDARS IN HIGH-PRECISION GRAVITY PROSPECTING (ON THE EXAMPLE OF EASTERN TRANSBAIKALIA)



**Р. В. Груздев,**  
Забайкальский государственный  
университет,  
г. Чита  
rogruzdev@mail.ru

**R. Gruzdev,**  
Transbaikal State University,  
Chita



**И. А. Рыльский,**  
Московский государственный  
университет им. М. В. Ломоносова,  
г. Москва  
rilskiy@mail.ru

**I. Rylysky,**  
Lomonosov Moscow State University,  
Moscow

При производстве высокоточных гравиметрических исследований на рудных месторождениях важным фактором выступает правильное методическое ведение работ, которое напрямую влияет на последующие затраты и жизненный цикл геологического-разведочного предприятия. Гравиметрическая съемка, помимо этапа измерений на местности, включает этап устранения погрешностей, вносимых в измерения сторонними полями и объектами, в частности – рельефом местности. Существующие и принятые на государственном уровне методики предполагают использование материалов картографических фондов (топографические карты масштабов 1:100 000...1:25 000 и крупнее). Допускается использовать открытые (бесплатные) модели рельефа. Указанные материалы отличает общая характерная особенность – недостаток детальности отображения микрорельефа и крутых наклонных поверхностей (склонов, стен, сбросов, врезов). Эти элементы оказывают существенное влияние на значения поля, измеряемые гравиметрами, особенно в том случае, когда измерения проводятся на пунктах, расположенных на небольшом удалении от указанных форм. Существующие методики не предполагают расчетов с использованием цифровых моделей рельефа, построенных по исходным данным с высокой плотностью высотных отметок (с шагом в первые метры и чаще). Все это создает предпосылки для недостаточно полного учета поправок в гравиметрических измерениях. Вместе с тем, технические возможности современных авиационных средств дистанционного зондирования позволяют в короткие сроки получить высокоточную цифровую модель рельефа местности на значительных по площади территориях. Наиболее точной, универсальной и перспективной технологией в этом отношении является метод воздушного лазерного (лидарного) сканирования. В статье рассматривается методика выполнения работ с использованием как материалов воздушного лазерного сканирования рельефа, так и прочих видов данных (топокарты 1:25 000, открытые модели данных). В рамках исследований выполнены расчеты итоговых поправок за влияние рельефа местности и сравнение полученных результатов между собой. С помощью математического моделирования и картографической алгебры построены матрицы (гриды) расчетных параметров. Результаты исследования наглядно продемонстрированы на диаграммах и схемах, обосновывая и иллюстрируя высокую информативность проведенного исследования

**Ключевые слова:** гравиразведка, воздушное лазерное сканирование, аэрофотосъемка, поправка за рельеф, цифровые модели рельефа, аномалия силы тяжести, зона учета, погрешность съемки, топокарты, интерпретация

In the production of high-precision gravimetric studies at ore deposits, an important factor is the methodical correctness of the work, which directly affects the subsequent costs and life cycle of a geological exploration enterprise. It is known, that gravimetric survey, in addition to the actual stage of measurements on the ground, includes the stage of eliminating errors introduced into the measurements by external fields and objects, in particular, the terrain. Methods existing and adopted at the state level involve the use of materials from cartographic funds (topographic maps at a scale of 1:100,000 – 1:25,000 and larger). It is also allowed to use open (free) terrain models. These materials are distinguished by a common characteristic feature – the lack of detail in the

display of the microrelief and steep inclined surfaces (slopes, walls, faults, incisions). These elements have a significant effect on the field values, measured by gravimeters, especially when measurements are taken at points located at a small distance from the specified forms. In addition, the existing methods do not involve calculations using digital elevation models built from initial data with a high density of elevations (with a step of a few meters or more). All this creates the prerequisites for an insufficiently complete consideration of corrections in gravimetric measurements. At the same time, the technical capabilities of modern aviation remote sensing equipment make it possible to quickly obtain a high-precision digital model of the terrain over large areas. The most accurate, versatile and promising technology in this respect is the method of airborne laser (lidar) scanning.

In this paper, the authors consider a methodology for performing work using both airborne laser scanning of the relief and other types of data (topographic maps 1:25,000, open data models). As part of the research, calculations were also made of the final corrections for the influence of the terrain and a comparison of the results obtained with each other. With the help of mathematical modeling and cartographic algebra, matrices (grids) of design parameters were constructed. The results of the study are clearly demonstrated in diagrams and diagrams, substantiating and illustrating the high information content of the study

**Key words:** gravity exploration, aerial laser scanning, aerial photography, terrain correction, digital relief models, gravity anomaly, accounting zones, measurement error, topographic maps, interpretation

**В**ведение. Высокоточные гравиметрические работы в составе поискового геолого-разведочного комплекса позволяют получить принципиально новую информацию об объекте исследования. Для обеспечения высокоточных измерений аномалий силы тяжести применяются современные высокоточные гравиметры и специализированная техника для наблюдений. После полевых измерений для каждой точки необходим учет различных поправок, среди которых одной из важных является поправка за влияние рельефа местности. При этом, важно оценить не только влияние абсолютной высоты конкретной точки, но и влияние различных окружающих 3Д-структур в максимально возможном радиусе влияния. Значения поправок, вносимых рельефом, могут достигать десятков процентов от измеренных значений, и в ряде случаев – в несколько раз превышать искомые величины гравитационных аномалий. Именно поэтому учет влияния рельефа является краеугольным этапом проведения высокоточных гравиразведочных работ. Ключевым источником данных в этом случае становится высокоточная (и детальная) цифровая модель рельефа, построенная с минимально возможной генерализацией рельефа и учитывающая в максимальной степени локальные аномалии поля тяжести (то есть микрорельеф).

Сведения о рельефе необходимы не только на район расположения точек наблюдения аномалий силы тяжести, но и на значительном удалении от них. Так, в зависимости от площади исследования, детальности

картирования и сложности рельефа территорий необходимый запас по охвату данными о рельефе может составлять от 2...4 до нескольких десятков километров. Именно такой уровень расширения охвата от непосредственных границ осваиваемой территории является обоснованным с точки зрения исследования потенциала силы тяжести.

Актуальность исследования заключается в том, что в работе демонстрируется эффективность применения лидарного сканирования при гравиметрической съемке. Определение поправок по цифровой модели рельефа (ЦМР) на основе лидарного сканирования позволяет значительно повысить точность вычисления аномалий силы тяжести и увеличить качество интерпретации гравиметрических данных. Поэтому любые исследования в данном направлении представляют для геологоразведки особый интерес.

Объектом исследования выступают цифровые модели рельефа местности и значения поправок за рельеф в гравиметрические наблюдения.

Предметом исследования является точность определения поправок за влияние рельефа местности на основе цифровых моделей рельефа, по данным лазерного сканирования и топографической карты М 1:25 000.

Целью исследования является обоснование целесообразности применения цифровых моделей рельефа, построенных на основе лидарного сканирования, для расчета поправок за влияние рельефа местности при высокоточной гравиметрической съемке.

**Задачи исследования:**

- выполнить расчет поправок за влияния рельефа местности на основе данных лазерного сканирования и на основе топографической карты М 1:25 000;
- сопоставить результаты вычисления поправок за рельеф, полученных на основе данных лазерного сканирования с поправками за рельеф, рассчитанных на основе топографической карты М 1:25 000;
- провести сравнение результатов интерпретации гравиметрических измерений с использованием рассчитанных поправок за рельеф, полученных по данным топокарт М 1:25 000 и данных лазерного сканирования;
- оценить корректность вычисления поправок за рельеф на основе интерпретации аномалий силы тяжести (решение обратной задачи гравиразведки);
- оценить возможность совмещения нескольких источников, данных при расчете поправок за рельеф;
- проанализировать результаты исследования, дать рекомендации.

*Степень разработанности проблемы* указывает на ряд нерешенных вопросов, касающихся, главным образом, целесообразности применения лазерного сканирования при гравиразведочных работах на месторождениях различного типа и рельефа, а также перехода от традиционных методов учета влияния рельефа в «центральной» зоне к компьютерным алгоритмам на основе данных только лазерного сканирования. Помимо этого, проблему представляет и собственно обеспечение данными для подобных расчетов. Для указанных задач могут быть использованы как материалы существующего картографического фонда, так и материалы открытого пользования – матрицы высот ASTER DEM, SRTM. В ряде случаев этих материалов вполне достаточно. Тем не менее, на большей части геолого-разведочных объектов рельеф местности значительно расчленен, обладает обилием микро- и мезоформ рельефа, которые не могут быть отражены ни на топографических картах (в силу ценза и условий их составления), ни на низкодетальных моделях рельефа открытого пользования. Использование недостаточно подробных данных о рельефе в последующем ведет к некорректной интерпретации с соответствующими долгосрочными негативными последствиями. Для обеспечения требований

высокоточной гравиразведки пользователь должен располагать матрицей высот, обладающей шагом 1...3 м и высотной точностью на уровне 0,3...1,0 м.

Имеющиеся традиционные съемочные методы получения информации о рельефе (такие как пассивные космические и авиационные съемки в видимом диапазоне) не позволяют создать достоверные модели рельефа с заданными характеристиками. Основные причины – наличие на подавляющей части территории страны растительности (лес), которая не позволяет картографировать собственно поверхность рельефа (только верхушки деревьев). При использовании космических снимков даже наилучшего качества достижение вертикальной точности на уровне 0,3...1,0 м является неразрешимой задачей.

В то же время, в РФ уже около 20 лет применяется метод воздушного лазерного (лидарного) сканирования. Метод хорошо себя зарекомендовал при реализации съемок под проектные работы в масштабе 1:2 000...1:500. Основное преимущество – лазерное сканирование обеспечивает проникновение части импульсов сквозь кроны деревьев и позволяет картографировать именно рельеф грунта (а не видимой поверхности, как при классической аэрофотосъемке). Метод отличается высокой производительностью (до 500 км<sup>2</sup> на одну съемочную систему в сутки) и высокой точностью (погрешность по высоте – не ниже 0,1...0,3 м).

В основу исследования положены практические и теоретические методы. В работе приведены результаты лидарной съемки и гравиразведочных работ (в основном уровне) на одном из объектов Восточного Забайкалья. Рассмотрена методика получения и использования данных лидарной съемки, выполнена сравнительная оценка полученных результатов расчетов поправок за рельеф в сравнении с иными формами информационного обеспечения вычислений. Результаты определений поправок за влияние рельефа местности сопоставлены и проанализированы. С помощью математического моделирования построены матрицы (гриды) расчетных параметров. Результаты исследования наглядно продемонстрированы на диаграммах и схемах, что указывает на высокую информативность проведенного исследования.

**Материалы и методы исследования.** Общие методы учета поправок за рельеф в гравиметрические измерения и их проблематика.

Понижения (недостаток масс ниже точки наблюдения) и повышения рельефа (избыток масс выше точки наблюдения) всегда приводят к уменьшению наблюдаемого значения силы тяжести. Таким образом, поправка за влияние рельефа дневной поверхности всегда положительна. Отсутствует унифицированная терминология и строгие границы для «ближней», «средней» (промежуточной) и «далней» зон учета поправки за рельеф. Термин «центральная зона» воспринимается и трактуется авторами по-разному. В нашем исследовании центральная зона выделяется внутри «ближней» на расстоянии радиусом до 50 м от пункта наблюдения. Полагаем, что «центральной» зоне следует уделять особое внимание, поэтому ее будем рассматривать в составе «ближней» зоны, которой традиционно приписывали радиус до 100...300 м.

Применяются несколько способов учета влияния рельефа местности, различающихся моделью, аппроксимирующей реальную поверхность Земли вокруг точки наблюдения. Фактическую поверхность задают совокупностью горизонтальных разновысотных площадок или квадратов разной величины, либо сетью узловых точек, аппроксимирующих модель рельефа в отсеках (или участках), которые образованы пересечениями лучей и концентрических окружностей или квадратов с общим центром в точке наблюдения или в узловых точках. К наиболее распространенным способам учета поправок за рельеф относятся: Лукавченко, Немцова-Пришивалко, Способ Дергачева, Березкина, Коваля, Мудрецовой, Маловичко. Среди названных ручных приемов расчета поправок за рельеф наиболее высокой точностью обладает способ Маловичко [1]. Общим недостатком ручных способов является трудоемкость определения средних высот в отсеках и квадратах, средневзвешенных высот параллелепипедов, узлах и т. п., что обуславливает низкую производительность. К перечисленному следует добавить невысокую точность определения поправок за влияние рельефа из-за существенного изменения действительной поверхности при сглаживании и аппроксимации модели [2].

В связи с развитием вычислительной техники и методов съемки рельефа дневной

поверхности практически полностью отказались от ручных приемов вычислений поправок за влияние рельефа. Первоначально технологии автоматизированного расчета поправок базировались на весьма простых вычислительных схемах, отвечающих палеточным способам вычислений на основе топокарт. Точность определения поправок таким приемом была на уровне ручного способа, преимущества заключалось только в производительности расчета. Однако подготовка цифровых моделей на основе топографических карт М 1:25 000 и более крупных карт (их оцифровка) занимала продолжительный период обработки, что выступало недостатком такого подхода.

Дальнейшим развитием технологии учета поправок за рельеф становится применение автоматизированных алгоритмов расчета в нескольких зонах и подзонах на основе регулярной матрицы высот (грид), детальность которой определяет точность вычислений. При таком подходе возможно использование нескольких зон, обобщенно: «центральная», «ближняя», «средняя», «далняя». Для каждой зоны могут применяться свои алгоритмы расчета и разная степень детальности. В результате вычислений полученные поправки во всех зонах для расчетной гравиметрической точки суммируются. Чрезвычайно важным остается точность и детальность цифровой модели, на основе которой производится вычисление поправок.

При высокоточных гравиметрических работах наиболее важным выступает точное вычисление поправок в «ближней» зоне (условно до 100...300 м) и особенно критично точно определять поправки в «центральной» зоне в радиусе до 50 м от гравиметрического пункта. В этих зонах наблюдаются контрастные «высокочастотные» составляющие гравитационного эффекта (избытка или недостатка масс) от возмущающих объектов. Инструментальными методами с помощью теодолитов, поправкомеров, баронивелиров и т. п на местности сложно добиться высокой точности определения поправки за рельеф на изрезанных «пересеченных» участках рельефа, особенно залесенных.

В нашем представлении для расчета поправок, как минимум, в «центральной» и «ближней» зонах наиболее предпочтительно использовать детальные (с ячейкой 1...3 м) цифровые модели рельефа на основе дан-

ных воздушного лазерного сканирования. В других зонах («средняя» и « дальняя») возможно применять группировку ячеек с целью оптимизации и ускорения вычислений. Для «дальних зон», где не проводилось лазерное сканирование, рационально использовать модели SRTM (наиболее приемлемые с ячейкой 1x1 с). Такие модели будут отвечать автоматизированным способам обработки с наилучшей точностью вычисления поправок за влияние рельефа [6].

*Сведения о имеющихся источниках данных о рельефе и их точность.* Существует определенная проблема в получении сведений о рельефе с детальностью, необходимой для выполнения гравиметрических работ. Широко используемые источники данных [3] можно разделить на:

- фондовые картографические. К ним относятся топографические карты масштабов 1:25 000...1:200 000. Наиболее приемлемыми из них являются М 1:25 000 с сечением рельефа 5 м. При этом, оценочная точность составляет около 1,5...2 м по высоте (для высокогорного рельефа может достигать 3...5 м). Шаг матрицы высот, по этим данным составляет соответственно 5...10 м;
- открытые сетевые источники, это модели данных ASTER DEM (высотная точность 15 м, шаг матрицы 30 м), SRTM 3x3 arcsec (высотная точность 7...10 м, шаг матрицы – около 90 м), SRTM 1x1 arcsec (высотная точность 5...7 м, шаг матрицы – около 30 м);
- материалы обработки пассивных съёмок в видимом диапазоне;
  - материалы обработки активных съёмок в радиолокационном диапазоне;
  - материалы обработки активных съёмок в видимом диапазоне.

*Воздушное лазерное сканирование: общие сведения о методе*

Воздушное лазерное сканирование представляет собой активный метод съёмки в оптическом диапазоне. К несомненным достоинствам метода относятся независимость от освещения, возможность «пробить» растительность, дав точки отражений как от верхушек растений, так и от грунта под ними, а также высокая точность измерений. При этом, сами измерения координат [4] являются прямыми (используется безотражательный сканер- дальномер), а не косвенными (как в стереофотограмметрическом методе).

Метод лазерного сканирования, появившийся в конце 90-х гг., когда он обеспечивал точность на уровне первых дециметров, быстро совершенствовался с течением времени. Общий набор компонентов систем лазерного сканирования остается неизменным: лазерный сканер- дальномер (получает дальности и дистанции до объектов), инерциальная система (определяет углы разворота в пространстве и промежуточные положения системы вне точек измерения с использованием ГНСС – глобальных навигационных спутниковых систем), ГНСС-приемник (используется для абсолютного позиционирования системы и коррекции дрейфа инерциальной системы).

Точность воздушного лазерного сканирования непрерывно возрастает. В настоящее время можно говорить о достижении абсолютной точности измерений (в системе WGS84, эллипсоидальные высоты) на уровне 3...5 см при использовании систем, работающих на дистанциях более 500 м, и на уровне 2,5...3,5 см для систем, работающих на дистанциях 100...300 м. Дальнейший рост точности лазерных систем ограничен возможностями ГНСС-систем.

*Результаты исследования и их обсуждение. Описание территории выполнения работ.* Территория работ расположена в восточной части Забайкальского края, в пределах одного из рудных месторождений, в низкогорной местности на высотах 450...850 м. Рельеф местности сильно расчлененный, основная масса форм рельефа представлена долинными комплексами (с преобладанием аккумулятивных пойменных процессов), окружеными возвышенностями с крутыми, до 45 градусов склонами с развитыми обвалально-осыпными процессами. В ряде участков представлены скальные стены высотой до 70 м. Территория расположена в таежной зоне и на 70 % покрыта древесно-кустарниковой растительностью.

В рамках программы геолого-разведочных работ выполнены площадные высокоточные гравиметрические исследования, площадь наблюдений составила около 23 км<sup>2</sup>. Основная сеть наблюдений проведена по сетке с шагом 200x100 м, в аномальных интервалах выполнено сгущение сетки до 100x50 м. Среднеквадратическая погрешность определения наблюдаемых значений аномалии силы тяжести ±0,011 мГал. Привязка точек осу-

ществлялась с помощью ГНСС-приемников (погрешность планового и высотного определения положения  $\pm 0,12$  м). Для учета влияния рельефа местности на участке гравиразведочных работ и за его пределами в радиусе более 2 км выполнено лидарное сканирование под масштаб 1:2 000. При этом площадь сканирования составила около 60 км<sup>2</sup>.

Лазерное сканирование выполнялось с высоты 600 м (+/- 70 м) с одновременной аэрофотосъемкой в видимом диапазоне. Плотность лазерного сканирования составила 4,2 точек на 1 м<sup>2</sup>, среднее расстояние между прямыми измерениями координат облучаемой поверхности – 48 см. Оценочная среднеквадратическая погрешность лазерно-локационной съемки [8] 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. Время выполнения сканирования – 3 ч. По результатам лазерного сканирования разработана классификация точек лазерных отражений (классы «Земля», «Растительность», «Прочее») [9; 10]. Из точек класса «Земля» методом триангуляции Делоне построена TIN-модель местности, позднее преобразованная в регулярно-ячеистую модель данных с ячейкой 1x1 м [11]. Именно эта модель использована в расчетах.

В качестве альтернативной модели использована векторизованная топографическая карта 1:25 000 с шагом горизонталей 5 м (шаг изолиний 5 м по высотам) (ожидаемая точность – на уровне 1/3 сечения рельефа, то есть 1,6 м).

Создана совмещенная модель рельефа (объединенная матрица высот), сочетающая цифровую модель рельефа по данным лидарной съемки (там, где эти данные есть) с моделью рельефа по топокарте 1:25 000 (на территории, где лидарная съемка не проводилась).

*Подходы к вычислению поправок за рельеф в аномалии силы тяжести.* Для определения поправок за влияние рельефа местности использован алгоритм вычисления, реализованный в Geosoft Oasis Montaj (рис. 1) [7]. Для расчета использовали две регулярные матрицы высот: локальную и региональную. Локальная матрица высот рассчитывается с мелкой ячейкой. Как правило, выбор ячейки определяется масштабом и точностью гравиметрических работ (чаще использу-

ется ячейка 1...5 м), вычисление на основе этой матрицы может производиться до заданного расстояния от гравиметрической точки или заканчиваться на краях локального грида высот. Далее расчет продолжается на основе матрицы высот регионального рельефа, который имеет более грубую ячейку, обычно 20...50 м и крупнее. Для небольших участков гравиметровой съемки (первые км<sup>2</sup> и первые десятки км<sup>2</sup>) радиус регионального рельефа чаще достаточно ограничивать 20...30 км, для участков с большей площадью и региональных гравиметрических работ радиус учета поправок за рельеф может достигать до 200 км.

В Geosoft поправка за рельеф рассчитывается на основе вкладов «ближней», «промежуточной» и «дальней» зон. В «ближней» зоне (0...1 ячейка от точки наблюдении) алгоритм суммирует эффекты четырех треугольных кусочков, которые описывают поверхность между гравиметрическим пунктом и высотой в точке каждого диагонального угла. В «промежуточной» зоне (1...8 ячеек от точки наблюдений) топографический эффект для каждой точки вычисляется с использованием метода призмы, верхнее основание которой – квадрат. В «дальней» зоне (более 8 ячеек) топографический эффект вычисляется на основе аппроксимации кольцеобразного сегмента квадратной призмой (см. рис. 1).

Полная поправка за влияние рельефа местности автоматически рассчитывается за счет суммирования вклада поправок в каждую зону.

*Построение цифровых поверхностей поправок.* В связи с тем, что детальные высокоточные цифровые модели имеют ограниченное распространение, то при увеличении радиуса вычисления поправки за рельеф приходится подключать другие более «грубые» цифровые модели высот. Данный подход предполагает расчет поправок отдельно для каждой цифровой поверхности высот. Такое разделение обусловлено разной степенью точности и детальности цифровых моделей рельефа, соответственно для «ближней» зоны используется детальная цифровая модель высот, а для дальних зон – более грубые и менее подробные модели. Например, для «ближней» зоны расчет выполняется на основе детальной модели, построенной по данным лазерного сканирования, для «средней» и «дальней» зон рассчитывается на основе

топокарт 1:25 000 или в комбинации с SRTM [5]. В результате полученные поправки в разных зонах суммируются. Точность моделей SRTM и топокарт масштаба 1:25 000 не позволяет использовать их для вычисления поправок в «ближней» зоне (далее рассмотрим пример). Поэтому комбинация из нескольких гридов высот, имеющих разную точность и детальность, представляется наиболее правильным решением для достижения высокой точности определения поправки за влияние

рельефа дневной поверхности. Таким образом, поправки за рельеф рассчитаны на основе всего имеющегося массива высотных отметок, включая пункты гравиметрических наблюдений, его окрестности и максимальное удаление, которое ограничено имеющимися данными ЦМР. Для модели, полученной по данным лазерного сканирования, ячейка составила 1x1 м, для модели ЦМР на основе топоданных – 5x5 м, для моделей SRTM ячейка составила 20x20 м.

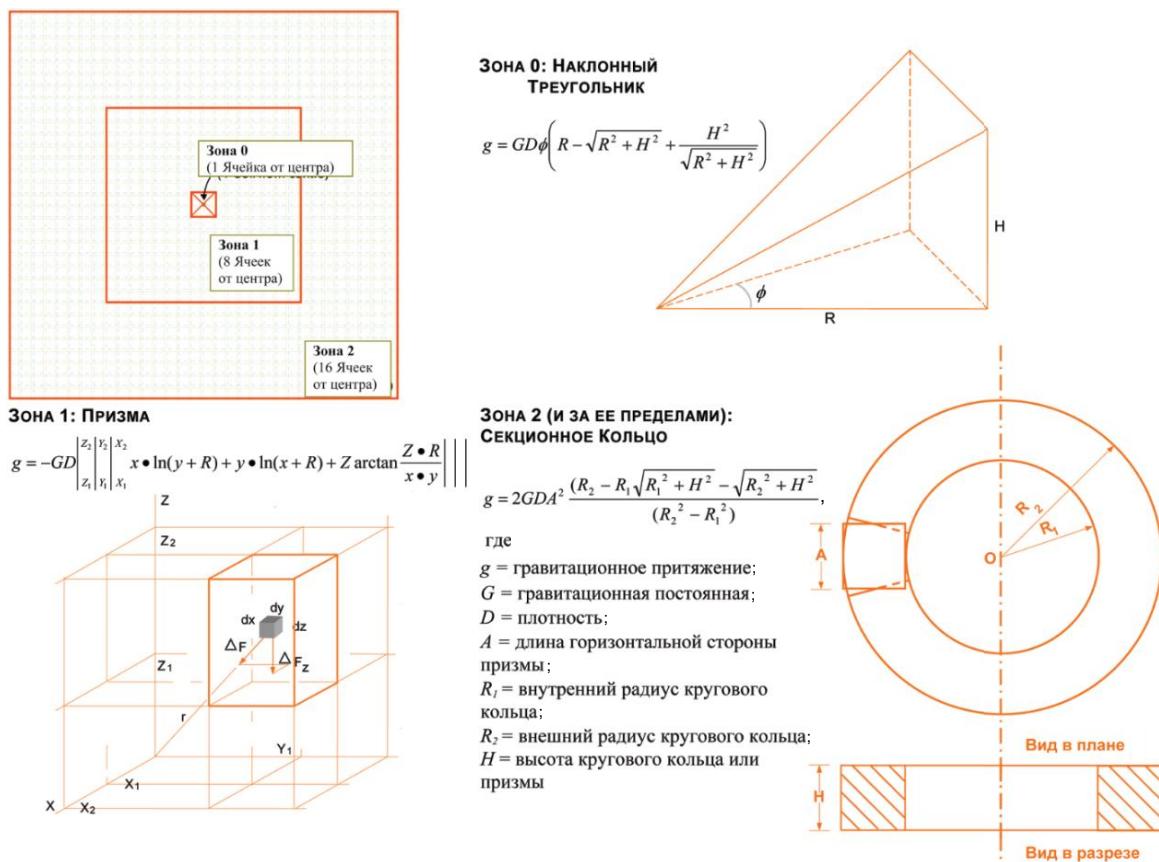


Рис. 1. Методика вычисления гравитационных поправок за рельеф в Geosoft Oasis Montaj / Fig. 1. Methodology calculation gravity terrain corrections in Geosoft Oasis Montaj

Оценка точности результатов расчета поправок за рельеф. 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<sup>1</sup>.

Оценка точности определения поправок за влияние рельефа местности при компьютерном расчете возможна на основе генерации случайных смещений местоположения гравиметрических пунктов по координатам X и Y [1]. Амплитуда смещения определялась на основе точности привязки гравиметрических пунктов и плановой точности данных

<sup>1</sup> Министерство геологии СССР: Инструкция по гравиразведке. – Л.: Недра, 1980. – 89 с.

лазерного сканирования. Для генерации случайных отклонений координат в плане (X и Y) принято значение  $\pm 1$  м (округлили до размера 1 ячейки модели ЦМР). В результате вычислений разность поправок за рельеф между фактическими и случайными смещениями изменяется в диапазоне -38...42 мкГал и характеризуется среднеквадратической погрешностью  $\pm 5$  мкГал (в сопоставлении участвовало 800 гравиметрических точек).

Для сопоставления результатов полученных поправок за рельеф по данным лазерного сканирования и топоданным рассчитаем модель их разности (рис. 2). Статистические показатели грида 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).

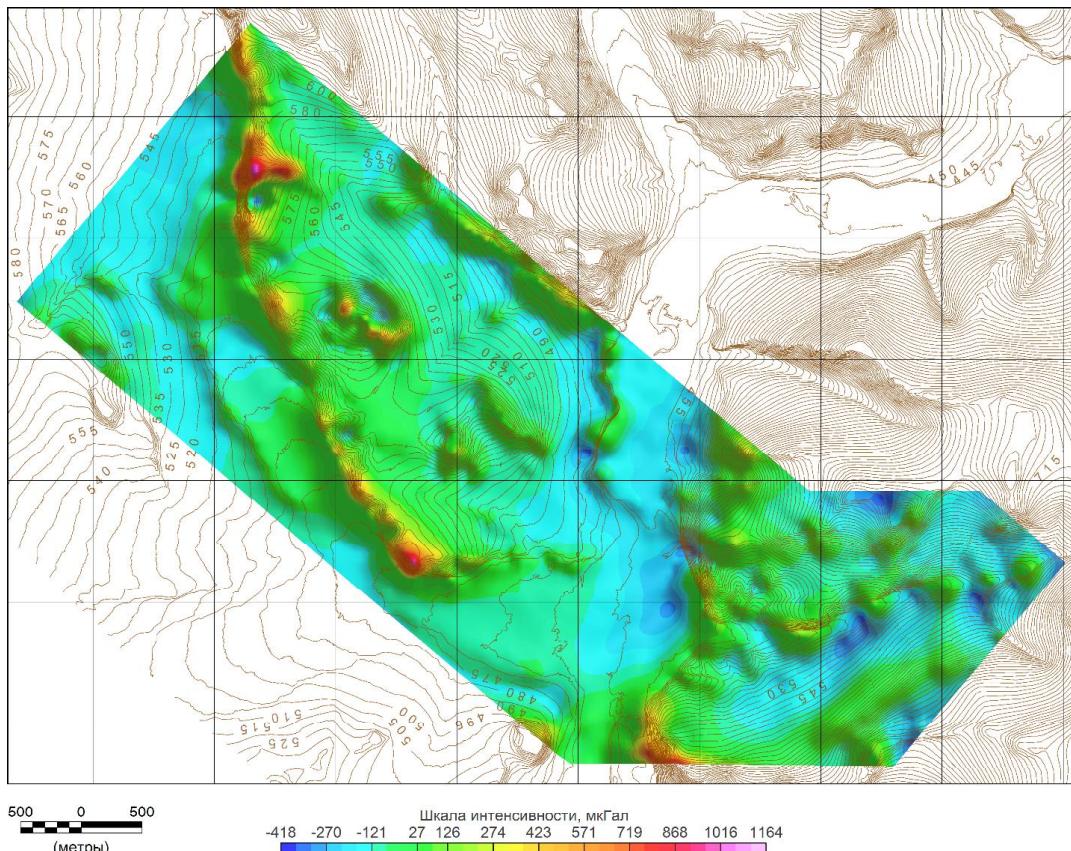


Рис. 2. Схема разности поправок за рельеф, полученных по данным лазерного сканирования и топокартам М 1:25 000 / Fig. 2. Difference between gravity corrections, calculated using LIDAR data and topographic data Scale 1:25 000

На рис. 2 наглядно представлено, что максимальные отклонения наблюдаются на круtyх 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<sup>2</sup>. В долинах и на пологих участках местности величина разности поправок минимальна и

несущественна. Отсюда возникает предположение, что эти расхождения в вычислениях поправок за рельеф могут значительно повлиять на интерпретацию аномалий силы тяжести.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы выполним расчет аномалии силы тяжести на примере фрагмента гравиметрического профиля, проходящего через крутой участок рельефа, где разница высотных отметок на

<sup>2</sup>Министерство геологии СССР: Инструкция по гравиразведке. – Л.: Недра, 1980. – 89 с.

склоне по результатам лазерного сканирования и топоданным достигает около 15 м (рис. 3). Разность поправок за влияние рельефа дневной поверхности на этом участке (ПК 190-200) достигает около 800 мкГал (рис. 4).

На представленном профиле аномалия силы тяжести будет выглядеть следующим образом (рис. 5). В результате трансформации аномалии силы тяжести компенсирована региональная составляющая гравитационного поля. Итогом трансформации (рис. 6) является остаточная аномалия (или локальная составляющая аномалии силы тяжести). В связи с некорректным рельефом на участке ПК 190–200 имеем ложный гравитационный эффект около -500 мкГал, обусловленный неучтеными массами «выше-ниже» точки наблюдения. Напомним, что для горных

районов в М 1: 25 000 при гравиметрической съемке допускается погрешность определения аномалии силы тяжести  $\pm 250$  мкГал<sup>3</sup>. В итоге, вклад только поправки за рельеф по топоданным превышает требуемую точность работ.

Необходимо оценить, насколько отклонение расчетов поправок за рельеф на основе топоданных М 1:25 000 является существенным при интерпретации аномалий. Для этого выполним моделирование на основе двумерной инверсии в программе ZondMag2D. Параметры инверсии для кривых локальной составляющей аномалии силы тяжести (рис. 6) примем одинаковыми. В результате решения обратной задачи получены разрезы эффективной избыточной плотности (рис. 7; 8).

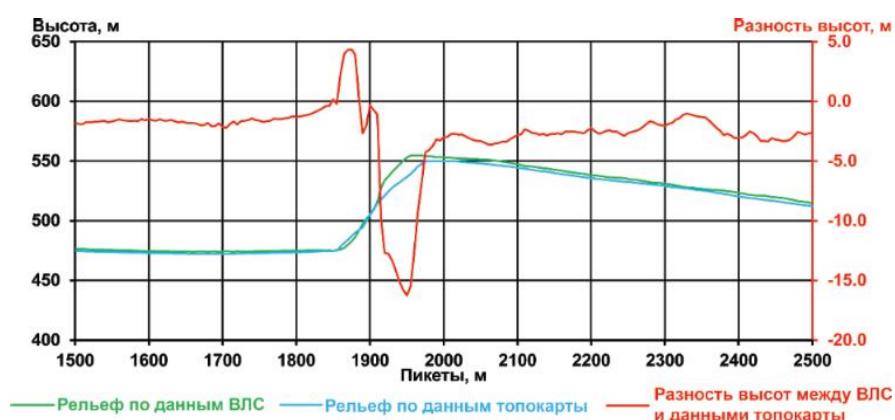


Рис. 3. Графики разности высотных отметок по профилю /  
Fig. 3. Graphs of elevation difference along the profile

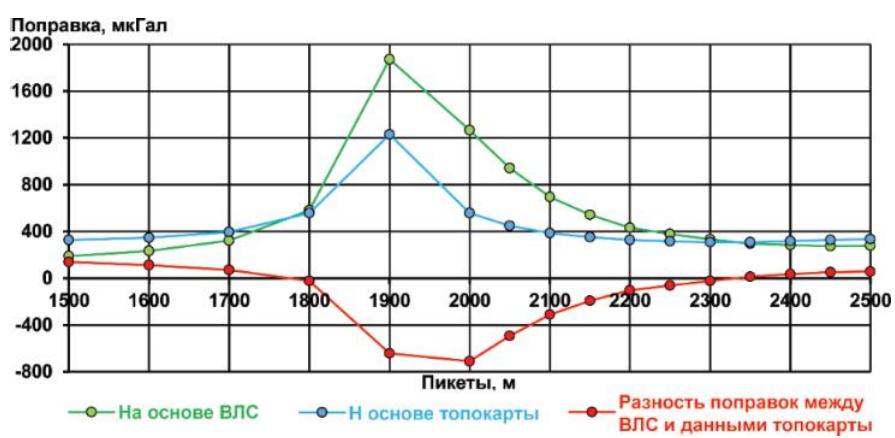


Рис. 4. Графики разности поправок за рельеф по профилю /  
Fig. 4. Graphs of gravity corrections difference along the profile

<sup>3</sup> Министерство геологии СССР: Инструкция по гравиразведке. – Л.: Недра, 1980. – 89 с.

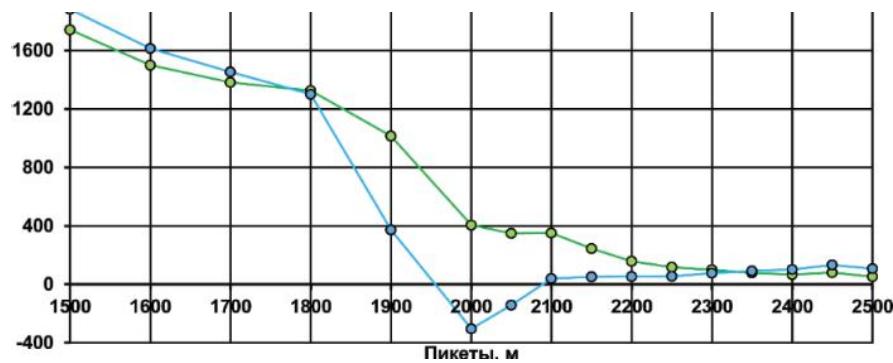


Рис. 5. Графики рассчитанной аномалии силы тяжести (условный уровень) /  
Fig. 5. Graphs of gravity anomalies along the profile (at conditional level)

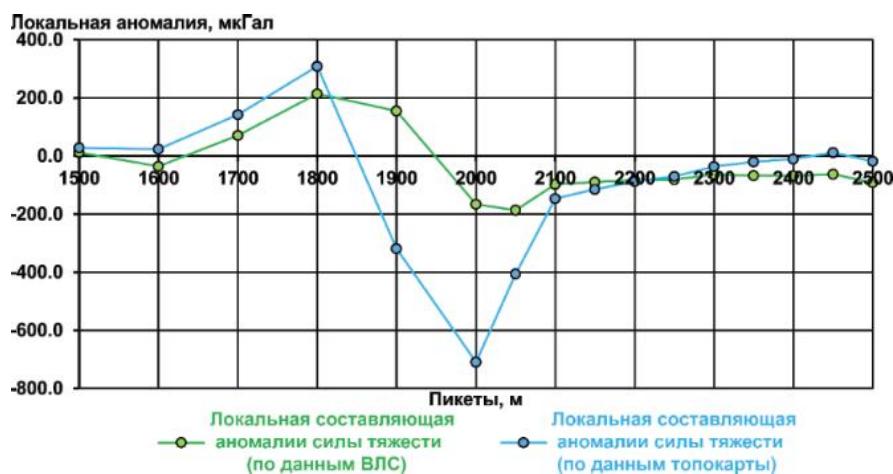


Рис. 6. Графики локальной составляющей аномалии силы тяжести /  
Fig. 6. Graphs of local gravity anomalies

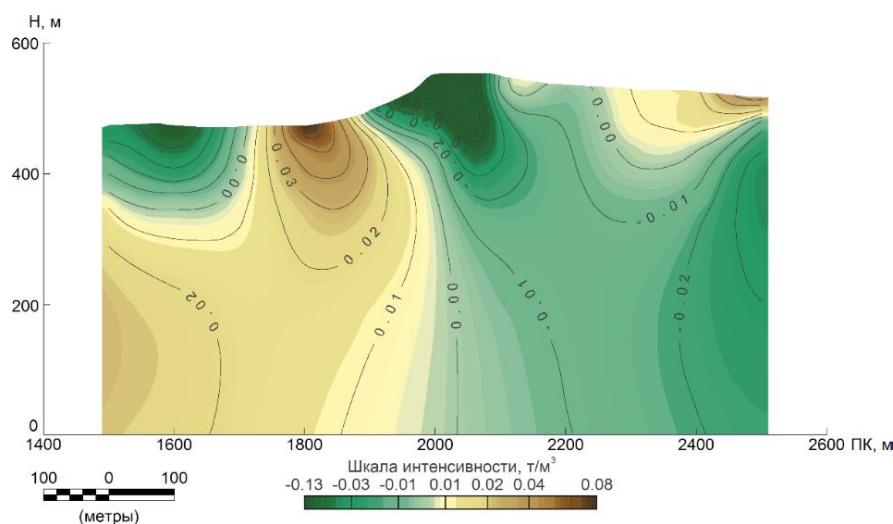


Рис. 7. Результаты двумерной инверсии (с поправкой за рельеф по лазерному сканированию) /  
Fig. 7. Results of 2D-inversion along profile (terrain correction using LIDAR data)

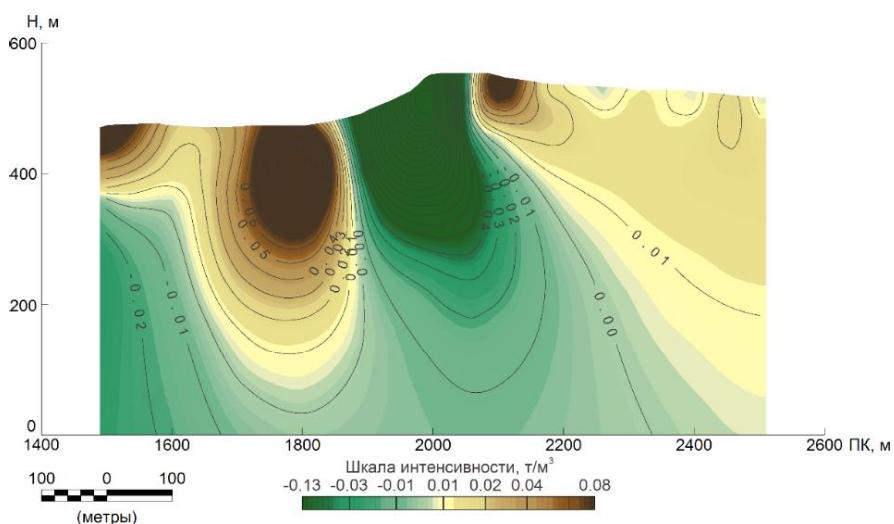


Рис. 8. Результаты двумерной инверсии (с поправкой за рельеф рельеф по картам М 1:25 000) /  
Fig. 8. Results of 2D-inversion along profile (terrain correction using topographic maps Scale 1:25 000)

Визуально анализируя рис. 7 и 8, наблюдаем значительное расхождение в результатах интерпретации. Форма аномалиеобразующих объектов различна, как и значения избыточной плотности в эпицентрах аномалий. В связи с этим, геологическая интерпретация полученных плотностных разрезов носит неоднозначный характер. Результаты моделирования на основе данных лазерно-

го сканирования выглядят более достоверно и хорошо корреспондируют с имеющейся геологической информацией по интерпретационному профилю (рис. 9). Как видим, результаты проверки полученных результатов с использованием сведений о территории показывают правильность исходного предположения.

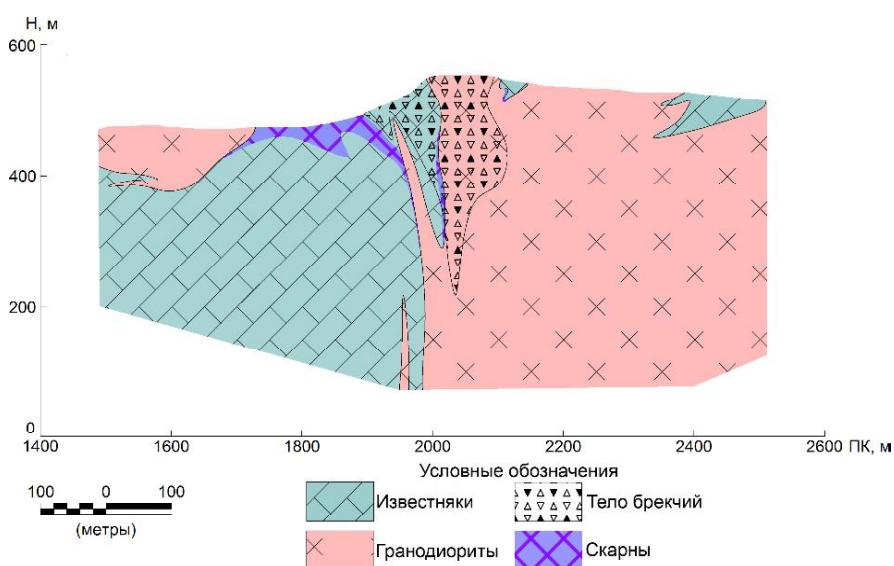


Рис. 9. Схематический геологический разрез по линии интерпретационного профиля /  
Fig. 9. Schematic geological section along interpretive profile line

**Выводы и рекомендации.** Применение воздушного лазерного сканирования в составе гравиразведочных работ с каждым годом

будет все более востребованным направлением в области геологоразведки. Результаты исследований приводят к основным выводам:

1. Применение воздушных лидаров является наиболее производительным и высокоточным способом для создания цифровой модели рельефа. Эту модель целесообразно применять для вычисления поправок за влияние рельефа местности в «центральной» и «ближней» зонах (условно до 300 м), охватывающих пункт гравиметрических наблюдений и его ближайшие окрестности.

2. В условиях сложного сильно расчлененного рельефа местности для определения поправок за рельеф недостаточно данных топографических карт М 1:25 000. Большинство топографических карт не обновляется, поэтому современные техногенные изменения в них не учтены (отработанные россыпи, карьеры, любое нарушение рельефа, которое влечет за собой перемещение масс).

3. Поправки, вычисленные на основе лазерного сканирования, являются наиболее достоверными относительно вычисленных по топографическим картам М 1:25 000. Расхождение между поправками, вычисленными с использованием данных лазерного сканирования и топоданных 1:25 000 (без использования данных лазерного сканирования), показывает, что использование только материалов М 1:25 000 в условиях сложного сильно расчлененного рельефа местности не

может давать адекватных результатов учета влияния рельефа местности.

4. При отсутствии данных лидарного сканирования за пределами гравиметровой съемки возможна комбинация из нескольких гридов высот, имеющих разную точность и детальность. Расчет поправок за рельеф может быть в виде совмещения данных топокарт М 1:25 000 с данными лазерного сканирования. При этом лазерное сканирование используется для расчетов в «ближней» зоне, а рельеф с 1:25 000 карт – в «средней» и « дальней» зонах (где влияние микрорельефа ничтожно). В качестве альтернативы для « дальней» зон рекомендуется использовать модели SRTM с ячейкой 1x1 arcsec.

Помимо непосредственного использования данных воздушного лазерного сканирования при выполнении гравиразведочных работ необходимо отметить высокую востребованность этих же данных для разработки проектов освоения месторождения, мониторинга динамики объемов вскрышных работ и подобных задач. Эта многовариантность востребованности существенно снижает затраты на собственно информационное обеспечение гравиразведки и открывает широкие перспективы для экономически обоснованного внедрения данного метода в практику освоения новых месторождений.

## Список литературы

1. Долгаль А. С., Костицин В. И. Гравиразведка: способы учета влияния рельефа местности: учеб. пособие. Пермь: Пермский гос. университет, 2010. 88 с.
2. Долгаль А. С., Новоселицкий В. М., Бычков С. Г., Антипов В. В. Компьютерная технология определения поправок за влияние рельефа земной поверхности при гравиметрической съемке // Геофизический вестник. 2004. № 5. С. 10–19.
3. Капралов Е. Г., Кошмарев А. В., Тиунов В. С. Основы геоинформатики / под ред. В. С. Тиунова. М.: Академия, 2004. 480 с.
4. Малеванная М. С., Рыльский И. А. Наземные лазерные методы – новые подходы к информационному обеспечению географических исследований // Геодезия и картография. 2014. № 4. С. 23–34.
5. Петровский А. П. Федченко Т. А., Ткачук А. Ю. Использование топографических данных SRTM для расчета поправки за влияние рельефа местности на гравитационное поле // Геофизический журнал. 2012. № 6, Т. 34. С. 147–153.
6. Симанов А. А. Учет влияния рельефа местности при высокоточной гравиметрической съемке на основе геоинформационных технологий // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы региональной науч.-практич. конф. Пермь: Перм. ун-т, 2008. С. 220–223.
7. Уайтхед Н. Руководство пользователя к программе Oasis Montaj 7.2. Торонто, 2012. 104 с.
8. Chen Q. Airborne lidar data processing and information extraction // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007. Vol. 73. No. 2. P. 109–112.
9. Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L. A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2017. Vol. 83. P. 343–350.
10. Lohr U. Digital elevation models by laser scanning: Principle and applications // Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition. Copenhagen, Denmark, 1997. Vol. 1. P. 174–180.
11. Vosselman G., Dijkman S. 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2001. No. 34. P. 37–43.

**References**

1. Dolgal A. S., Kostitsin V. I. *Gravirazvedka: sposoby ucheta vliyaniya relyefa mestnosti: ucheb. posobiye* (Gravity exploration: ways to take into account the influence of the terrain: textbook. allowance). Perm: Perm State University, 2010, 88 p.
2. Dolgal A. S., Novoselitskiy V. M., Bychkov S. G., Antipin V. V. *Geofizicheskiy vestnik* (Geophysical Bulletin), 2004, no. 5, pp. 10–19.
3. Kapralov Ye. G., Koshkarev A. V., Tikunov V. S. *Osnovy geoinformatiki / pod red. V. S. Tikunova* (Fundamentals of geoinformatics / ed. V. S. Tikunov). Moscow: Academy, 2004, 480 p.
4. Malevannaya M. S., Rylskiy I. A. *Geodeziya i kartografiya* (Geodesy and cartography), 2014, no. 4, pp. 23–34.
5. Petrovskiy A. P. Fedchenko T. A., Tkachuk A. Yu. *Geofizicheskiy zhurnal* (Geophysical Journal), 2012, no. 6, vol. 34, pp. 147–153.
6. Simanov A. A. *Geologiya i poleznye iskopayemye Zapadnogo Urala: materialy region. nauch.-prakt. konf.* (Geology and minerals of the Western Urals: materials of the region. scientific-practical. conf.). Perm: Perm State University, 2008, pp. 220–223.
7. Saytkhed N. *Rukovodstvo polzovatelya k programme Oasis Montay 7.2* (User Guide for Oasis Montay 7.2). Toronto, 2012, 104 p.
8. Chen Q. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (Photogrammetric Engineering & Remote Sensing), 2007, vol. 73, no. 2, pp. 109–112.
9. Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (Photogrammetric Engineering & Remote Sensing), 2017, vol. 83, pp. 343–350.
10. Lohr U. *Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition* (Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition). Copenhagen, Denmark, 1997, vol. 1, p. 174–180.
11. Vosselman G., Dijkman S. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing), 2001, no. 34, pp. 37–43.

**Информация об авторе****Information about the author**

Груздев Роман Викторович, канд. геол.-минерал. наук, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: геофизика  
rogruzdev@mail.ru

Рыльский Илья Аркадьевич, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия. Область научных интересов: геодезия и картография  
rilskiy@mail.ru

**Information about the author**

Roman Gruzdev, candidate of geological and mineralogical sciences, Transbaikal State University, Chita, Russia. Scientific interests: geophysics

Ilya Rylsky, candidate of geographical sciences, senior researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia. Sphere of scientific interests: geodesy and cartography

**Для цитирования**

Груздев Р. В., Рыльский И. А. Применение воздушных лидаров в высокоточной гравиразведке (на примере Восточного Забайкалья) // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 2. С. 6–18. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-2-6-18.

Gruzdev R., Rylsky I. The use of airborne lidars in high-precision gravity prospecting (on the example of Eastern Transbaikalia) // Transbaikal State University Journal, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 6–18. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-2-6-18.

Статья поступила в редакцию: 01.02.2022 г.  
Статья принята к публикации: 09.02.2022 г.