

УДК 553.3 (571.55)
DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-12-25

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОПРАВОК ЗА РЕЛЬЕФ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ)

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS FOR CALCULATING TERRAIN CORRECTIONS BASED ON DIGITAL TERRAIN MODELS (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 имени М.В. Ломоносова,
г. Москва
rilskiy@mail.ru

I. Ryl'skiy,
Lomonosov Moscow State University,
Moscow

Исследование поправок за влияние рельефа местности является весьма востребованной и значимой процедурой при производстве высокоточных гравиметрических работ. Результаты подобных исследований позволяют определить оптимальные параметры для вычисления поправок за рельеф, что способствует уменьшению погрешности вычисления аномалии силы тяжести в редукции Буге и, соответственно, приводит к увеличению качества интерпретируемого материала. Поэтому совершенствование методики вычисления поправок за рельеф представляет особый интерес для гравиразведки и является весьма актуальным направлением в высокоточной съемке. Целью исследования является определение оптимальных параметров расчета поправок за рельеф при высокоточной гравиметрической съемке. Степень проработанности проблемы указывает на ряд нерешенных вопросов, которые в некоторой мере раскрыты авторами в результате проведенных расчетов и анализа цифровых гридов, графиков и прочих данных, участвующих в вычислениях поправок за рельеф.

В исследовании рассматриваются фактические материалы и методы определения поправок за влияние рельефа местности, полученные при производстве полевых высокоточных гравиметрических работ на одном из объектов Восточного Забайкалья. В ходе проведенного исследования приведены результаты определений поправок за рельеф, выполнены сопоставления поправок в разных зонах, проанализированы их количественные показатели, приведена статистика. С помощью математического моделирования построены матрицы (гриды) расчетных параметров. Результаты исследования наглядно продемонстрированы на диаграммах и в итоговых таблицах, что указывает на достоверность выполненного исследования. На основе проведенного исследования сделаны выводы и составлены рекомендации к методике вычисления поправок за влияние рельефа местности

Ключевые слова: гравиразведка; поправка за рельеф; цифровые модели рельефа; воздушное лазерное сканирование; зоны учета; рельеф местности; графики; Восточное Забайкалье; методика вычисления поправок; цифровые гриды

The study of corrections for the influence of terrain is a very popular and significant procedure in the production of high-precision gravimetric work. The results of such studies allow us to determine the optimal parameters for calculating terrain corrections, which helps to reduce the error in calculating the anomaly of the force of gravity in the Buge reduction and, accordingly, leads to an increase in the quality of the interpreted material. Therefore, the improvement of the methodology for calculating corrections for terrain is of particular interest for gravity exploration today and is a very relevant direction in high-precision surveying.

Thus, in this article, the purpose of the study is to determine the optimal parameters for calculating terrain corrections for during high-precision gravimetric surveying. The degree of elaboration of the study indicates a number of unresolved issues, which are to some extent disclosed by the authors as a result of calculations and analysis of digital grids, graphs and other data involved in calculating terrain corrections.

The article discusses the actual materials and methods for determining corrections for the influence of terrain, obtained during the production of high-precision field gravimetric work on one of the objects of the Trans-

baikal Territory. In the course of the study, the results of determining the terrain corrections are presented, comparisons of the corrections in different zones are made, their quantitative indicators are analyzed, and statistics are provided. With the help of mathematical modeling, matrices (grids) of calculated parameters are constructed. The results of the study are clearly demonstrated in the diagrams and in the final tables, which indicates the reliability of the study performed.

On the basis of the conducted research, conclusions are drawn and recommendations are made for the method of calculating corrections for the influence of terrain

Key words: gravity exploration; terrain correction; digital relief models; aerial laser scanning; accounting zones; terrain; graphs; Eastern Transbaikalia; correction calculation methodology; digital grids

Введение. При производстве детальных гравиметрических работ к точности вычисления поправок за влияние рельефа местности предъявляются высокие требования. Особого внимания заслуживает «центральная», или «ближняя» зона учета, где градиент поправок в пересеченной местности может достигать 0,5 мГал/100 м и более [8]. Примером аномальных градиентов поправок за рельеф выступает исследуемая территория, где на одном из гравиметрических пунктов отмечен градиент до 1,45 мГал/100 м. В этой связи определение поправок за влияние рельефа местности является *актуальной* задачей при проведении высокоточной гравirazведки.

Отсутствует унифицированная терминология и строгие границы для определения «ближней», «средней» (промежуточной) и «дальней» зон учета поправки за рельеф. Термин «центральная зона» воспринимается и трактуется учеными по-разному. В настоящем исследовании «центральная» зона выделяется внутри «ближней» зоны 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 [6]. Термином «радиус учета», или просто «радиус» будем называть расстояние, в пределах которого учитывается влияние рельефа местности на значение поправок в гравиметрические измерения. В пределах данного радиуса используются максимально подробные из доступных сведения о рельефе (цифровые модели рельефа, построенные по данным лазерного сканирования и открытых источников данных).

Одним из наиболее перспективных методов создания цифровой модели рельефа вблизи гравиметрического пункта является использование воздушного лазерного ска-

нирования, которое обеспечивает точное описание нерегулярных поверхностей и, по сравнению с другими методами, весьма производительно. Ряд исследователей отмечают эффективность использования лазерных сканеров только на открытых участках [2; 8]. Однако, благодаря современным подходам к съемке и постобработке материалов воздушного лазерного сканирования на залесённых территориях, удаётся получить качественный материал, пригодный для построения цифровых моделей под масштаб 1:2000 и крупнее [3; 5]. Именно поэтому данный метод применен в настоящей работе для получения исходных данных о рельефе при расчете поправки за рельеф.

В исследовании рассматриваются материалы и методы определения поправок за влияние рельефа местности при производстве высокоточных гравиметрических работ на одном из объектов Восточного Забайкалья.

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

Предметом исследования являются закономерности и связи поправок за рельеф в исследуемых зонах и радиусом зоны, в которой рассчитывается поправка для каждого из пунктов (далее – радиус учета).

Целью исследования является определение оптимальных параметров расчета поправок за рельеф при высокоточной гравиметрической съемке.

Задачи исследования:

– выполнить расчет поправок за влияние рельефа местности с разными радиусами учета от точки наблюдения;

– сопоставить результаты расчетов полных поправок за влияние рельефа местности в определенных зонах;

– привести статистику результатов вычислений поправок, построить графики зависимости поправок за рельеф от разных радиусов учета;

– проанализировать полученные результаты исследования;

– оценить возможность определения оптимальных параметров учета поправок за влияние рельефа местности с помощью данной методики на подобных объектах;

– привести рекомендации по определению поправок за рельеф.

Значимость исследования обусловлена тем, что на основе фактического материала (данные лазерного сканирования, наземные гравиметрические работы) выполнены расчеты, которые дают возможность определить оптимальные параметры вычисления поправок за влияние рельефа местности, при этом полученные результаты позволяют значительно повысить общую точность гравиразведочных работ.

Появление метода лазерного сканирования открыло возможность получения цифровых моделей рельефа с беспрецедентной точностью (до 10 см по высоте) и подробностью (шаг ЦМР 0,5...1,0 м) на значительные территории (до 10000 км² и более).

Рост детальности неизбежно сопровождается экспоненциальным ростом времени на выполнение необходимых расчетов для учета гравитационных поправок. Так, при использовании ЦМР с шагом 1 м (построенной по данным ВЛС) объем вычислений возрастает примерно в 625 раз по сравнению с использованием ЦМР, полученной по данным топографических карт масштаба 1:25000 (шаг 25 м).

Кроме того, стоимость 1 км² данных лазерного сканирования составляет 250...400 долл. США (в ценах 2021 г.), поэтому излишний охват площадей данным видом съемки может быть экономически нецелесообразен.

Степень разработанности исследования указывает на ряд нерешенных вопросов: отсутствует четкая терминология и жесткие границы для определения «ближней», «средней» (промежуточной) и «дальней» зон учета поправки за рельеф. Не полностью изучен вопрос о значимости определения поправок за рельеф в «центральной» зоне (условно 1...50 м). До сих пор в приоритете для рас-

четов поправок в «ближней» зоне в гравиразведке используются модели учета высот, полученные с помощью «крестов» и «звездочек», точность при использовании которых в горной местности существенно уступает моделям, построенным на основе воздушного лазерного сканирования. Компьютерное вычисление поправок за рельеф на основе цифровых моделей рельефа, полученных по данным воздушного лазерного сканирования, имеет большие перспективы и, по мнению авторов, является лучшим решением для обеспечения исследуемой местности поправками за рельеф при высокоточных гравиметрических работах. Поэтому любые исследования в данном направлении являются актуальными и вносят существенный вклад в развитие технологий учета поправок за рельеф.

В основу *методологии исследования* положены принцип всесторонности, объективности, а также практические и теоретические методы. В работе приведены данные полевых исследований, выполненных согласно методическим указаниям инструкции по гравиразведке¹, пособия к модулю обработки в Geosoft Oasis Montaj (GravityTerrainCorrections) [10] и собственные производственные наработки. Полученные результаты определений поправок за рельеф сопоставлены и проанализированы, приведена статистика. С помощью математического моделирования построены матрицы (гриды) расчетных параметров. Результаты исследования наглядно продемонстрированы на диаграммах и в итоговых таблицах, что указывает на достоверность выполненного исследования.

Материалы и методы исследования. В рамках программы геологоразведочных работ на одном из объектов Восточного Забайкалья в 2020 г. выполнены площадные высокоточные гравиметрические исследования масштаба 1:25000. Территория работ расположена в низкогорной местности на высотах 450...850 м. Рельеф местности сильно расчлененный, формы рельефа представлены в основном долинными комплексами (с преобладанием аккумулятивных пойменных процессов), окруженными возвышенностями с крутыми, до 45 градусов, склонами с развитами обвально-осыпными процессами. В ряде участков представлены скальные стены

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

высотой до 70 м. Территория расположена в таежной зоне и на 70 % покрыта древесно-кустарниковой растительностью. Площадь участка гравиразведочных работ составила около 18 км².

Гравиметрические наблюдения проведены по сетке 200x100 м, в аномальных интервалах выполнено сгущение сетки до 100x50 м. В качестве измерителя использовался высокоточный гравиметр класса А, марки CG-5. Общее количество измерений составило более 2000 физических точек. Среднеквадратическая погрешность (СКП) определения наблюденных значений аномалии силы тяжести составила $\pm 0,011$ мГал. Привязка точек осуществлялась с помощью ГНСС-приемников марки LeicaGS14, погрешность планового определения положения составила $\pm 0,12$ м, высотного – $\pm 0,05$ м. Для учета влияния рельефа местности на участке гравиразведочных работ и за его пределами в радиусе более 2 км выполнено воздушное лазерное сканирование под масштаб 1:2000 (СКП по высоте – $\pm 0,12$ м). Весь цикл обработки гравиразведочных материалов, в том числе учет влияния рельефа местности, выполнен в программе Geosoft™.

Для вычисления поправок за влияние рельефа местности использованы две регулярные матрицы высот (гриды): локальная и региональная. Локальная матрица высот подготовлена на основе данных воздушного лазерного сканирования с ячейкой 1x1 м. За пределами локальной матрицы (на расстоянии более 1000 м от гравиметрической точки) вычисления выполнялись на основе региональной матрицы высот, подготовленной на основе общедоступной цифровой модели SRTM (1 с), приведенной к размеру ячейки 20x20 м. Характеристика и параметры SRTM моделей приводятся на открытых веб-ресурсах [7], их применение в гравиразведке отмечено в многочисленных публикациях [1; 2; 4; 9].

Активные методы съемок рельефа местности являются предпочтительными при выполнении работ по гравиразведке. К ним можно отнести воздушное лазерное сканирование и радиолокационную съемку (авиационного или космического базирования) [11; 12]. Основным преимуществом данных методов является возможность проникновения пучка электромагнитного излучения (инфракрасного – для лазерного сканирования,

радиолокационного – для радарной съемки) сквозь полог растительности (рис. 1) [6]. Пассивные методы съемки (стереосъемка) в видимом или инфракрасном диапазоне не дают желаемого результата ввиду невозможности непосредственного картографирования поверхности рельефа (вместо нее стереофотограмметрический метод дает поверхность видимой части растительного покрова, сам рельеф виден лишь в условиях отсутствия кустарников и деревьев).

Алгоритм вычисления поправок в Geosoft заключается в следующем: данные цифровой модели рельефа пересчитываются к ячейке сети, центрированной по пункту наблюдений, для которого выполняются вычисления. Поправка рассчитывается на основе вкладов «ближней», «промежуточной» и «дальней» зон. В «ближней» зоне (0...1 ячейка от точки наблюдений) алгоритм суммирует эффекты четырех треугольных кусочков, которые описывают поверхность между гравиметрическим пунктом и высотой в точке каждого диагонального угла. В промежуточной зоне (1...8 ячейки 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 (рис. 2).

Полная поправка за рельеф автоматически рассчитывается за счет суммирования вклада поправок в каждой зоне, основываясь на цифровых моделях локального и регионального рельефа.

Оценка точности определения поправок за влияние рельефа местности при компьютерном расчете в Geosoft Oasis Montaj возможна на основе генерации случайных смещений местоположения гравиметрических пунктов по координатам X и Y. Подобный способ рассмотрен в пособии [1]. 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 (1 ячейка модели ЦМР). В результате вычислений разность поправок за рельеф между фактическими и случайными смещениями изменяется в диапазоне -38...42 мГал и характеризуется СКП ± 5 мГал.

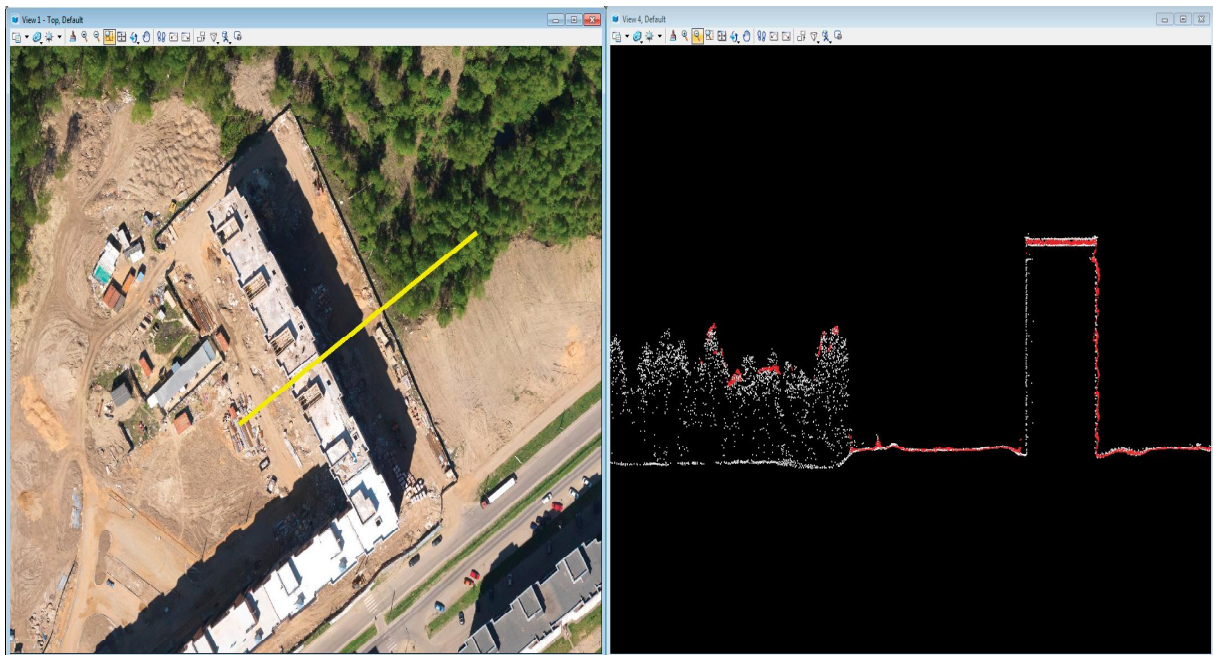


Рис. 1. Сравнение данных, полученных активным методом (белый цвет, воздушное лазерное сканирование) и пассивным методом (красный цвет, стереофотосъемка) / Fig. 1. Comparison of data obtained by the active method (white, airborne laser scanning) and the passive method (red, stereo photography)

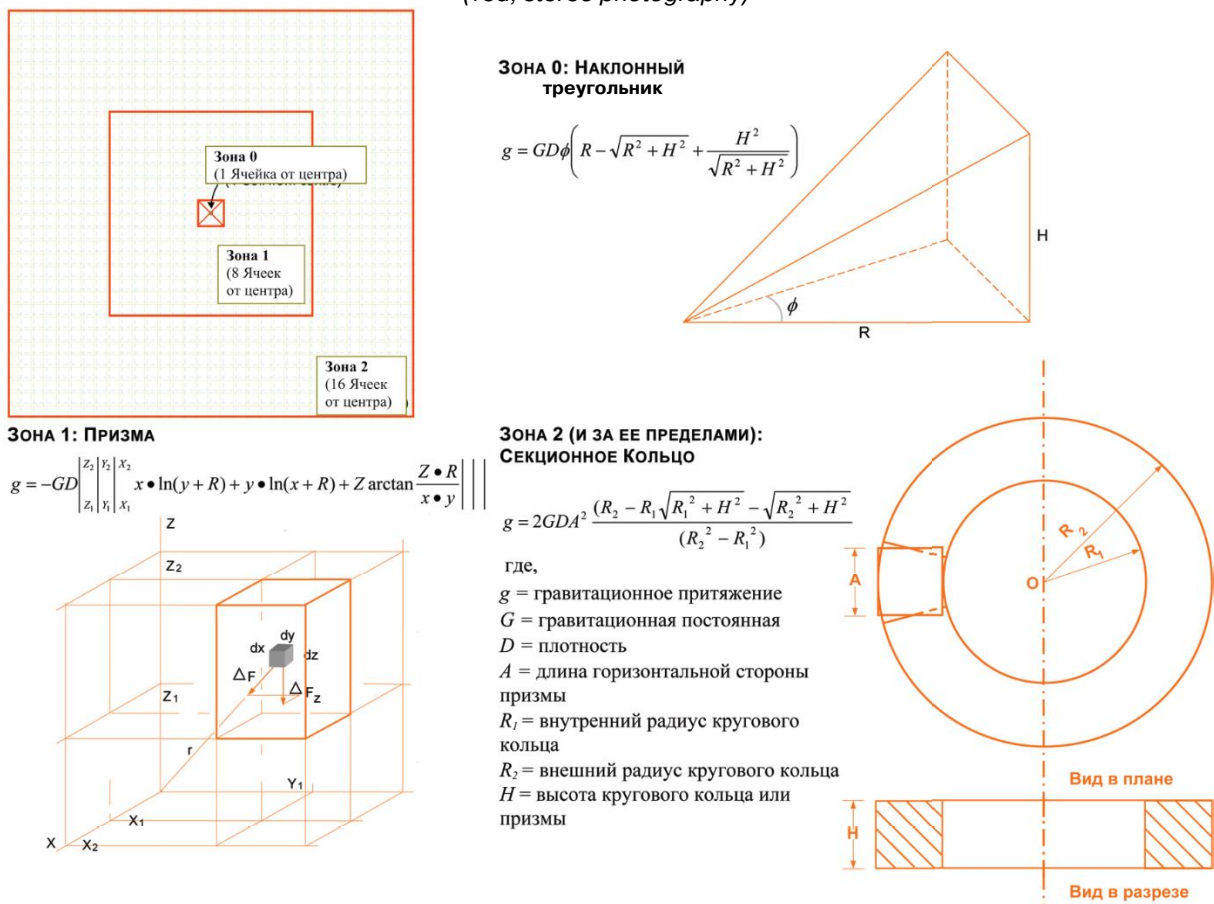


Рис. 2. Методика вычисления гравитационных поправок за рельеф в Geosoft Oasis Montaj / Fig. 2. Methodology of gravity terrain corrections calculation in Geosoft Oasis Montaj

В ходе обработки высокоточных гравиметрических материалов одной из основных задач является проведение специальных исследований по определению оптимальных параметров вычисления поправок за влияние рельефа местности. Это обусловлено тем, что на участке работ преобладает сложный, сильно расчлененный рельеф, где основное количество форм представлено долинными комплексами, окруженными возвышенностями с крутыми до 45 градусных склонами (рис. 3). На отдельных участках площади присутствуют скальные стены высотой до 70 м.

На построение высокоточных гравиметрических карт накладываются ряд высоких

требований по точности и детальности учета поправок за влияние рельефа местности, что вызывает необходимость переработки методики вычисления поправки за рельеф и подбор оптимальных параметров для ее расчетов.

Для выявления оптимальных параметров учета поправок за рельеф рассчитаны поверхности поправок, построенные с использованием разных радиусов учета влияния рельефа местности, с постепенным увеличением расстояния (или удалением) от точки наблюдения на 1...20000 м. Статистические параметры выполненных расчетов приведены в табл.1.

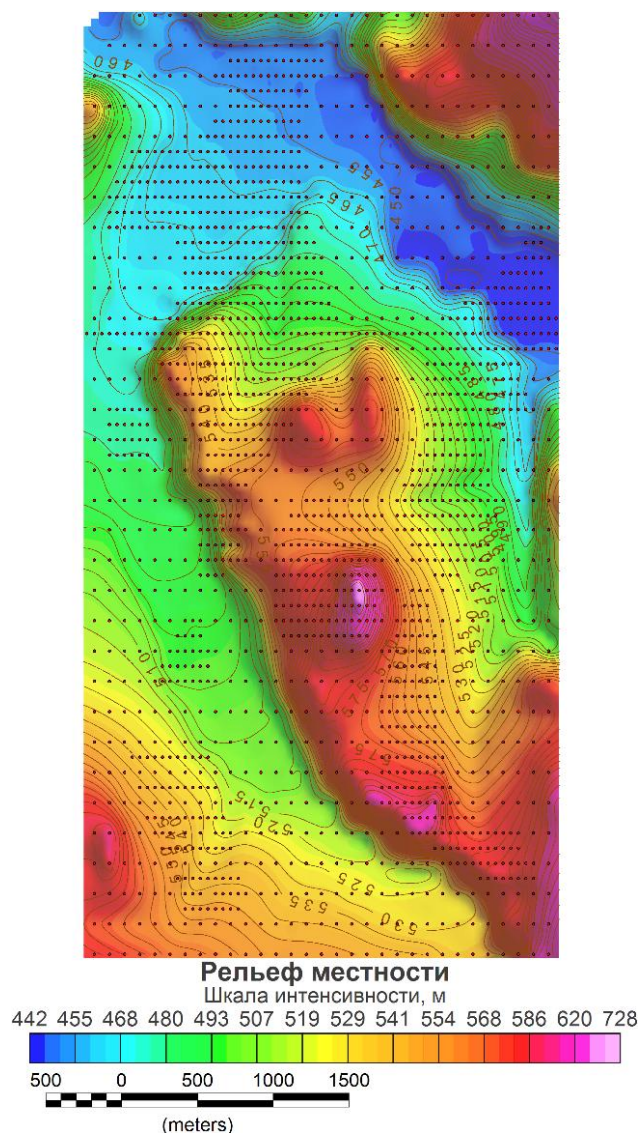


Рис. 3. Рельеф местности с гравиметрическими пунктами наблюдений (обозначены точками) /
Fig. 3. Elevation with gravimetric observation points (indicated by dots)

Таблица 1 / Table 1

*Статистические параметры матриц (гридов) для разных радиусов учета поправки за рельеф /
Statistical parameters of matrices (grids) for different radii of taking into account the terrain correction*

Радиус учета, м / Accounting radius, m	Параметр, мГал / Parameter, μ Gal				
	минимум / minimum	максимум / maximum	среднее значение / mean	медиана / median	стандартное отклонение / standard deviation
1	230	1341	411	384	142
5	231	1343	413	386	142
10	232	1352	418	391	143
15	233	1359	422	397	144
20	234	1364	426	401	146
30	236	1372	435	409	152
50	241	1401	450	420	166
75	246	1589	468	431	185
100	251	1844	485	442	204
150	257	2158	516	464	239
200	261	2312	544	480	268
300	273	2443	593	508	312
400	278	2655	634	528	346
500	288	2885	670	544	372
750	314	3230	740	578	422
1000	327	3441	791	608	458
2000	345	3830	908	685	532
5000	438	4294	1060	837	572
10000	522	4416	1144	924	564
20000	538	4459	1172	954	566

На основе результатов выполненных расчетов построены матрицы (гриды) поправок за влияние рельефа местности. Для визуализации на рис. 4 приведены иллюстрации нескольких гридов поправок за влияние рельефа с различными радиусами учета (10, 30, 50, 100, 200, 300, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000 м). Вычисление поправок за рельеф сводится к интегрированию по объему между поверхностью рельефа и некоторой «нормальной» поверхностью, находящейся на высоте гравиметрического пункта. Увеличение радиуса учета приводит к увеличению поправки за рельеф. Прове-

денное исследование подтверждает этот факт (табл. 1; рис. 4).

Результаты вычислений поправок с увеличением радиуса учета влияния рельефа местности (табл. 1; рис. 4) свидетельствуют о том, что функция поправки за рельеф при удалении от точки наблюдения возрастает нелинейно. Для оценки этой функции (при использовании разных зон учета влияния рельефа) выполнены расчеты поверхностей разности поправок между вкладами каждой зоны учета влияния рельефа местности в последующую расчётную.

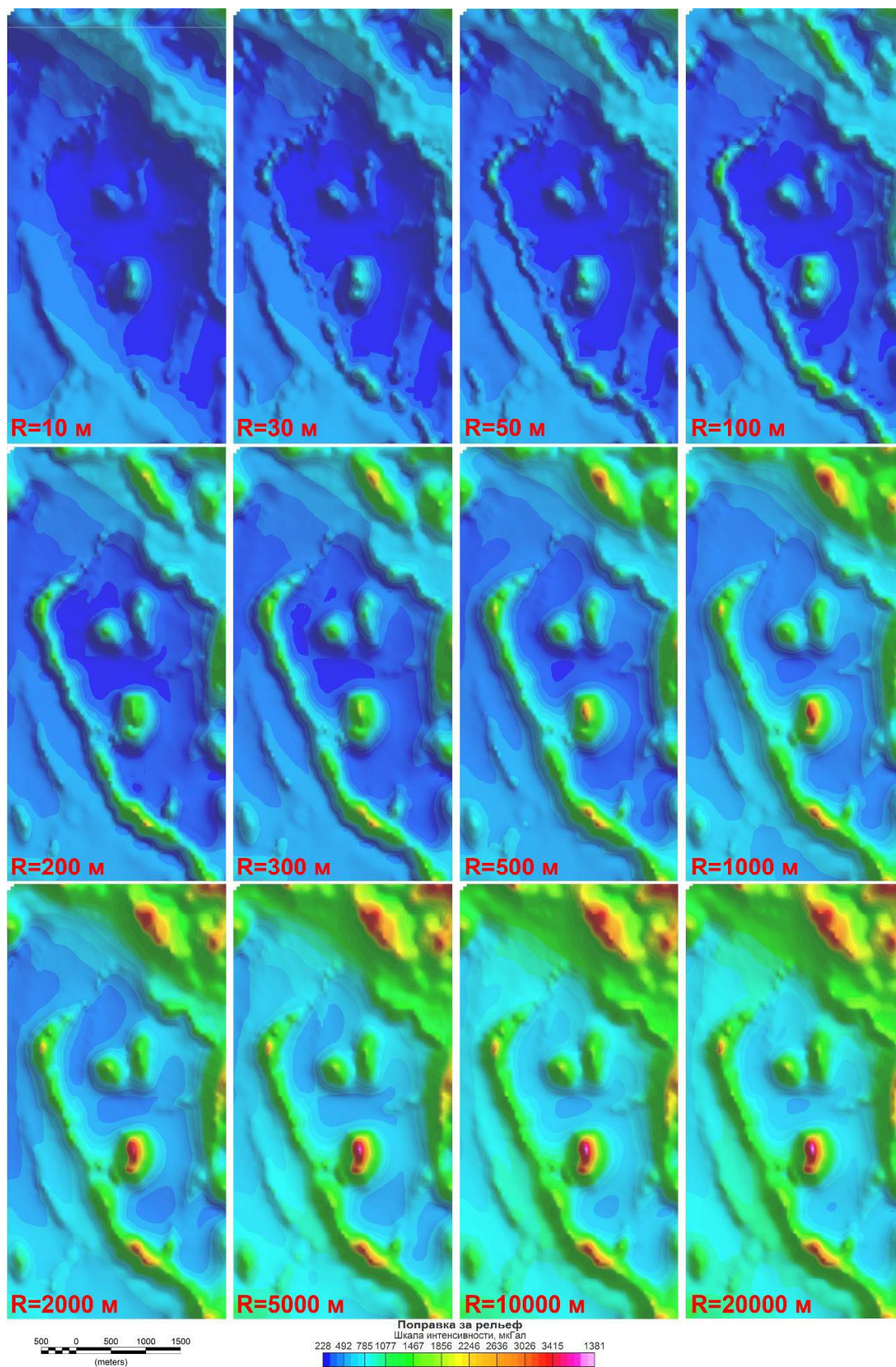


Рис. 4. Рассчитанные поправки за рельеф для разных радиусов учета (R) / Fig. 4. Calculated terrain corrections for different accounting radii (R)

Таблица 2 / Table 2

Статистические параметры матриц (гридов) для разности зон учета поправки за рельеф /
 Statistical parameters of matrices (grids) for the different zones of the terrain correction accounting

Зона учета, м / Zone of influence, m	Параметр, мкГал / Parameter, μ Gal				
	минимум / minimum	максимум / maximum	среднее значение / mean	медиана / median	стандартное отклонение / standard deviation
1-5	0	71	2	0	5
5-10	0	128	5	1	11
10-15	0	111	4	1	10
15-20	0	112	4	1	10
20-30	0	206	8	2	18
30-50	0	329	15	3	32
50-75	0	325	18	5	34
75-100	0	289	17	5	30
100-150	0	376	31	10	49
150-200	0	310	28	10	40
200-300	0	514	49	22	61
300-400	0	353	41	25	45
400-500	0	251	36	24	36
500-750	4	450	70	49	65
750-1000	5	312	51	34	48
1000-2000	11	661	116	72	100
2000-5000	55	541	153	148	74
5000-10000	14	159	83	78	42
10000-20000	13	69	29	24	14

В результате выполненных расчетов построены матрицы (гриды) разности поправок за влияние рельефа местности для разных зон учета (10...1; 30...10; 100...50; 200...100; 300...200; 500...300; 1000...500; 2000...1000; 5000...2000; 10000...5000; 20000...10000 м) (рис. 4). Здесь наглядно прослеживаются контрастные границы градиента поправок в зонах 1...1000 м, с удалением от точки наблюдения градиент приращения функции поправки за влияние рельефа уменьшается.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты вычисления поправок за влияние рельефа местности и исследование их приращения в разных зонах учета (от 1 м до 20 км) позволяют обосновывать подбор оптимальных параметров и методику расчета поправок за рельеф для данной территории производства гравиразведочных работ. Кро-

ме того, эти параметры позволяют обосновать ширину буферной зоны (за пределами зоны гравиразведки), в пределах которой необходимо подготовить и использовать данные о рельефе.

Основываясь на материалах проведенного исследования, можно отметить, что значение поправки за рельеф растёт с увеличением радиуса учета (радиуса зоны анализа) для точки наблюдения. Скорость этого роста напрямую связана с формами рельефа, плотностью учитываемого слоя и объемом масс, которые он включает. Далее представлены диаграммы, построенные на основе осредненных значений поправок для каждого радиуса учета и зон учета влияния рельефа местности (табл. 1; 2) с графиком градиента функции в разных масштабах.

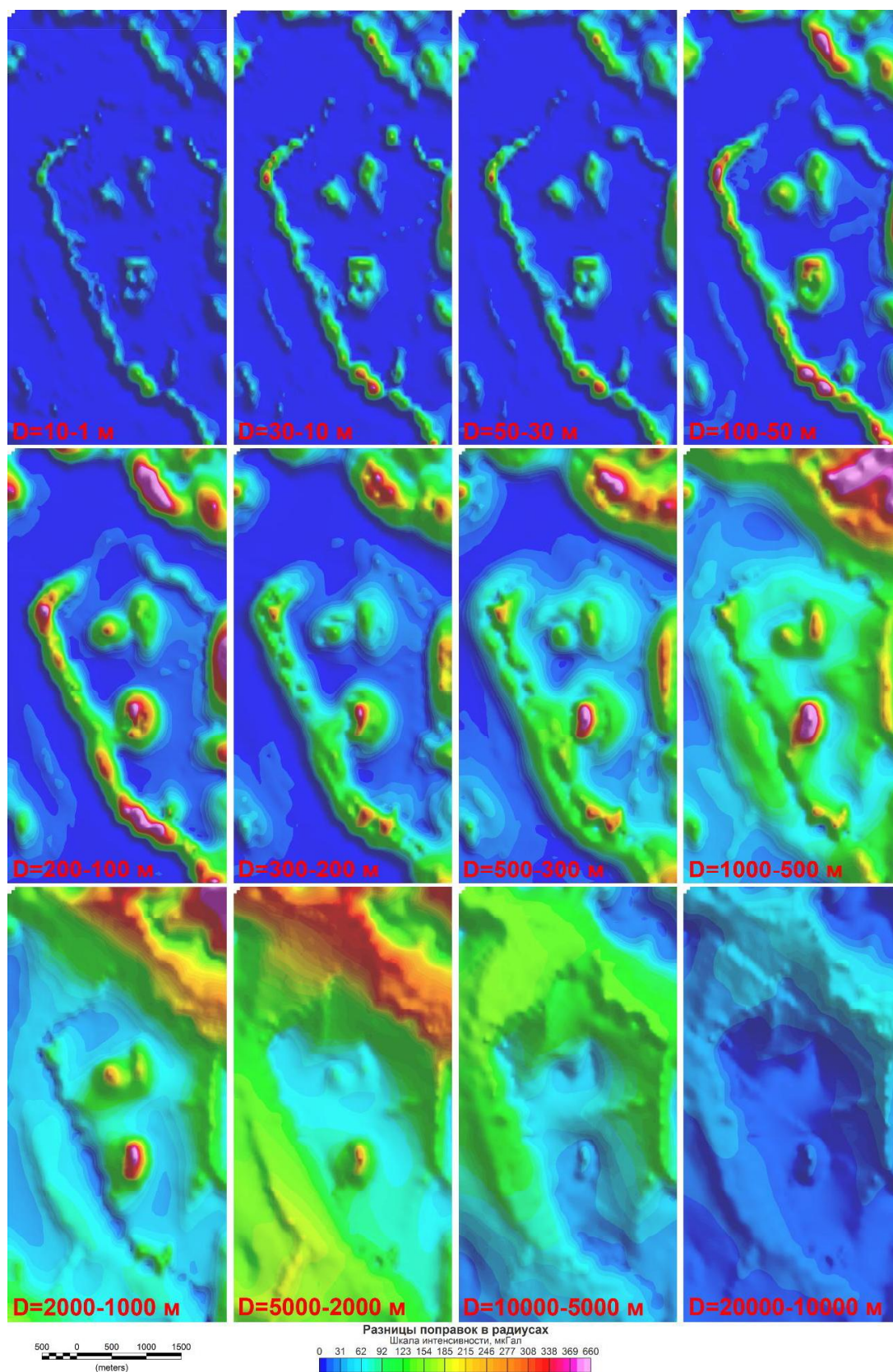


Рис. 5. Разность поправок за рельеф (D) для разных радиусов учета /
Fig. 5. Difference of terrain corrections (D) for different accounting radii

На рис. 6 наглядно представлено интегрирование поправок за рельеф при увеличении радиуса учета от 1 до 20000 м. Для данной территории исследования около 3х6 км (18 км²) с характерным рельефом местности (рис. 3) функция поправки за рельеф выходит на асимптоту в радиусах около 10...20 км, причем стандартное отклонение учета поправок за рельеф для разных радиусов учета (R) выходит на асимптоту на расстоянии около 5 км (рис. 7). После 2 км остаточные поправки (их разность 5000...2000 м) постепенно на-

чинают приобретать «гладкую» форму, в зонах 2...10 км это наиболее заметно (рис. 5; 6). Особое внимание уделяется зоне от 1...1000 м. Здесь прослеживается граница градиента поправок, после которой «крутизна» функции поправки за влияние рельефа значительно уменьшается. Это, в некоторой мере, является основанием для применения более грубых моделей для определения поправок за рельеф в зонах более 1000 м (например, при использовании цифровых моделей SRTM 1s).

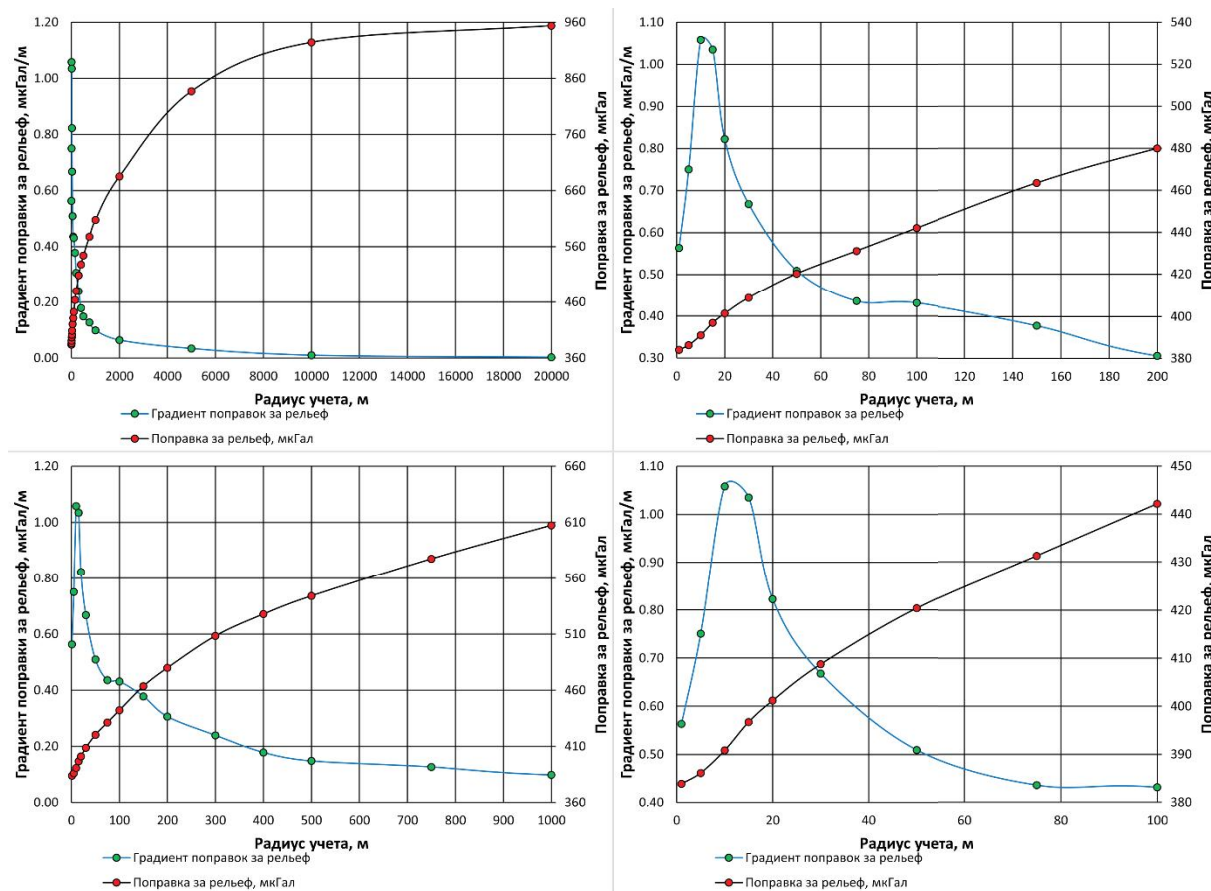


Рис. 6. Поправка за рельеф и ее градиент для разных радиусов учета /
 Fig. 6. Terrain correction and its gradient for different accounting radii

Статистические параметры в зонах учета от 10...20 км (табл. 2) свидетельствуют о том, что для данной территории достаточно учитывать рельеф местности в радиусе до 20 км. За пределами этой зоны изменения поправок за рельеф будут незначительны. СКП между значениями поправок за рельеф в зонах 10 и 20 км составила ±15 мкГал (более 2000 сопоставлений), соответственно в зонах учета более 20 км СКП будут близки к

погрешности определения поправки за рельеф при компьютерном расчете в Geosoft Oasis Montaj.

На определение локальной составляющей аномалии силы тяжести ограничение зоны учета влияния поправки за рельеф до 20 км скажется незначительно, так как часть неучтенных поправок будут сняты (в виде тренда) при вычитании из исходного поля региональной составляющей.

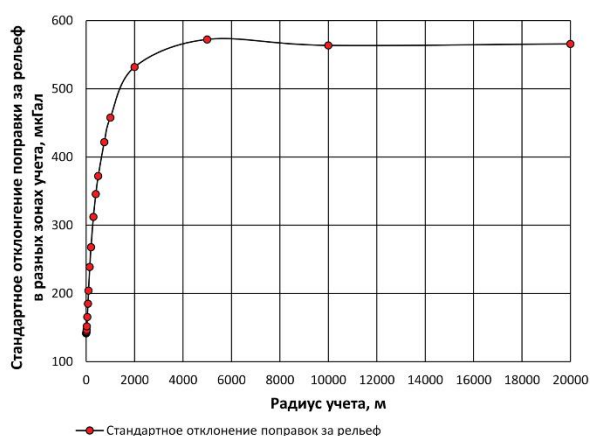


Рис. 7. Стандартное отклонение поправок за рельеф для разных радиусов учета (R) / Fig. 7. Standard deviation of terrain corrections for different accounting radii (R)

Одним из наиболее важных результатов исследования является полученная характеристика функции поправки за рельеф в «центральной» зоне, которая в данном исследовании входит в состав «ближней» зоны. Здесь (рис. 6) наглядно продемонстрирована контрастная граница градиента функции в радиусах 1...50 м, пик градиента приходится в радиусе около 10 м. Эта зона выделяется как наиболее чувствительная к изменениям формы рельефа, поэтому в условиях пересеченной местности в зоне до 50 м от точки наблюдения необходимо иметь подробную ЦМР (например, построенную по данным ВЛС).

Далее функция градиента поправки за рельеф постепенно спадает, по ее крутизне можно выделить несколько характерных площадок (1...50 м; 50...100 м; 100...300 м; 300...500 м; 500...1000 м; 1000...2000 м; 2000...5000 м; 5000...10000 м; 10000...20000 м). Последнее подтверждается разностью поправок за рельеф (D) в разных зонах учета (рис. 8). Здесь горизонтальный масштаб приведен в логарифмической шкале. При аппроксимации кривой поправок за рельеф ее наилучшим образом описывает степенная функция, что также доказывает нелинейность нарастания поправки за рельеф при удалении от точки наблюдения.

Зональность в распределении функции поправок за рельеф позволяет оптимизировать методику расчетов и, опираясь на проведенное исследование, использовать «детальные модели» ЦМР для «центральной»

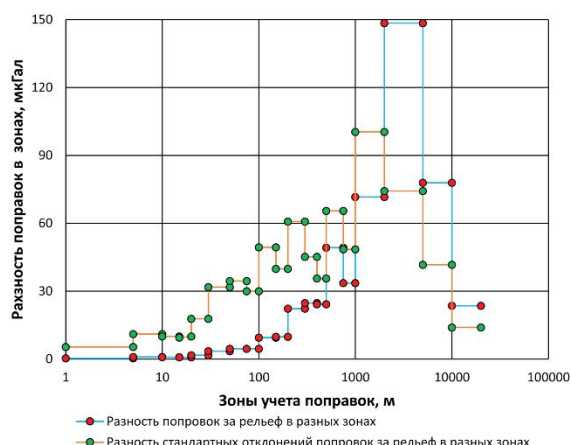


Рис. 8. Разность поправок за рельеф (D) в разных зонах учета / Fig. 8. Difference of terrain corrections (D) in different accounting zones

ной» (условно до 50 м) и «ближней» (условно до 100...300 м) зон, менее подробные для «средней» (или «промежуточной») зоны (условно 300...1000 м) и грубые модели для «дальней» зоны (условно более 1000 м) учёта. Такой подход к учету поправок за рельеф, вероятно, является оптимальным, технически пригодным и может быть использован не только в Geosoft, но и в других авторских программах, разработанных для вычисления гравитационных поправок за рельеф.

Выводы и рекомендации. В результате проведенного исследования для территории работ определены поправки за влияние рельефа местности и их приращения в радиусе учета 1...20000 м. Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1) функция поправки за рельеф – нелинейная, аппроксимируется функцией степени, при удалении от точки наблюдения всегда возрастает и приводит к увеличению значений поправки за рельеф;

2) для расчета интегрированной поправки за рельеф («центральная»; «ближняя»; «средняя»; «дальняя» зоны) рекомендуется использовать две цифровые модели рельефа: локальную и региональную. Построение локальной матрицы рельефа оптимально производить на основе данных воздушного лазерного сканирования (с шагом 1 м), построение региональной матрицы – на основе моделей SRTM 1s или ASTERDEM (с шагом 20...30 м). Вычисления поправки за рельеф по локальной матрице оптимально произво-

доть до 1000 м (она должна выходить за границы гравиметрической съемки до 1000 м), за пределами – по региональной матрице высот;

3) расчет поправки за рельеф рационально производить с оптимизацией, с удалением от пункта наблюдения, постепенно увеличивая размер расчетной ячейки матрицы. Ячейку локального грида в зоне до 50 м рекомендуется принимать равной от 1x1 м до 2x2 м (здесь требуется детальный высокоточ-

ный расчет поправки за рельеф), далее в зонах 50...100 м ячейка грида может составлять до 5x5 м. В зонах 300...1000 м рекомендуется использовать ячейку до 10x10 м. После 1000 м вычисления производятся на основе модели SRTM 1s, приведенной к размерам ячейки 20x20 м;

4) для небольших территорий (до 15...20 км²) со схожим рельефом местности оптимально подходит радиус учета поправки за рельеф до 20 км.

Список литературы

1. Долгаль А. С., Новоселицкий В. М., Бычков С. Г., Антипин В. В. Компьютерная технология определения поправок за влияние рельефа земной поверхности при гравиметрической съемке // Геофизический вестник. 2004. № 5. С. 10–19.
2. Долгаль А. С., Костицын В. И. Гравиразведка: способы учета влияния рельефа местности. Пермь: Перм. гос. ун-т, 2010. 88 с.
3. Капралов Е. Г., Кошкарёв А. В., Тикунов В. С. Основы геоинформатики: в 2 кн. Кн. 1. М.: Академия, 2004. 480 с.
4. 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.
5. Рыльский И. А., Груздев Р. В., Котова Т. В. Расчет гравитационных поправок с использованием данных воздушного лазерного сканирования // Интеркарто. 2021. Т. 27–2. С. 141–154.
6. Рыльский И. А., Тикунов В. С. Перспективы использования комплексов воздушного лазерного сканирования для картографирования лесов // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о земле». 2016. Т. 15, № 2073–3402. С. 104–113.
7. Сайт цифровых моделей SRTM. URL: <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/> (дата обращения: 02.10.2021). Текст: электронный.
8. Симанов А. А. Учет влияния рельефа местности при высокоточной гравиметрической съемке на основе геоинформационных технологий // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы регион. науч.-практ. конф. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2008. С. 220–223.
9. Симанов А.А. Проблема «Центральной» зоны при определении поправок за влияние рельефа местности // Шестые научные чтения памяти Ю. П. Булашевича. Екатеринбург: Институт геофизики Урал. отд-ния РАН, 2011. С. 332–334.
10. Уайтхед Н. Руководство пользователя к программе Oasis Montaj 7.2. Торонто, 2012. 104 с.
11. Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L. A method for optimizing height threshold when computing airborne laser scanning metrics // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2017. Vol. 12. P. 343–350.
12. 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. Dolgal A.S., Novoselitsky V.M., Bychkov S.G., Antipin V.V. *Geofizicheskiy vestnik* (Geophysical Bulletin), 2004, no. 5, pp. 10–19.
2. Dolgal A. S., Kostitsyn V. I. *Gravirazvedka: sposoby ucheta vliyaniya relyefa mestnosti: ucheb. posobiye* (Gravity survey: methods of taking into account the influence of the terrain: textbook. allowance). Perm: Perm State Un-ty, 2010. 88 p.
3. Kapralov Ye. G., Koshkarov A. V., Tikunov V. S. *Osnovy geoinformatiki: ucheb. posobiye dlya stud. vuzov* (Fundamentals of geoinformatics: textbook. manual for stud. universities: in 2 books. Book. 1). Moscow: Academy, 2004. 480 p.
4. Petrovsky A. P. Fedchenko T. A., Tkachuk A. Yu. *Geofizicheskiy zhurnal* (Geophysical Journal), 2012, no. 6, vol. 34, pp. 147–153.
5. Rylsky I. A., Gruzdev R. V., Kotova T. V. *Interkarto* (Intercarto), 2021, vol. 27-2, pp. 141–154.

6. Rylsky I. A., Tikunov V. S. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o zemle»* (Bulletin of the Irkutsk State University. Series "Earth Sciences"), 2016, vol. 15, no. 2073-3402, pp. 104-113.
7. *Sayt tsifrovyyh modeley SRTM* (SRTM digital models site. Available at: <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/> (date of access: 02.10.2021). Text: electronic.
8. Simanov A. A. *Geologiya i poleznyye iskopayemyye Zapadnogo Urala: materialy region. nauch.-prakt. konf.* (Geology and minerals of the Western Urals: materials of the region. scientific-practical conf.) Perm: Perm State Nat. Research Un-ty, 2008, pp. 220–223.
9. Simanov A.A. *Shestye nauchnyye chteniya pamyati Yu. P. Bulashevicha* (Sixth scientific readings in memory of Yu. P. Bulashevich). Yekaterinburg: Institute of Geophysics Ural. Branch of RAS, 2011, pp. 332–334.
10. Uaytkhed N. *Rukovodstvo polzovatelya k programme Oasis Montaj 7.2. Toronto* (Oasis Montaj User Manual 7.2. Toronto), 2012, 104 p.
11. Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (Photogrammetric Engineering & Remote Sensing), 2017, vol. 12, pp. 343–350.
12. Lohr U. *Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition* (Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition), 1997, pp. 174–180.

Информация об авторе

Груздев Роман Викторович, аспирант, кафедра прикладной геологии и технологии геологической разведки, 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, postgraduate, Applied Geology and Geological Exploration Technology department, Transbaikalian State University, Chita, Russian Federation. Sphere of 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. Определение оптимальных параметров для вычисления поправок за рельеф на основе цифровых моделей рельефа местности (на примере Восточного Забайкалья) // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 8. С. 12–25. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-12-25.

Gruzdev R., Rylsky I. Determination of optimal parameters for calculating terrain corrections based on digital terrain models (on the example of Eastern Transbaikalia) // Transbaikalian State University Journal, 2021, vol. 27, no. 8, pp. 12–25. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-12-25.

Статья поступила в редакцию: 14.10.2021 г.

Статья принята к публикации: 19.10.2021 г.