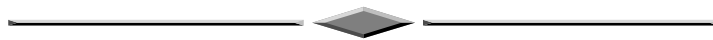


ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ



УДК 004.925.83+[528:629.783+528.38](569.3)
DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-5-16

Методика построения цифровой модели рельефа на основе технологии спутникового нивелирования для территории Ливана

М. Г. Мустафин¹✉, Х. И. Мусса¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

e-mail: mustafin_m@mail.ru

Аннотация. Актуальность настоящих исследований продиктована отсутствием для территории Ливана высотной геодезической сети. Методика исследований заключается в применении спутникового нивелирования, которое отличается от традиционного подхода частичным применением геометрического нивелирования и модели геоида Земли. При этом для выделенных на территории Ливана характерных участков аномалии высот определялись по результатам спутниковых определений и уточненных на основе геометрического нивелирования локальных квазигеоидов. В свою очередь эти локальные квазигеоиды создадут основу для построения путем интерполяции и экстраполяции данных (высот) локального квазигеоида для территории всего Ливана. Результаты для двух регионов Ливана уже были опубликованы в литературе. Данное исследование посвящено описанию работ на новом объекте (регион Аккар) для создания еще одной ключевой точки для последующего обобщения всех результатов. В регионе Аккар была построена локальная сеть прямоугольной формы с центральной точкой. Приведены результаты статистических спутниковых определений высот точек локальной сети и геометрического нивелирования. Данные геометрического нивелирования и высоты по EGM2008 обеспечили с помощью модели линейной регрессии выявление коэффициента отличия. Затем этот коэффициент был использован в методе интерполяции на основе ГИС-технологии для уточнения существующей цифровой модели рельефа (ЦМР) и модели локального квазигеоида. Разработана методика определения высотных отметок на территории Ливана, которая может быть полезной при создании высотного обоснования для других территорий.

Ключевые слова: спутниковые определения, геоид, локальный квазигеоид, модель геоида Земли, глобальные навигационные спутниковые системы, системы высот, геометрическое нивелирование, цифровая модель рельефа

Введение

Обеспечение высотной основы имеет первостепенное значение для широкого спектра объектов при их строительстве, эксплуатации и реконструкции. Следует отметить такие объекты, как, например, высотные сооружения или протяженные объекты, для которых критические неточности высотных отметок могут полностью зачеркнуть огромные за-

траты на возведение объекта или привести к его существенному удорожанию.

Вместе с тем некоторые регионы и страны сталкиваются с серьезными проблемами в области строительства из-за отсутствия высотной основы. Эта проблема решается в мире по-разному [1–3]. В целом, общая тенденция решения данного вопроса заключается в разработке моделей локальных квазигеоидов с использованием технологий

глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [4, 5].

В России методика спутникового нивелирования эффективно применялась в ряде исследований. При этом уточнялась модель геоида на основе создания локальных квазигеоидов и решались специальные инженерно-геодезические задачи [6].

За рубежом уже давно применяются различные методики, базирующиеся на спутниковом нивелировании [7–9]. Так, для уточнения высот проведены исследования в районе Тибетского нагорья в Китае (2018 г.) [10]. Интеграция данных ГНСС и геометрического нивелирования позволила значительно повысить точность и надежность определения высоты на сложном рельефе Тибетского нагорья. В Иране исследователи использовали комбинацию ГНСС-наблюдений и данных нивелирования для разработки уточненной модели квазигеоида, при этом подчеркнута

важность применения геометрического нивелирования. Подобные исследования выполнены также для территории Вьетнама [11].

Опираясь на существующий объем знаний, эта статья призвана внести свой вклад в исследования по дальнейшему развитию методик построения моделей квазигеоида.

Методика и объект исследований

Исследование проводилось в Аккаре, Северный Ливан. Этот регион имеет участки, рельеф которых характеризуется значительным перепадом высот (рис. 1). Эти обстоятельства являются отличительными от предыдущих исследований авторов [12], проведенных на относительно равнинных участках.

Район исследования ограничили квази-прямоугольной областью с четырьмя контрольными и центральной точками.

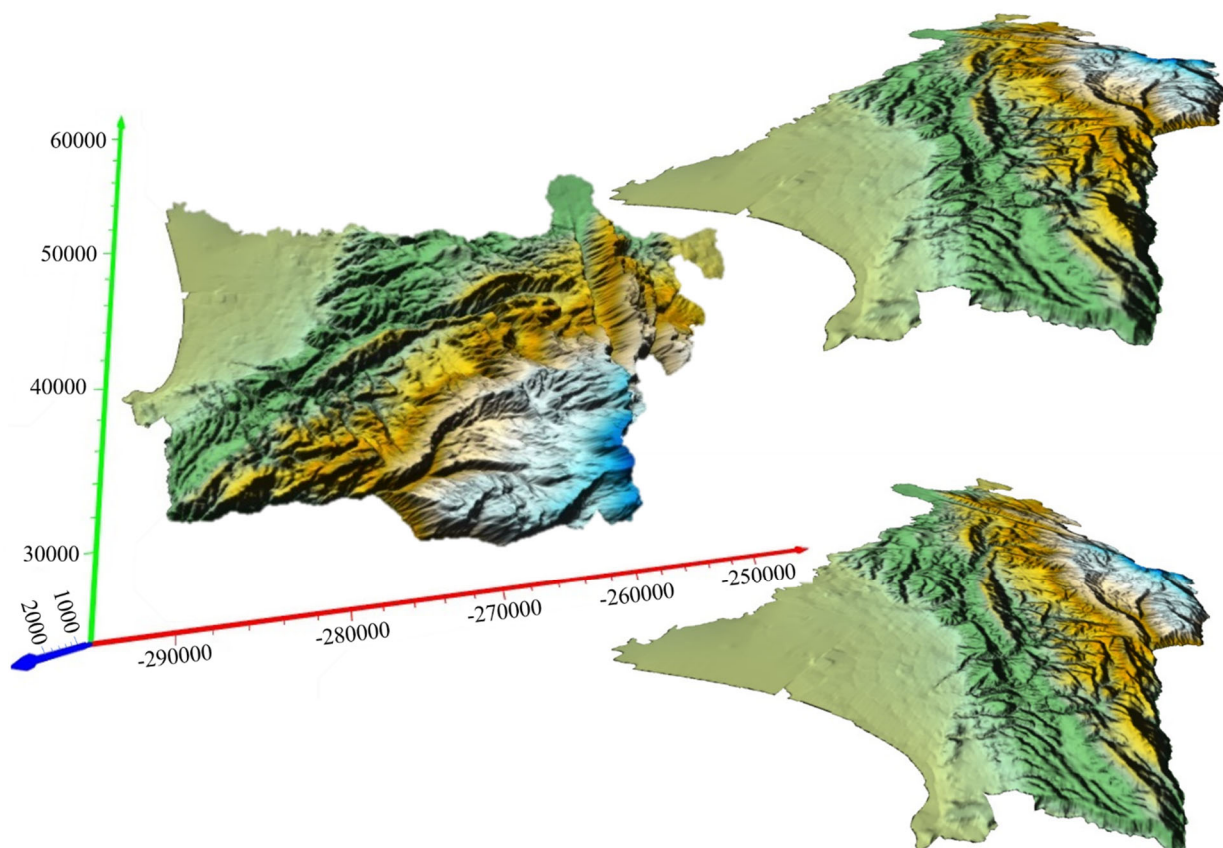


Рис. 1. 3D-модели региона Аккар, созданные с помощью ПК Surfer

Общая площадь экспериментального полигона составляет $1,000,000 \text{ м}^2$, с перепадами высот от 140 до 212 м. В табл. 1 показаны географические координаты точек полигона.

Географические координаты контрольных точек

Наименование точек	Широта	Долгота
PT_1	$N 34^{\circ}36'52,517''$	$E 36^{\circ}07'53,089''$
PT_2	$N 34^{\circ}36'39,532''$	$E 36^{\circ}08'13,637''$
PT_3	$N 34^{\circ}36'12,383''$	$E 36^{\circ}08'00,494''$
PT_4	$N 34^{\circ}36'34,617''$	$E 36^{\circ}07'08,980''$
CP	$N 34^{\circ}36'34,278''$	$E 36^{\circ}07'55,867''$

На этих пяти точках выполнены сеансы спутниковых определений в режиме статики. Перед обработкой базовых линий были проведены настройки проекта, а спутниковые определения отредактированы (удалены зашумленные данные и плохо отслеживаемые спутники). После обработки базовых линий проведена корректировка для выявления некачественных наблюдений в сети и оценок ошибок для всех наблюдений. Никаких некачественных наблюдений в сети не обнару-

жено. При обнаружении их следует удалять по одному, начиная с самого отрицательного, чтобы не искажалась статистика сети. После удаления одной из базовых линий корректировку необходимо выполнить заново и оценить новые ошибки [13–15].

На следующем этапе нормальные высоты были определены методом геометрического нивелирования с использованием двух видов маршрутов нивелирования – прямолинейного и криволинейного (рис. 2).

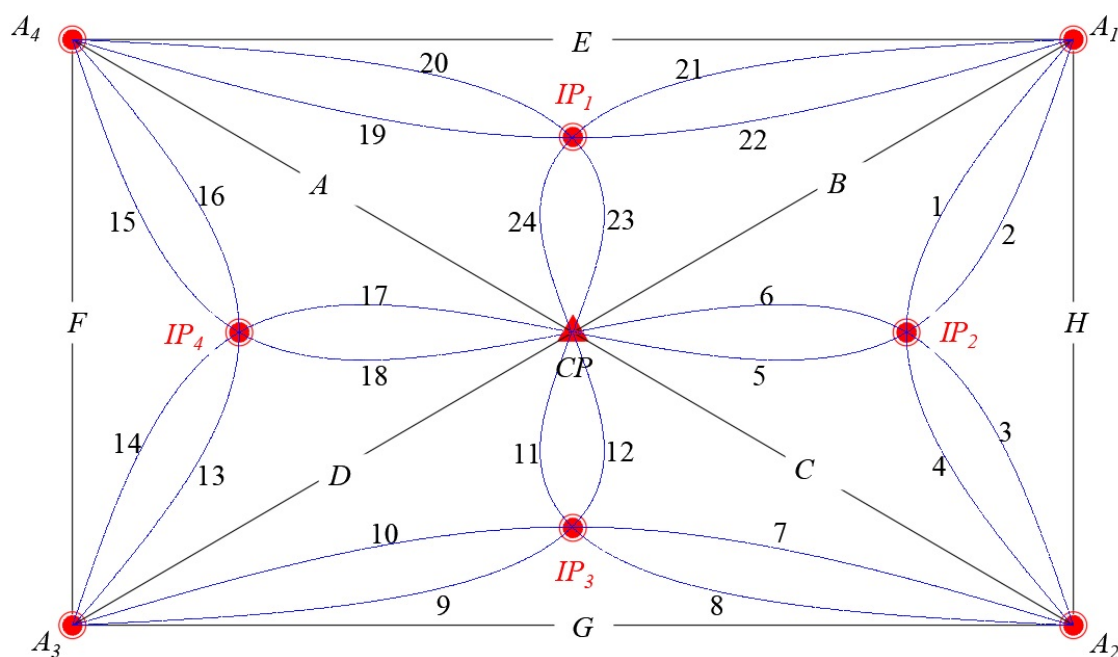


Рис. 2. Схема высотной сети:

A_1 – A_4 угловые точки полигона; A, B, C, D, F, E, H, G – прямолинейные нивелирные ходы; 1–24 – криволинейные нивелирные ходы

Неравномерное распределение массы внутри Земли, обусловленное разной плотностью горных пород, приводит к неравномерной гравитационной силе притяжения, что в свою

очередь приводит к волнистости геоида. Для оценки локальной волнистости геоида были проведены нивелировки по базовым линиям и по криволинейным маршрутам между точ-

ками базовых линий. Затем сравнивались различия в высоте. Таким образом выполнялась проверка на идентичность гравитационного поля. В целях достижения максимальной точности измерений выполнена корректировка результатов для уменьшения систематических ошибок, которые невозможно адекватно контролировать с помощью приборов или методов наблюдения [16]. Так, коллимационная ошибка цифрового уровня оценивалась посредством проверки коллимации, при этом также регистрировались температурная ошибка стержня и ошибка невязки в линиях уровня двойного пробега. Сеть, показанная на рисунке ниже, состоит из пяти выбранных точек, которые хорошо распределены, и центральной точки, соединяющей их все.

Результаты

Передача высотной отметки на точку A_1 выполнена геометрическим нивелированием от контрольной станции QDF7, имеющей известные координаты в стереографической проекции ($X = -276703,05$; $Y = 50591,71$; $h = 223,91$).

Следующим шагом было выполнение геометрического нивелирования по базовым

линиям. При этом, как было сказано выше, нивелирование проводилось по трем маршрутам (см. рис. 2). В табл. 2 показаны результаты измерения превышений между точками A_1 , CP (базовая линия) и $B, 2, 5, 21, 24$.

Результаты измерений показали разницу в конечных значениях. Если по пути $CP-A_1$ превышение составило 48,616 м, то по другим маршрутам оно оказалось примерно на 8 см меньше. Это говорит о волнистости геоида. Вместе с тем эта волнистость соизмерима с допустимой невязкой технического нивелирования [17, 18]. Следовательно, если прийти к единым усредненным значениям, то будет известна некая отметка, характерная для данной области. Для получения средних значений высот для данного полигона выполнено уравнивание, после которого возможно сравнение высот точек с величинами геодезической высоты и модели EGM2008 [19, 20].

Уравнивание высот проведено по методу наименьших квадратов [21–23]. Использовались результаты геометрического нивелирования для всего полигона, как представлено для одной базовой линии (см. табл. 2).

Таблица 2

Результаты определений превышений по базовым линиям $B, 2, 5, 21$ и 24 (A_1-CP)

Линии		Расстояние, км	Превышения, м	Вес измерений
точки	точки			
CP	A_1	1,024	48,616	0,977
A_1	IP_2	0,612	-15,526	1,953
CP	IP_2	0,611	33,004	1,958
CP	IP_1	0,458	9,369	2,183
A_1	IP_1	0,756	-39,168	1,323

Для базовой линии A_1-CP покажем нахождение поправок (V_e) к превышениям точек.

При условии, что высота точки A_1 равна 100 м, поправки составят следующие значения:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}; f = \begin{pmatrix} -0,0654 \\ -0,0168 \\ 0,0045 \\ 0,0015 \\ 0,0119 \end{pmatrix}; W_e = \begin{pmatrix} 0,9765 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,9528 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,9580 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,1833 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,3235 \end{pmatrix};$$

$$\Delta = \begin{pmatrix} -0,0115 \\ 0,0004 \\ -0,0036 \end{pmatrix}; V_e = \begin{pmatrix} -0,0673 \\ -0,0142 \\ 0,0052 \\ -0,0124 \\ -0,0239 \end{pmatrix},$$

где W_e – матрица весов измерений; B – матрица коэффициентов параметрических уравнений; f – вектор свободных членов (разница между измеренными и расчетными величинами).

Поправки к координатам определяются из выражения

$$\Delta = [B^T W_e B]^{-1} [B^T W_e f]. \quad (1)$$

Общие поправки к измеренным превышениям:

$$V_e = B\Delta - f. \quad (2)$$

Уравненные высоты точек полигона показаны в табл. 3. Такая же процедура была проделана для всех остальных точек полигона.

Таблица 3

Скорректированные нормальные высоты для точек (A_1 , CP), образующих базовую линию B , и точек (IP_1 , IP_2), принадлежащих двум другим путям

Точка	Нормальная высота
A_1	189,188
CP	140,639
IP_1	149,996
IP_2	173,648

Далее уравненные нормальные высоты, полученные в результате геометрического нивелирования, сравнивались с ортометрическими высотами EGM2008 и эллипсоидными высотами ГНСС в каждой точке. Затем волнистость геоида рассчитывалась из выражения

$$N = h - H, \quad (3)$$

где N – аномалия высоты; h – геодезическая высота; H – нормальная высота.

Вычисленные аномалии высоты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Аномалии высот

Точка	1 H -нивелирование, м	2 H -EGM2008, м	3 h -ГНСС, м	N (1–3)	N (2–3)
CP	140,639	139,252	164,5	23,861	25,248
A_1	189,188	187,686	212,957	23,769	25,271
A_2	169,376	167,909	193,228	23,852	25,319
A_3	212,455	210,945	236,286	23,831	25,341
A_4	140,066	138,538	163,769	23,703	25,231

Анализируя результаты, представленные в таблице, становится очевидным, что каждая точка полигона имеет вариацию значений высот. Эти расхождения подчеркивают наличие общей волнистости геоида, на что указывают различия между нормальными высотами, полученными в результате геометрического нивелирования, ортометрическими высотами EGM2008 и эллипсоидными высотами ГНСС [24–26]. Рассчитанные значения волнистости геоида дают ценную информацию о неравномерностях гравитационного поля Земли, на основе которой возможно построение локального квазигеоида [27, 28].

По графику (рис. 3) можно сделать заключение, что на исследуемой территории, характеризующейся значительным перепа-

дом высот, в условиях отсутствия гравиметрических данных, EGM2008 не позволяет получить нормальные высоты. Вместе с тем, как видно из рис. 3, обнаруживается корреляция этих данных, о чем свидетельствует сравнение (ГНСС–нивелирование). Также продемонстрировано сравнением ГНСС– EGM2008. Эти данные приведены не для того, чтобы зафиксировать феномен, который и теоретически и практически был ранее определен, например [29]. Однако, как было сказано во введении статьи, необходимо было на характерных районах Ливана определить зависимости нормальных высот от геодезических или аномалии высот, которые позволят на основе интерполяции и экстраполяции построить модель квазигеоида для всего Ливана.

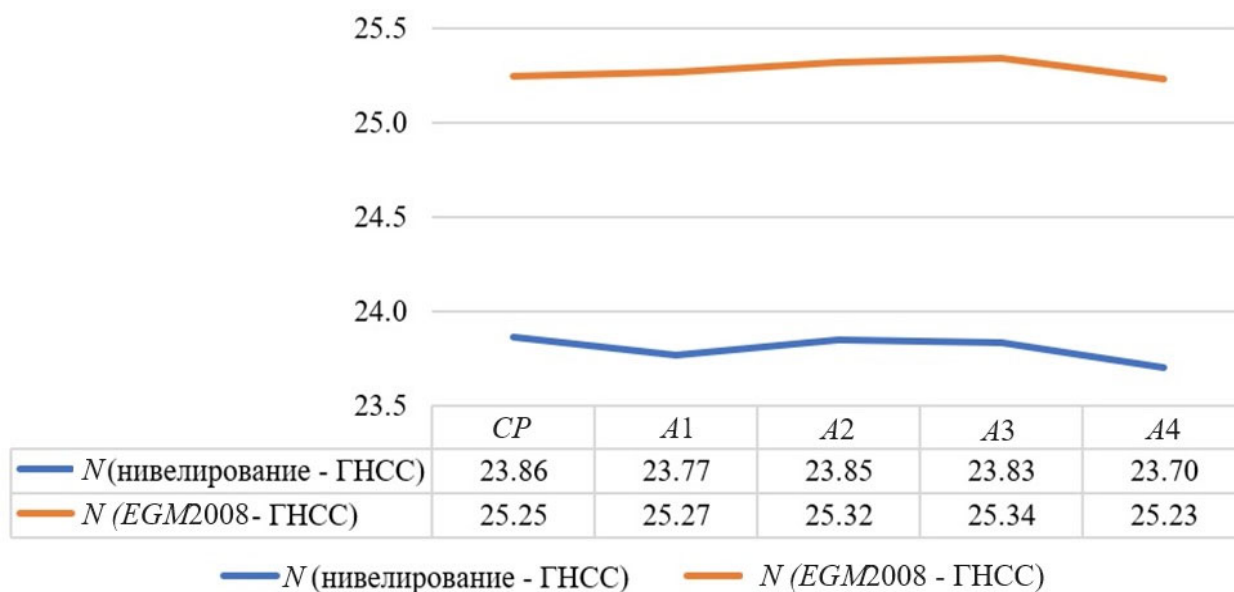


Рис. 3. Графики аномалий высот

Используя аномалию высоты N , рассчитанную по разнице между нормальной и эллипсоидными высотами, определили коэффициент [30–32]. Этот коэффициент, обозначаемый средним значением N , использовался в методе топографической интерполяции

с целью получения уточненной цифровой модели рельефа для региона Аккар с использованием программного обеспечения ГИС. На рис. 4 представлена полученная ЦМР с минимальной и максимальной зафиксированными высотами.

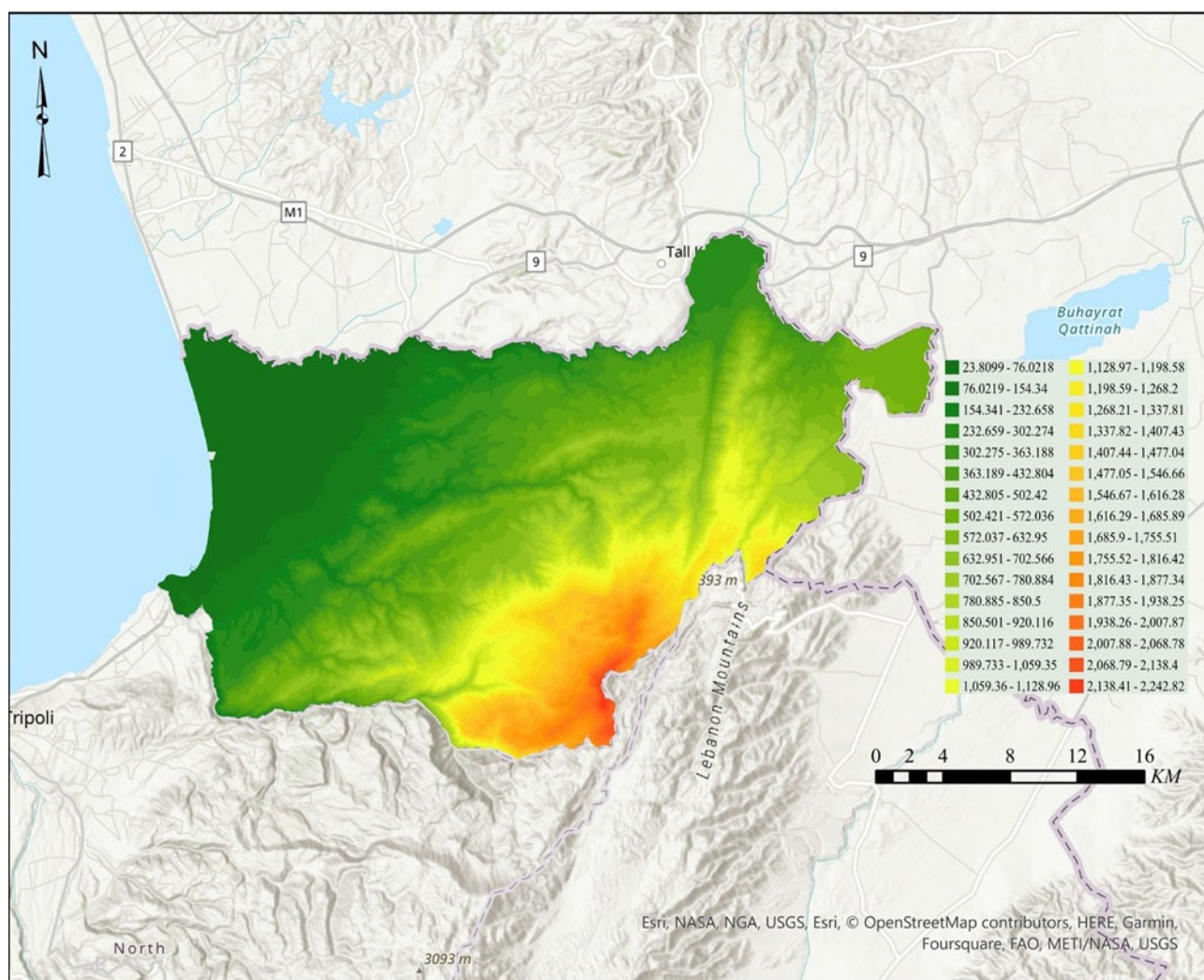


Рис. 4. ЦМР для региона Аккар по результатам проведенных измерений, созданных с помощью ГИС

Заключение

Предложена методика создания модели локального квазигеоида для региона Аккар в Ливане путем проведения комплекса геодезических измерений на экспериментальном полигоне и последующей их интерпретации. Выполнено геометрическое нивелирование по разным маршрутам между точками базовых линий, геоцентрические координаты которых определены на основе статических измерений по технологии ГНСС-измерений. Аномалия высоты, определенная на основе спутниковых определений и геометрического нивелирования, обеспечила внесение поправок в модель EGM2008 и построение модели локального квазигеоида. Поправочный коэф-

фициент был рассчитан путем усреднения значений аномалии высоты, полученных из соотношения данных ГНСС-измерений и геометрического нивелирования. В результате с использованием ГИС-технологии построена ЦМР к региону Аккар. При этом использовался метод топорастровой интерполяции с учетом определенного поправочного коэффициента. ЦМР обеспечивает улучшенное представление местности в регионе Аккар, позволяя более точно планировать и анализировать различные инженерные приложения, такие как развитие инфраструктуры, гидрологическое моделирование и экологические исследования [33].

Вместе с тем важно отметить, что построенная ЦМР представляет собой необходимый

элемент для дальнейших исследований и позволяет построение модели квазигеоида для всей территории Ливана. Для этого предстоит выявить зависимости между уже построенными ЦМР [34–36] для разных типов рельефа Ливана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богомолова Е. С. и др. Геодезическое обеспечение строительства вантовых мостов во Владивостоке // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 33–36.
2. Выстрчил М. Г., Гусев В. Н., Сухов А. К. Методика определения погрешностей сегментированных GRID-моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна // Записки Горного института. – 2023. – Т. 262. – С. 562–570.
3. Ганагина И. Г., Челнокова Д. С., Голдобин Д. Н. Создание модели квазигеоида на локальном участке средствами ГИС // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 14–25.
4. Гиенко Е. Г., Елагин А. В., Резниченко К. Ю. Результаты построения локальной модели квазигеоида на территории геодезического учебного полигона СГУГиТ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 8 т. (Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. Т. 1. – С. 252–260.
5. Долгачева А. С., Долгачева Т. А., Самаевская В. Д. Методы интерполяции в vertical mapper для создания цифровых моделей рельефа // Огарёв-Online. – 2023. – Т. 187, № 2. – С. 10.
6. Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н. Моделирование высот квазигеоида на локальных участках земной поверхности по результатам разложения в обобщенный ряд Фурье // Гироскопия и навигация. – 2020. – Т. 28, № 4. – С. 82–94.
7. Кузин А. А. Выделение оползнеопасных территорий на основе методов нейронных сетей // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 46–51.
8. Кузин А. А., Филиппов В. Г. Разработка алгоритма выбора метода и геодезического оборудования в зависимости от скорости оползневых смещений на примере Миатлинской ГЭС // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 4. – С. 22–37.
9. Малков А. Г., Брыскин Р. М. Современная методика высокоточного геометрического нивелирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 9 т. (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. Т. 1, № 2. – С. 32–38.
10. Li J., WenBin S., Xuhua Z. Direct regional quasi-geoid determination using EGM2008 and DEM: A case study for Mainland China and its vicinity areas // Geodesy and Geodynamics. – 2015. – Vol. 6, № 6. – P. 437–443.
11. Li Y., et al. Integration of GNSS and precise leveling for a refined quasi-geoid model in the Tibetan Plateau // Journal of Geodesy. – 2018. – Vol. 92 (10). – P. 1147–1160.
12. Marian D. P., Marian R. R. Performing Some Analysis on DEM Using the Surfer Software // Annals of the University of Petroșani, Mining Engineering. – 2016. – Vol. 17. – P. 91–99.
13. Mishra Upendra Nath, Jayanta Kumar Ghosh. Development of a geoid model by geometric method // Journal of The Institution of Engineers (India). – 2017. – Series A 98. – P. 437–442.
14. Mustafin M. G., Moussa H. The Determination of Plumb Line Deviation Using Satellite/Levelling Technique // International Conference on Geosynthetics and Environmental Engineering. – Singapor : Springer Nature Singapor, 2023. – P. 37–47.
15. Needham T. G., Braasch M. S. Impact of gravity modeling error on integrated GNSS/INS coasting performance // IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC). – 2017. – P. 1–10. – DOI 10.1109/DASC.2017.8102006.
16. Маркович К. И. Приведение результатов геометрического нивелирования в систему нормальных высот с использованием глобальных гравитационных моделей Земли // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79, № 5. – С. 2–9. – DOI 10.22389/0016-7126-2018-935-5-2-9.

17. Павлов Н. С., Санникова А. П. Предпосылки к проведению геодезических обследований технического состояния подводных переходов магистральных газопроводов // Маркшейдерия и недропользование. – 2016. – № 2 (82). – С. 61–63.
18. Ларионов А. А., Рудницкая Н. И. Создание локальной модели высот квазигеоида геометрическим методом // Земля Беларуси. – 2016. – № 1. – С. 36–41.
19. Liang W., Li J., Xu X., Zhang S., Zhao Y. A high-resolution Earth's gravity field model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, satellite altimetry, and EGM2008 // Engineering. – 2020. – Vol. 6 (8). – P. 860–878.
20. Marchenko A. N., Dzhuman B. B. Regional quasigeoid determination: an application to arctic gravity project // JGD. – 2015. – Vol. 18, No. 1. – P. 7–17. – DOI 10.23939/jgd2015.01.007.
21. Amiri-Simkooei A., et al. Development of a refined quasi-geoid model for Iran using GNSS and leveling data // Journal of Applied Geodesy. – 2019. – Vol. 13 (3). – P. 287–299.
22. Banasik P., Bujakowski K. The use of quasigeoid in leveling through terrain obstacles // Reports on Geodesy and Geoinformatics. – 2017. – Vol. 104 (1). – DOI 10.1515/rgg-2017-0015.
23. Barzaghi R., Carrion D., Pepe M., Prezioso G. Computing the deflection of the vertical for improving aerial surveys: a comparison between EGM2008 and ITALGEO05 estimates // Sensors. – 2016. – Vol. 16 (8). – P. 1168.
24. Falchi U., Parente C., Prezioso G. Global geoid adjustment on local area for GIS applications using GNSS permanent station coordinates // Geodesy and Cartography. – 2018. – Vol. 44 (3). – P. 80–88.
25. Gilardoni M., Reguzzoni M., Sampietro D. GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008 // Studia Geophysica et Geodaetica. – 2016. – Vol. 60. – P. 228–247.
26. Гусев В. Н., Блищенко А. А., Санникова А. П. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 173–179. – DOI 10.31897/PMI.2022.35.
27. Kostelecký J., Klokočník J., Bucha B., Bezděk A. Förste C. Evaluation of gravity field model EIGEN-6C4 by means of various functions of gravity potential, and by GNSS/levelling // Geoinformatics Fce Ctú. – 2015. – Vol. 14 (1). – P. 7–28.
28. Kuzin A. A., Palkin P. O. Coordinate method for determining position in geodetic monitoring of cracks // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1728, No. 1. – P. 012010.
29. Wu R., Wu Q., Han F., Liu T., Hu P., Li H. Gravity compensation using EGM2008 for high-precision long-term inertial navigation systems // Sensors. – 2016. – Vol. 16 (12). – P. 2177.
30. Павлова А. И. Анализ методов интерполирования высот точек для создания цифровых моделей рельефа // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 2. – С. 86–94.
31. Тарасян В. С., Дмитриев Н. В. Интерполяция распределенных данных горизонталей для получения цифровой модели рельефа [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1 (48). – С. 85. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4774>.
32. Ajvazi B., Kornél C. A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study of Rahovec, Kosovo // Geodesy and cartography. – 2019. – Vol. 45, No. 1. – P. 43–48.
33. Okolie C. J., Smit J. L. A systematic review and meta-analysis of Digital elevation model (DEM) fusion: Pre-processing, methods and applications // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2022. – Vol. 188. – P. 1–29.
34. Polidori Laurent, Mhamad El Hage. Digital elevation model quality assessment methods: A critical review // Remote sensing. – 2020. – Vol. 12, No. 21. – P. 3522.
35. Razas M. A., Hassan A., Khan M. U., Emach M. Z., Saki S. A. A critical comparison of interpolation techniques for digital terrain modelling in mining // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2023. – Vol. 123, No. 2. – P. 53–62.
36. Valkov V. A., Kuzin A. A., Kazantsev A. I. Calibration of digital non-metric cameras for measuring works // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1118, No. 1. – P. 012044.

Об авторах

Мурат Газизович Мустафин – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой инженерной геодезии.

Хиба Ибрахим Мусса – аспирант кафедры инженерной геодезии.

Получено 07.11.2023

© М. Г. Мустафин, Х. И. Мусса, 2024

Methodology for constructing a digital elevation model on the basis of satellite leveling technology for the Lebanese territory

M. G. Mustafin¹✉, H. I. Moussa¹

¹ St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: mustafin_m@mail.ru

Abstract. The relevance of this research is dictated by the lack of a high-altitude geodetic network for the territory of Lebanon. The research methodology involves the use of satellite leveling, which differs from the traditional approach by the partial use of geometric leveling and the Earth's geoid model. At the same time, for characteristic areas identified on the territory of Lebanon, height anomalies were determined based on the results of satellite determinations and local quasi-geoids refined on the basis of geometric leveling. In turn, these local quasi-geoids will create the basis for the construction by interpolation and extrapolation of local quasi-geoid data (heights) for the entire Lebanon area. Results for two regions of Lebanon have already been published in the literature. This work is devoted to a description of work at a new site (Akkar region) to create another key point for the subsequent generalization of all results. In the Akkar region, a local network was built, shaped like a rectangle with a central point. The results of static satellite determinations of the heights of local network points and geometric leveling are presented. Geometric leveling and elevation data from EGM2008 provided a linear regression model to identify the difference coefficient. This coefficient was then used in a GIS-based interpolation method to refine the existing digital elevation model (DEM) and local quasi-geoid model. A methodology has been developed for determining elevations on the territory of Lebanon, which can be useful in creating an elevation justification for other territories.

Keywords: satellite definitions, geoid, local quasi-geoid, Earth geoid model, global navigation satellite systems (GNSS), elevation systems, geometric leveling, digital elevation model (DEM)

REFERENCES

1. Bogomolova, Ye. S., & et al. (2013). Geodetic support for the construction of cable-stayed bridges in Vladivostok. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 204, 33–36 [in Russian].
2. Vystrchil, M. G., Gusev, V. N., & Sukhov, A. K. (2023). A method of determining the errors of segmented GRID models of open-pit mines constructed with the results of unmanned aerial photogrammetric survey. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 262, 562–570 [in Russian].
3. Ganagina, I. G., Chelnokova, D. S. & Goldobin, D. N. (2020). Creation of a quasigeoid model on a local section by GIS means. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(3), 14–25 [in Russian].
4. Giyenko, Ye. G., Yelagin, A. V., & Reznichenko, K. Yu. (2021). Results of building a local quasigeoid model on the territory of the geodetic training ground of SSUGT. In *Sbornik materialov*

Interexpo GEO-Sibir'-2021: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2021: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying] (pp. 252–160). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

5. Dolgacheva, A. S., Dolgacheva, T. A., & Samayevskaya, V. D. (2023). Interpolation methods in vertical mapper to create digital terrain models. *Ogarov-Online*, 2(187), p.10 [in Russian].

6. Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., & Goldobin D. N. (2020). Modeling the quasigeoid heights on local areas of the earth surface by the results of expansions into a generalized Fourier series. *Giroskopiya i navigatsiya [Gyroscopy and Navigation]*, 28(4), 82–94 [in Russian].

7. Kuzin, A. A. (2013). The isolation of landslide-prone territory using the neural network method. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 204, P. 46–51 [in Russian].

8. Kuzin, A. A., & Filippov, V. G. (2023). Development of an algorithm for choosing a method and geodetic equipment depending on the velocity of landslide displacements, by the example of the Miatlinskaya HPS. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 28(4), 22–37 [in Russian].

9. Malkov, A. G., & Bryskin, R. M. (2019). Modern technique of high-precision geometric leveling. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2019: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1, no. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2019: International Scientific Conference: Vol. 1, No. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 32–38). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

10. Li, J., WenBin, S., & Xuhua, Z. (2015). Direct regional quasi-geoid determination using EGM2008 and DEM: A case study for Mainland China and its vicinity areas. *Geodesy and Geodynamics*, 6(6), 437–443.

11. Li, Y., & et al. (2018). Integration of GNSS and precise leveling for a refined quasi-geoid model in the Tibetan Plateau. *Journal of Geodesy*, 92(10), 1147–1160.

12. Marian, D. P., & Marian, R. R. (2016). Performing Some Analysis on DEM Using the Surfer Software. *Annals of the University of Petroşani, Mining Engineering*, 17, 91–99.

13. Mishra Upendra Nath, & Jayanta Kumar Ghosh. (2017). Development of a geoid model by geometric method. *Journal of The Institution of Engineers (India), Series A* 98, 437–442.

14. Mustafin, M. G., & Moussa, H. (2023). The Determination of Plumb Line Deviation Using Satellite/Levelling Technique. *International Conference on Geosynthetics and Environmental Engineering* (pp. 37–47). Singapor: Springer Nature Singapor.

15. Needham, T. G., & Braasch, M. S. (2017). Impact of gravity modeling error on integrated GNSS/INS coasting performance. *IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 1–10). DOI 10.1109/DASC.2017.8102006.

16. Markovich, K. I. (2018). Reduction of geometric leveling results to a system of normal heights using the global gravity models of the Earth. *Geodezia i Kartografia [Geodesy and Cartography]*, 79(5), 2–9. DOI 10.22389/0016-7126-2018-935-5-2-9 [in Russian].

17. Pavlov, N. S., & Sannikova, A. P. (2016). Prerequisites of geodetic surveying of technical status of trunk gas pipeline"s underwater crossing. *Marksheyderiya i nedropol'zovaniye [Surveying and Subsoil Use]*, 2(82), 61–63 [in Russian].

18. Larionov, A. A., & Rudnitskaya, N. I. (2016). Creation of a local model of quasigeoid heights using the geometric method. *Zemlya Belarusi [Land of Belarus]*, 1, 36–41 [in Russian].

19. Liang, W., Li, J., Xu, X., Zhang, S., & Zhao, Y. (2020). A high-resolution Earth's gravity field model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, satellite altimetry, and EGM2008. *Engineering*, 6(8), 860–878.

20. Marchenko, A. N., & Dzhuman, B. B. (2015). Regional quasigeoid determination: an application to arctic gravity project. *JGD*, 18(1), 7–17. DOI 10.23939/jgd2015.01.007.

21. Amiri-Simkooei, A., & et al. (2019). Development of a refined quasi-geoid model for Iran using GNSS and leveling data. *Journal of Applied Geodesy*, 13(3), 287–299.

22. Banasik, P., & Bujakowski, K. (2017). The use of quasigeoid in leveling through terrain obstacles. *Reports on Geodesy and Geoinformatics, Vol. 104(1)*. DOI 10.1515/rgg-2017-0015.

23. Barzaghi, R., Carrion, D., Pepe, M., & Prezioso, G. (2016). Computing the deflection of the vertical for improving aerial surveys: a comparison between EGM2008 and ITALGEO05 estimates. *Sensors*, 16(8), P. 1168.
24. Falchi, U., Parente, C., & Prezioso, G. (2018). Global geoid adjustment on local area for GIS applications using GNSS permanent station coordinates. *Geodesy and Cartography*, 44(3), 80–88.
25. Gilardoni, M., Reguzzoni, M., & Sampietro, D. (2016). GECCO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60, 228–247.
26. Gusev, V. N., Blishchenko, A. A., & Sannikova, A. P. (2022). Study of a set of factors influencing the error of surveying mine facilities using a geodesic quadcopter. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 254, 173–179. DOI 10.31897/PMI.2022.35 [in Russian].
27. Kostelecký, J., Klokočník, J., Bucha, B., Bezděk, A., & Förste, C. (2015). Evaluation of gravity field model EIGEN-6C4 by means of various functions of gravity potential, and by GNSS/levelling. *Geoinformatics Fce Ctú*, 14(1), 7–28.
28. Kuzin, A. A., & Palkin, P. O. (2021). Coordinate method for determining position in geodetic monitoring of cracks. *Journal of Physics: Conference Series*, 1728(1), P. 012010.
29. Wu, R., Wu, Q., Han, F., Liu, T., Hu, P., & Li, H. (2016). Gravity compensation using EGM2008 for high-precision long-term inertial navigation systems. *Sensors*, 16(12), P. 2177.
30. Pavlova, A. I. (2017). Analysis of elevation interpolation for creating digital elevation models. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53(2), 171–177.
31. Tarasyan, V. S., & Dmitriyev, N. V. (2018). Interpolation of scattered data of countour lines for production of digital terrain model. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Journal of Don]*, 1(48), P. 85. Retrieved from <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4774> [in Russian].
32. Ajvazi, B., & Kornél, C. A. (2019). Comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study of Rahovec, Kosovo. *Geodesy and Cartography*, 45(1), 43–48.
33. Okolie, C. J., & Smit, J. L. (2022). A systematic review and meta-analysis of Digital elevation model (DEM) fusion: Pre-processing, methods and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 188, 1–29.
34. Polidori Laurent, & Mhamad El Hage. (2020). Digital elevation model quality assessment methods: A critical review. *Remote sensing*, 12(21), P. 3522.
35. Razas, M. A., Hassan, A., Khan, M. U., Emach, M. Z., & Saki, S. A. (2023). A critical comparison of interpolation techniques for digital terrain modelling in mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 123(2), 53–62.
36. Valkov, V. A., Kuzin, A. A., & Kazantsev, A. I. (2018). Calibration of digital non-metric cameras for measuring works. *Journal of Physics: Conference Series*, 1118(1), P. 012044.

Author details

Murat G. Mustafin – D. Sc., Professor, Head of the Department of Engineering Geodesy.
Hiba I. Moussa – Ph. D., Department of Engineering Geodesy.

Received 07.11.2023

© M. G. Mustafin, H. I. Moussa, 2024