ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCE

CENTRAL ASIAN SCIENTIFIC JOURNAL
ISSN 3135-3061
2026. №4 (32), Том 3. С. 26–32
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.24528805
Сайт журнала: https://cajournal.kz

УДК 528.48:622.271

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ РЕЛЬЕФА КАРЬЕРА ПО ПЯТИ ВЫСОТНЫМ ПРОФИЛЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ QGIS

А.А. Красняк[1], А.С. Туякбай[1], Д.С. Ожигин[2]
[1]Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан
[2]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

Красняк Алексей Андреевич — магистрант 2 курса Института землеустройства и архитектуры, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан.

Туякбай Асем Сериковна — PhD, старший преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан.

Ожигин Дмитрий Сергеевич — PhD, ассоциированный профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан.

Научный руководитель: Туякбай Асем Сериковна — PhD, старший преподаватель, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина.

© А.А. Красняк, А.С. Туякбай, Д.С. Ожигин, 2026

Аннотация: Цель исследования заключается в оценке пространственной неоднородности изменений рельефа карьера по разновременным цифровым моделям местности за 2022–2023 гг. В QGIS выполнено построение пяти фиксированных высотных профилей P1–P5, попарное сравнение отметок и классификация изменений с учётом вертикальной поправки 0,193436 м и рабочего порога ±0,372 м. Установлено преобладающее повышение отметок на профилях P1, P2 и P4, понижение на P3 и относительная стабильность большей части P5. Предложенная последовательность объединяет воспроизводимую геометрию сечений, численную оценку изменений и контроль ограничений при интерпретации результатов.

Ключевые слова: геодезический мониторинг, карьер, цифровая модель местности, QGIS, высотный профиль, БПЛА, разность высот, межэпоховое сравнение

Введение

Открытые горные выработки относятся к объектам с интенсивно меняющейся поверхностью. Развитие бортов, формирование уступов, перемещение и складирование горной массы приводят к тому, что отдельные участки карьера могут демонстрировать противоположно направленные изменения высот в пределах одного временного интервала. Для объективной оценки таких изменений недостаточно сопоставить только итоговую площадь выемки и накопления: необходимы локальные геометрические характеристики, показывающие распределение разностей высот вдоль конкретных направлений.

Фотограмметрические технологии на основе аэрофотосъёмки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяют получать цифровые модели поверхности с высокой пространственной детализацией. Возможности метода Structure-from-Motion (SfM)

для построения трёхмерных моделей местности раскрыты в работе Westoby и соавторов [1]. Вместе с тем точность получаемых моделей существенно зависит от качества опорных данных, геопривязки и параметров фотограмметрического уравнивания [2]. Следовательно, сравнение разновременных моделей требует не только наличия двух растров, но и проверки их сопоставимости.

При сопоставлении цифровых моделей местности (ЦММ) в геоморфологических исследованиях широко используется модель разностей высот DEM of Difference (DoD). Wheaton и соавторы [3] показали, что неопределённость геодезических данных должна учитываться до интерпретации объёмных изменений. В настоящей работе площадной подход дополнен методом повторяемых высотных профилей, который позволяет выделять характерные участки изменения рельефа и сравнивать их в единой системе показателей.

Цель статьи — разработать и апробировать практическую последовательность построения и количественного сравнения пяти высотных профилей на основе ЦММ карьера за 2022 и 2023 годы в QGIS. Для достижения цели выполнены фиксация геометрии профильных линий, извлечение отметок по двум эпохам, расчёт скорректированных разностей, классификация наблюдений и сопоставление результатов по отдельным сечениям.

Материалы и методы

Исходными материалами служили две цифровые модели местности одного карьерного участка, полученные по результатам аэросъёмок разных лет, и ортофотоплан, использованный для размещения линий. Данные исследовались в среде QGIS. На предварительном этапе осуществлялись проверка пространственного совмещения ЦММ, приведение растров к совместимой сетке и исключение областей отсутствующих данных (NoData). Для согласования растра применимы стандартные инструменты выравнивания QGIS [4].

На ортофотоплане определены пять сечений, охватывающих разные морфологические части карьера: P1 — юго-западную область, P2 — центральную, P3 — восточную, P4 — южную периферию, P5 — северо-западную часть. Такое размещение обеспечивает представление нескольких локальных типов изменений вместо оценки лишь одного направления. Размещение профилей показано на рисунке 1.



Рисунок 1 – Расположение пяти высотных профилей P1–P5 на ортофотоплане исследуемого карьера

Для воспроизводимого построения сечений геометрия линий сохранена в векторном слое GeoPackage с текстовым атрибутом name (P1–P5). В модуле Profile Tool использован режим Selected polyline, позволяющий получать графики по сохранённым объектам, а не по каждый раз заново нарисованным временным линиям [5]. Растры 2022 и 2023 годов подключались к одному профилю одновременно. Числовые результаты экспортировались в виде пар «расстояние от начала сечения — высотная отметка».

Для актуальных профилей P2–P5 сохранено по 1001 паре значений каждой эпохи. При обработке проверено совпадение расстояний во всех 1001 точке для соответствующей пары экспортов. Результаты P1 получены из ранее сформированной расчётной ведомости. Попарная сетка наблюдений формировалась вдоль одной и той же линии; шаг отсчёта менялся от профиля к профилю в зависимости от его длины, но оставался постоянным внутри сечения. Следовательно, рассчитанные ниже процентные доли описывают распределение точек вдоль линии, а не площадь всего карьера.

Исходная межэпоховая разность высот вычислялась как превышение отметки 2023 года над отметкой 2022 года. По ранее выполненной оценке пяти предположительно стабильных участков была принята систематическая вертикальная поправка c = 0,193436 м. Скорректированное изменение для точки i рассчитывалось по формуле:

$$\Delta H_i = H_{2023,i} - H_{2022,i} - 0{,}193436\ м \quad (1)$$

где $H_{2022,i}$ и $H_{2023,i}$ — отметки одной точки вдоль профиля по ЦММ соответствующих лет, м; ΔH_i — скорректированная разность высот, м. Положительная разность свидетельствует о повышении отметок поверхности, отрицательная — о понижении. Принятая поправка задаёт единый вертикальный сдвиг, но не устраняет возможные локальные расхождения разновременных ЦММ.

Для отделения выраженных изменений от небольших расхождений использован ранее определённый рабочий порог τ = 0,372 м. В класс повышения включались точки с $\Delta H_i > +\tau$, в класс понижения — с $\Delta H_i < -\tau$; при $|\Delta H_i| \le \tau$ изменение считалось находящимся в пределах рабочего порога. Этот критерий не отождествлялся с универсальным статистическим 95-процентным пределом обнаружения изменений, поскольку его величина зависит от процедуры оценки точности конкретного набора данных.

Среднее изменение высоты вычислялось как арифметическое среднее значений ΔH_i вдоль каждого профиля. Дополнительно определялись максимальные положительные и отрицательные разности, расстояния до экстремумов, число точек в каждом классе и процентное распределение классов относительно общего числа отсчётов. Такая схема обеспечивает сопоставимость результатов для линий неодинаковой длины, но не заменяет расчёт объёмов по всей площади DoD.

Результаты и обсуждение

Расчёт выявил принципиально разные типы изменений поверхности на пяти сечениях. Сводные геометрические характеристики представлены в таблице 1, а распределение отсчётов по рабочим классам — в таблице 2. Значения всех изменений получены после учёта систематической поправки. Обновлённые профили P2 и P3 имеют соответственно длины 214,007 и 298,108 м; данные ранее построенных сечений с иной геометрией в анализ не включались.

Таблица 1 – Основные параметры изменений высот по профилям P1–P5

Профиль	Длина, м	Среднее ΔH, м	Макс. повышение, м	Макс. понижение, м
P1	282,520	+12,923	+26,145	−2,122
P2	214,007	+5,668	+10,822	−6,225
P3	298,108	−23,519	—	−37,173
P4	248,674	+10,765	+20,163	−1,702
P5	191,421	−0,249	+1,049	−2,650

В таблице 1 прочерк в графе максимального повышения для P3 означает, что положительных разностей на этом профиле не наблюдалось. Такое представление исключает

ошибочное толкование наименее отрицательного значения как фактического повышения отметки.

Таблица 2 – Распределение точек профилей по классам изменения поверхности, %

Профиль	Повышение	Понижение	В пределах ±0,372 м
P1	87,70	9,40	2,90
P2	86,11	12,89	1,00
P3	0,00	100,00	0,00
P4	82,32	3,60	14,09
P5	3,80	19,78	76,42

Уже на уровне средних значений прослеживается неоднородность направленности изменений: P1, P2 и P4 характеризуются повышением, P3 — выраженным понижением, а P5 — близкой к нулю средней разностью. При этом усреднение не описывает полностью структуру изменения рельефа. Поэтому для каждого направления дополнительно сопоставлены кривые высот и положение экстремальных разностей.

Профиль P1: преобладающее повышение отметок

На линии P1 длиной 282,520 м получено среднее скорректированное изменение высоты +12,923 м. Максимальное повышение достигает +26,145 м, наибольшее понижение равно −2,122 м. Согласно классификации, 87,70 % отсчётов относятся к повышению, 9,40 % — к понижению и 2,90 % — к интервалу относительной стабильности. Сопоставление двух кривых (рисунок 2) показывает, что на ряде отрезков вертикальный разрыв между эпохами существенен и изменяется вдоль линии.

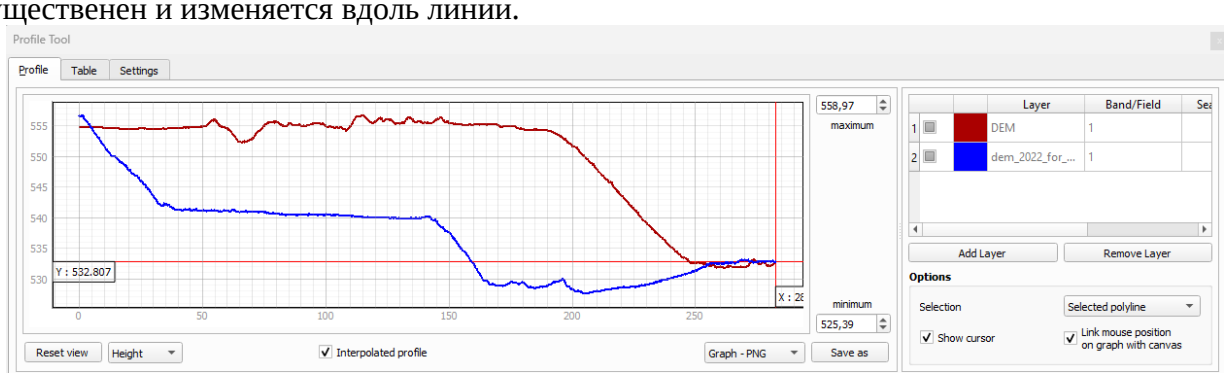

Рисунок 2 – Сравнение высотных отметок вдоль профиля P1 в QGIS Profile Tool

Преобладающее повышение по P1 может быть связано с изменением положения уступов или перераспределением материала в соответствующей части выработки. Однако профиль фиксирует геометрический результат по двум моментам времени, а не технологическую причину изменения, поэтому окончательное объяснение должно опираться на материалы горных работ и сопоставление ортофотопланов.

Профиль P2: повышение с локальной зоной понижения

Обновлённая длина P2 составляет 214,007 м. Средняя разность +5,668 м отражает доминирование повышения на 86,11 % точек. Положительный экстремум +10,822 м находится в 3,852 м от начала линии. Вместе с тем в её конечной части фиксируется локальное понижение до −6,225 м на расстоянии около 213,365 м. Такая смена знака подтверждает необходимость интерпретации распределения разностей по длине, а не только среднего значения (рисунок 3).

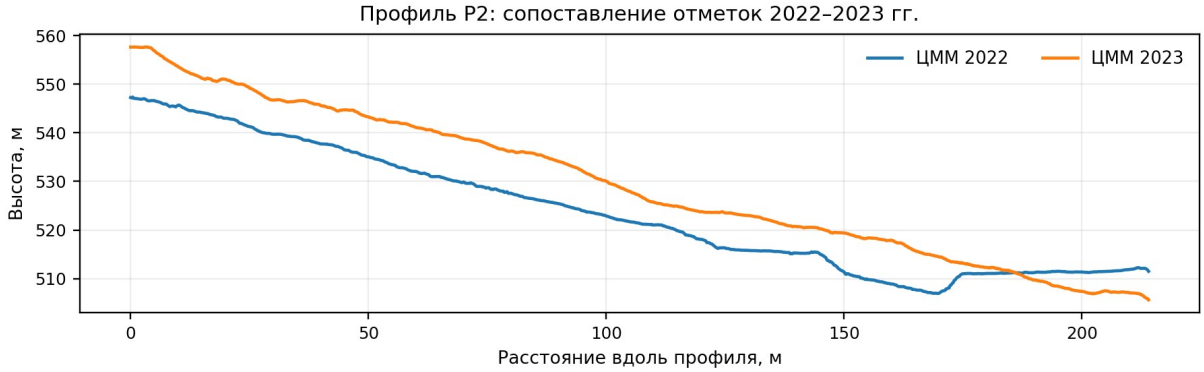

Рисунок 3 – Сопоставление ЦММ 2022 и 2023 годов по линии P2

Профиль P3: наиболее интенсивное понижение

Профиль P3 протяжённостью 298,108 м характеризуется наибольшим по модулю отрицательным средним изменением — −23,519 м. На всей линии 100 % отсчётов имеют ΔH < −0,372 м. Наибольшее снижение −37,173 м зафиксировано у конечной точки сечения. На рисунке 4 показано устойчивое расхождение двух высотных кривых на протяжении всего профиля.

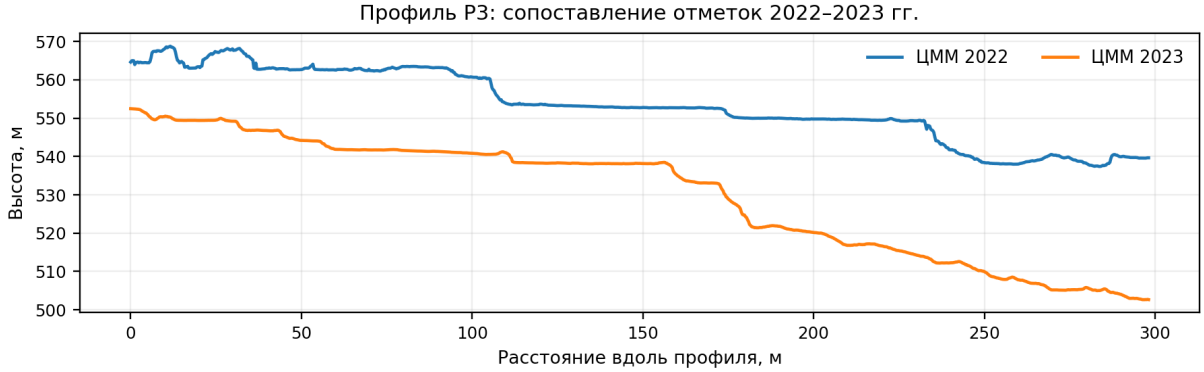

Рисунок 4 – Изменение высотного профиля P3 за 2022–2023 годы

Величины такого порядка могут соответствовать значительной переработке рельефа на участке активной добычи. Вместе с тем непрерывное понижение на всём протяжении сечения требует отдельного контроля геометрического совмещения моделей в этой зоне. Без проверки по независимым опорным данным и разновременным ортофотопланам величину −37,173 м следует рассматривать как измеренную модельную разность, а не как окончательно подтверждённую глубину фактической выемки.

Профиль P4: значительное повышение с локальными отклонениями

Для P4 длиной 248,674 м средняя разность высот составляет +10,765 м. Наибольшее повышение +20,163 м находится на отметке расстояния 220,822 м, а наибольшее понижение −1,702 м — около 55,454 м. Повышение преобладает на 82,32 % точек, доля относительно стабильных отсчётов составляет 14,09 %. На графике (рисунок 5) видно, что две кривые имеют неодинаковые формы и расхождения по отдельным участкам линии.

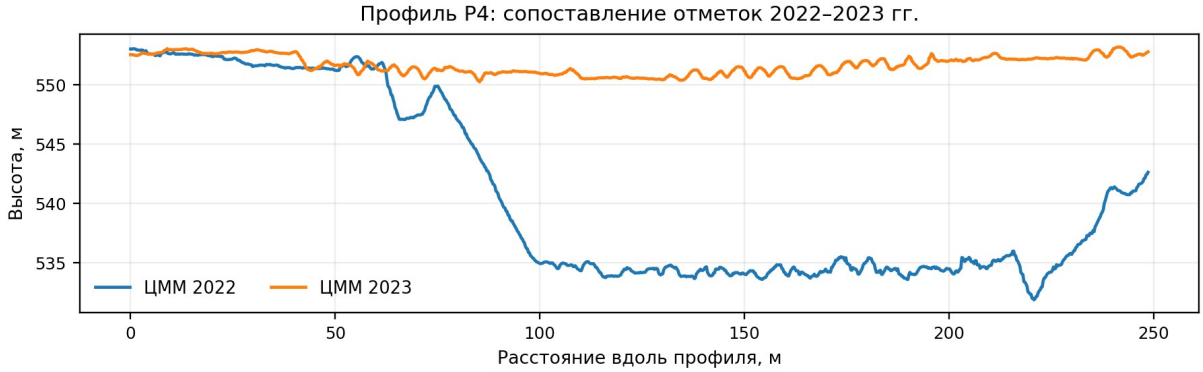

Рисунок 5 – Сравнение высотных отметок 2022 и 2023 годов по профилю P4

Профиль P5: преобладание изменений в пределах порога

Профиль P5 длиной 191,421 м существенно отличается от остальных. Средняя ΔH равна −0,249 м, а на 76,42 % точек абсолютное значение разности не превышает 0,372 м. При этом присутствуют локальное повышение до +1,049 м и понижение до −2,650 м, последнее наблюдается вблизи расстояния 61,829 м. Расположение двух кривых (рисунок 6) характеризуется наибольшим взаимным совпадением среди исследованных сечений.

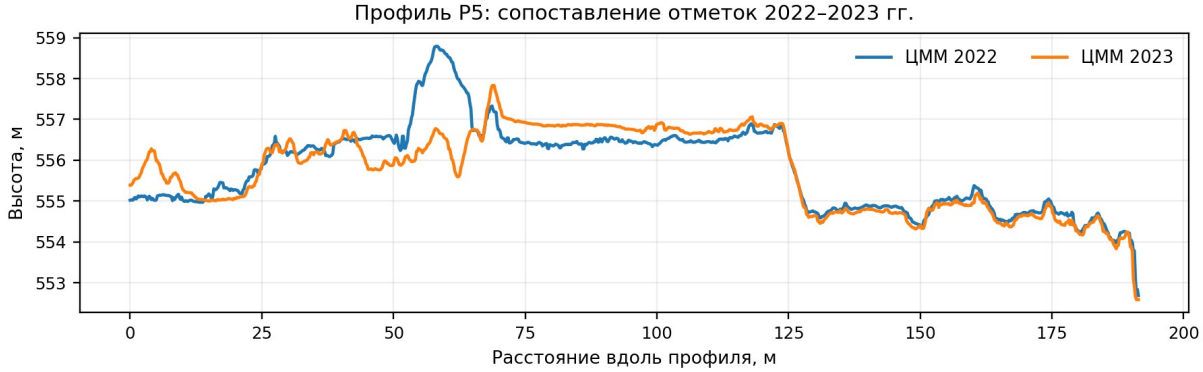

Рисунок 6 – Сравнение разновременных высотных профилей P5

Относительная стабильность P5 определяется в пределах заданного порога и не означает доказанного отсутствия изменений рельефа. Более того, 19,78 % отсчётов на этом профиле отнесены к классу понижения. Поэтому P5 целесообразно использовать как локальный пример участка с преимущественно малой межэпоховой разностью, но не как самостоятельное доказательство точности всей модели.

Сравнительная интерпретация и ограничения исследования

Анализ пяти профилей демонстрирует, что единая временная пара ЦММ может содержать одновременно зоны преобладающего повышения, выраженного понижения и сравнительно устойчивой поверхности. Средние значения P1 (+12,923 м), P4 (+10,765 м) и P2 (+5,668 м) отличаются более чем в два раза, тогда как P3 характеризуется отрицательным средним изменением −23,519 м. В то же время на P5 средняя разность близка к нулю. Таким образом, профили дают пространственно дифференцированное представление об изменениях поверхности карьера.

Для эксплуатационного мониторинга практически значимым результатом является возможность повторного использования сохранённой геометрии линий и одинаковой процедуры обработки. При последующих циклах съёмки можно воспроизводить профильные сечения, отслеживать изменение их кривых и сравнивать долю отсчётов разных классов. Геопривязанный линейный слой также позволяет сопоставлять результаты профилей с картами разности ЦММ, ортофотопланами и производственными границами.

Полученные значения следует интерпретировать с учётом ряда ограничений. Во-первых, профиль характеризует только одномерное сечение, поэтому проценты отсчётов нельзя переносить на площадь всего карьера и использовать для прямого расчёта объёмов. Во-вторых, совпадение массива расстояний при экспорте ещё не доказывает правильность

пространственной геопривязки, если графики были построены по разным линиям одинаковой длины. В-третьих, единая вертикальная поправка не устраняет локальные ошибки фотограмметрии, особенно на крутых склонах, уступах и участках слабой текстуры. Эти положения согласуются с необходимостью контроля неопределённости разновременных ЦММ [2, 3].

Методическое преимущество предложенной последовательности состоит не в разработке нового инструмента QGIS, а в согласованном использовании фиксированной геометрии профилей, попарных высотных отсчётов, вертикальной коррекции и пороговой классификации при едином представлении результатов. Для перевода данного подхода в полноценную систему производственного геодезического мониторинга необходимы документированные параметры геопривязки, независимые контрольные измерения и проверка причин крупных изменений по материалам съёмок и горных работ.

Заключение

В результате исследования сформирована воспроизводимая последовательность сравнения разновременных цифровых моделей местности по пяти фиксированным профильным линиям в QGIS. Для каждой линии определены характер и величина межэпоховых изменений высот с использованием единой вертикальной поправки 0,193436 м и рабочего порога ±0,372 м. Полученные результаты разделяют исследуемую территорию на участки с различными типами изменений: повышение преобладает на P1, P2 и P4; понижение на P3; на P5 большая часть отсчётов находится в пределах рабочего порога.

Наиболее выраженное снижение по P3 составляет −37,173 м, тогда как на P1 достигается максимальное повышение +26,145 м. Показатели характеризуют отдельные продольные сечения и дополняют площадной анализ DoD, но не заменяют расчёт объёмов горных работ. Практическая значимость исследования связана с возможностью повторного построения профилей в одинаковой геометрии и сравнения результатов последовательных съёмок. Для дальнейшего повышения достоверности необходимы независимые контрольные измерения и проверка крупных расхождений по разновременным ортофотопланам.

Список литературы:

1. Westoby M. J., Brasington J., Glasser N. F., Hambrey M. J., Reynolds J. M. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications // Geomorphology. – 2012. – Vol. 179. – P. 300–314. – DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

2. James M. R., Robson S., d’Oleire-Oltmanns S., Niethammer U. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment // Geomorphology. – 2017. – Vol. 280. – P. 51–66. – DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.11.021.

3. Wheaton J. M., Brasington J., Darby S. E., Sear D. A. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets // Earth Surface Processes and Landforms. – 2010. – Vol. 35, № 2. – P. 136–156. – DOI: 10.1002/esp.1886.

4. QGIS Documentation. Raster tools: Align rasters [Электронный ресурс]. – URL: https://docs.qgis.org/3.44/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/rastertools.html (дата обращения: 24.11.2026).

5. QGIS Python Plugins Repository. Profile tool [Электронный ресурс]. – URL: https://plugins.qgis.org/plugins/profiletool/ (дата обращения: 24.11.2026).

© Central Asian Scientific Journal, 2026