

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_2_13

МРНТИ 36.29.33

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ПОЛУЧЕНИЮ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ СОЧЕТАНИЯ АЭРОФОТОСЪЕМКИ, ЛИДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

АЭРОФОТОТҮСІРІС, ЛИДАР ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ МЕН ЖЕРДЕГІ ЛАЗЕРЛІК СКАНЕРЛЕУДІҢ ҮЙЛЕСІМІ НЕГІЗІНДЕ ГЕОКЕҢІСТІКТІК ДЕРЕКТЕРДІ АЛУҒА КЕШЕНДІ ТӘСІЛДІ ҚОЛДАНУ

APPLICATION OF AN INTEGRATED APPROACH TO GEOSPATIAL DATA ACQUISITION BASED ON A COMBINATION OF AERIAL PHOTOGRAPHY, LIDAR TECHNOLOGIES AND GROUND-BASED LASER SCANNING

М.М. Тогузова ¹, М.Е. Рахымбердина ¹, А.К. Капасов ^{1*}, Б. Апшикур ¹,
А.К. Абдығалиева ¹

¹НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева»,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Капасов Азамат Кайсарович, e-mail: AKapasov@edu.ektu.kz

Ключевые слова:

Лазерное сканирование,
мультиспектральные
данные, БПЛА, цифровая
модель местности,
ортофотоплан,
геоинформационный
анализ, аэрофотосъемка,
лидарные технологии.

АННОТАЦИЯ

В статье представлен комплексный подход к обработке данных полевых геологических обследований с использованием ГИС-технологий. Интегрированы изображения с беспилотных летательных аппаратов (в т.ч. мультиспектральные), данные лидарного сканирования. Получены высокодетализированные ортофотопланы, цифровые модели рельефа и 3D-модели исследуемого участка, отражающие сложное строение обнажений. Показано, что совместная обработка фотограмметрических, мультиспектральных и лидарных данных повышает точность выявления геологических структур по сравнению с разрозненным применением методов. Научная новизна работы – применение комплексного подхода к получению геопространственных данных на основе сочетания аэрофотосъемки, лидарных технологий и наземного лазерного сканирования и разработка единого метода комплексного использования разнородных данных для геологического картирования. Результаты могут найти применение при поиске месторождений редких металлов, инженерно-геологических изысканиях и мониторинге опасных процессов.

Түйінді сөздер:

Лазерлік сканерлеу,
мультиспектрлік

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада ГАЗ технологияларын қолдана отырып, далалық геологиялық зерттеулердің деректерін өңдеудің кешенді тәсілі келтіріл-



деректер, ұшқышсыз ұшу аппараттары, жергілікті жердің цифрлық моделі, ортофотоплан, геоаппараттық талдау, аэрофототүсіріс, лидар технологиялары.

ген. Ұшқышсыз ұшу аппараттарының суреттері (оның ішінде мультиспектральды), лидар сканерлеу деректері біріктірілген. Жоғары егжей-тегжейлі ортофотопландар, сандық рельефтік модельдер және экспозициялардың күрделі құрылымын көрсететін зерттелетін учаскенің 3D модельдері алынды. Фотограмметриялық, мультиспектрлік және лидар деректерін бірлесіп өңдеу әдістерді пашыраңқы қолданумен салыстырғанда геологиялық құрылымдарды анықтау дәлдігін арттыратыны көрсетілген. Жұмыстың ғылыми жаңалығы-аэрофототүсірілім, лидар технологиялары мен жердегі лазерлік сканерлеудің үйлесімі негізінде геокөнедіктік деректерді алуға кешенді тәсілді қолдану және геологиялық картаға түсіру үшін гетерогенді деректерді біріктірудің бірыңғай әдісін әзірлеу. Нәтижелер сирек металдар кен орындарын іздеуде, инженерлік-геологиялық зерттеулерде және қауіпті процестерді бақылауда қолданыла алады.

keywords:

Laser scanning, multispectral data, UAV, digital terrain model, orthophotoplane, geoinformation analysis, aerial photography, lidar technologies.

ABSTRACT

The article presents an integrated approach to processing field geological survey data using GIS technologies. Integrated images from unmanned aerial vehicles (including multispectral), lidar scanning data. Highly detailed orthophotographs, digital relief models, and 3D models of the area under study were obtained, reflecting the complex structure of the outcrops. It is shown that the combined processing of photogrammetric, multispectral, and lidar data improves the accuracy of detecting geological structures compared with the disparate use of methods. The scientific novelty of the work is the application of an integrated approach to obtaining geospatial data based on a combination of aerial photography, lidar technologies and ground-based laser scanning and the development of a single method for integrating heterogeneous data for geological mapping. The results can be used in the search for deposits of rare metals, engineering and geological surveys and monitoring of hazardous processes.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях интенсификации геологических исследований и перехода к цифровым методам анализа пространственных данных возрастает роль геоинформационных технологий в обработке материалов полевых обследований. Современные геологические объекты, особенно участки с обнажением горных пород, характеризуются высокой структурной сложностью, пространственной неоднородностью и динамичностью процессов. Это требует применения комплексных методов сбора и анализа данных, обеспечивающих высокую точность, воспроизводимость и наглядность результатов.

Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью интеграции разнородных источников пространственной информации, включая данные беспилотных летательных аппаратов, лазерного сканирования в единую геоинформационную среду. Традиционные методы полевых геологических наблюдений, основанные преимущественно на визуальных описаниях и локальных измерениях, обладают ограниченной пространственной репрезентативностью и не всегда позволяют выявить скрытые закономерности строения и развития геологических объектов. Использование ГИС и данных дистанционного зондирования расширяет аналитические возможности исследований, повышает детальность картографических материалов и способствует более глубокому пониманию геологической структуры территории.

В научных исследованиях последних лет геоинформационное картографирование рассматривается как базовый инструмент интеграции и анализа пространственных данных

в геологии. В работах зарубежных авторов подчеркивается, что использование ГИС позволяет эффективно объединять результаты полевых наблюдений, дистанционного зондирования и геофизических измерений, обеспечивая целостное представление о геологическом строении территории. Существенный вклад в развитие теоретических и прикладных аспектов геоинформационного анализа внесли исследования авторов (Longley et. al., 2015, Chen et. al., 2021), в которых ГИС рассматривается как универсальная платформа для пространственного моделирования природных процессов.

Фотограмметрическая реконструкция и построение цифровых моделей рельефа и поверхности получили широкое распространение благодаря развитию технологий беспилотной аэрофотосъемки. В зарубежной литературе подробно описаны возможности БПЛА для детального картографирования обнажений горных пород, анализа тектонических структур и морфологии рельефа. Работы (Westoby et. al., 2012, Bupathy, 2021, Carrivick et. al., 2016) демонстрируют высокую точность цифровых моделей, полученных методом Structure from Motion, и их применимость для геологических и геоморфологических исследований. Отдельное направление составляют исследования, посвященные использованию лазерного сканирования, включая наземное и воздушное сканирование с технологией LiDAR, для построения высокоточных облаков точек и выявления мелкомасштабных структурных элементов (LaRue et. al., 2020).

В казахстанской научной литературе вопросы применения ГИС и данных дистанционного зондирования в геологических и геоэкологических исследованиях также активно поднимаются. В работах отечественных авторов (Alpysbay et. al., 2024, Alibekova et. al, 2023) рассматриваются возможности использования космических снимков и цифровых моделей рельефа для геологического картографирования, оценки инженерно-геологических условий и мониторинга природных процессов. Ряд исследований, выполненных на примере регионов Восточного и Юго-Восточного Казахстана (Рафиков и др., 2024, Ulykpanova, 2024), подтверждает эффективность интеграции полевых данных и материалов дистанционного зондирования в ГИС-среде при изучении сложных геологических объектов.

Вместе с тем анализ научных публикаций показывает, что при наличии значительного количества работ, посвященных отдельным методам – БПЛА-съемке, лазерному сканированию или дистанционному зондированию – вопросы их комплексной обработки и совместного анализа для конкретных геологических объектов, особенно участков с обнажением пород, остаются недостаточно структурированными. Это определяет необходимость дальнейшего методического развития геоинформационных подходов, ориентированных на интеграцию разнородных полевых и дистанционных данных в рамках единого технологического процесса.

Целью данного исследования является разработка и апробация подхода к геоинформационной обработке и анализу данных полевого обследования для геологических исследований на основе объединения данных БПЛА, лазерного сканирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на геологическом объекте с обнажениями горных пород и сложным рельефом, расположенном вблизи села Таргын (Восточный Казахстан) (рисунок 1).

Полевой этап включал комплексную съемку территории с применением современных геодезических и дистанционных технологий. Для аэрофотосъемки использовался мультиспектральный дрон senseFly eBee X, регистрирующий изображения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, а также DJI Phantom 4 Multispectral. Для повышения точности позиционирования была выполнена геодезическая съемка опорных точек с помощью двухчастотного GNSS-приемника Trimble SP60 в режиме RTK, что

обеспечило сантиметровую точность координат. Дополнительно осуществлялось наземное лазерное сканирование с использованием сканера Trimble SX12, позволившее детально зафиксировать рельеф и объекты на местности. Предварительная калибровка оборудования перед съемкой гарантировала высокое качество исходных данных.

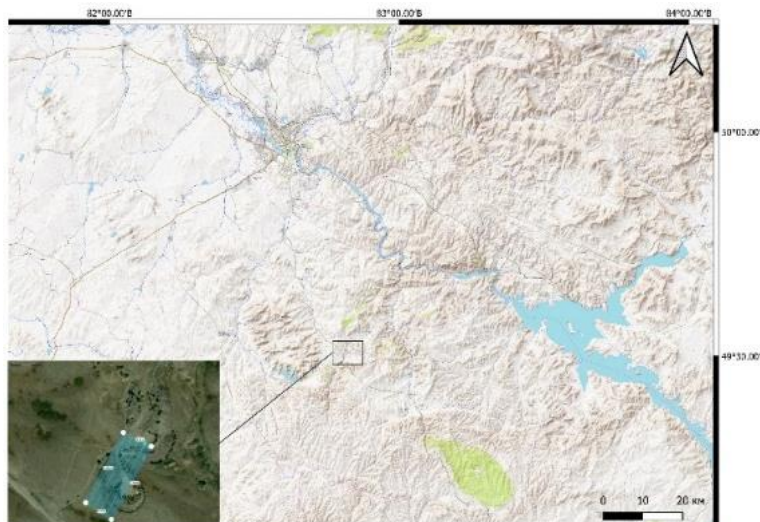


Рисунок 1. Объект исследования

Примечание – составлено авторами

Собранные полевые данные были обработаны с помощью специализированного программного обеспечения (Agisoft Metashape, DJI Terra, QGIS) в единой геоинформационной системе. Методологической основой исследования послужили методы цифрового моделирования рельефа, фотограмметрической обработки изображений и дистанционного зондирования Земли. Комплексное применение этих методов позволило интегрировать разнородные пространственные данные, выровнять их в общей координатной системе и получить достоверное представление об исследуемой территории для последующей геологической интерпретации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Камеральная обработка является завершающим и наиболее аналитически значимым этапом комплексных геодезических и дистанционных исследований. Именно на этой стадии выполняются систематизация, проверка и интеграция всех пространственных данных, полученных в ходе полевых наблюдений – аэрофотосъемки, лидарного сканирования, GNSS-измерений и наземного лазерного сканирования.

Главная цель камеральной обработки заключается в преобразовании необработанных полевых данных в структурированные цифровые модели и тематические картографические продукты, пригодные для последующего анализа в геоинформационных системах (ГИС). На данном этапе обеспечивается согласование координатных систем, устранение геометрических и радиометрических искажений, а также создание ортофотопланов, цифровых моделей рельефа (ЦМР) и трехмерных визуализаций исследуемых территорий.

Значимость камерального этапа определяется тем, что качество и точность итоговых цифровых карт зависят не только от примененного оборудования, но и от корректности алгоритмов обработки данных, выбранных параметров фильтрации и методов совмещения данных различных источников.

Камеральная обработка данных дистанционного зондирования и полевых обследований опирается на принципы геоинформационного картографирования и цифрового моделирования геосистем (Chaminé et. al, 2021, Farella et. al, 2023).

В процессе обработки реализуются следующие ключевые этапы:

- 1) импорт и систематизация данных – объединение фотограмметрических, лидарных, мультиспектральных и GNSS-измерений в единую координатную систему;
- 2) фильтрация и классификация данных – удаление шумов, выделение земной поверхности и тематических объектов;
- 3) геометрическая коррекция – выравнивание изображений и облаков точек с учетом параметров полета и калибровки оборудования;
- 4) радиометрическая коррекция – нормализация яркостных характеристик изображений для обеспечения однородности визуального восприятия и достоверности спектрального анализа;
- 5) построение цифровых моделей (DEM, DSM) – формирование трехмерных представлений рельефа и поверхностных структур;
- 6) интеграция и визуализация данных в ГИС – создание тематических слоев, построение ортофотопланов и аналитических карт.

Фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков выполнялась с использованием алгоритмов пространственной триангуляции, что позволило вычислить координаты точек по перекрывающимся изображениям с высокой точностью (Чибуничев, 2022, Remondino, 2022). Лидарные данные формировались на основе измерения времени пролета лазерного импульса, обеспечивая построение облаков точек предельно высокой плотности и точности (Altuntas, 2023, Naala, 2021). В совокупности применение этих технологий позволило получить детальные цифровые модели рельефа и поверхности, которые служат основой для дальнейшего геоинформационного анализа и построения тематических карт. Использование специализированных программных комплексов обеспечило автоматизацию описанных операций, оптимизацию вычислений и корректное совмещение разнородных форматов данных.

Таким образом, камеральная обработка является важным этапом в создании цифровых моделей рельефа природных и техногенных объектов, обеспечивая научную достоверность, метрическую точность и аналитическую глубину пространственных исследований.

В весенне-летний период 2025 года в пределах территории, расположенной между населенными пунктами Огневка и Сагыр, были выполнены комплексные полевые исследования с использованием БПЛА, лидарных и спутниковых геодезических технологий с целью получения детализированных пространственных данных для формирования ЦМР и трехмерной визуализации исследуемой местности. Собранные данные предназначены для последующего построения цифровых моделей рельефа природных и техногенных месторождений редких металлов.

Полевой этап включал подготовку оборудования, разработку маршрутов аэрофотосъемки, установку мобильной GNSS-станции, выполнение наземного лазерного сканирования и геодезических измерений (рисунок 2). Такой комплексный подход обеспечил высокую детализацию данных и возможность их интеграции в единую пространственно-координатную систему.

Для организации аэрофотосъемочных работ с использованием БПЛА senseFly eBee X применялось программное обеспечение eMotion, предназначенное для планирования и управления миссиями. На рисунке 3 показана рабочая зона миссии, в пределах которой был спланирован маршрут полета. В программе задавались границы полигона съемки, направление пролетов, ключевые точки маршрута и параметры полета, включая:

- высоту съемки (в среднем 100–120 м для обеспечения оптимального пространственного разрешения);

- скорость движения дрона (5–7 м/с для исключения смазывания изображений);
- углы обзора камеры;
- коэффициенты продольного и поперечного перекрытия снимков (примерно 75–80 % и 65–70 % соответственно).



Рисунок 2. Полевые работы в пределах территории объекта исследования
Примечание – составлено авторами



Рисунок 3. План полетной миссии БПЛА senseFly eBee X
Примечание – составлено авторами

В условиях отсутствия стабильного интернет-соединения все картографические данные и полетные задания были подготовлены заранее и загружены в программу eMotion, что позволило обеспечить автономное выполнение миссии. Такой подход способствовал оптимизации маршрута полета, сокращению времени съемки и повышению качества получаемых фотограмметрических данных.

После завершения аэрофотосъемочных работ материалы, полученные с камеры S.O.D.A. 3D, были импортированы в программный комплекс Agisoft Metashape Professional

для выполнения камеральной обработки. Данная камера является специализированным фотограмметрическим сенсором, предназначенным для высокоточного трехмерного картографирования и создания детализированных цифровых моделей местности (ЦММ). В процессе обработки выполнялась автоматическая триангуляция снимков, построение плотного облака точек, генерация ЦММ и ортотрансформация изображений. ЦММ (рисунок 4, а), созданная на основе плотного облака точек, точно отражает морфологические особенности исследуемой территории - перепады высот, уклоны, формы склонов и микрорельеф.

Ортофотоплан (рисунок 4, б) представляет собой метрически точное изображение местности, пригодное для проведения геоинформационного анализа, совместного использования с другими пространственными данными и создания тематических карт различного назначения.

Кроме того, на основе фотограмметрической реконструкции была создана трехмерная модель объекта (рисунок 4, в), представляющая совмещенное отображение рельефа и поверхностных структур. В отличие от ЦММ, трехмерная модель обеспечивает наглядную визуализацию ландшафтных и техногенных элементов, что позволяет выполнять пространственные измерения, морфометрический анализ и моделирование геологических и инженерных процессов.

Таким образом, использование камеры S.O.D.A. 3D в составе беспилотного комплекса senseFly eBee X позволило получить высокоточные фотограмметрические данные, ставшие основой для построения цифровых моделей рельефа и трехмерных визуализаций территории.

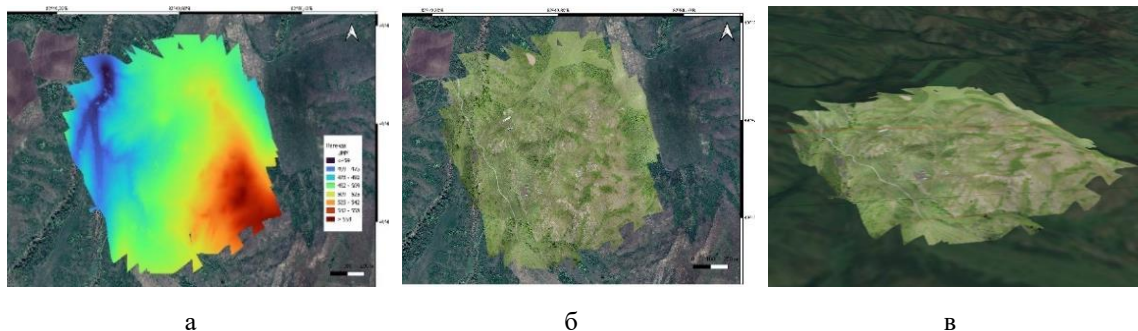


Рисунок 4. Результаты фотограмметрической обработки данных:
а – ЦММ; б – ортофотоплан; в – 3D модель поверхности

Примечание – составлено авторами

Для анализа состояния природных объектов и характеристик подстилающей поверхности использована мультиспектральная камера Parrot Sequoia+, установленная на БПЛА senseFly eBee X. Камера регистрирует отраженное излучение в четырех спектральных диапазонах – зеленом, красном, красной границе (Red Edge) и ближнем инфракрасном (NIR), что обеспечивает получение информации, недоступной при стандартной RGB-съемке. Такой подход позволяет оценивать биофизические параметры растительности, состояние почвенного покрова и степень антропогенного воздействия.

На основе обработки мультиспектральных данных в программном комплексе Agisoft Metashape Professional созданы цифровая модель местности (рисунок 5, а), ортофотоплан (рисунок 5, б), трехмерная модель исследуемого участка (рисунок 5, в). Полученные результаты дают представление о структуре поверхности и пространственном распределении природных объектов. Визуализация в трехмерном виде позволяет рассчитывать вегетационные индексы (NDVI, NDRE и др.), применяемые для выявления экологических и техногенных изменений территории.

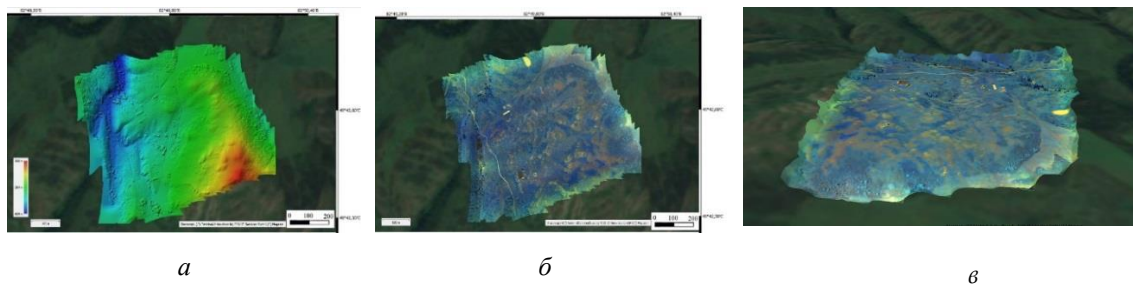


Рисунок 5. Результаты обработки мультиспектральных данных:

а – ЦММ; *б* – ортофотоплан; *в* – 3D-модель поверхности

Примечание – составлено авторами

Ортофотоплан, построенный по данным мультиспектральной аэрофотосъёмки с БПЛА senseFly eBee X, наглядно демонстрирует выраженную спектральную неоднородность поверхности. Съёмка выполнена мультиспектральным сенсором Parrot Sequoia+ (4 канала) с центрами спектральных диапазонов около 550 нм (зелёный), 660 нм (красный), 735 нм (red edge) и 790 нм (ближний ИК) (рисунок 6).

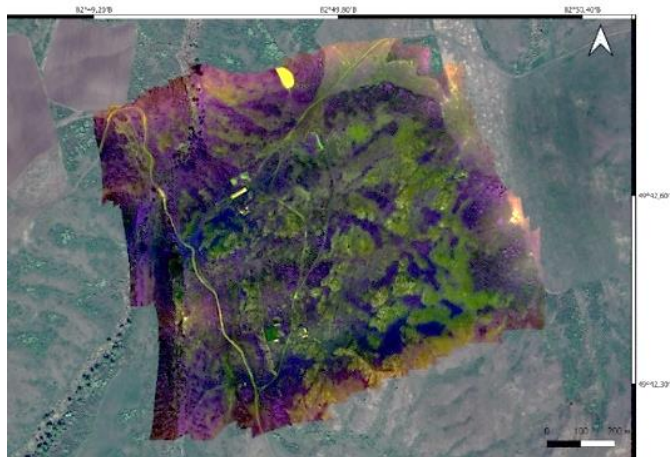


Рисунок 6. Результаты аэросъёмки мультиспектральным сенсором Parrot Sequoia+

Примечание – составлено авторами

При среднем высотном уровне полёта ~100 м это обеспечило ортофотоплан с пространственным разрешением порядка 20–30 см/пикс. Полученное изображение в ложноцветовой композиции (ближний ИК – красный – зелёный в каналах RGB) выявляет значительные вариации отражательной способности разных участков. Например, отношение отражения в красном и зелёном каналах (650/560 нм) достигает повышенных значений (~1,5) в отдельных зонах по сравнению с фоновым уровнем (~1,0 для неизменённых пород), что указывает на возможное обогащение поверхности соединениями железа.

Одновременно индексы растительности (NDVI) в этих аномальных участках низкие (<0,2), что подтверждает отсутствие густого растительного покрова и истинно литогенную природу аномалий (для сравнения, пиксели с NDVI >0,3 считаются покрытыми растительностью и исключаются из анализа).

Такое сочетание спектральных характеристик отражает различия в литологическом составе пород, степени их вторичных минералогических изменений и интенсивности

экзогенных процессов (выветривания, эрозии и т. д.). На основе выявленных спектральных аномалий удалось выделить несколько участков, потенциально перспективных для поисков рудных проявлений.

Зоны ортофотоплана, характеризующиеся жёлто-оранжевыми и светло-фиолетовыми оттенками, интерпретируются как участки развития сильно окисленных и вторично изменённых пород. Спектральная сигнатура этих участков типична для зон интенсивного выветривания и окисления, где в приповерхностных породах присутствуют гидроокислы железа. Эти минералы обладают высокой отражательной способностью в красном видимом диапазоне и выраженным поглощением в ближнем ИК-диапазоне, что и обуславливает наблюдаемый цветовой тон на ложноцветном изображении.

Подобная комбинация спектральных признаков характерна для госсанов – надрудных зон окисления рудных тел, формирующихся в верхних горизонтах месторождений и представленных продуктами вторичных окислительных процессов. В нашем случае наличие лимонит-гётитовых аномалий указывает на возможное развитие поверхностных ореолов минерализации.

Выделенные участки с железистыми оттенками образуют как локальные пятна размером в десятки метров, так и протяжённые полосовидные аномалии, вытянутые вдоль тектонических линий на несколько сотен метров. Чаще всего они приурочены к понижениям рельефа – например, долинам временных водотоков или отрицательным формам рельефа, где могли накапливаться продукты окисления. Одновременно прослеживается связь части аномалий с линейными структурами, что позволяет предположить контролирующую роль разломов и зон трещиноватости: вдоль этих структур, вероятно, происходила циркуляция минерализующих флюидов, оставивших после выветривания яркий отпечаток в виде железистых ореолов. Выявленные спектральные аномалии в ложноцветном ортофотоплане напрямую указывают на перспективные зоны рудоконтролирующих структур, зоны окисления и вторичных изменений пород, что делает мультиспектральный метод съёмки эффективным инструментом на этапе поисково-оценочных работ.

Для выполнения лидарной съёмки использовался квадрокоптер DJI Matrice 350 RTK, оснащенный лидарным модулем Zenmuse L2 и мобильной станцией D-RTK. При планировании маршрута были заданы ключевые параметры миссии: границы полигона, высота полета (в среднем 80–120 м для LiDAR), скорость движения дрона и степень перекрытия пролетов. Обработка и визуализация данных выполнялись в специализированном программном обеспечении DJI Terra. В результате камеральной обработки в DJI Terra получены корректно структурированные и метрически точные лидарные данные, готовые к интеграции с фотограмметрическими материалами и использованию при создании ЦМР.

После выполнения реконструкции в программе DJI Terra были получены результаты обработки лидарных данных, представленные в нескольких вариантах визуализации: RGB-отображение; отражаемость (Reflectivity); высота (Elevation); тип (Classification) (рисунок 7).

На рисунке 7, а представлена RGB-визуализация, которая обеспечивает реалистичное отображение поверхности и используется для визуального сопоставления с ортофотопланами и другими картографическими материалами. Карта отражательной способности (рисунок 7, б) характеризует различия физических свойств поверхности и позволяет дифференцировать типы грунтов, растительность и инженерные сооружения по интенсивности отраженного сигнала. Карта высот (рисунок 7, в) представляет пространственное распределение отметок рельефа и служит основой для построения ЦМР и проведения морфометрического анализа (уклоны, экспозиции, профили). Карта классификации (рисунок 7, г) отражает результаты автоматического разделения облака точек на тематические классы (земная поверхность, растительность, здания, шумовые отражения), что используется при создании чистых цифровых моделей рельефа (DTM) и поверхности (DSM).

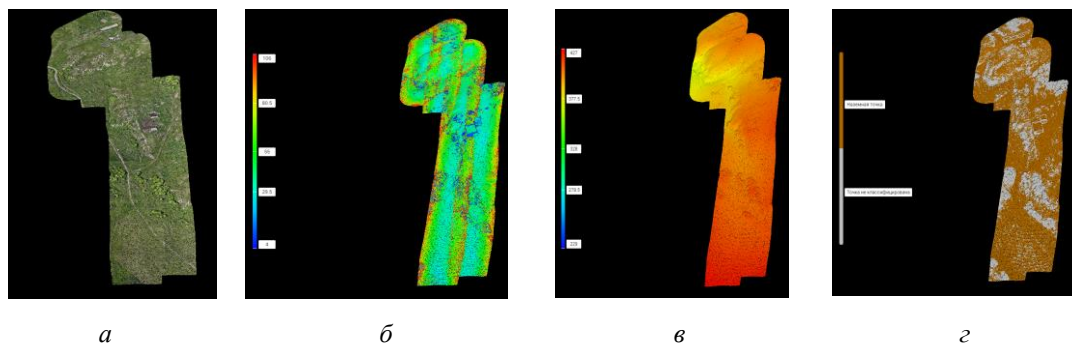


Рисунок 7. Результаты обработки данных лидара Zenmuse L2:

a – визуализация в RGB-диапазоне; *б* – отображение по отражательной способности (Reflectivity); *в* – распределение по высотным отметкам (Elevation); *г* – классификация объектов по типам поверхности (Classification)

Примечание – составлено авторами

Полученные материалы являются исходными данными для разработки цифровых карт фактического материала и последующего геоинформационного анализа, оценки геоморфологии и пространственного моделирования территории.

Для получения детализированных данных рельефа исследуемого участка дополнительно выполнено лазерное сканирование сканером Trimble SX12, которое, в отличие от аэрофотосъемки и лидарных данных с БПЛА, позволяет фиксировать мелкие элементы рельефа и инженерные объекты с миллиметровой точностью на локальных участках.

На рисунке 8, *a* представлено облако точек, полученное непосредственно после полевых измерений. Данная визуализация необходима для оценки качества измерений, выявления зон недостаточной плотности точек и определения участков, требующих фильтрации. На следующем этапе выполняется автоматическая классификация точек по категориям: земля, растительность, здания, шумы. Это позволяет изолировать точки земной поверхности, которые в дальнейшем используются для построения ЦМР. Далее проводится дополнительная очистка данных (рисунок 8, *б*): удаляются шумовые и ложные отражения, не относящиеся к поверхности. Этот процесс существенно повышает точность модели и устраняет артефакты при генерации рельефа.

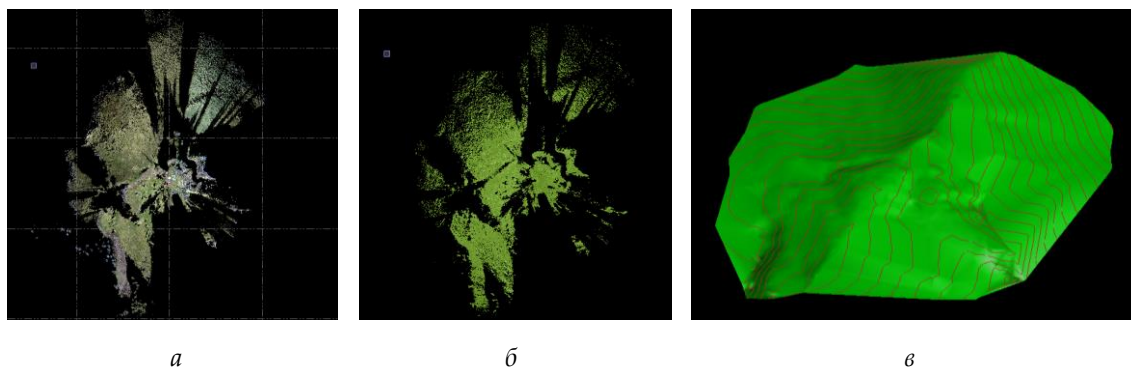


Рисунок 8. Результаты съемки лазерным сканером Trimble SX12:

a – исходное облако точек; *б* – данные после расширенной фильтрации;
в – ЦМР с горизонталями

Примечание – составлено авторами

После очистки выполняется разрежение облака точек с шагом 5 метров для оптимизации объема данных. Это снижает вычислительную нагрузку и облегчает

последующую обработку при сохранении основных геометрических характеристик рельефа. На основе очищенного облака точек создается цифровая модель поверхности, отражающая морфологию рельефа. Заключительным этапом обработки является генерация горизонталей (рисунок 8, в), используемых в дальнейшем для инженерно-геодезических расчетов, морфометрического анализа и создания цифровых карт.

Таким образом, данные лазерного сканирования с Trimble SX12 прошли все этапы - от первичной классификации до построения горизонталей. Итогом стала высокоточная ЦМР, которая может быть использована для геологических, инженерных и проектных работ. Проведенные полевые работы показали высокую эффективность применения комплексного подхода к получению пространственных данных, основанного на сочетании аэрофотосъемки, лидарных технологий и наземного лазерного сканирования.

Анализ интегрированных данных позволил, в частности, выявить структурные закономерности залегания пород и зоны техногенного воздействия, что подтверждает высокую эффективность предложенного подхода на данном полигоне. Сформированный набор пространственных данных обеспечивает всестороннее описание геологического объекта. На его основе можно детально исследовать геоморфологические особенности участка, выявлять структурные закономерности залегания пород и анализировать влияние внешних факторов (например, эрозии или техногенных воздействий). Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что созданные высокоточные модели и карты могут использоваться для решения прикладных задач – от планирования горно-геологических работ до мониторинга опасных геологических процессов. Таким образом, интеграция данных БПЛА, мультиспектральной и лидарной съемки в едином информационном пространстве существенно повышает информативность и достоверность геологических исследований по сравнению с разрозненным применением указанных методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования разработан и экспериментально проверен новый подход к геоинформационной обработке данных полевого обследования геологического объекта, основанный на интеграции разнородных данных. Применение комплексной методики позволило получить высокодетализированные ортофотопланы, цифровые модели рельефа и 3D-модели, обеспечивающие целостное представление о пространственной структуре исследуемой территории. Установлено, что совместная обработка данных, полученных различными датчиками, обеспечивает более высокую точность и информативность результатов по сравнению с отдельным использованием отдельных методов. Научная новизна работы состоит в разработке единого технологического процесса совместной обработки фотограмметрических, мультиспектральных и лидарных данных для геологических целей, что ранее не было реализовано в полной мере применительно к объектам со сложным рельефом и обнажениями пород.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их применения для решения широкого круга прикладных задач геологии и смежных областей. Созданные высокоточные цифровые модели и тематические карты могут использоваться при поиске и разведке месторождений (в том числе редких металлов), инженерно-геологических изысканиях, мониторинге геологических процессов и экологическом контроле территории. Предложенный подход может быть адаптирован для исследования различных геологических условий и объектов, повышая эффективность и достоверность интерпретации пространственных данных. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением методики за счет включения новых типов данных (например, геофизических), совершенствования алгоритмов автоматической обработки и

анализа, а также с апробацией комплекса методов на других полигонах для подтверждения универсальности и воспроизводимости полученных результатов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках программно-целевого финансирования (Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан) BR24992854 «Разработка и внедрение конкурентоспособных научно обоснованных технологий для обеспечения устойчивого развития горно-металлургической отрасли Восточно-Казахстанской области».

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В процессе подготовки данной научной статьи авторы использовали инструмент генеративного искусственного интеллекта – ChatGPT (модель GPT-4) на платформе OpenAI – для помощи в частичном редактировании текста и уточнении структуры разделов. Все предложенные ИИ материалы были проверены и одобрены авторами перед включением в финальную версию рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems* (4th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118676950>
- Chen, S., Li, M., Guo, H., & Liu, X. (2021). Fundamentals and advances of geographic information systems: A review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), 132. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030132>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Bupathy, P., Sivanpillai, R., Sajithvariya, V. V., & Sowmya, V. (2021). Optimizing low-cost UAV aerial image mosaicing for crop growth monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-M-3-2021, 7–13. ASPRS 2021 Annual Conference, 29 March–2 April 2021. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-3-2021-7-2021>
- Carrivick, J. L., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). *Structure from Motion in the geosciences*. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118895818>
- LaRue, E. A., Wagner, F. W., Fei, S., Atkins, J. W., Fahey, R. T., Gough, C. M., & Hardiman, B. S. (2020). Compatibility of aerial and terrestrial LiDAR for quantifying forest structural diversity. *Remote Sensing*, 12(9), 1407. <https://doi.org/10.3390/rs12091407>
- Alpysbay, M. A., Orynbasarova, E. O., Sydyk, N. K., Adebiyet, B., & Kamza, A. T. (2024). Mining mapping and exploration using remote sensing data in Kazakhstan: A review. *Engineering Journal of Satbayev University*, 146(2). <https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i2.05>
- Alibekova, N., Abisheva, A., Dosmukhambetova, B., Saktaganova, N., Abdikerova, U., & Budikova, A. (2023). Use of GIS technologies for zoning urban areas taking into account engineering-geological conditions. *International Journal of GEOMATE*, 25(110), 167–175. <https://doi.org/10.21660/2023.110.3970>
- Рафиков, Т. К., Ерболқызы, М., & Жилдикбаева, А. Н. (2024). Применение данных дистанционного зондирования Земли и анализа NDVI в Восточно-Казахстанской области. *Ізденістер, нәтижелер – Исследования, результаты*, 1(101), 183–189. <https://doi.org/10.37884/1-2024/18> // Rafikov, T. K., Yerbolkyzy, M., & Zhildikbayeva, A. N. (2024). *Primenenie dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli i analiza NDVI v Vostochno-Kazakhstanskoy oblasti* [Application of Earth remote sensing data and NDVI

- analysis in the East Kazakhstan region]. Izdenister, natizheler – Issledovaniya, rezul'taty, 1(101), 183–189. <https://doi.org/10.37884/1-2024/18> (In Russ.).
- Ulykpanova, M. M., Auezova, Z., Ramazanova, N., Mussabaeva, M., & Zhanguzhina, A. (2024). Application of remote-sensing data in geochemical studies of soils of the Yertis River basin within East Kazakhstan. *Quaestiones Geographicae*, 43(1), 157–164. <https://doi.org/10.14746/quageo-2024-0009>
- Chaminé, H. I., Pereira, A. J. S. C., Teodoro, A. C., et al. (2021). Remote sensing and GIS applications in earth and environmental systems sciences. *SN Applied Sciences*, 3, 870. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04855-3>
- Farella, E. M., Remondino, F., Cahalane, C., Qin, R., Loghin, A. M., Di Tullio, M., Haala, N., & Mills, J. (2023). Geometric processing of very high-resolution satellite imagery: Quality assessment for 3D mapping needs. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-1/W3-2023, 47–54. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W3-2023-47-2023>
- Чибуничев, А. Г. (2022). Фотограмметрия: учебник для вузов. Москва: Издательство МИИГАиК. // Chibunichev, A. G. (2022). *Photogrammetry: A textbook for universities*. Moscow: Publishing House of MIIGAiK. (In Russ.).
- Remondino, F., Morelli, L., Stathopoulou, E., Elhashash, M., & Qin, R. (2022). Aerial triangulation with learning-based tie points. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2022. Proceedings of the XXIV ISPRS Congress, 6–11 June 2022, Nice, France.
- Altuntas, C. (2023). Review of scanning and pixel array-based LiDAR point-cloud measurement techniques to capture 3D shape or motion. *Applied Sciences*, 13(11), 6488. <https://doi.org/10.3390/app13116488>
- Haala, N., Kölle, M., Cramer, M., Laupheimer, D., Mandlbürger, G., & Glira, P. (2021). Hybrid georeferencing, enhancement and classification of ultrahigh resolution UAV LiDAR and image point clouds for monitoring applications. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-2-2020. Proceedings of the XXIV ISPRS Congress, 2020 edition.
- ChatGPT. (2026). Уточнение и редактирование научного текста статьи [Большая языковая модель]. OpenAI. <https://chat.openai.com> // ChatGPT. (2026). Utochnenie i redaktirovanie nauchnogo teksta stat'i [Clarification and editing of scientific text of the article] [Large language model]. OpenAI. <https://chat.openai.com> (In Russ./AI-generated).

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Тогужева Маржан Мельсовна – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Тогужева Маржан Мельсовна – доктор PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серікбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Toguzova Marzhan Melsovna – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: MToguzova@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7395-6060>



Рахымбердина Маржан Есенбековна – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Рахымбердина Маржан Есенбековна – доктор PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Rakhymberdina Marzhan Yessenbekovna – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: MRahymberdina@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2196-6512>



Капасов Азамат Кайсарович – магистр, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Капасов Азамат Кайсарович – магистр, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Kapasov Azamat Kaysarovich – master, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: AKapasov@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2103-9513>



Апшикур Байтак – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Апшикур Байтак – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Apshikur Baytak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: BApshikur@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2103-9513>



Абдығалиева Алмагуль Кайыркхановна – магистр, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Абдығалиева Алмагуль Кайыркхановна – магистр, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Abdygalieva Almagul Kayyirkhanovna – master, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: AAbdygalieva@ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0006-3877-3713>