

УДК: 912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-66-82

И. А. Рыльский¹, М. С. Малеванная², Д. А. Парамонов³, Р. В. Груздев⁴

ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬДАЙСКОГО КРАТЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты комплексного исследования Мульдайского кратера в Забайкалье, проведенного с применением современных технологий воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки. Кратер, ранее считавшийся метеоритным, был изучен с высокой точностью с использованием системы лазерного сканирования RIEGL LMS-Q560 и цифровой аэрофотосъемочной камеры IGI DIGICAM H60, что позволило создать детальные цифровые модели рельефа и ортофотопланы. Полученные данные выявили значительные расхождения с ранними описаниями объекта: отсутствие ударного вала, который является ключевым признаком метеоритного происхождения, а также совпадение высот дна кратера и ближайшего водотока, что противоречит предыдущим утверждениям о его расположении ниже уровня реки. Объем воронки составил 42 708 м³, а крутизна склонов (до 48°) свидетельствует об их относительной молодости и слабой эродированности, что не является характерным для древних метеоритных структур. Анализ морфологии и геологического контекста позволил предположить, что формирование кратера связано с карстовыми процессами, а не с ударным событием. Это подтверждается наличием в районе известняков и магнитных аномалий, обусловленных контактово-метасоматическими изменениями пород. Расчеты энергии, необходимой для образования кратера метеоритного происхождения, делают данный сценарий маловероятным. Исследование также затрагивает общие проблемы идентификации малых ударных кратеров в России, включая их слабую изученность, труднодоступность многих регионов и отсутствие системных программ по их поиску. Авторы подчеркивают важность использования высокоточных методов дистанционного зондирования для уточнения природы подобных объектов и призывают к более детальным полевым исследованиям, включая бурение и геофизические измерения, для окончательного подтверждения их происхождения. Работа вносит значительный вклад в дискуссию о природе Мульдайского кратера и демонстрирует, как современные технологии могут пересмотреть устоявшиеся гипотезы, основанные на ограниченных данных прошлых лет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъемка, 3D-точки, лазерное сканирование, цифровая модель рельефа, метеоритный кратер

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119234, *e-mail: rilskiy@mail.ru*

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail: malevannaya_m@mail.ru*

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail: paramonovwork@mail.ru*

⁴ ФГБУН Институт природных ресурсов, экологии и криологии, Сибирское отделение РАН, ул. Недорезова, д. 16а, а/я 1032, Чита, Россия, 672002, *e-mail: rogruzdev@mail.ru*

Ilya A. Rylskiy¹, Marina S. Malevannaya², Dmitriy A. Paramonov³, Roman V. Gruzdev⁴

INVESTIGATION OF THE MULDAI CRATER USING AIRBORNE LASER SCANNING

ABSTRACT

The article presents the results of a comprehensive study of the Muldai Crater in Transbaikalia, conducted using modern airborne laser scanning and aerial photography technologies. The crater, previously considered a meteorite crater, was studied with high accuracy using the RIEGL LMS-Q560 laser scanning system and the IGI DIGICAM H60 digital aerial photography camera, which made it possible to create detailed digital relief models and orthophotomaps. The data obtained revealed significant discrepancies with earlier descriptions of the object: the absence of an impact ridge, which is a key feature of meteorite origin, as well as the coincidence of the heights of the crater floor and the nearest watercourse, which contradicts previous statements about its location below the river level. The volume of the funnel was 42,708 m³, and the steepness of the slopes (up to 48°) indicates their relative youth and weak erosion, which is not typical for ancient meteorite structures. Analysis of the morphology and geological context suggests that the crater formation is related to karst processes rather than an impact event. This is supported by the presence of limestones in the area and magnetic anomalies caused by contact-metasomatic changes of rocks. Calculations of the energy required to form a crater of meteoritic origin make this scenario unlikely. The study also addresses general problems of identifying small impact craters in Russia, including their poor study, the inaccessibility of many regions, and the lack of systematic programs to search for them. The authors emphasize the importance of using high-precision remote sensing methods to clarify the nature of such objects and call for more detailed field studies, including drilling and geophysical measurements, to finally confirm their origin. The work makes a significant contribution to the debate on the nature of the Muldai Crater and demonstrates how modern technologies can revise established hypotheses based on limited data from past years.

KEYWORDS: aerial photography, 3D points, laser scanning, digital elevation model, meteorite crater

ВВЕДЕНИЕ

Метеоритные кратеры являются уникальными природными объектами, представляющими значительный интерес для геологии, планетологии и астрономии. Они не только свидетельствуют о столкновениях Земли с космическими телами, но и позволяют изучать процессы ударного метаморфизма, а также влияние таких событий на геологическую и биологическую эволюцию планеты. Особый интерес представляют малые метеоритные кратеры диаметром от 50 до 300 м, которые, несмотря на относительно небольшие размеры, встречаются значительно чаще крупных астроблем и могут предоставить важные данные о частоте падений небольших небесных тел [Хрянина, 1987].

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: rilskiy@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: malevannaya_m@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: paramonovwork@mail.ru

⁴ FGBUN Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Department of Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezova str., PO box 1032, Chita, 672002, Russia, e-mail: rogruzdev@mail.ru

Распространение и изученность малых кратеров в России

Территория Российской Федерации, занимающая значительную часть Евразии, потенциально должна содержать множество ударных структур, однако их документально подтвержденное количество остается сравнительно небольшим. По состоянию на 2024 г. в России зарегистрировано около 20 подтвержденных метеоритных кратеров, из которых лишь несколько попадают в категорию малых (50–300 м). Это связано не только с относительно низкой частотой падений, но и с трудностями их обнаружения.

Основные районы обнаружения малых кратеров включают Сибирь, Дальний Восток и Забайкалье, что объясняется не только обширными незалесенными территориями, но и активными геологоразведочными работами в этих регионах. Однако даже в этих зонах многие структуры остаются невыявленными из-за эрозии, тектонической активности и антропогенного воздействия.

Малые ударные кратеры, как правило, имеют простое строение с чашеобразной формой [Шевченко, 1996], выраженным валом и относительно небольшой глубиной. Соотношение глубины к диаметру у таких структур обычно составляет 1:5–1:10, что связано с меньшей энергией удара по сравнению с крупными астроблемами. В ряде случаев их форма может быть искажена последующими геологическими процессами, такими как осадконакопление или оползни.

Одной из ключевых проблем изучения малых кратеров является их слабая сохранность. В отличие от крупных структур, которые могут сохраняться сотни миллионов лет, небольшие кратеры быстро разрушаются под воздействием эрозии и зарастают растительностью. Кроме того, их часто путают с карстовыми воронками, вулканическими кратерами или антропогенными образованиями (например, старыми карьерами).

Список подтвержденных метеоритных кратеров России

На территории России зарегистрировано около 20 подтвержденных ударных структур [Амелин, 2014], включая как крупные астроблемы (диаметром более 1 км), так и малые кратеры (50–300 м). Ниже приведены наиболее известные из них:

- Попига́йская астроблема (Красноярский край) — ~100 км, ~35 млн. лет;
- Пучеж-Катунский кратер (Нижегородская обл.) — ~80 км, ~167 млн. лет;
- Карский кратер (Южный остров, Новая Земля) — ~65 км, ~70 млн. лет;
- Каменский кратер (Ростовская обл.) — ~25 км, ~49 млн. лет;
- Логанша (Архангельская обл.) — ~20 км, ~40 млн. лет;
- Янисъярви (Карелия) — ~14 км, ~700 млн. лет;
- Суавъярви (Карелия) — ~16 км, ~2,4 млрд. лет;
- Болтышский кратер (Украина, но близ границы с Россией) — ~24 км, ~65 млн. лет;
- Гусевский кратер (Мордовия) — ~3 км, ~55 млн. лет;
- Каларский кратер (Забайкалье) — ~15 км, предположительно палеозой;
- Мульда́йский кратер (Забайкалье) — ~200 м, возраст неизвестен;
- Соболевский кратер (Камчатка) — ~50 м, современный (возможно XIX–XX вв.);
- Эльгыгытгын (Чукотка) — ~18 км, ~3,6 млн. лет;
- Жаманшин (Казахстан, но близ Оренбургской обл.) — ~14 км, ~1 млн. лет;
- Безымянный кратер в Якутии (Алданский щит) — ~8 км, возраст неизвестен;
- Усть-Карский кратер (Чукотка) — ~5 км, ~70 млн. лет;
- Чукча (Чукотский) кратер — ~6 км, предположительно мезозой;
- Курда́йский кратер (Алтай) — ~3 км, возраст неизвестен;
- Канда́лакшский кратер (Кольский п-ов) — ~5 км, спорный (не подтвержден);
- Смердячее озеро — 0,25 км.

Из них только Мульдайский, Соболевский, Гусевский и Смердячее можно отнести к малым (менее 300 м) ударным кратерам.

Проблемы поиска и идентификации ударных кратеров

Основными методами обнаружения малых кратеров являются:

- дистанционное зондирование (спутниковые снимки, LiDAR);
- геофизические исследования (магнитометрия, гравиметрия);
- полевые исследования с отбором проб на наличие ударных признаков (планшетчатые кварцы, импактиты).

Однако даже при использовании современных технологий подтверждение ударного происхождения требует сложных лабораторных анализов, что делает процесс дорогостоящим и трудоемким. Кроме того, сплошной поиск кратеров требует выполнения автоматизированного анализа значительных объемов данных.

Основные проблемы изучения метеоритных кратеров в России довольно многообразны. В первую очередь это сложность обнаружения, имеющая много причин:

- географическая удаленность — многие потенциальные кратеры находятся в труднодоступных районах Сибири, Дальнего Востока и Арктики;
- зарастание и эрозия — малые кратеры быстро разрушаются под действием воды, ветра и растительности;
- антропогенная маскировка — старые карьеры, воронки от взрывов и другие техногенные образования часто принимают за ударные структуры.

Полевые исследования потенциально возможных астроблем, даже в случае их успешного обнаружения, также многообразны:

- высокая стоимость экспедиций — подтверждение метеоритного происхождения требует бурения, геофизических исследований и лабораторных анализов (например поиск импактитов);
- отсутствие системного поиска — в отличие от Канады и США, в России нет государственных программ по поиску ударных структур.

Проблемы подтверждения метеоритных кратеров также существуют. К ним относятся:

- отсутствие четких морфологических признаков — малые кратеры часто не имеют выраженного вала или центрального поднятия;
- сложность датировки — многие кратеры в России имеют неизвестный возраст из-за отсутствия подходящих методов (например для древних докембрийских структур);
- конкуренция с другими геологическими процессами — вулканические кальдеры, карстовые воронки и криогенные формы рельефа могут имитировать ударные кратеры.

Существующие на сегодняшний день технологии обладают рядом недостатков. Космические снимки в оптическом диапазоне не дают возможности полноценного поиска подобных кратеров в залесенных районах (рельеф кратера «теряется» под кронами растительности, либо не виден вообще). Технология лидарной съемки (воздушного лазерного сканирования) дает гораздо больше возможностей, однако обладает низким охватом и высокой стоимостью по сравнению с космосъемками. Тем не менее, именно лазерное сканирование способно дать принципиальный толчок развитию системного поиска малых и средних астроблем на территории России.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Географическое положение

Природный памятник «Мульдайский метеоритный кратер» расположен в отрогах Газимурского хребта, на верхней террасе правого борта реки Мульдай, у основания склона рядом с распадком Ямным, в 105 км восточнее г. Сретенска. Географические координаты центральной части памятника природы: $52^{\circ}13'54''$ с. ш., $119^{\circ}16'50''$ в. д. [Перечень..., 2025]. Ближайшим населенным пунктом является с. Курлея. Климат района резко континентальный. Район приравнен к районам Крайнего Севера. До с. Курлея идет хорошая проселочная дорога. Далее маршрут проходит в ненаселенной и достаточно труднодоступной местности до распадка Ямного по правому берегу р. Мульдай, на верхней террасе которой и расположен памятник природы.

Историческая справка

Мульдайский метеоритный кратер — памятник природы (Решение Чит. Облисполкома № 593 от 29.12.1988). ООПТ имеет региональное значение (геологический профиль), порядковый номер кадастрового дела № 558 и регистрационный номер № 1057536125382. Согласно классификации Международного союза охраны природы (МСОП, IUCN), объекту присвоена III категория. Общая площадь ООПТ составляет 2 га.

Объектом охраны является воронкообразная форма рельефа, предположительно связываемая с местом падения метеорита (рис. 1). Расположен в Сретенском р-не на р. Мульдай (прав. приток р. Газимур) в 8 км от устья. Кратер обнаружен в 1980 г. журналистом В. В. Курочкиным [1987], обследован по его настоянию в 1986–1987 гг. членами Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР с участием ученого секретаря Г. М. Ивановой и научного сотрудника АН Эстонской ССР по малым метеоритным кратерам из Эстонии Ю. В. Кестлане.

Для изучения объекта в 1980-е гг. исследователями практически через всю воронку была пройдена канава (рис. 2), проведена топографическая съемка, изучена морфология кратера и обследован рыхлый материал в его бортах и на дне.

Согласно открытым источникам, Мульдайский метеоритный кратер представляет собой воронку диаметром по длинной оси 100 м, по поперечной 85 м [Энциклопедия..., 2024]. Дно плоское, заполнено торфом с включением обломков кристаллических сланцев, занято заболоченным лесом, большая часть склонов тоже облесена. Склоны крутые, до 35° . Воронка расположена у подошвы склона на верхней террасе, имеющей высоту около 14 м. Дно воронки лежит ниже уреза реки на 1,6 м, его абсолютная отметка — 598 м (Балтийская система высот). Глубина воронки — 10–16 м. Внутри воронки выявлено нарушение ориентации стрелки компаса, что позволило исследователям предположить наличие железного метеоритного вещества в погребенном дне кратера.

По мнению первых исследователей, о метеоритном происхождении кратера свидетельствует: наличие вала высотой до 0,5 м, расположенного по бордюру воронки; дефицит объема вещества, находящегося в пределах вала, по отношению к объему воронки, что говорит о выбросе вещества из воронки в условиях рельефа, совершенно исключающих ее образование другим способом, кроме взрыва метеорита. Возраст воронки не определен. По мощности торфяного слоя, накопившегося на дне воронки, можно предположить, что падение метеорита произошло несколько тысячелетий назад. Метеоритный кратер такого малого размера, но хорошей сохранности — явление чрезвычайно редкое на Земле. В списке «Достоверные метеоритные кратеры Земли» всего 7 кратеров имеют размеры до 100 м. Необычность Мульдайского метеоритного кратера и в его овальной форме, поскольку другие кратеры имеют округлую форму, создаваемую при взрыве в однородных условиях. Здесь же кратер расположен у подошвы склона горы. О размерах метеорита,

образовавшего воронку, можно судить по аналогии с другими кратерами. Так, Соболевский кратер в хр. Сихотэ-Алинь диаметром 50 м связан с падением тела объемом 0,5–6 м³. Проблема сохранности кратера возникла в связи с работами по добыче россыпного золота в долине р. Мульдай. Памятник недостаточно изучен (Энциклопедия Забайкалья).



Рис. 1. Вид с северной экспозиции склона на Мульдайский метеоритный кратер (фото из архивов Ю. Т. Руденко. Автор: В. Дворовенко, 1987 г.)

Fig. 1. View from the northern slope exposure to the Muldai meteorite crater (photo from the archives of Yu. T. Rudenko. Author: V. Dvorovenko, 1987)

Более глубокие исследования планировались на будущие сезоны, была достигнута договоренность с геологами и руководством золотодобывающей старательской артели пробурить скважину в центре кратера. Но вся последующая история не благоприятствовала намеченным планам. Результаты всех трудов на Мульдайском «провале» вылились в несколько газетных публикаций и обобщающую статью Ю. Т. Руденко.

В 2017 г. известный забайкальский путешественник и блогер А. А. Леснянский [2017] в своей статье разместил материал (см. рис. 3) о поездке на природный памятник «Мульдайский метеоритный кратер». В своей статье Александр Абрамович отметил, что «на дне воронки компас действительно сбивается и чудит (мы пользовались электронным компасом, встроенным в спортивные часы). Еще я хочу сказать (не претендуя при этом на истину), что мы не заметили наличия по периметру кратера специфического вала, который описан упомянутыми исследователями и служит аргументом в пользу взрывного образования воронки. Может, глаз у нас не наметан, а может, вал раньше был, да разгладился со временем».



*Рис. 2. Проходка канавы в борту Мутьдайского метеоритного кратера
(фото из архивов Ю. Т. Руденко. Автор: В. Дворовенко, 1987 г.)
Fig. 2. Excavation of a trench in the side of the Muldai meteorite crater
(photo from the archives of Yu. T. Rudenko. Author: V. Dvorovenko, 1987)*



*Рис. 3. Фото А. А. Леснянского из туристического велопохода на Мутьдайский
метеоритный кратер (Автор: А. А. Леснянский, 2017 г.)
Fig. 3. Photo by A. A. Lesnyansky from a tourist cycling trip to the Muldai
meteorite crater (Author: A. A. Lesnyansky, 2017)*

После осмотра природный памятник путешественники сделали вывод: «Если заниматься изучением кратера, то нужно это делать основательно и серьезно — рыть глубокие шурфы, бурить, проводить измерения геофизическими приборами».

Таким образом, геофизических или серьезных горных и буровых исследований после работ 1986–1987 гг. не проводилось.

Методика аэросъемочных работ

Аэрофотосъемка и воздушное лазерное сканирование выполнялось в 2021 г. в рамках программы геологоразведочных работ на сопредельной территории. Территория Мульдайского кратера попала в зону выполнения работ. Пользуясь возможностью, авторы произвели исследование морфометрических характеристик кратера и проверили сведения, приведенные выше. Данный вид работ (воздушное лазерное сканирование, цифровая аэрофотосъемка) никогда не производился на данном объекте, что дает богатую почву для исследования формы объекта сейчас и возможной динамики в будущем.

Работы велись с использованием пилотируемого носителя (Ан-2), лазерной сканирующей системы REIGL LMS Q560, и цифровой среднеформатной аэрофотосъемочной камеры IGI DIGICAM H60 (60 мегапикселей). Итоговые результаты получены в системе координат WGS84 (эллипсоидальные высоты), также было проведено уточнение локальных параметров связи WGS84-ГСК2011 и уточнены остаточные поправки в высоты при переходе к Балтийской системе высот 1977 г. с использованием модели геоида EGM2008.

Воздушное лазерное сканирование выполнялось с высоты 600 м (+/-30 м) с одновременной аэрофотосъемкой в видимом диапазоне. Плотность лазерного сканирования составила 4,2 точек на 1 м², среднее расстояние между прямыми измерениями координат облучаемой поверхности составляет 48 см. Пространственное разрешение аэрофотоснимков на местности получено не хуже 0,10 м/пикс. Съемка велась параллельными залетами с продольным перекрытием 65 % и поперечным перекрытием 30–35 % [Руководство..., 1986].

Съемка велась в осенний период с практически отсутствующим лиственным покровом. Это позволило получить варианты модели рельефа как по данным лазерного сканирования (которое свободно проникает сквозь кроны деревьев даже при наличии листвы), так и по данным аэрофотосъемки (посредством построения фотограмметрического блока и стереомоделирования рельефа).

По результатам проведенных наземных измерений на контрольных точках, координаты которых определялись методом статических ГНСС-измерений, оценочная среднеквадратическая погрешность лазерно-локационной съемки по высоте составила 12,5 см, и 24,2 см — в плане. Высотная точность модели рельефа, построенной по данным аэрофотосъемки с разрешением 10 см несколько хуже — около 28 см по высоте и 31 см в плане.

Время выполнения работ составило 3 ч (включая сопредельные территории, помимо самого кратера). По результатам лазерного сканирования была выполнена классификация точек лазерных отражений (классы «Земля», «Растительность», «Прочее») с использованием средств автоматизации с последующей визуальной проверкой построенной модели (использовался пакет Terra Solid). Из точек класса «Земля» методом триангуляции Делоне [Капранов, 2004] (средняя длина ребра — 1,2–1,8 м в зависимости от типа рельефа) была построена TIN-модель местности, позднее преобразованная в регулярно-ячеистую модель данных (формат ArcINFO GRID) с шагом 1 м. На основе цифровой матрицы (формат ArcINFO GRID) построены изолинии рельефа местности с сечением 0,1 м.

Фотограмметрический блок строился с использованием программного обеспечения Agisoft Metashape. Использовались аппаратным образом определенные координаты центров фотографирования и углов разворота камеры в пространстве, а в дальнейшем

производилось уточнение элементов внешнего ориентирования по данным взаимной триангуляции и наземных контрольных точек. Итоговые материалы конвертировались в массив трехмерных точек, схожий с облаком точек лазерного сканирования [Chandler, 2001]. Фильтрация полученного фотограмметрическим способом облака точек происходила аналогично данным лазерного сканирования. Построение ортофотопланов производилось с использованием цифровой модели рельефа, полученной по материалам воздушного лазерного сканирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Все работы велись в системе координат и высот WGS84, эллипсоидальная система высот. Для связи Балтийской системы высот 1977 г. и эллипсоидальных высот WGS84 может быть использована формула (1):

$$H_{БСВ77} = H_{WGS84} - 8,163 \quad (1).$$

Все приведенные в дальнейшем высоты — WGS84 эллипсоидальные, за исключением отдельно оговоренных случаев. Основная использованная ЦМР сделана по данным воздушного лазерного сканирования (как более полная и более точная).

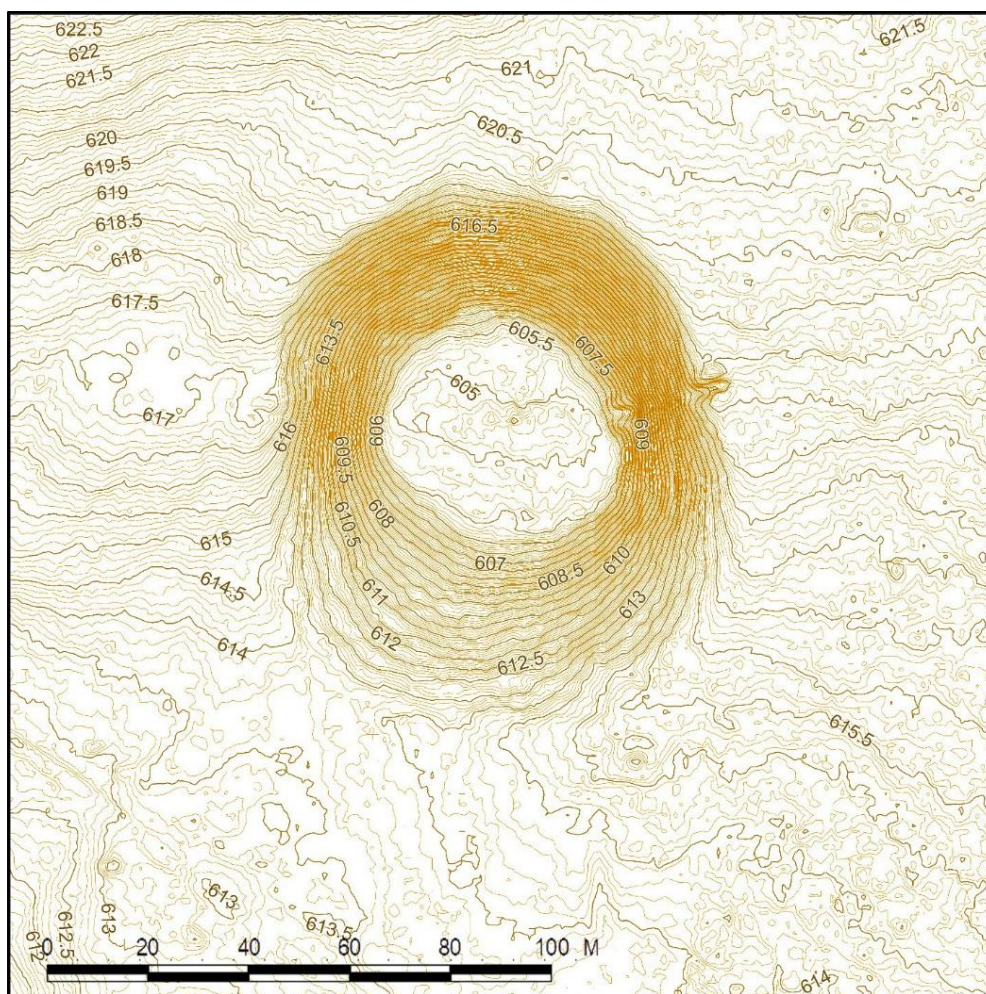


Рис. 4. Изолинии рельефа местности (горизонтали) с сечением 0,1 м (север сверху)
Fig. 4. Terrain isolines (horizontal) with a section of 0.1 m (north from above)

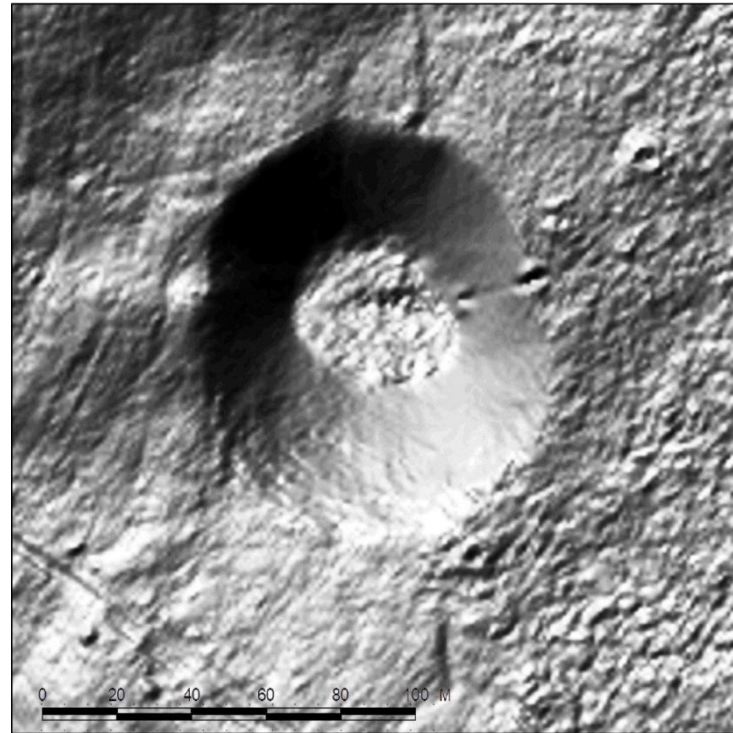


Рис. 5. Модель рельефа местности, построенная методом теневой пластики (север сверху)

Fig. 5. A model of the terrain constructed by the method of shadow plastic (north from above)

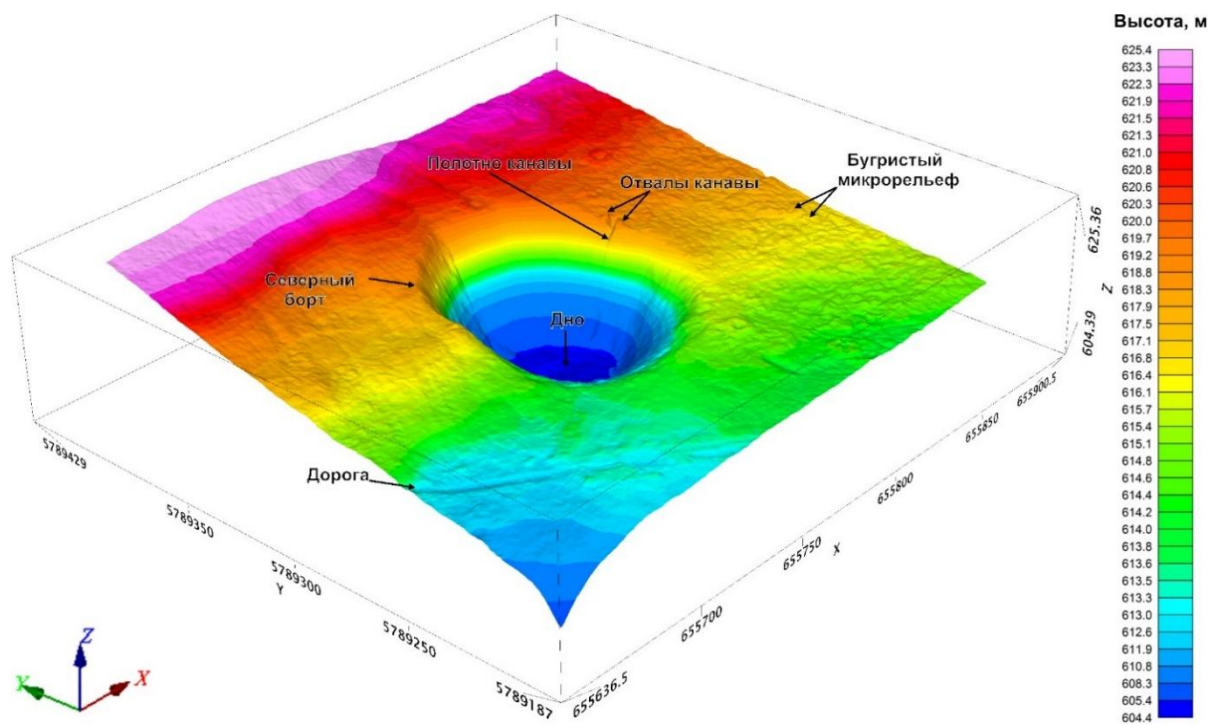


Рис. 6. Представленная в объеме цифровая модель рельефа (север на стрелке Y)

Fig. 6. A digital relief model presented in the volume (north on the Y arrow)

Некоторые числа и высоты

По результатам лазерного сканирования была построена регулярно-ячеистая модель данных (рис. 8) в формате ArcInfo GRID, шаг 1 м. По ней же была построена модель углов наклона (рис. 7) в том же формате.

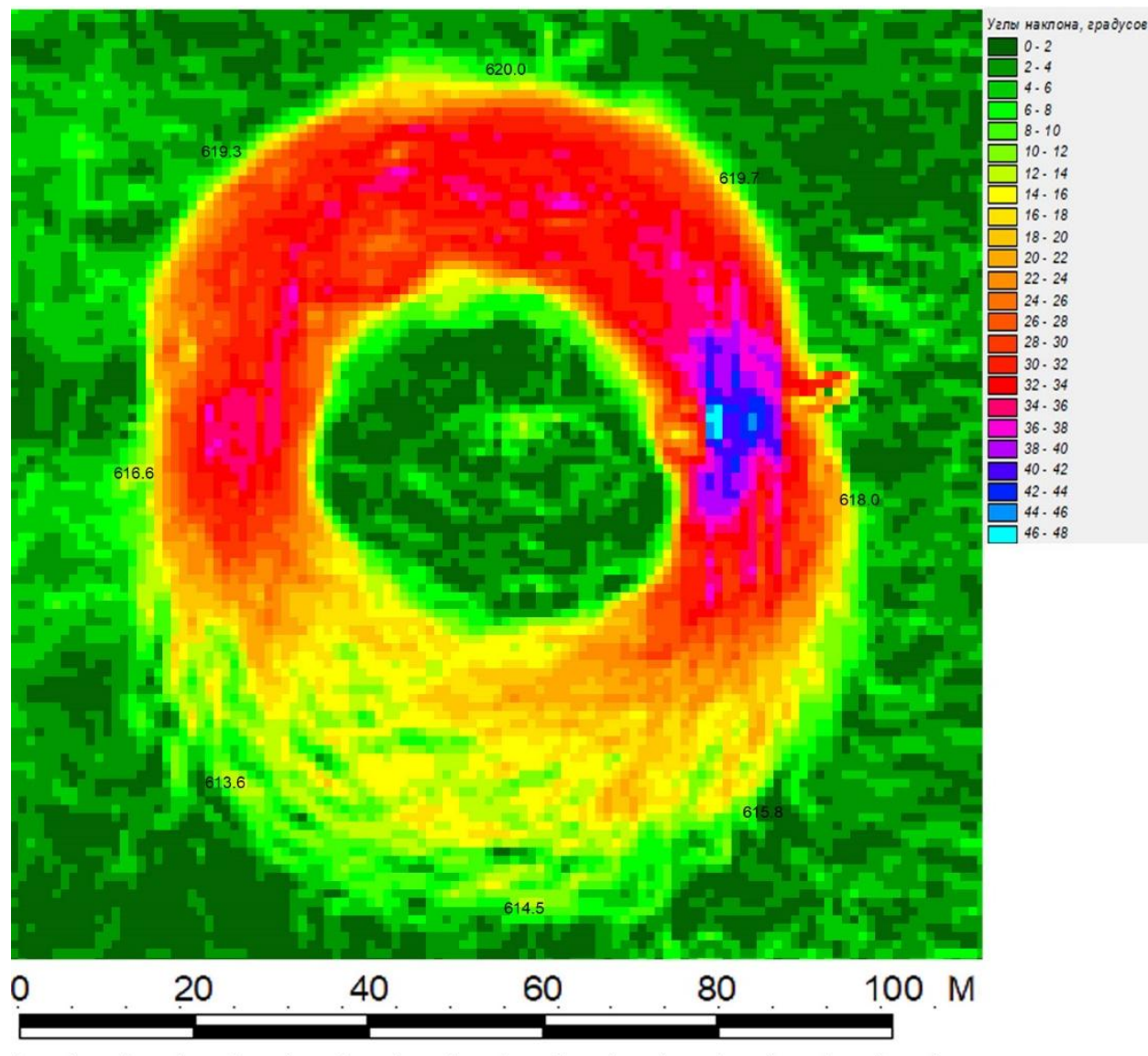


Рис. 7. Модель углов наклона в виде растра с шагом 1 м
Fig. 7. Model of tilt angles in the form of a raster with a step of 1 m

Нетрудно видеть, что модель углов наклона очень хорошо позволяет выявить границу воронки, за которую был принят переход к углам наклона в 6° и более (см. рис. 7). По результатам оконтуривания были отмечены границы в виде векторного полигонального объекта. Все нижеперечисленные морфометрические характеристики относятся к объекту внутри данного полигона с контуром синего цвета (см. рис. 8).

Урез кратера имеет разную высоту (см. рис. 8). Центр кратера имеет высоту 604,5 м, северный край — 620,0 м, восточный — 618,0 м, южный — 614,5 м, западный — 616,6 м. Таким образом, минимальная глубина кратера составляет 10 м, максимальная — 15,5 м.

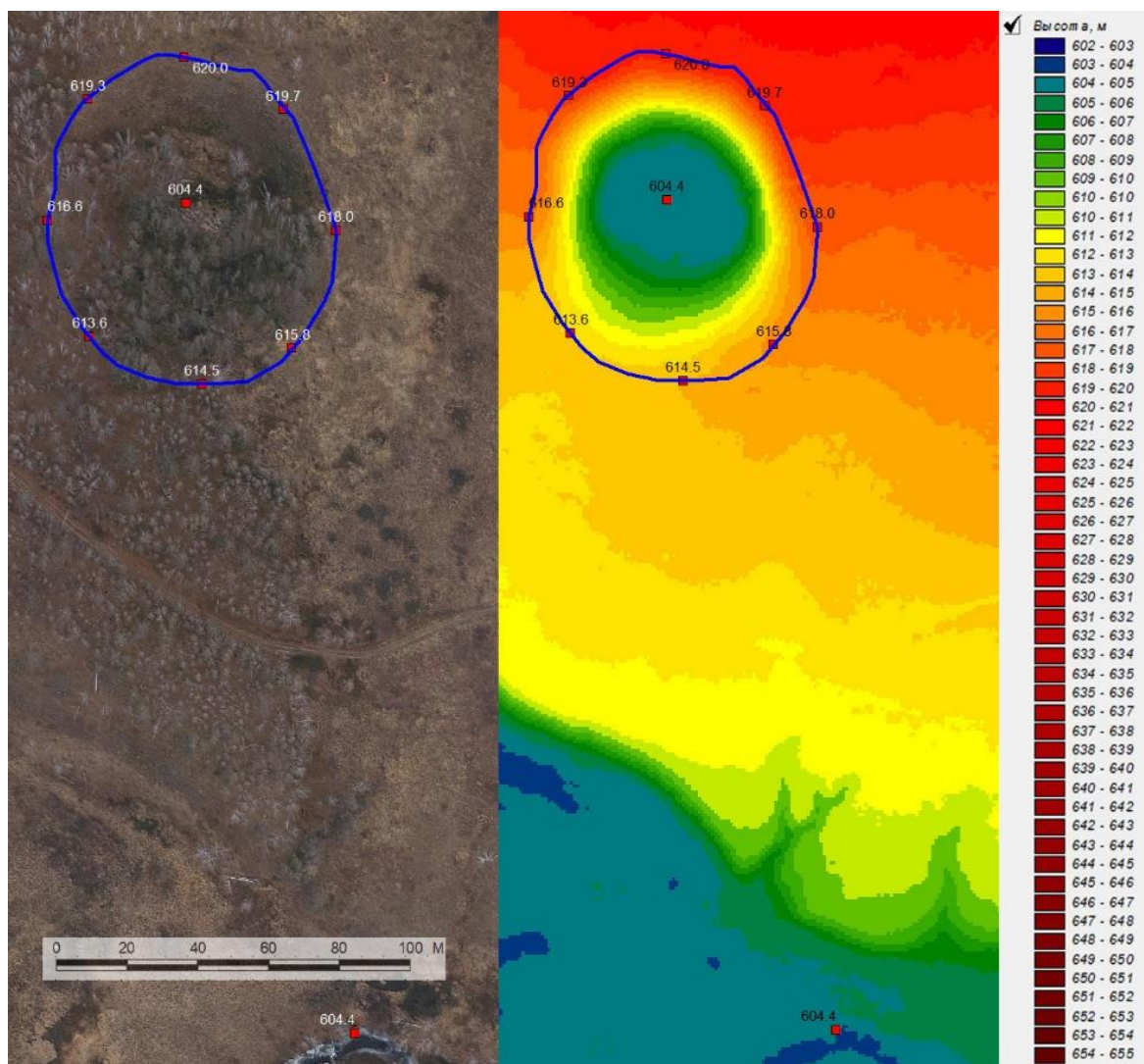


Рис. 8. Слева — ортофотоплан, справа — ЦМР Мульдайского кратера и прилегающего участка речной долины до ближайшего участка русла
 Fig. 8. On the left is an orthophotomap, on the right is a digital elevation model of the Muldai Crater and the adjacent section of the river valley to the nearest section of the riverbed

Объем воронки, вычисленный с помощью растровой модели методом конечных элементов (вычислялся до плоскости, образованной отметками высот по периметру кратера на рис. 8), составляет 42 708 м³. Размеры кратера — 103×90 м. Модель углов наклона показывает крутизну восточного склона кратера до 48°, северного и западного — до 38°, южного — до 30° (см. рис. 7). Углы свыше 34° превышают естественный угол осыпания рыхлых пород. Склоны подобной крутизны, сложенные рыхлыми породами, неустойчивы и не могут существовать в течение длительного времени.

Профилирование облака точек подтверждает эти вычисления (см. рис. 9). По результатам исследований 1980-х гг., в восточном борту кратера была пройдена канава (см. рис. 2) с целью изучения строения верхних слоев грунта (канава хорошо видна в модели рельефа, см. рис. 5). Канава предшественников действительно хорошо дешифрируется в материалах аэрофотосъемки в виде своеобразной выемки (полотно) с двумя характерными бугорками (отвалы). В особенности хорошо сохранилась ее восточная часть. Кроме того, в ЦМР хорошо прослеживается вездеходная дорога и кочковатый бугристый микрорельеф

(формы 10–20 см, рис. 4–6). Соответственно пропуск описанного исследователями вала в точках лазерных отражений практически невозможен. Как видно на рис. 2, склоны кратера сложены рыхлым материалом и свободно копаются лопатой. Склоны, несмотря на значительную крутизну, имеют невыработанный профиль, что говорит о низком уровне переработки поверхности кратера под действием поверхностного стока и атмосферных осадков, а это в свою очередь свидетельствует о незначительном возрасте данной формы рельефа. Отметим, что для формирования выработанного профиля в областях развитой овражно-балочной эрозии порой достаточно нескольких лет. Тем не менее, в данном кратере склоны сохраняют свою форму.

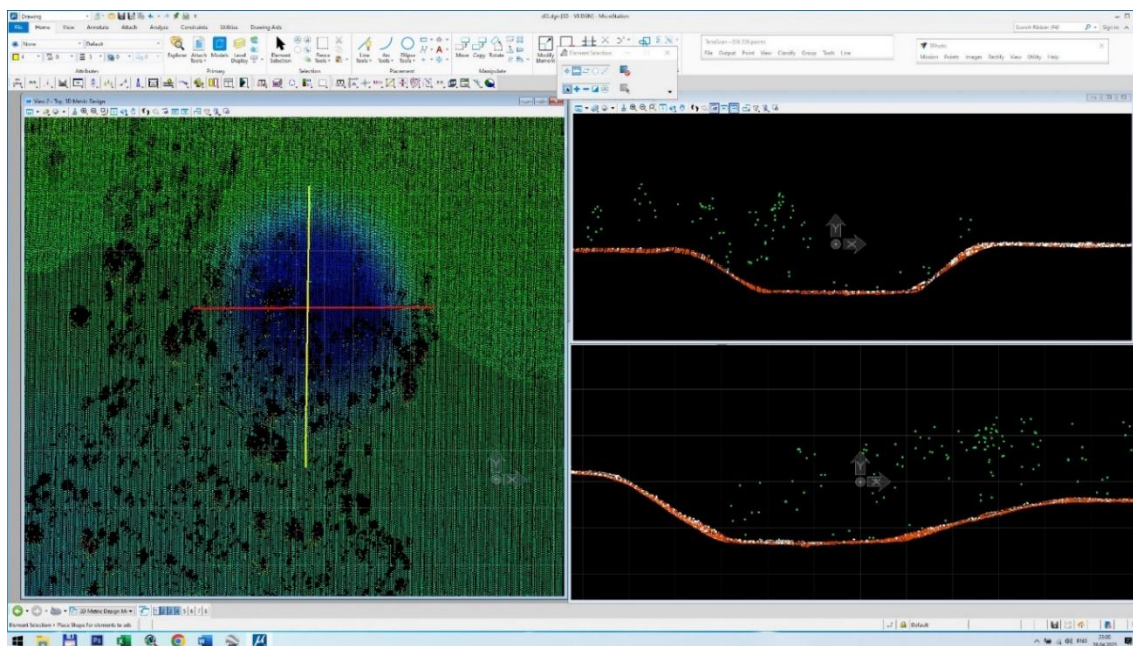


Рис. 9. Профилирование облака точек. Справа сверху — профиль по красной линии (слева направо), справа внизу — профиль по желтой линии (сверху вниз)

Fig. 9. Profiling the point cloud. Top right — profile along the red line (from left to right), bottom right — profile along the yellow line (from top to bottom)

О наличии ударного вала

По итогам визуальной оценки профилей воронки, построенным по точкам лазерного сканирования, было отмечено, что описанного в ранних свидетельствах о кратере вала не отмечено. Точность и подробность данных ВЛС (12,5 см по высоте, шаг точек — около полуметра) исключает возможность пропуска валов выше 20 см по высоте, и если бы ударный вал был представлен на местности, он прекрасно выделялся бы в точках лазерных отражений. Учитывая объем перемещенного грунта (объем кратера составляет 42 708 м³), вал должен существовать. В табл. 1 приведены возможные сценарии формирования вала и предположительная его высота.

Как видим, даже если бы выброшенный грунт, формирующий вал, составил бы всего 50 % от общего объема кратера, а ширина вала составила бы 40 м (при габаритах воронки 100×90 м), он все равно имел бы высоту около 2 м и не мог бы быть незаметен на профилях (см. рис. 9), однако на них он не наблюдается. Не наблюдается он ни в ЦМР (в рисунке горизонталей, см. рис. 4), ни в модели углов наклона (рис. 7). Таким образом, мы можем утверждать, что у Мульдайского кратера вала нет, а свидетельства обследований 1980-х гг. не подтверждаются.

Табл. 1. Возможные параметры вала по периметру кратера
при различных сценариях перемещения грунта
Table 1. Possible shaft height for different scenarios

	Периметр	% объема воронки, перешедший в вал		
Текущий контур кратера	306,0	100 %	70 %	50 %
Вал шириной 20 м	431,6	9,90	6,93	4,95
Вал шириной 30 м	494,4	5,76	4,03	2,88
Вал шириной 40 м	557,2	3,83	2,68	1,92

Второй особенностью, противоречащей ранним описаниям, является высота днища воронки. По данным ВЛС, высота дна кратера (низшая точка — 604,4 м), высота уреза воды у ближайшего постоянного водотока — тоже 604,4 м. Таким образом, дно кратера не находится ниже уровня реки (см. рис. 10), как это было отмечено в более ранних обследованиях. Вопрос о том, затопливается ли дно воронки во время паводковых явлений на реке, остается открытым.

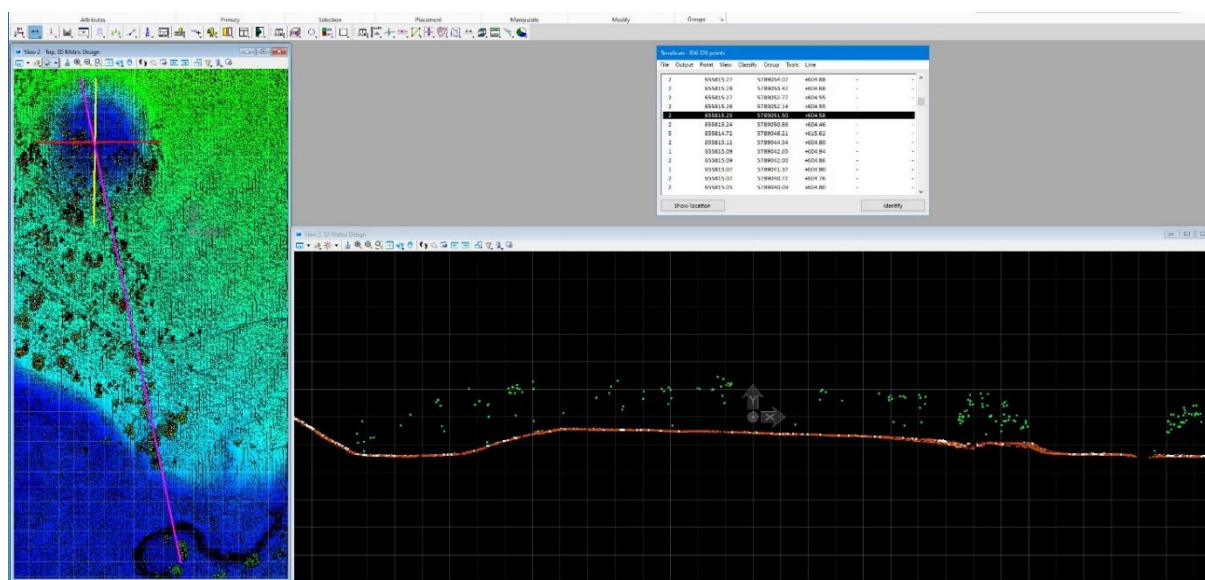


Рис. 10. Профилирование облака точек. Профиль по фиолетовой линии показывает, что дно кратера и урез воды ближайшей реки находятся на одном уровне

Fig. 10. Profiling the point cloud. The profile along the purple line shows that the bottom of the crater and the water line of the nearest river are at the same level

Энергия удара

Интересным представляется также вопрос об энергии удара и параметрах тела, которое должно было оставить астроблему подобного размера, из которой полностью исчезла вся порода без формирования ударного вала. Предположим, что средняя плотность породы равна $2\,750\text{ кг/м}^3$ (идентично известняку), ее теплоемкость равна $1\,000\text{ кДж/кг} \cdot \text{градус}$ (глина, бетон), и для полного расплавления породы ее нужно нагреть до $1\,340$ градусов (известняк). В этом случае (при вычисленном объеме) масса породы составит $123\,800$ тонн породы, а на ее полное расплавление уйдет около $157,4$ ТДж энергии (соответствует $37,66$ кт в тротиловом эквиваленте). Космическое тело,

обладающее подобной энергией при скорости 10 км/с (в момент столкновения), должно было бы иметь массу 3 147 т (для сравнения, масса крейсера «Аврора» — 6 700 т). В случае, если бы подобное тело было бы железным, его объем должен был бы быть 426 м³, что соответствует железному шару диаметром 9,4 м. Если бы метеорит был каменным (хондрит, плотность 3 200 кг/м³), его диаметр должен был бы быть 12,5 м. Однако все вышеизложенное достаточно только для расплавления породы, но не испарения ее. Испарение с выпадением без образования вала потребовало бы кратно большее количество энергии (в 4–6 раз), и даже в этом случае трудно представить себе сценарий формирования кратера, не имеющего никакого вала по периметру.

Кратеры схожих размеров обычно формируются телами существенно меньших размеров, чем описано выше (например Сихотэ-Алинский метеорит), при этом энергии удара недостаточно для полного расплавления породы в объеме образующегося кратера, что приводит к выбросам породы, хорошо выражающимся в рельефе. В данном случае сценарий полного расплавления/испарения породы при ударе выглядит совершенно фантастическим.

Точка зрения геологов

Хотелось бы уделить внимание еще паре обстоятельств, которые выходят за пределы возможностей аэрофотосъемки и лазерного сканирования, но имеют геологическое объяснение. Участниками экспедиции 1986–1987 гг., обнаружен мелкообломочный каменный материал, который интерпретировался как раздробленные коренные породы при ударе небесного тела. А. А. Леснянский [2017] в своей статье отмечает, что «...этим рыхлым „осколочным“ материалом сложен не только вал по периметру кратера, но точно такой же щебень и дресва распространены вообще по всей долине, а склоны сопки сплошь ими покрыты под тонким слоем дерна. И это всего лишь типичные элювиальные и делювиальные отложения, формирующиеся при естественных процессах разрушения и выветривания горных пород». Эту точку зрения разделяют и авторы настоящей статьи. В окрестностях устья р. Мульдай в ходе выполнения литогеохимической съемки по вторичным ореолам рассеяния Р. В. Груздев лично неоднократно встречал элювиально-делювиальными развалы кремнистых сланцев и алевролитов ерниченской толщи (Є₁₋₂?er), наблюдаемых в виде обломочных плиток.

Следующее, участниками экспедиции внутри воронки выявлено нарушение ориентации стрелки компаса, что позволило им предположить наличие железного метеоритного вещества в погребенном дне кратера. Последнее подтверждает в своей статье Александр Абрамович — «...на дне воронки компас действительно сбивается и чудит (мы пользовались электронным компасом, встроенным в спортивные часы)» [Леснянский, 2017]. Этот факт можно объяснить особенностью геологического строения территории природного памятника. Здесь основное участие принимают терригенно-осадочные отложения ерниченской толщи нижнего среднего кембрия (Є₁₋₂?er) [Синица, Турчинов, 1968]. Породы толщи представлены светло-серыми песчаниками аркозовыми и кварцитовидными, алевропесчаниками, темно-серыми до черных алевролитами тонкополосчатыми, прослоями и линзами серых известняков, гравелитами с пестроцветными серицит-кремнистыми сланцами. Повсеместно терригенные породы ороговикованны до образования плагиоклаз-кордиерит-биотитовых, кварц-полевошпатовых и биотит-роговообманковых роговиков, а карбонатные породы скарнированы [Синица, Турчинов, 1968]. В районе работ лично автором был обследован целый ряд магнитных аномалий, представленных скарнированными известняками быстринской и линзами известняков ерниченской толщи. Некоторые наиболее интенсивные аномалии заверялись поисковым картировочным бурением. Как правило природа магнитных аномалий устанавливалась однозначно — скарнированные разновидности карбонатных пород с содержанием магнетита, реже пирротина. Вероятно,

упомянутые магнитные аномалии и нарушение ориентации компаса обусловлены развитием магнетитсодержащих скарнов на контакте линз известняков ернической толщи с средне-позднеюрскими гранодиорит-порфирами шахтаминского комплекса ($\gamma\delta\pi_3J_{2-3}\check{c}$). В ходе бурения некоторых скважин буровые бригады отмечали потерю промывочной жидкости, что в дальнейшем объяснялось пустотами выщелачивания (кавернами) в известняках.

В ходе подготовки статьи появилась еще интересная информация о том, что не так давно природный памятник был посещен сотрудником СО РАН О. В. Корсуном. В результате обследования Мульдаевского метеоритного кратера из рыхлых отложений были отобраны пробы. Изучение Г. А. Юргенсоном тяжелой фракции рыхлых отложений под электронным микроскопом не выявило примеси метеоритных минералов (материалы исследований пока не опубликованы).

Наличие растворимых карбонатных пород в пачке ернической толщи в совокупности с перечисленными выше факторами позволяет рассматривать здесь вероятность подземного карстообразования с последующим обвалом, перекрывающих карст пород. Для подтверждения нашей гипотезы в пределах природного памятника требуется проведение детальных геофизических исследований с последующим изучением объекта горными и буровыми работами. Только тогда может появиться полное понимание о природе т. н. Мульдаевского метеоритного кратера.

ВЫВОДЫ

Отметим, что выполненный залет по своему масштабу, размерам пиксела и другим параметрам соответствует требованиям залета, необходимым для создания топографических планов м-ба 1:1 000 с сечением рельефа 0,5 м. Все формы рельефа с размерами более 1/3 сечения рельефа (т. е. 0,16 м по высоте) отображены на полученном массиве данных. Общие результаты анализа пространственных и географических данных говорят о:

1. Несоответствии ранее проведенных результатов обследования полученным данным. Отсутствует ударный вал, при этом перемещение более 42 000 кубометров породы из кратера остается без объяснений.
2. Высота дна кратера и уреза ближайшего водотока идентична. Ранее авторы предыдущих обследований утверждали, что дно кратера находится ниже уровня уреза ближайшей реки, что принималось за признак ударного происхождения кратера.
3. Значительная крутизна и невыработанный профиль стенок кратера говорит о незначительном (возможно, десятки или первые сотни лет) возрасте склонов.
4. Найденные обломки пород в пределах памятника имеют находки далеко за пределами памятника и, вероятно, являются элювиально-делювиальными развалами песчаников, алевролитов и кремнистых сланцев.
5. Магнитные аномалии могут быть связаны с контактово-метасоматическими процессами, в т. ч. образованием скарнов с магнетитом и пирротинном по линзам и прослоям известняков, встречающихся в ернической толще.
6. Природа образования Мульдаевского метеоритного кратера скорее всего связана с процессами карстообразования по линзам известняков ернической толщи и последующим провалом грунта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова по теме «Изучение динамики социоприродных систем с использованием геоинформационного картографирования и цифровых технологий» (№ 121051100163-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амелин И. И., Ляпидевская З. А., Гусяков В. К. Импактные структуры Сибири и Дальнего Востока. Сборник материалов X Международного научного Конгресса «Интерэкспо ГЕОСибирь-2014». Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. С. 114–118.
- Капралов Е. Г., Кошкарёв А. В., Тикунов В. С. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 480 с.
- Курочкин В. В. Глыба из космоса. М.: Неделя, 1987. С. 2–8.
- Леснянский А. А. Туристический велопоход. Электронный ресурс: <https://lesnyanskiy.livejournal.com> (дата обращения 24.03.2025).
- Перечень особо охраняемых природных территорий регионального значения Забайкальского края. Утвержден приказом от 17.01.2025. Чита, 2025. С. 1–11.
- Руководство по аэрофотосъемочным работам. М.: Министерство гражданской авиации, 1986. 176 с.
- Синица С. М., Турчинов И. А. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Восточно-Забайкальская. Лист N-50-XXXVI. Объяснительная записка. М.: Недра, 1968. 68 с.
- Хрянина Л. П. Метеоритные кратеры на Земле. Л., Недра, 1987. 178 с.
- Шевченко Ю. С. Особенности ударных структур типа конусов разрушения (экспериментальные данные). Геология и геофизика, 1996. № 37. Т. 2. С. 124–129.
- Энциклопедия Забайкалья. Электронный ресурс: <http://encycl.chita.ru/encycl/person/?id=2868> (дата обращения 31.03.2024).
- Chandler H. Terrain Measurement Using Automated Digital Photogrammetry. Engineering Geology Special Publications, 2001. V. 12. P. 13–18.

REFERENCES

- Aerial Photography Guide. Moscow: Ministry of Civil Aviation, 1986. 176 p. (in Russian).
- Amelin I. I., Liapidevskaya Z. A., Gusiakov V. K. Impact Structures of Siberia and Far East. Proceedings of X International Scientific Congress “InterExpo GeoSiberia-2014”. Novosibirsk: Siberian State University of Geosystems and Technologies, 2014. V. 1. No. 1. P. 114–118 (in Russian).
- Chandler H. Terrain Measurement Using Automated Digital Photogrammetry. Engineering Geology Special Publications, 2001. V. 12. P. 13–18.
- Encyclopedia of Transbaikalia. Web resource: <http://encycl.chita.ru/encycl/person/?id=2868> (accessed 31.03.2025) (in Russian).
- Hryanina L. P. Meteorite Craters on Earth. Leningrad: Nedra, 1987. 178 p. (in Russian).
- Kapralov E. G., Koshkariyov A. V., Tikunov V. S. Fundamentals of Geoinformatics. Moscow: Academia, 2004. 480 p. (in Russian).
- Kurochkin V. V. The Boulder from Outer Space. Moscow: The Week, 1987. P. 2–8 (in Russian).
- Lesnyanskiy A. A. Tourist Bike Tour. Web resource: <https://lesnyanskiy.livejournal.com> (accessed 24.03.2025) (in Russian).
- List of Specially Protected Natural Areas of Regional Significance of the Zabaikalsky Krai. Approved by order of 17.01.2025. Chita, 2025. P. 1–11 (in Russian).
- Shevchenko U. S. Features of Impact Structures of the Destruction Cone Type (Experimental Data). Geology and Geophysics, 1996. No. 37. V. 2. P. 124–129 (in Russian).
- Sinitza S. M., Turchinov I. A. Geological Map of USSR of scale 1:200 000. Series East-Zabaikalie. Sheet N-50-XXXVI. Explanatory note. Moscow: Nedra, 1968. 68 p. (in Russian).