



# Визуализация данных о морфологических особенностях кольцевых структур на примере метеоритного кратера Цэнхэр (Гобийский Алтай)

С.Н. Абдульмянов<sup>1,2</sup>✉, С. Хадбаатар<sup>3</sup>, И.К. Семеренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Москва, Россия

<sup>3</sup> Монгольский государственный университет образования, Улан-Батор, Монголия

✉ abdulmyanov@gmail.com

**ЦИТИРОВАНИЕ** Абдульмянов С.Н., Хадбаатар С., Семеренко И.К. Визуализация данных о морфологических особенностях кольцевых структур на примере метеоритного кратера Цэнхэр (Гобийский Алтай) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 1. С. 64–89. DOI:10.30533/GiA-2025-004.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** поверхность, спутниковые данные, геоморфологические особенности, полевые методы исследований, кольцевые структуры, астроблема, светотеневая отмывка, изображение форм рельефа на картах

**АННОТАЦИЯ** Многие из известных импактных структур обнаружены благодаря анализу характерных морфологических признаков с использованием геоинформационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования. Спутниковые данные и возможности ГИС позволяют провести дешифрирование, визуальную оценку метеоритных кратеров и представить особенности морфологии объектов. Однако структурным формам не всегда соответствуют явные морфологические выражения. Морфологические признаки многих геологических объектов, хорошо просматривающиеся при анализе спутниковых снимков и отображающиеся на картах, могут быть совершенно не очевидными при прохождении полевых маршрутов и проведении глазомерной съемки. Это актуально и для выделения астроблем, среди значительного количества которых лишь небольшая часть обладает явными морфологическими особенностями. Импактные структуры различаются сохранностью, обусловленной особенностями деформации, степенью разрушения поверхности, условиями захоронения и топографической открытостью. В результате проведения полного цикла исследовательских работ (изучение геоморфологии, литологии, петрографии, полевые работы с прохождением маршрутов, съемка, отбор образцов

и их камеральная обработка) становится возможным диагностировать генезис астероидных кратеров. На примере метеоритных кратеров можно проследить разные по степени сложности задачи дешифрирования кольцевых структур. Кольцевые структуры хорошей сохранности являются примерами визуализации данных и наглядного представления рельефа поверхности.

## 1 Введение

Широко распространенные кольцевые структуры представляют собой объекты различного масштаба, генезиса, возраста и сохранности. Многие из этих форм обладают яркими морфологическими чертами, являются объектами для детальных инструментальных исследований, визуализации данных и примерами наглядного представления рельефа поверхности.

По размерам (диаметрам) кольцевые структуры могут быть четырех основных групп: мини- (километры), мезо- (десятки километров), макро- (первые сотни километров), мега- (многие сотни и тысячи километров) [1]. Данная классификация основана «на четкой дискретности латеральных параметров структур»<sup>1</sup>. Самой многочисленной является первая группа<sup>2,3</sup>.

По глубине заложения среди кольцевых структур выделяют внутрикоровые, астеносферные (астеноконы), внутримантийные и внутриядерные (геоконы). По мнению ряда исследователей, существует линейная корреляция между поперечником структуры и глубиной ее заложения. По происхождению кольцевые структуры могут быть магматическими структурами, вулканическими постройками, импактными кратерами (астроблемами), карстовыми формами, соляными куполами, объектами, связанными с криогенной деятельностью, и др.

К кольцевым структурам эндогенного происхождения относятся большинство из трех сотен сохранивших округлые очертания вулканов Монголии (эффузивные формы) и хорошо просматривающиеся магматические структуры (интрузивные формы), также встречающиеся в стране в изобилии. Такими заметными объектами являются: вулкан Тогоо-Уул (*монг.* Тогоо уул) в нагорье Хангай, крупные кальдеры Зуун-Бурслуур-Уул и Агтын-Хурээ (*монг.* Зуун бурслуур уул, Агтын хурээ), расположенные в вулканическом плато Дарьганга, на границе Монголии и Китая, и ряд других объектов. Кроме многочисленных эффузивных форм в Монголии встречается большое число магматических образований (интрузий), имеющих и более значительные размеры, округлые очертания, хорошо просматривающихся на космических и аэрофотоснимках. На территории Монголии, вероятно, самая большая структура магматической природы — массив Арц-Богд. Структура расположена на юго-западе страны (координаты: 44,750046° / 95,422581°), ее диаметр составляет более 35 км, высота — 2770 м. Крупной кольцевой магматической структурой Восточной Гоби является массив Хан-Богд. С ним связано уникальное медно-золоторудное месторождение страны — гигант Оюутолгой (*монг.* Оюутолгой; *англ.* Оуу Tolgoi mine). Его координаты: 43,045217° / 107,135434°. Примечательны магматический Индертинский массив, расположенный на южном склоне Монгольского Алтая, и формы, распространенные в долине р. Булган-Гол (*монг.* Булган гол; *каз.* Урумгу), уходящей за пределы страны в Джунгарию. Изображения кольцевых структур эндогенного генезиса представлены на рис. 1–4.

1 Соловьев В.В. Карта морфоструктур центрального типа территории СССР. Масштаб 1 : 10 000 000. 2-е изд. Л.: ВСЕГЕИ, 1982. С. 18.

2 Брюханов В.Н., Буш В.А., Глуховский М.З. и др. Кольцевые структуры континентов Земли. М.: Недра, 1987. 184 с.

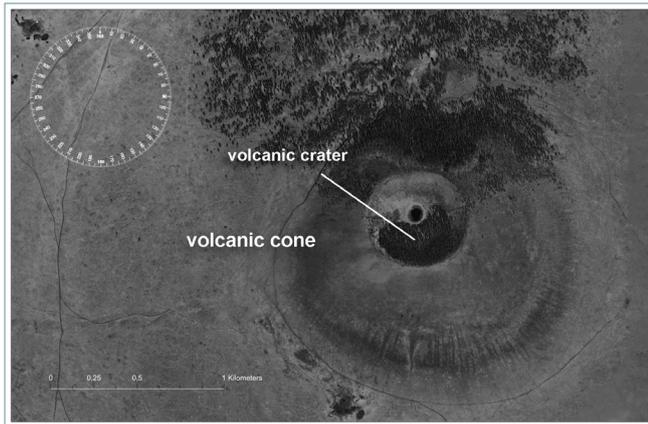
3 Ежов Б.В., Худяков Б.И. Морфотектоника геодинамических систем центрального типа. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. 129 с.

**Рис. 1**

Вид на хорошо сохранившийся вулкан Тогоо-Уул (1688,2 м), нагорье Хангай, центр Монголии. На снимке обозначены конус (volcanic cone) и кратер вулкана (volcanic crater). Диаметр более 1,5 км, диаметр кратера 0,4 км. Масштаб 1 : 3 000. Координаты: 48,996149° / 102,738402°. Вариант слоя: World Imagery, Esri (версия 2023)

**Fig. 1**

View of the well-preserved volcano Togoo uul (1688.2 m), Khangai plateau, Central Mongolia. The image shows the cone and crater of the volcano. The diameter is more than 1.5 km, the diameter of the crater is 0.4 km. Scale 1 : 3,000. Coordinates: 48.996149°, 102.738402°. Layer option: World Imagery, Esri, in version 2023

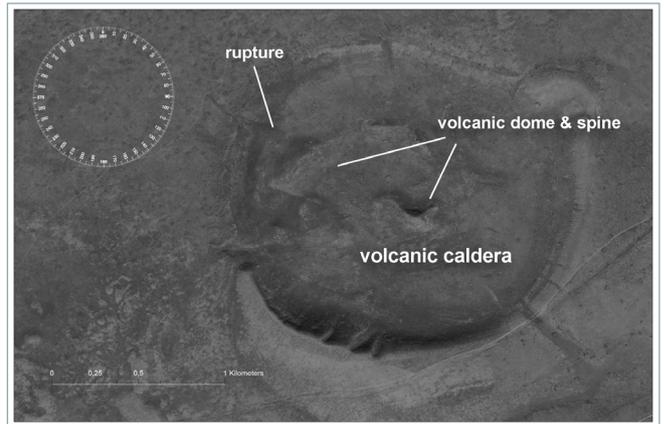


**Рис. 2**

Вид на кальдеру Агтын-Хурээ (1478,0 м), плато Дарьганга, юго-восток, граница Китая и Монголии. На снимке обозначены кальдера (volcanic caldera), вулканические купола (volcanic dome & spine) и повреждения контура (rupture). Диаметр более 2 км. Масштаб 1 : 3 000. Координаты: 45,436016° / 114,696679°. Вариант слоя: World Imagery, Esri (версия 2023)

**Fig. 2**

View of the Agtyn Khuree caldera (1478.0 m), Darganga plateau, southeast, border of China and Mongolia. The image shows the caldera, volcanic domes and damage to the contour. Diameter is more than 2 km. Scale 1 : 3,000. Coordinates: 45.436016°, 114.696679°. Layer option: World Imagery, Esri, in version 2023

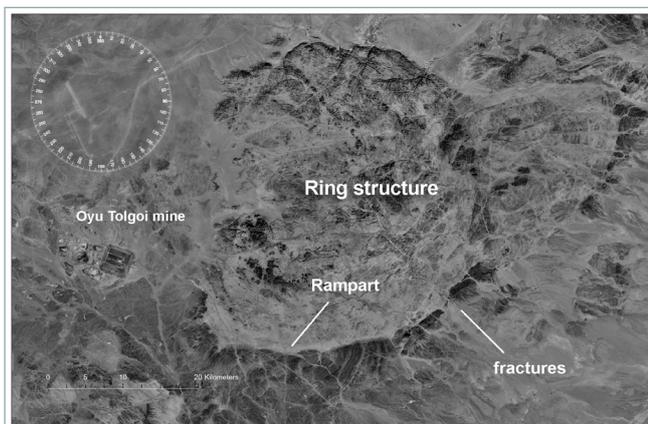


**Рис. 3**

Вид на структуру (ring structure) магматической природы Хаан-Богд, юг Монголии. Диаметр 30 км, высота 1178 м. На снимке обозначены вал (rampart), трещины (fractures), месторождение Оюутолгой (Oyu Tolgoi mine). Масштаб 1 : 50 000. Координаты: 43,045217° / 107,135434°. Вариант слоя: World Imagery, Esri (версия 2023)

**Fig. 3**

View of the magmatic structure of Khaan Bogd, southern Mongolia. Diameter 30 km, height 1178 m. The image shows a swell, cracks, and the Oyuun Tolgoi deposit. Scale 1 : 50,000. Coordinates: 43.045217°, 107.135434°. Layer option: World Imagery, Esri, in version 2023

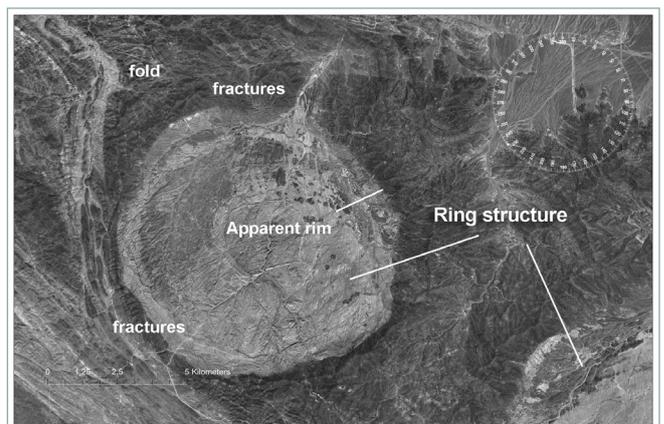


**Рис. 4**

Вид на структуру (ring structure) магматической природы (батолит) долины р. Булган-Гол, граница Китая и Монголии. На снимке обозначены вал (apparent rim), трещины (fractures) и складки (fold). Диаметр 3,8 км, высота 1141 м. Масштаб 1 : 24 000. Координаты: 46,063972° / 90,901970°. Вариант слоя: World Imagery, Esri (версия 2023)

**Fig. 4**

View of the magmatic structure (batholith) of the Bulgan Gol river valley, border of China and Mongolia. The image shows structures, swell, cracks and folds. Diameter 3.8 km, height 1141 m. Scale 1 : 24,000. Coordinates: 46.063972°, 90.901970°. Layer option: World Imagery, Esri, in version 2023



Кольцевые структуры, связанные с действием экзогенных факторов (карстовых процессов, совместной работы льда, снега и воды), имеют молодой возраст, относительно небольшие размеры и менее распространены. Так, типичной миниатюрной формой высокогорной зоны Монгольского Алтая являются ледниковые цирки (кары), формы рельефа, имеющие гляциальное происхождение.

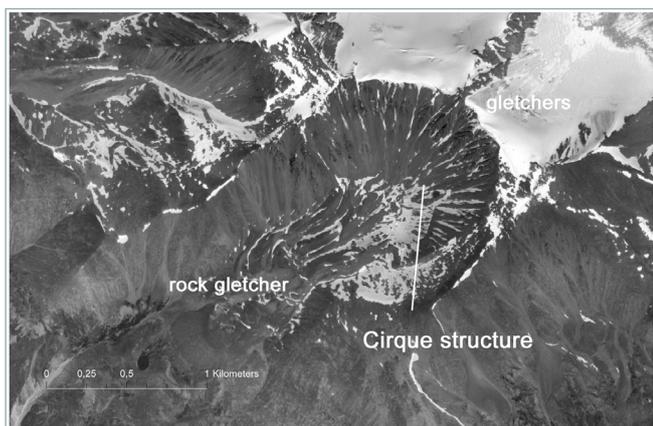
В отдельных крупных массивах они образуют лестницы каров (*англ.* cirque steps, glacier stairway), маркирующих циклические фазы оледенения горной страны. Большой интерес представляют и кольцевые структуры, распространенные в пределах современной криолитозоны, а также разнообразные структуры, имеющие техногенное происхождение. Примером такого рода, вероятно, могут быть взрывные кратеры, образованные в результате подземного взрыва газогидратов, на полуострове Ямал. Первой из найденных структур является Ямальский кратер в бассейне р. Мьяронгъяха (притока р. Мордыяха). Первоначальные размеры кратера: диаметр около 20 м, глубина около 50 м. Время образования — зимний период 2013–2014 годов. Координаты:  $69,971111^\circ / 68,370278^\circ$ . Специалистами картированы несколько десятков подобных кольцевых структур. Вопрос происхождения ряда наземных кольцевых структур является открытым, значительная часть объектов изучена недостаточно. Примеры кольцевых структур экзогенного генезиса приведены на рис. 5–6.

**Рис. 5** 

Вид на кар, массив Буянтын-Уул (3661 м), северо-запад Монголии. На снимке обозначены ледниковый цирк (кар) (cirque structure), ледники (gletcher) и каменные глетчеры (rock gletcher). Диаметр 920 м, высота 3403 м. Масштаб 1 : 2 600. Координаты:  $48,328661^\circ / 89,816284^\circ$ . Вариант слоя: World Imagery (Clarity), Esri (версия 2024)

**Fig. 5**

View of the kar, Buyantyn uul (3661 m), northwestern Mongolia. The picture shows a glacial cirque (kar), glaciers and rock glaciers. Diameter 920 m, height 3403 m. Scale 1 : 2,600. Coordinates:  $48.328661^\circ$ ,  $89.816284^\circ$ . Layer option: World Imagery (Clarity), Esri, in version 2024

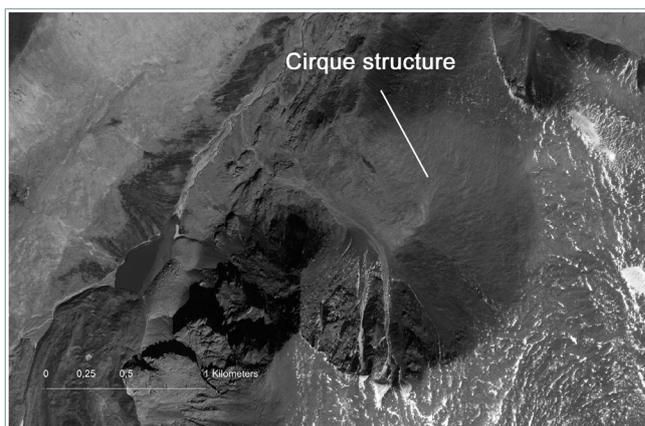


**Рис. 6** 

Вид на кар, массив Ценгел-Хайрхан-Уул (3925 м), северо-запад Монголии. На снимке обозначен ледниковый цирк (кар) (cirque structure). Диаметр 1620 м, высота 2922 м. Масштаб 1 : 2 600. Координаты:  $48,578016^\circ / 89,213845^\circ$ . Вариант слоя: World Imagery (Clarity), Esri (версия 2024)

**Fig. 6**

View of the kar, Tsengel Khairkhan uul (3925 m), northwestern Mongolia. The picture shows a glacial cirque (kar). Diameter 1620 m, height 2922 m. Scale 1 : 2,600. Coordinates:  $48.578016^\circ$ ,  $89.213845^\circ$ . Layer option: World Imagery (Clarity), Esri, in version 2024



Метеоритные кратеры Земли относятся к экзогенным формам и рассматриваются исследователями отдельно. Астроблемы — геологические структуры, связанные с падением метеоритов и их фрагментов, свидетельства мгновенного, часто катастрофического изменения земной поверхности. Направления исследований наземных метеоритных кратеров включают три группы диагностических признаков: морфоструктурные, геофизические и минералопетрографические.

Многие импактные кольцевые структуры имеют грандиозные размеры, сложное строение, в значительной степени разрушены, погребены или скрыты толщей океанических осадков и предполагают длительное комплексное детальное изучение. Пример такого рода грандиозных объектов — возвышенность Бедаут (*англ.* Bedout High), крупный геологический объект, расположенный в Индийском океане, примерно в 250 км от северо-западного побережья Австралии, в бассейне Каннинга и вышележащих бассейнах Робака (*англ.* Canning and overlying Roebuck basins). Координаты:  $-18,000000^\circ / 119,000000^\circ$ ;  $-300$  м. Возвышенность Бедаут представляет собой лишь центральное поднятие гигантского метеоритного кратера. Структура — погребенный импактный кратер диаметром более 250 км (!), превосходящий по размерам также скрытый осадками кратер Чиксулуб

(исп. Chicxulub) на полуострове Юкатан, у побережья Мексики. Координаты: 21,400000° / -89,516700°.

При анализе кернов нефтяных разведочных скважин района были обнаружены признаки ударного метаморфизма. Так, плагиоклаз, выделенный из разведочной скважины Лагранж-1, имеет возраст (метод  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ )  $250,1 \pm 4,5$  млн лет и соотносится с границей перми и триаса (Permian, Changhsingian – Lower Triassic, Anisian) [2].

Сейсмические и гравитационные данные, идентификация расплавленных пород брекчии по кернам буровых скважин возвышенности Бедаут согласуются и свидетельствуют о наличии погребенного ударного кратера. Возраст данного гигантского кратера совпадает со временем пермо-триасовой экологической катастрофы, когда погибло до 90 % биологических видов. Некоторые исследователи считают, что именно грандиозные импактные события явились причиной шести больших и многочисленных малых экологических кризисов, вызвавших катастрофические изменения биоты Земли: Кембрийского взрыва —  $542 \pm 0,5$  млн лет назад; ордовикского, девонского, пермского, триасового и мелового кризисов — 450, 370, 250, 210 и 65 млн лет назад соответственно.

**Морфоструктурные признаки астроблем** включают местоположение бескорневой геологической структуры, ее изученность, установленный возраст, степень сохранности, морфологические особенности и др. Выделяются погребенные и вторично открытые импактные структуры. Морфология кратеров включает описание контуров, формы, характеристику конфигурации и рисунка современной гидросети. При детальном исследовании оценивается строение частей импактного кратера: тип, ширина, глубина, внешний вал и борта (высота, ширина, разрывы и трещины, проломы вала). Указывается степень заполнения верхней части кратера брекчией, наличие и состояние центрального поднятия. Размеры кратера и его элементов — важный литологический признак. Так, размеры центрального поднятия прямо зависят от состава пород (диаметр кратера в осадочных породах меньше, чем в кристаллических). Критические величины для простых импактных форм составляют 2 и 4 км соответственно<sup>4</sup>.

На сохранность объекта влияет множество факторов. Имеют значение режим и количество атмосферных осадков, особенности развития уникального гидро режима импактной структуры, идущие гидротермальные изменения, продолжительность и интенсивность процессов выветривания, степень разрушения поверхности, особенности деформации, захоронения и открытости геологических структур<sup>5,6</sup>.

Сохранность и яркие морфологические особенности ударного кратера являются важными дешифровочными признаками. На примере метеоритных кратеров возможно проследить разные по степени сложности задачи дешифрирования снимков кольцевых структур. Среди множества астроблем лишь очень небольшая их часть обладает явными морфологическими особенностями. Возраст и размеры структуры, особенности геологической истории региона часто являются главными факторами. В качестве примера хорошо изученных структур приведем территорию Австралии. Возраст репрезентативных метеоритных кратеров континента составляет от 35 до  $2,229 \pm 5$  млн лет. Диаметр самого молодого (эоценового возраста) кратера Флакман (*англ.* Flaxman), находящегося на юге Австралии, около 10 км, превышения свыше 200 м. Морфологические признаки не выражены. Координаты:  $-34,616667^\circ / 139,066667^\circ$ . Яркий метеоритный кратер прекрасной сохранности — Госсес-Блафф (*англ.* Gosses Bluff) в центре Австралийского материка. Возраст импактной структуры составляет  $145,5 \pm 0,8$  млн лет. Структура прекрасно обнажена, изолирована, диаметр внутреннего вала около 3 км, внешнего вала — 22 км, превышения около 100 м. Координаты:  $-23,820833^\circ / 132,307778^\circ$ . Самый древний кратер Яррабубба (*англ.* Yarrabubba)

4 Huggett R.J. Fundamentals of Geomorphology. 3rd ed. London: Routledge, 2011. 536 p.

5 Мелosh Г.Д. Образование ударных кратеров: геологический процесс: монография / пер. с англ. И.О. Китова, А.В. Потапова; под ред. В.В. Адушкина, Б.А. Иванова. М.: Мир, 1994. 336 с.

6 Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Машак М.С. и др. Геология астроблем. Л.: Недра, 1980. 231 с.

расположен в Западной Австралии. Проведенные изотопные U-Pb-исследования возраста деформаций монацитов и цирконов позволяют предполагать, что это одна из самых древних астроблем Земли. Объект выделен на основании геофизических (магнитных аномалий) и минерало-петрографических признаков. Структура хорошо обнажена и морфологически выражена. Кратер имеет размеры около 70 км и представлен сохранившимися фрагментами ударной структуры с превышениями около 20 м<sup>7,8</sup>. Координаты:  $-27,182222^{\circ} / 118,834444^{\circ}$  [3, 4].

Распространенными примерами слабо выраженных в рельефе, скрытых водой и частично погребенных кратеров являются Карский и Усть-Карский — структуры мелового возраста, расположенные в европейской части Арктики в России. Крупная геологическая структура Карский метеоритный кратер (Карская астроблема) округлой формы и диаметром 50–56 км находится на Югорском полуострове. В рельефе кратер выражен слабо, представляет собой вытянутую и открытую к морю впадину, заполненную образовавшимися при взрыве обломками пород. В строении выделяется центральное поднятие размерами 7×9 км, в котором на поверхность выступают отложения ордовика с силлами позднедевонского возраста. Для структуры характерно отсутствие строгой кольцевой симметрии кратерной воронки в связи с воздыманием и денудацией юго-западной части кратера. Данные изотопного датирования импактных стекол —  $70,3 \pm 2,2$  млн лет (Mesozoic, Upper Cretaceous, Maastrichtian  $72.1 \pm 0.2$  / Paleogene, Paleocene, Danian –66.0). Координаты:  $69,100000^{\circ} / 64,150000^{\circ}$ . Высота дна кратера составляет 34 м. Расположенный рядом на востоке Усть-Карский импактный кратер находится под водой. Диаметр 25 км. Координаты:  $69,435058^{\circ} / 65,157704^{\circ}$ ; –25 м.

Структурным формам в данном случае импактных структур не всегда соответствуют явные морфологические выражения. Таким образом, морфологические признаки многих геологических объектов, хорошо просматривающиеся при анализе спутниковых снимков и отображающиеся на картах, могут быть совершенно не очевидными при прохождении полевых маршрутов и проведении глазомерной съемки. С развитием современных технологий обработки данных и адаптации визуальной информации появилась и проблема восприятия другого рода. Эта проблема заключается в верификации данных снимков, сопряжении их с картографическими данными и особенностями реальной местности. Как выглядит конкретный природный объект в естественных условиях? Для многих астроблем это еще более актуально, чем для простых для понимания эндогенных и экзогенных форм рельефа, таких как участки разрывных дислокаций, вулканические формы или проявления активных склоновых процессов. Известен пример, когда в ряде первых экспедиционных поездок в аймак Баянхогогор в январе 2012 года специалисты не нашли сразу импактный кратер Цэнхэр. В экспедиционной поездке 2023 года под руководством С. Хадбаатара, организованной кафедрой географии Монгольского национального университета образования, студенты, не имеющие опыта натурных наблюдений, с трудом проводили визуальную оценку вулканических форм рельефа региона Мандал-Говь в Восточной Гоби. В большинстве экспедиционных поездок появляются подобные проблемы, связанные с идентификацией и классификацией природных объектов, часто составляющие домашние задания для исследователей на камеральный период.

Астроблемы часто служат ядрами формирования многих месторождений минерального сырья. Разрушения и дислокации тверди, вызванные мощным ударным воздействием, делают более доступными ресурсы. В одном из последних научных обзоров, посвященных изучению наземных астроблем, приводятся следующие данные: на разрабатываемые месторождения, связанные с метеоритными кратерами, приходится 17 % нефти, 32 % газа, 4,7 % алмазов, 14,26 % рудных минералов, 3,6 % солей, 2,4 % угля и др. В целом более

7 Earth Impact Database (EIDB). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/> (дата обращения: 01.10.2024).

8 Asetre Jo Hannah. Australia's Meteorite Impacts. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nacis.org/awards/2021-smpc-design-winner/> (дата обращения: 05.12.2023).

четверти всех известных месторождений ресурсов связаны с ударными кратерами. По этой причине астроблемы считаются новыми перспективными объектами для поисков ресурсов<sup>9,10</sup> [5, 6].

Визуализации ярких геоморфологических особенностей астроблем посвящено множество работ. В рамках информационного проекта «Атлас простых форм рельефа Монголии» ударные кратеры были одними из первых мишеней.

В данной статье рассмотрены морфологические особенности, приведены результаты картографирования и визуализации спутниковых данных по метеоритному кратеру Цэнхэр, расположенному на территории Монгольской (Восточной) Гоби.

**Цель исследования** — на основе спутниковых данных провести картографирование и визуальную оценку природных объектов — импактных структур; создать изображения, наглядно показывающие морфологические особенности астроблем. В процессе исследования и анализа объектов были определены и следующие задачи:

- 1) провести отбор и анализ характеристик наиболее репрезентативных объектов среди метеоритных кратеров на территории Монголии;
- 2) подготовить серию карт импактной структуры Цэнхэр и ее трехмерную модель на основе интерпретации спутниковых данных, создать серию унифицированных иллюстраций, наглядно показывающих морфологические особенности кратера;
- 3) дать анализ состояния поверхности объекта и выделить ряд контрольных участков поверхности, требующих проведения систематических наблюдений.

## 2 Материалы и методы

В качестве основного инструмента при подготовке серии картографических изображений использовались возможности ГИС ArcGIS Desktop (v.10.3.0, Esri Inc.), Q-GIS v.2.18, в качестве дополнительного — возможности программного пакета для ОС Windows Global Mapper v21.00, а также графических редакторов, программ по обработке изображений<sup>11,12</sup>.

При подготовке материала использовались возможности ГИС и пространственные открытые данные из трех групп источников. Актуальными являются исследования особенностей восприятия, частота использования разных тематических основ для создания карт поверхности и предпочтений аудитории.

1. Для анализа состояния поверхности участка применялись доступные многозональные снимки среднего разрешения оптического диапазона Landsat 5TM, Landsat 8OLI\_TIRS, Landsat 9OLI\_TIRS за период с 13.03.1987 по 19.03.2024. Для работы использованы восьмой спектральный канал (B8 PAN, панхроматический [англ. panchromatic, PAN]; длина волны 0,500–0,680 мкм, разрешение 15 м) как наиболее детальный<sup>13</sup>. Перечень снимков (сцен) с указанием названия сцены и даты съемки приводится в табл. 1.

9 French B.M. Traces of catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998. 120 p.

10 Flamini E., Martino M.D., Coletta A. Encyclopedic Atlas of Terrestrial Impact Craters. Springer Cham, 2019. 708 p.

11 ArcGIS Desktop, v.10.3.0 / Esri Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.arcgis.com> (дата обращения: 07.02.2024).

12 Global Mapper / Blue Marble Geographics. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bluemarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-21/GlobalMapper.htm> (дата обращения: 05.02.2024).

13 Earth Resources Observation and Science Center (EROS). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 07.05.2024).

**Таблица 1** 

Перечень многозональных снимков Landsat на ударный кратер Цэнхэр (Гобийский Алтай) за период с 1987 по 2024 год<sup>14</sup>

**Table 1**

List of Landsat multispectral images of the Tsenkher impact crater (Gobi Altai), for the period from 1987 to 2024<sup>14</sup>

Дата и время съемки	Уникальный номер снимка (сцены) Landsat
<b>LANDSAT_5 TM</b>	
1987-03-13. 03:34:51.2230130Z	LT05_L1TP_136030_19870313_20201014_02_T1
1987-05-16. 03:36:54.3280000Z	LT05_L1TP_136030_19870516_20201014_02_T1
1988-02-12. 03:42:38.0480190Z	LT05_L1TP_136030_19880212_20200917_02_T1
1988-02-28. 03:42:50.1150810Z	LT05_L1GS_136030_19880228_20200917_02_T2
2004-01-16. 03:45:39.4020190Z	LT05_L1TP_135030_20040116_20200904_02_T1
2007-02-16. 04:08:03.5620750Z	LT05_L1TP_136030_20070216_20200831_02_T1
2010-08-19. 04:03:23.0800380Z	LT05_L1TP_136030_20100819_20200824_02_T1
<b>LANDSAT_8 OLI_TIRS</b>	
2014-06-20. 04:06:36.0711040Z	LC08_L1TP_135030_20140620_20200911_02_T1
2015-12-16. 04:07:01.2333400Z	LC08_L1TP_135030_20151216_20200908_02_T1
2016-07-11. 04:06:48.7792230Z	LC08_L1TP_135030_20160711_20200906_02_T1
2017-03-31. 04:12:39.0266980Z	LC08_L1TP_136030_20170331_20200904_02_T1
2019-10-24. 04:07:17.0353760Z	LC08_L1TP_135030_20191024_20200825_02_T1
2020-01-28. 04:06:59.9238210Z	LC08_L1TP_135030_20200128_20200823_02_T1
2020-02-04. 04:13:07.9464689Z	LC08_L1TP_136030_20200204_20200823_02_T1
2020-02-29. 04:06:51.2619290Z	LC08_L1TP_135030_20200229_20200822_02_T1
2020-12-04. 04:06:56.5434409Z	LC08_L1TP_135030_20240123_20240130_02_T1
2021-02-15. 04:06:57.8953310Z	LC08_L1TP_135030_20210215_20210301_02_T1
2021-11-14. 04:07:14.6491170Z	LC08_L1TP_135030_20211114_20211125_02_T1
2022-01-17. 04:07:05.9892530Z	LC08_L1TP_135030_20220117_20220123_02_T1
2022-01-24. 04:13:14.0310750Z	LC08_L1TP_136030_20220124_20220128_02_T1
2022-02-18. 04:06:56.1345210Z	LC08_L1TP_135030_20220218_20220301_02_T1
2022-06-17. 05:34:14.3655210Z	LC08_L1TP_136233_20220617_20220629_02_T1
2024-01-23. 04:06:56.5434409Z	LC08_L1TP_135030_20240123_20240130_02_T1
2024-02-08. 04:06:59.5035750Z	LC08_L1TP_135030_20240208_20240213_02_T1
<b>LANDSAT_9 OLI_TIRS</b>	
2022-01-16. 04:13:18.6063570Z	LC09_L1TP_136030_20220116_20230501_02_T1
2022-03-30. 04:06:50.1277280Z	LC09_L1TP_135030_20220330_20230423_02_T1
2022-07-27. 04:13:04.1286150Z	LC09_L1TP_136030_20220727_20230406_02_T1
2022-11-16. 04:13:30.0796530Z	LC09_L1TP_136030_20221116_20230322_02_T1
2022-12-18. 04:13:30.0796530Z	LC09_L1TP_136030_20221218_20230317_02_T1
2023-06-28. 04:12:27.5196710Z	LC09_L1TP_136030_20230628_20230628_02_T1
2023-09-09. 04:06:55.4259660Z	LC09_L1TP_135030_20230909_20230909_02_T1
2023-11-19. 04:13:17.6405120Z	LC09_L1TP_136030_20231119_20231119_02_T1
2024-01-22. 04:13:17.8379110Z	LC09_L1TP_136030_20240122_20240122_02_T1
2024-03-19. 04:07:02.4005179Z	LC09_L1TP_135030_20240319_20240319_02_T1
2024-06-23. 04:05:55.0408230Z	LC09_L1TP_135030_20240623_20240623_02_T1

**Примечание.** Приводятся оригинальные названия, номера сцен и версий снимков Landsat.

- Для анализа состояния поверхности участка применялись подготовленные на основе доступных радарных данных цифровые модели высот (ЦМВ). Были проанализированы доступные данные ЦМВ: The NASA Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM, Version 4 (SRTM 30m, 2008),

<sup>14</sup> Earth Explorer. GIS Data / United States Geological Survey (USGS). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 20.02.2024).

ALOS Global Digital Surface Model (DSM), ALOS World 3D-30m (AW3D30), Version 4,0 (2023); NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001 (2020) — и их последующие интерпретации<sup>15,16,17,18</sup>.

Данные ЦМБ ALOS на Монголию были подготовлены компанией NextGIS. Были использованы высотные данные, входящие в комплект многозональных снимков среднего разрешения Landsat 9 OLI\_TIRS.

3. В качестве дополнительных источников данных использовались спутниковые мозаики World Imagery, World Imagery (Clarity), World Hillshade (Dark), база данных о гидросети HydroSHEDS, коллекции карт ArcGIS Living Atlas (Esri Inc.), возможности национальной ГИС MonGeoCat<sup>19,20,21</sup>.

Выбранный участок подготовлен в системе Geographic Coordinate System (GCS Datum): World Geodetic System, WGS 1984 (EPSG: 4326). Для подготовки изображений объекта применялась цилиндрическая картографическая проекция Меркатора (Web Mercator – Auxiliary Sphere). Для проекта использовались масштабы 1 : 24 000 – 1 : 6 000, основной масштаб — 1 : 12 500. Картографические изображения предполагают печать.

С помощью приложения Global Mapper v21.00 и инструмента ArcToolbox ArcMap ESRI оценивались и визуализировались три показателя — крутизна склонов в градусах, экспозиция склонов и кривизна склонов.

Детальные изображения метеоритного кратера были подготовлены при комбинации методов визуализации с использованием спутниковых снимков и данных ЦМБ. Результат процесса обработки данных и их визуализации — монохромные и цветные версии изображений метеоритного кратера Цэнхэр.

**Порядок подготовительных работ** по сведению данных ДЗЗ и визуализации цифровой модели рельефа представлен ниже.

1. Анализ и выбор сцен (снимков) из серии многозональных снимков среднего разрешения оптического диапазона Landsat за 37-летний период.
2. Подготовка композитного стека на основе серии снимков Landsat. В качестве основных использовались данные панхроматического канала (B8-PAN).
3. Анализ, выбор и объединение файлов цифровых моделей высот ЦМР (HDR/HGT – SRTM и GeoTIFF – ALOS GDEM) в Global Mapper v21.00 и ArcGIS Desktop.
4. Проецирование растровой модели рельефа в выбранную проекцию, выявление и удаление артефактов, обрезка растровых изображений по заданным границам.
5. Визуализация геоморфологических показателей кольцевой структуры. Данные ЦМБ (SRTM [Ver. 4, 30m, 2008], ALOS World 3D-30m [AW3D30, Ver. 4,0, 2023]) обрабатывались с помощью инструментов ArcGIS Spatial Analyst Tools (Esri Inc.). Лучшие результаты на основе данных высот были получены на масштабах 1 : 12 000 – 1 : 6 000.
6. Подготовка картографического изображения поверхности с применением современных методик визуализации данных. Обработка данных

15 SRTM, version 4 / Consortium for Spatial Information of the Consultative Group for International Agricultural Research (CGIAR-CSI). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://srtm.csi.cgiar.org> (дата обращения: 07.02.2024).

16 ALOS Science Project. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earth.jaxa.jp/en/research/projects/alos/index.html> (дата обращения: 05.01.2024).

17 NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001. 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem\\_hgtv001](https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem_hgtv001) (дата обращения: 30.04.2024).

18 NextGIS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nextgis.ru/datasets> (дата обращения: 30.04.2024).

19 HydroSHEDS / World Wildlife Fund US. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.hydrosheds.org> (дата обращения: 25.05.2021).

20 ArcGIS Living Atlas of the World / Esri Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://livingatlas.arcgis.com> (дата обращения: 20.04.2024).

21 MonGeoCat / Mineral Resources and Petroleum authority of Mongolia. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://webgis.mris.mn> (дата обращения: 20.04.2024).

спутниковой съемки проводилась методами аналитической отмычки рельефа с оптимальным освещением склонов различной крутизны (*англ.* Multidirectional hillshades, MDOW) в сочетании с гипсометрической окраской, светящихся контуров<sup>22</sup> [7], а также комбинированным методом RRIM (*англ.* Red Relief Image Map). Для отображения главных особенностей структуры метеоритного кратера изолинии проведены через 25, 10, 5 м.

Метод горизонталей (освещенных, затененных, подсвеченных или светящихся контуров), в оригинале — метод рельефного контура (*англ.* Relief Contour Method), предложил в 1950 году японский картограф Китиро Танака (Kitiro Tanaka). Метод заключается в том, что в результате косого положения источника света получается объемный эффект. Объекты, изображаемые на картах, выглядят трехмерными. Данный метод позднее был модифицирован П. Кеннелли, Дж. Кимерлингом (P. Kennelly, A. Jon Kimerling) и широко используется мастерами современной картографии Д. Коу (Daniel E. Coe), Дж. Нельсоном (John M. Nelson) и другими специалистами<sup>23,24</sup>.

Метод RRIM — комбинированный метод визуализации высотных данных, учитывающий физиологические особенности зрительного восприятия. Его предложил в 2008 году японский картограф Тацуро Чибя (Tatsuro Chiba). Данный метод стал широко применяться для визуализации особенностей горных территорий. Он был использован при подготовке изображений метеоритного кратера как наиболее простой и выразительный [8–10]. Генерализация и применение различных методов отображения рельефа при создании карт и моделей актуальны. Важен баланс между выразительностью, реализмом и оптимальным количеством деталей [11–13].

7. Создание нескольких версий трехмерной модели поверхности участка Восточной Гоби с помощью приложений ArcGIS ArcScene / Q-GIS, модуля / плагина Q-GIS 2threejs, Global Mapper v21.00. В работе приводится одна версия.

В каталоге импактных структур Земли А.В. Михеевой (Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН) на территории Монголии указывается 45 структур. Среди них выделено пять категорий: достоверные, вероятные, предполагаемые, неустановленные и опровергнутые<sup>25,26</sup>. Метеоритные кратеры как импактные структуры связаны с метеоритными бомбардировками. Данные о найденных метеоритах входят в специализированные международные информационные базы<sup>27</sup>. Исследования продолжаются. Полевые материалы свидетельствуют о разных причинах происхождения подобных кольцевых структур. Примером тому служит эндогенная кольцевая структура Унегед-Уул (EISC), представляющая собой соляной диапир [14]. Координаты центра: 44,257836° / 109,348895°.

Геологические особенности территории Монголии изучены достаточно подробно, на картах масштабов 1 : 1 000 000 – 1 : 200 000 выделены 20 кольцевых структур с морфологией и признаками ударного метаморфизма. Исследования

22 Tanaka K. The Relief Contour Method of Representing Topography on Maps // *Geographical Review*. 1950. Vol. 40. No. 30. P. 444–457.

23 Coe D.E. The Washington Geological Survey. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dancocart.com> (дата обращения: 15.04.2024).

24 Nelson J.M. Adventures In Mapping. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://adventuresinmapping.com> (дата обращения: 05.05.2024).

25 Полный каталог импактных структур Земли А.В. Михеевой, ИВМиМГ СО РАН. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://labmpg.sssc.ru> (дата обращения: 05.07.2024).

26 Expert Database on Earth Impact Structures (EDEIS). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tsun.sssc.ru/nh/impact.php> (дата обращения: 05.07.2024).

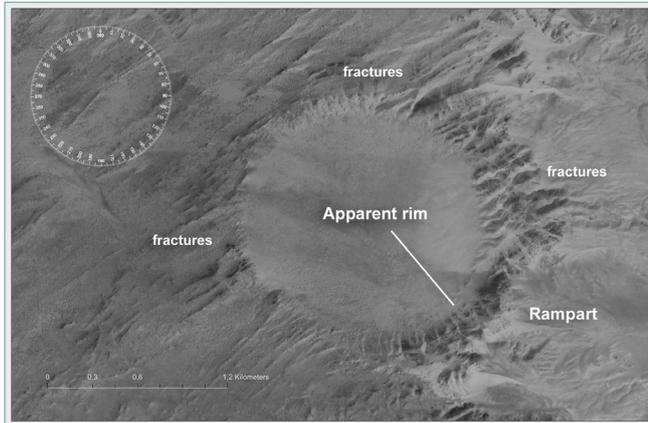
27 Meteoritical Bulletin and the Meteoritical Bulletin Database (MBDB). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php> (дата обращения: 01.10.2024).

**Рис. 7** 

Вид на кратер Табун-Хара-Обо, юго-восток Монголии. На снимке обозначены метеоритный кратер, контур (apparent rim), насыпной вал (rampart), разломы (fractures). Внешний диаметр 1,3 км. Масштаб 1 : 3 000. Координаты: 44,131111° / 109,653889°. Вариант слоя: World Imagery, Esri (версия 2023)

**Fig. 7**

View of the Tabun-Khara-Obo crater, southeast Mongolia. The image shows the meteorite crater, outline, embankment, and faults. The outer diameter is 1.3 km. Scale 1 : 3,000. Coordinates: 44.131111°, 109.653889°. Layer option: World Imagery, Esri, in version 2023



ны внутреннее строение геологических объектов, состав и особенности комплекса пород-мишеней, внутренняя структура образцов импактитных брекчий и элементы ударного метаморфизма, в ряде из них отмечены находки диаплектических минералов и вулканического стекла. По большинству геологических объектов — импактных структур необходимы детальные исследования. Наиболее полный цикл исследовательских работ, включая научное бурение дна, проведен по одной простой импактной структуре — метеоритному кратеру Табун-Хара-Обо [15]. Изображение метеоритного кратера приводится на рис. 7.

Результаты детального изучения в настоящий момент доступны по двум кратерам: Табун-Хара-Обо и Цэнхэр. Из всех ударных кратеров, выделяемых в Монголии, последний наиболее репрезентативный. В отличие от простого по строению и небольшого по размерам кратера Табун-Хара-Обо, структура Цэнхэр обладает большими размерами, более сложным строением и яркими морфологическими чертами. Но, несмотря на перечисленные особенности, это сложный объект с точки зрения и визуального восприятия, и реальных для наблюдателя масштабов. Если не располагать данными

съемки и не являться специалистом, при прохождении тематических маршрутов данную геологическую структуру можно просто не идентифицировать. Оценка данного объекта, как и большинства астроблем, предполагает посещение серии контрольных участков в сопровождении подготовленного гида. Приведем далее краткую справочную информацию об особенностях выбранного объекта — метеоритного кратера Цэнхэр.

Кратер Цэнхэр (*монг.* Цэнхэр, Номин Цэнхэр уул) расположен в юго-западной части Монголии, в пределах Гобийского Алтая (Алтайская горная страна). Структура находится в пределах котловины шириной 1020 км, между двумя невысокими горными хребтами: с севера расположен Эрдэн (*монг.* Эдренгийн нуруу, 1422 м), с юга — Хэвцагай (*монг.* Хавцгайн нуруу, 1497 м). Хребты разделяют участки Заалтайской Гоби, к югу находится равнинный участок Цэнхэр-Хоолой, к юго-западу от геологической структуры расположены пустынные участки Шаргын-Гоби.

Расстояние объекта от столицы страны Улан-Батора — 816 км. Центр аймака — город Баян-Хонгор — удален более чем на 350 км на северо-восток от метеоритного кратера. В административном плане это территория самого западного аймака Баян-Хонгор — сомона Баян-Ундер (*монг.* Баян-Өндөр). Ближайший и оптимальный для маршрута населенный пункт — Шинэжинст (*монг.* Шинэжинст сум) — находится в 126 км на северо-восток (без учета реальной дорожной сети). Структура расположена в пределах природоохранной территории на северо-востоке Большого Гобийского заповедника (кластер А).

Объект описан и нанесен на топографические карты в результате проведения наземных геодезических работ. Первые полевые исследования генезиса объекта датируются 1998 годом и связаны с работой Совместной монгольско-российско-американской археологической экспедиции. В процессе дешифрирования данных дистанционного зондирования кольцевая структура идентифицирована как возможный ударный кратер.

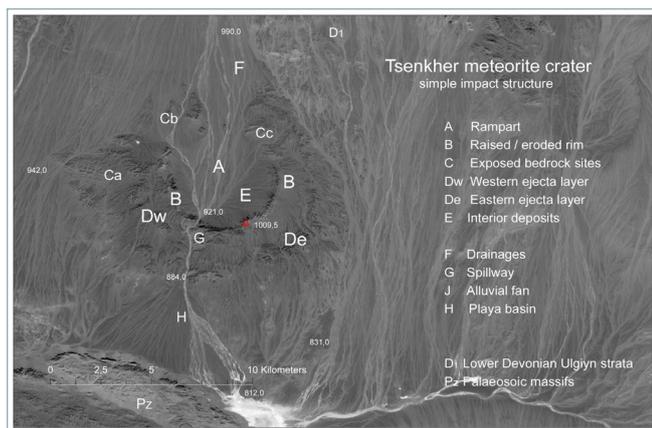
Структура Цэнхэр представляет собой частично разрушенное сооружение — простую импактную структуру, образованную в древних кристаллических породах. Диаметр сооружения 7,3 км, высота дна кратера 943 м. Координаты центра: 43,635583° / 98,363694°. На топографической карте Генштаба ВС СССР приведены следующие высотные отметки: максимальная высота — 1009,5 м,

**Рис. 8**

Вид на кратер Цэнхэр, юго-запад Монголии. Координаты: 43,635583° / 98,363694°. Базовое изображение: снимок Landsat 9 OLI\_TIRS от 2023-11-19, Landsat ID: 2023-11-19 / 04:13:17.6405120Z- LC09\_L1TP\_136 030\_20231119\_20231119\_02\_T1. Канал B8 PAN. Масштаб 1 : 24 000.  
 A — насыпной вал, B — размывтый контур, C — обнаженные породы, Dw — западный слой закратерного выброса, De — восточный слой закратерного выброса, E — внутренние отложения, F — дренирующий канал, G — водосбор, J — аллювиальный конус выноса, H — плайя, D1 — нижнедевонские отложения, Pz — палеозойские массивы

**Fig. 8**

View of the Tsenkher crater, southwest Mongolia. Coordinates: 43.635583°, 98.363694°. Base image: Landsat 9 OLI\_TIRS image from 2023-11-19, Landsat ID: 2023-11-19 / 04:13:17.6405120Z- LC09\_L1TP\_136 030\_20231119\_20231119\_02\_T1. Channel B8 PAN. Scale 1 : 24,000

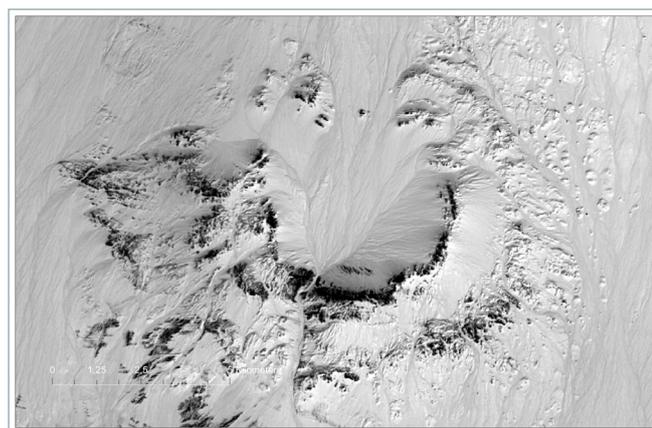


**Рис. 9**

Вид на кратер Цэнхэр. Сезонные изменения — нерегулярно образующийся снежный покров. Снимок Landsat 9 OLI\_TIRS от 2022-01-16, Landsat ID: 2022-01-16, 04:13:18.6063570Z- LC09\_L1TP\_13 6030\_20220116\_20230501\_02\_T1. Канал B8 PAN. Масштаб 1 : 12 000

**Fig. 9**

View of Tsenkher crater. Seasonal changes – irregular snow cover. Landsat 9 OLI\_TIRS image from 2022-01-16, Landsat ID: 2022-01-16, 04:13:18.6063570Z- LC09\_L1TP\_136030\_20220116\_20230501\_02\_T1. Channel B8 PAN. Scale 1 : 12,000



минимальная высота днища кратера — 921,0 м, разрушенная временными потоками южная часть контура структуры — 884,0 м и др.<sup>28</sup>

Кратер имеет округлую форму, слегка вытянут в северном направлении, с юго-восточным падением. Радиус видимого края кратера меняется от 3,5 до 4 км. Высота фрагментов края кратера различная, максимальные значения оставляют 70–80 м. Непрерывный (за исключением разрушенной северной части) внешний вал, образованный в результате взрыва (зона закратерных выбросов) и последующего осаждения материала, расположен на расстоянии 12 км от кратера. Относительные высоты вала малы и находятся в диапазоне 20–50 м. Внешний вал разрушен неравномерно, лучше сохранилась его восточная часть. По периферии кольцевой структуры в изобилии встречаются радиальные и тангенциальные разломы и трещины. В южной части структуры, в самом низком месте воронки, находится дренирующую систему канал. Активные сейсмические разломы расположены на север и на юго-восток от ударного кратера и относятся к хребту Эдренгийн-Нуруу, к Гоби-Тянь-Шанской зоне разломов (англ. Gobi Tien Shan Fault Zone / System, AFEAD Database, Sheet K47)<sup>29</sup>. Последний крупный тектонический разлом проходит в субширотном направлении и хорошо просматривается на спутниковых и аэрофотоснимках. Часто в отношении сооружений этой части Большого Алтая применяется термин *Транс-Алтай*. На рис. 8–9 обозначены основные элементы геологической структуры.

Ударный кратер создан в древнейших зеленокаменных и сланцево-карбонатных породах рифейско-кембрийского возраста, ассоциирующих с гипербазитами. В данном регионе Гобийского Алтая широко распространены гранитные интрузии. Возраст вмещающих пород по стратиграфическим признакам определяется как раннекембрийский (PZ-MZ). Аллювиальный материал, который заполняет кратер, привнесен с горного хребта Эдренгийн-Нуруу четвертичного возраста<sup>30</sup>. Несогласные отложения полимиктовой брекчии фиксируются за пределами видимого края кратера.

В экспедиции 2007 года была проведена гравитационно-магнитная съемка. Моделирование данных показало чашеобразное и бескорневое строение структуры Цэнхэр при отсутствии магматического очага. Определение возраста обломков брекчии радиоизотопным (<sup>40</sup>Ar – <sup>39</sup>Ar) методом дало значения 4,9 ± 0,9 млн лет (3.600 Ma Piacenzian Age – 5.333 Ma Zanclean Age, Pliocene Epoch, Neogene Period – 7.246 Ma Messinian Age, Miocene Epoch) [16].

28 Топографическая карта. Масштаб 1 : 100 000. М.: ВТУ ГШ ВС СССР, 1976. Л. К-47-17.  
 29 Active Faults of Eurasia Database (AFEAD), version 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://neotec.ginras.ru/index/english/database\\_eng.html](http://neotec.ginras.ru/index/english/database_eng.html) (дата обращения: 01.10.2024).  
 30 Монгольская Народная Республика. Национальный атлас / гл. ред. В.В. Воробьев, Ш. Цэгмид. М.: Улан-Батор, 1990. 144 с.

В течение нескольких полевых сезонов интернациональный коллектив ученых проводил наземные геолого-структурные исследования кратера Цэнхэр [17, 18].

Комплексные полевые исследования территории включали: работы с картографическими материалами, детальную полевую фотосъемку 12 контрольных участков структуры, прохождение гипсометрические профилей, экспресс-диагностику минерального состава и генезиса проб горных пород на месте (РСА-анализ), отбор проб пород для исследования в условиях лаборатории. В процессе последующей детальной камеральной обработки данных подтвердилось предположение об импактном генезисе геологической структуры [19].

Изучение вещественного состава горных пород, отобранных в пределах астроблемы Цэнхэр, показало присутствие магнетита со следами плавления и ударного воздействия, а также наличие композитных микрочастиц, которые могли возникнуть в результате удара метеорита о поверхность Земли. В отобранных на месте пробах были найдены вещества, подтверждающие космогенную природу кольцевой структуры: свидетельства шокового метаморфизма пород-мишеней и минералов, остаточные механические напряжения, связанные с деформацией кристаллических решеток породообразующих минералов. Результаты проведенного комплекса исследований подтверждают ударное происхождение кратера Цэнхэр [20–22].

Важной особенностью положения рассматриваемой импактной структуры является ее изолированность и нахождение вблизи зоны ветрового затишья, на рубеже двух циркуляционных систем — Атлантической и Тихоокеанской. В значительной степени эта особенность определяет малое количество, низкую интенсивность процессов выпадения атмосферных осадков и интенсивность процессов физического и химического выветривания. Для определения их роли в формировании современной поверхности необходимо провести анализ климатических данных о режиме и количестве атмосферных осадков и увлажнении поверхности за продолжительный период времени. Анализ продолжительного периода съемки показал нерегулярно образующийся снежный покров, подчеркивающий разницу и морфологию склонов метеоритного кратера, изменения гидрологической сети и оптических характеристик поверхности. Это типичные аридные условия и набор процессов, формирующих рельеф [23, 24].

Сезонный снежный покров фиксируется на 15 снимках Landsat 5 TM, Landsat 8-9 OLI\_TIRS. Показательны данные о климатических характеристиках: температурах, ветровом режиме, снеговом покрове ближайших населенных пунктов (Баян-Тоорой). Координаты: 44,920026° / 96,748591°. Высота 1180 м. В данный момент на основе использования ГИС активно ведутся работы по детальной классификации экологических условий Гоби и рельефу как их главной слагаемой поверхности [25].

Несмотря на максимум атмосферных осадков, приходящихся на теплый период, даже нерегулярно образующийся маломощный снежный покров, концентрируясь в зоне кратера, вносит свой вклад в формирование поверхности структуры. Большое значение имеет режим его схода или таяния. При быстром сходе, как для всех горных регионов, здесь фиксируются миниатюрные селевые потоки, документированные при проведении детальных полевых работ. Главная гидрологическая система (без названия), начинаясь с хребта Эдренгийн-Нуруу, проходит в меридиональном направлении к котловине Цэнхэр-Хоолой. Временные сезонные водные потоки совершают работу по преобразованию поверхности структуры, образуя за границами кратера хорошо видимый аллювиальный шлейф. Это имеет значение и для процедуры визуализации данных. В зависимости от года, сезона и угла спутниковой съемки степень этих изменений поверхности хорошо видна на доступных спутниковых снимках среднего разрешения. Созданные изображения поверхности эффектно подчеркивают данные особенности.

В заключении настоящего обзора необходимо сделать следующее замечание. Для работы с морфологическими характеристиками рассматриваемой ударной структуры в данный момент недостаточно высотных данных. Отсутствуют также детальные геологические сведения о данной части Гобийского Алтая.

Доступными являются только данные съемки масштаба 1 : 250 000. Это затрудняет создание более точной и реалистичной модели поверхности, проведение расчетов по сезонному изменению динамики поверхности и ряду других измерений. Восполнить этот пробел возможно использованием спутниковых снимков на объект более высокого разрешения, проведением детальной геологической съемки с выделением значимых морфологических частей. Для подобных объектов приемлемо употребление терминов *геотоп* (англ. *geotop*), *слагающие его части* (англ. *geosite*), *геоморфологические участки* (англ. *geomorphosites*). Примером в данном случае могут служить работы с кратером Рис в Швабии<sup>31,32</sup> [26] — мониторинг контрольных участков наблюдений, наземные работы с использованием БПЛА.

Метеоритные кратеры — уникальные геологические структуры — являются ценными природными объектами, частью геологического наследия Земли. Импактные кратеры могут служить в качестве природных объектов для научных исследований, подготовки космических программ, геотуризма и популяризации знаний. Исследования их особенностей необходимы. Примеров такого рода достаточно. В исследовании рабочей группы Международного союза геологических наук (программа 731 по изучению геологического наследия) таких участков на октябрь 2024 года всего лишь пять. Все объекты — импактные кратеры разного масштаба, возраста и разной степени сохранности — детально изучены. Объекты находятся под охраной государства и имеют статус национального геопарка или геопарка ЮНЕСКО<sup>33,34</sup>.

Среди них — купол Арагуайнья (Паранский бассейн, бассейн р. Амазонки) (исп. *Domo de Araguainha*; англ. *Araguainha Dome*, IUGS Site 01-100). Крупная импактная структура вскрыла неопротерозойский и кембрийский кристаллический фундамент, окруженный силурийскими и пермскими осадочными слоями, представлена центральным поднятием<sup>33</sup>.

Крупнейшая, более 250 км диаметром, ударная структура суши, имеющая возраст 2,02 млрд лет, также представлена фрагментами центрального поднятия — купол Вредефорта в Южной Африке (англ. *Vredefort Dome*, IUGS Site 02-197). Ударная структура Вредефорт произвела масштабные изменения, обнажила древнейшие породы, генетически связана с золотоносным бассейном Витватерсранд. Три другие кайнозойские геологические структуры — более простые и менее масштабные природные объекты.

Метеоритный кратер миоценового возраста Нёрдлингер-Рис, или Рис (нем. *Nördlinger Ries*, IUGS Site 02-198), находится в Швабии (земля Баден-Вюртемберг, Германия). Детально изученная ударная структура относится к сложным по строению ударным кратерам с центральным поднятием, внутренним и внешним валом.

Ударная структура плейстоценового возраста — кратер Босумтви (англ. *Bosumtwi crater*, IUGS Site 02-199) — расположена в регионе Ашанти (Гана, Западная Африка). Кратер имеет возраст 1,07 млн лет, диаметр около 10,5 км и полностью заполнен водой. Кратер вскрыл метаморфизованные кристаллические породы возрастом 2 млрд лет.

Кратер Барринджера (англ. *Barringer Crater*, IUGS Site 02-200) голоценового возраста находится на севере Аризоны в США. Метеоритный кратер образовался около 50 000 лет назад, классифицируется как простой ударный кратер. Структура имеет чашеобразную форму, диаметр 1200 м и глубину 170 м. Внешний вал 45 м высотой<sup>34</sup>.

31 Hüttner R., Schmidt-Kaler H. Die geologische Karte des Rieses. Maßstab 1 : 50 000 (2., überarbeitete Auflage). München, 1998. 16 S.

32 Lagally U., Rohrmüller J., Glaser S., et al. Hundert Meisterwerke – Die schönsten Geotope Bayerns. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012. 288 S.

33 The first 100 IUGS Geological Heritage Sites. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iugs-geoheritage.org/publications> (дата обращения: 29.09.2024).

34 The Second 100 IUGS Geological Heritage Sites. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iugs-geoheritage.org/publications> (дата обращения: 29.09.2024).

В перспективе, по мнению специалистов и авторов статьи, после проведения стандартной процедуры и рассмотрения материалов экспертами метеоритный кратер Цэнхэр может попасть в реестр национальных охраняемых объектов и далее — в состав сети геопарков ЮНЕСКО (UNESCO Global Geopark – UGGp)<sup>35</sup>.

### 3 Результаты

В процессе совместного исследования природных объектов были решены следующие задачи.

1. Был выбран репрезентативный участок — крупный метеоритный кратер на территории Гобийского Алтая.
2. Результатом работы по анализу и обработке спутниковых снимков оптического диапазона и радиометрических данных стал комплект унифицированных картографических изображений, наглядно показывающих геоморфологические особенности астроблемы Цэнхэр. На участок Гобийского Алтая и импактную структуру Цэнхэр создана 3D-модель. Серия изображений особенностей поверхности кольцевой структуры подготовлена с использованием комбинированных методов визуализации (см. рис. 10–23 в приложении).
3. На основе анализа данных за продолжительный период выбраны участки геологической структуры, требующие проведения систематического изучения и наблюдений.

### 4 Обсуждение

В данной работе рассмотрена открытая в результате дешифрирования снимков простая по строению и крупная импактная структура (*англ.* simple impact structure) хорошей сохранности. Среди метеоритных кратеров Монголии структура Цэнхэр является прекрасным примером ударного кратера с яркими морфологическими признаками, очевидными геологическими особенностями, значимыми обнажениями брекчий, геофизическими и минералогическими признаками ударного генезиса. Кратер является объектом изучения современных экзогенных процессов, нивелирующих современную поверхность.

Большинство из выделяемых импактных структур, расположенных в Монголии, являются более сложными объектами для процедуры дешифрирования и представления в качестве репрезентативных, эталонных объектов. Для их изучения необходимы как большие массивы данных, так и комплексное детальное исследование особенностей кольцевых импактных структур, включающее сбор материала и камеральную обработку материалов полевых работ.

### 5 Выводы

Кольцевые структуры широко распространены, разнообразны по своим размерам, генезису, строению и открытости. Объекты являются примерами визуализации данных и наглядного представления особенностей поверхности. Картографические данные, современные иллюстративные материалы о формах

---

<sup>35</sup> Global Geoparks Network. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.globalgeopark.org> (дата обращения: 01.10.2024).

рельефа связаны с содержанием учебных дисциплин, необходимы для качественной подготовки студентов. Благодаря возможностям ГИС-технологий с помощью современных методов обработки данных создана серия наглядных картографических изображений простой импактной структуры на территории Гобийского Алтая.

**БЛАГОДАРНОСТИ** Авторы благодарят исследователя природы и недр Монголии, кандидата геолого-минералогических наук М.Н. Гречухина, оказавшего помощь в работе над содержательной частью настоящего обзора, а также выражают признательность Р.Ч. Арифулову за руководство данным информационным проектом и его техническое сопровождение.

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Гуревич Д.В. Кольцевые структуры: важнейшие механизмы образования // Региональная геология и металлогения. 2009. № 39. С. 14–23.
  2. Becker L., Poreda R.J., Basu A.R., et al. Bedout: A possible end-Permian impact crater offshore of Northwestern Australia // Science. 2004. Vol. 304. No. 5676. P. 1469–1476. DOI:10.1126/science.1093925.
  3. Macdonald F.A., Bunting J.A., Cina S.E. Yarrabubba – a large, deeply eroded impact structure in the Yilgarn Craton, Western Australia // Earth and Planetary Science Letters. 2003. Vol. 213. No. 3-4. P. 235–247. DOI:10.1016/S0012-821X(03)00322-4.
  4. Erickson T.M., Kirkland C.L., Timms N.E., et al. Precise radiometric age establishes Yarrabubba, Western Australia, as Earth's oldest recognised meteorite impact structure // Nature Communications. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 300. DOI:10.1038/s41467-019-13985-7.
  5. Meschede M., Warr L.N. Asteroid Craters // The Geology of Germany. Regional Geology Reviews. Springer, Cham. 2019. P. 251–257. DOI:10.1007/978-3-319-76102-2\_15.
  6. Kenkmann T. The terrestrial impact crater record: A statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more // Meteoritics & Planetary Science. 2021. Vol. 56. No. 5. P. 1024–1070. DOI:10.1111/maps.13657.
  7. Kennelly P., Kimerling A.J. Modifications of Tanaka's Illuminated Contour Method // Cartography and Geographic Information Science. 2001. Vol. 28. No. 2. P. 111–123. DOI:10.1559/152304001782173709.
  8. Chiba T., Kaneta S., Suzuki Y. Red Relief Image Map: New visualization method for three dimensional data // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2008. Vol. 37. Part B2. P. 1071–1076.
  9. Chiba T., Hasi B. Ground surface visualization using Red Relief Image Map for a variety of map scales // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. 41. Part B2. P. 393–397. DOI:10.5194/isprsarchives-XLI-B2-393-2016.
  10. No T., Hiramatsu T., Sato T., et al. Red relief image map and integration of topographic data in and around the Japan Sea // JAMSTEC Report of Research and Development. 2016. Vol. 22. P. 13–29. (In Japanese). DOI:10.5918/jamstecr.22.13.
  11. Samsonov T. Granularity of Digital Elevation Model and Optimal Level of Detail in Small-Scale Cartographic Relief Presentation // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. No. 5. 1270. DOI:10.3390/rs14051270.
  12. Sparavigna A.C. Craters in Maps given by Spaceborne Digital Elevation Models. 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03607208> (дата обращения: 29.09.2024).
  13. Douglass N.A.K., Fish C.S. That's a Relief: Assessing Beauty, Realism, and Landform Clarity in Multilayer Terrain Maps // Cartographic Perspectives. 2022. No. 100. P. 43–66. DOI:10.14714/CP100.1727.
  14. Schmieder M., Seyfried H., Gerel O. The circular Uneged Uul structure (East Gobi Basin, Mongolia) – Geomorphic and structural evidence for meteorite impact into an unconsolidated coarse-clastic target? // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. Vol. 64. No. 5. P. 58–76. DOI:10.1016/j.jseaes.2012.11.042.
  15. Amgaa T., Mader D., Reimold W.U., et al. Tabun Khara Obo impact crater, Mongolia: Geophysics, geology, petrography, and geochemistry // Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution VI: Geological Survey of America. Reimold W.U., Koeberl C. (eds.). 2021. Vol. 550. P. 81–132. DOI:10.1130/2021.2550(04).
  16. Cohen K.M., Finney S.C., Gibbard P.L., et al. The ICS International Chronostratigraphic Chart // Episodes. 2013. Vol. 36. No. 3. P. 199–204. DOI:10.18814/epiiugs/2013/v36i3/002.

17. Komatsu G., Olsen J.W., Ormö J., et al. The Tsenkher structure in the Gobi-Altai, Mongolia: Geomorphological hints of an impact origin // *Geomorphology*. 2006. Vol. 74. No. 14. P. 164–180. DOI:10.1016/j.geomorph.2005.07.031.
18. Komatsu G., Ormö J., Bayaraa T., et al. The Tsenkher structure in the Gobi-Altai, Mongolia; preliminary results from the 2007 expedition // 39th Lunar and Planetary Science Conference (Lunar and Planetary Science XXXIX) (League City, Texas, March 10–14, 2008). 2008. No. 1391. P. 1622.
19. Komatsu G., Ormö J., Bayaraa T., et al. Further evidence for an impact origin of the Tsenkher structure in the Gobi-Altai, Mongolia: Geology of a 3.7 km crater with a well-preserved ejecta blanket // *Geological Magazine*. 2019. Vol. 156. No. 1. P. 1–24. DOI:10.1017/S0016756817000620.
20. Салтыковский А.Я., Цельмович В.А., Байараа Т. и др. Импактный кратер и состав космического вещества в раннепалеозойской структурной зоне Южной Монголии // *Материалы XII Международной конференции «Физико-химические и петрофизические проблемы в науках о Земле» (Москва, 3–5 октября 2011 г.; Борок, 6 октября 2011 г.)*. М., 2011. С. 274–279.
21. Салтыковский А.Я., Никитин А.Н., Цельмович В.А. и др. Импактный кратер и состав космического вещества в Центральной Азии. 2012. P. 1–16. DOI:10.13140/RG.2.2.17623.68003.
22. Цельмович В.А. Самородные металлы и космические минералы из астроблемы Цэнхэр // *Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции (Екатеринбург, 15–18 октября 2012 г.)*. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2012. С. 257–259.
23. Goudie A. *Arid and Semi-Arid Geomorphology*. Cambridge University Press, 2013. 454 p.
24. Береснева И.А. *Климаты аридной зоны Азии* / отв. ред. П.Д. Гунин. М.: Наука, 2006. 286 с.
25. Heiner M., Batsaikhan N., Galbadrakh D., et al. Towards a National GIS Model to Map Terrestrial Ecosystems in Mongolia: A Pilot Study in the Gobi Desert Region // *Proceedings of the Trans-disciplinary Research Conference: Building Resilience of Mongolian Rangelands (Ulaanbaatar, Mongolia, June 9–10, 2015)*. Ulaanbaatar, 2015. P. 24–34. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mountainscholar.org/items/f270edf3-2db1-47f5-91a4-b1fd6d8367e4> (дата обращения: 29.09.2024).
26. Reynard E., Coratza P., Regolini-Bissig G. *Geomorphosites*. Munchen: Verlag Dr. Friedrich Pfeil, 2009. 240 p.

**АВТОРЫ** **Абдильянов Саид Нурмухамматович**

ФГБУН «Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН» (ГГМ РАН), Москва, Россия;

ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина», Москва, Россия  
кафедра геоэкологии, факультет геологии и геофизики нефти и газа  
канд. геогр. наук, доцент

 0000-0003-2053-8230

**Хадбаатар Сандар**

Монгольский государственный университет образования, Улан-Батор, Монголия  
кафедра географии, Институт математики и естественных наук  
канд. геогр. наук, профессор

**Семеренко Илья Константинович**

ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина», Москва, Россия  
кафедра геоэкологии, факультет геологии и геофизики нефти и газа  
магистрант

Поступила 03.10.2024. Принята к публикации 21.02.2025. Опубликовано 28.02.2025.

## Приложение

### Рис. 10

Вид на кратер Цэнхэр. Сезонные изменения — разрушающийся снежный покров. Снимок Landsat 8 OLI\_TIRS от 2022-01-24, Landsat ID: 2022-01-24, 04:13:14.0310750Z-LC08\_L1TP\_136030\_20220124\_20220128\_02\_T1. Канал B8 PAN. Масштаб 1 : 12 000

### Fig. 10

View of Tsenkher crater. Seasonal changes – eroding snow cover. Landsat 8 OLI\_TIRS image from 2022-01-24, Landsat ID: 2022-01-24, 04:13:14.0310750Z-LC08\_L1TP\_136030\_20220124\_20220128\_02\_T1. Channel B8 PAN. Scale 1 : 12,000

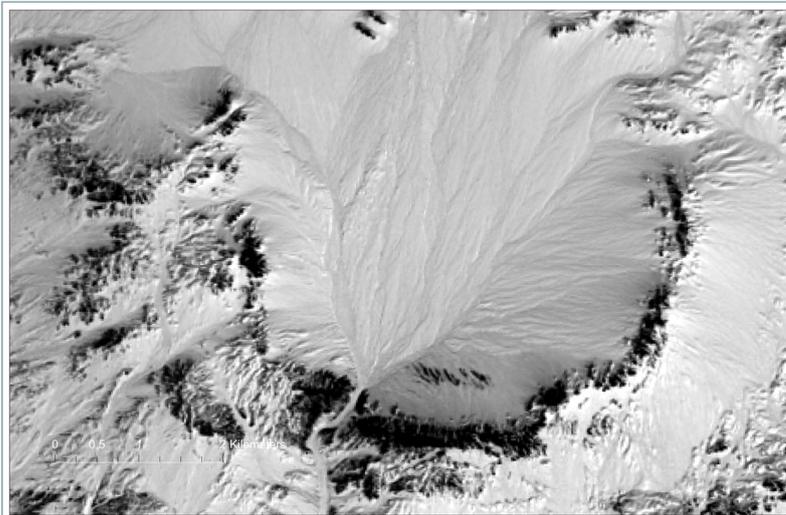


### Рис. 11

Вид на кратер Цэнхэр. Сезонные изменения — нерегулярно образующийся снежный покров. Снимок Landsat 8 OLI\_TIRS от 23.01.2024, Landsat ID: 2024-01-23 / 04:06:56.5434409Z- LC08\_L1TP\_135030\_20240123\_20240130\_02\_T1. Канал B8 PAN. Масштаб 1 : 6 000

### Fig. 11

View of Tsenkher crater. Seasonal changes – irregular snow cover. Landsat 8 OLI\_TIRS from 23.01.2024, Landsat ID: 2024-01-23 / 04:06:56.5434409Z-LC08\_L1TP\_P\_135030\_20240123\_20240130\_02\_T1. Channel B8 PAN. Scale 1 : 6,000

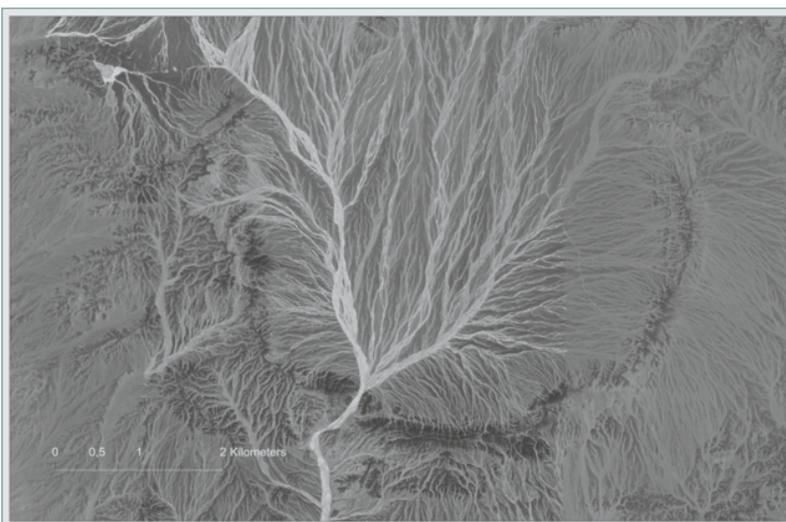


### Рис. 12

Вид на кратер Цэнхэр. Сезонные изменения — высохшие дренирующие систему временные водотоки. Вариант слоя: World Imagery (Clarity), монохромный вариант изображения. Esri (версия 2023). Масштаб 1 : 6 000

### Fig. 12

View of Tsenkher crater. Seasonal changes – temporary streams draining the system have dried up. Layer option: World Imagery (Clarity), Esri, in version 2023. Scale 1 : 6,000

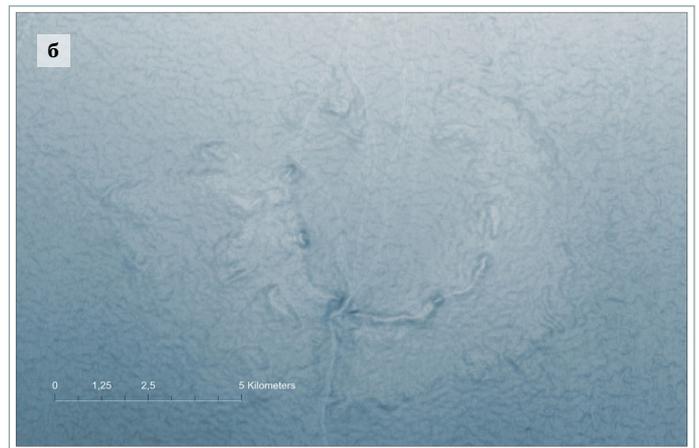
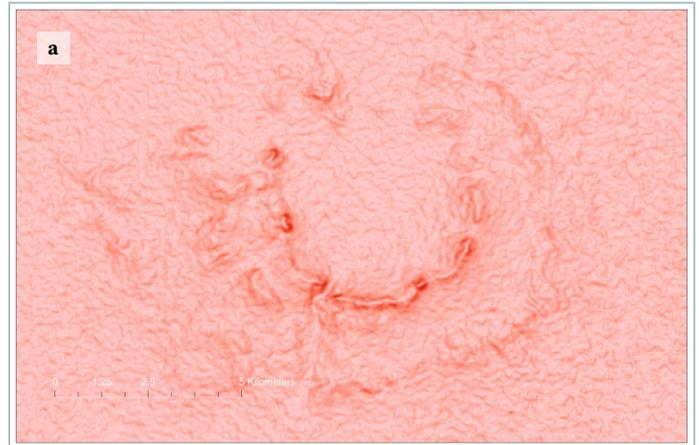


**Рис. 13** ➤

Вид на кратер Цэнхэр. Обработка данных цифровой модели высот (SRTM). Визуализация показателя — «крутизна склонов» (градусы). Основной тематический слой — градиентный вариант раскраски (а). Комбинация тематических слоев: крутизна склонов (градусы) — градиентный вариант гипсометрической раскраски и базового слоя World Imagery (Clarity), Esri (версия 2023) (б). Масштаб 1 : 12 000

**Fig. 13**

View of Tsenkher crater. Processing of digital elevation model (SRTM) data. Visualization of the slope steepness (degrees) indicator. The main thematic layer is a gradient coloring option (a). Combination of thematic layers: slope steepness (degrees) – a gradient version of hypsometric coloring and the base layer of World Imagery (Clarity), Esri in version 2023 (b). Scale 1 : 12,000

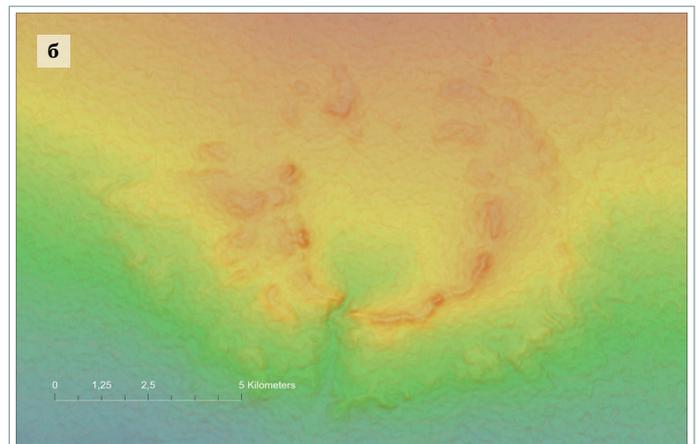


**Рис. 14** ➤

Вид на кратер Цэнхэр. Обработка данных цифровой модели высот (SRTM). Комбинация тематических слоев: гипсометрическая раскраска в сочетании с методом горизонталей, изогипсы проведены через 10 м, градиентный вариант раскраски (а), многоцветный вариант гипсометрической раскраски (б). Масштаб 1 : 12 000

**Fig. 14**

View of the Tsenkher crater. Processing of digital elevation model (SRTM) data. Combination of thematic layers: hypsometric coloring combined with the contour method, isohypses drawn every 10 meters, gradient coloring option (a), multicolor hypsometric coloring option (b). Scale 1 : 12,000

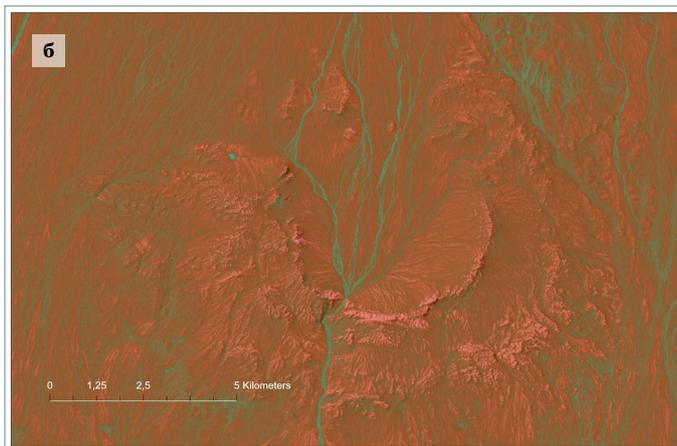


**Рис. 15** ➔

Вид на кратер Цэнхэр. Обработка данных цифровой модели высот (SRTM). Комбинация тематических слоев: гипсометрическая раскраска в сочетании с методами аналитической светотеневой отмывки, святающихся горизонталей, градиентный вариант (а), World Imagery (Clarity), World Hillshade (Dark), Esri (версия 2022). Метод светотеневой отмывки, многоцветный вариант гипсометрической раскраски (б). Масштаб 1 : 12 000

**Fig. 15**

View of Tsenkher crater. Processed digital elevation model (SRTM) data. Combination of thematic layers: hypsometric coloring combined with analytical hillshading methods, glowing contours, gradient version (a), World Imagery (Clarity), World Hillshade (Dark), Esri in version 2022. Analytical hillshading method, multi-color version of hypsometric coloring (b). Scale 1 : 12,000

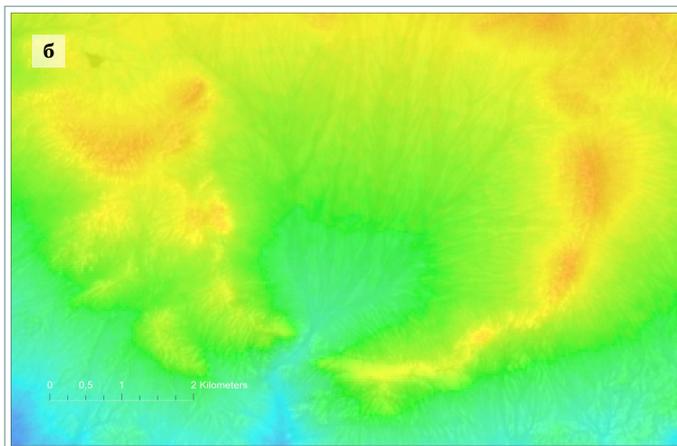
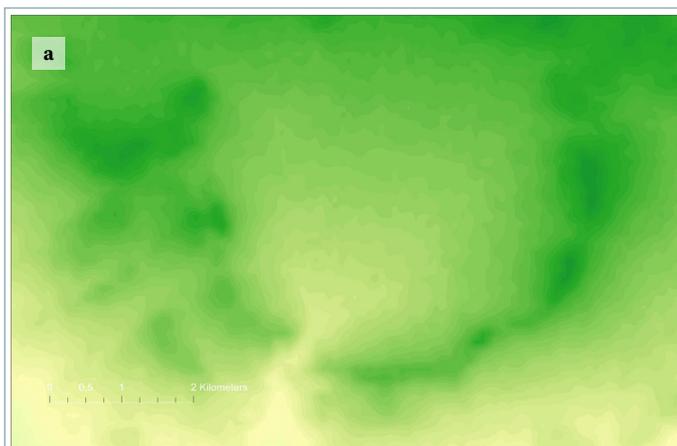


**Рис. 16** ➔

Вид на кратер Цэнхэр. Обработка данных цифровой модели высот (ALOS GDEM). Комбинация тематических слоев: гипсометрическая раскраска в сочетании с методом горизонталей, изогипсы проведены через 5 м, многоцветный вариант раскраски (а), данных цифровой модели высот (ALOS GDEM) и базового слоя: World Imagery (Clarity), Esri (версия 2023), многоцветный вариант гипсометрической раскраски (б). Масштаб 1 : 6 000

**Fig. 16**

View of the Tsenkher crater. Processing of digital elevation model (ALOS GDEM) data. Combination of thematic layers: hypsometric coloring combined with the contour method, isohypses drawn every 5 meters, multi-color version of coloring (a), digital elevation model (ALOS GDEM) data and the base layer: World Imagery (Clarity), Esri in version 2023, multi-color version of hypsometric coloring (b). Scale 1 : 6,000

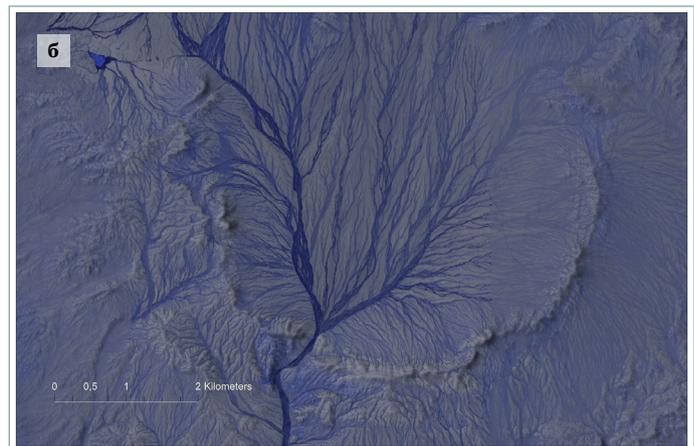
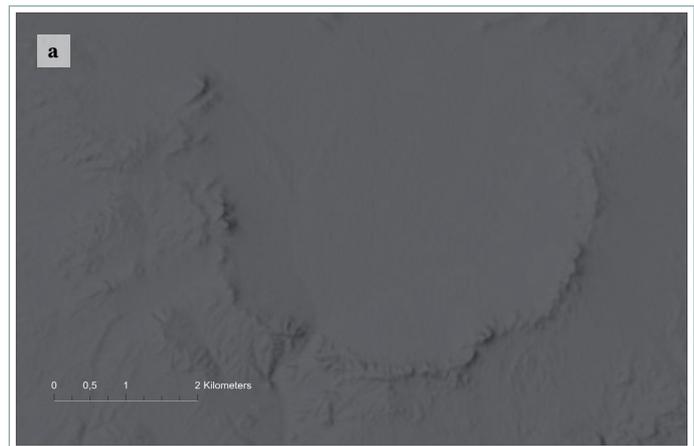


**Рис. 17** ➤

Вид на кратер Цэнхэр. Изображение на основе использования комбинации тематических слоев: World Imagery (Clarity), World Hillshade (Dark), Esri (версия 2022). Метод светотеневой отмывки, градиентный вариант (а), World Imagery (Clarity), World Hillshade (Dark), Esri (версия 2022). Метод светотеневой отмывки, многоцветный вариант гипсометрической раскраски (б). Масштаб 1 : 6 000

**Fig. 17**

View of Tsenkher crater. Image based on a combination of thematic layers: World Imagery (Clarity), World Hillshade (Dark), Esri in version 2022. Analytical hillshading, gradient version (a), World Imagery (Clarity), World Hillshade (Dark), Esri in version 2022. Analytical hillshading, multicolor version of hypsometric coloring (b). Scale 1 : 6,000

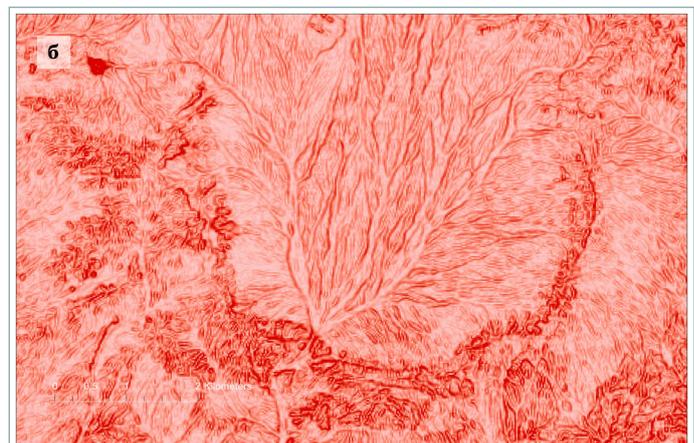
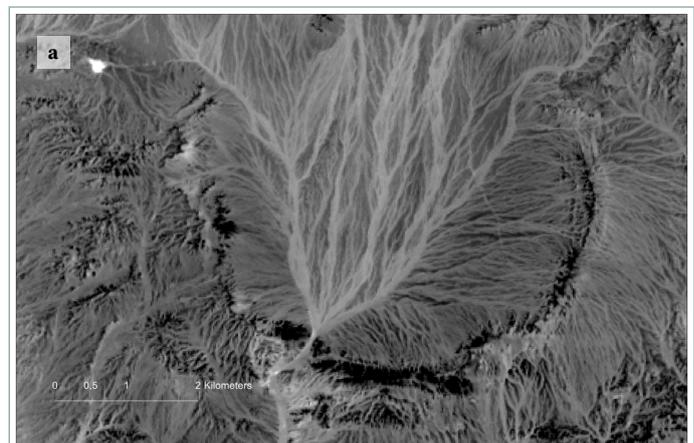


**Рис. 18** ➤

Вид на кратер Цэнхэр. Landsat 8 OLI\_TIRS от 20.06.2014, Landsat ID: 2014-06-20. 04:06:36.0711040Z-LC08\_L1TP\_135030\_20140620\_20200911\_02\_T1. Band 8 PAN (а), обработка данных снимка. Визуализирован показатель – «крутизна склонов» (градусы) (б). Масштаб 1 : 6 000

**Fig. 18**

View of Tsenkher crater. Landsat 8 OLI\_TIRS from 2014-06-20, Landsat ID: 2014-06-20. 04:06:36.0711040Z-LC08\_L1TP\_135030\_20140620\_20200911\_02\_T1. Band 8 PAN (a), image data processing. The slope steepness (degrees) indicator is visualized (b). Scale 1 : 6,000

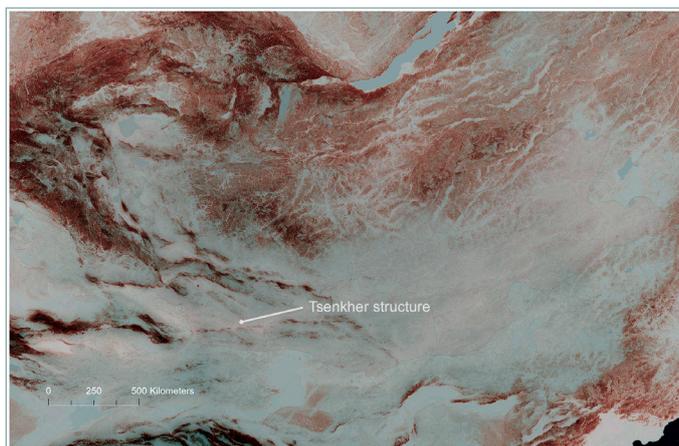


**Рис. 19** ➤

Положение импактной структуры Цэнхэр (Tsenkher structure). На снимке обозначена территория Монголии. Изображение на основе использования комбинированного метода визуализации высотных данных RRIM. Базовый слой: World Dark Canvas, Esri (версия 2023). Масштаб 1 : 2 600 000

**Fig. 19**

Position of the Tsenkher impact structure. The image shows the territory of Mongolia. Image based on the combined method of visualization of high-altitude data RRIM. Base layer: World Dark Canvas, Esri in version 2023. Scale 1 : 2,600,000

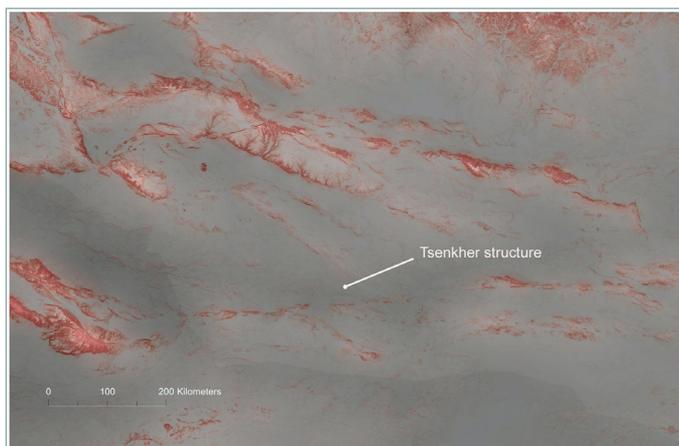


**Рис. 20** ➤

Положение импактной структуры Цэнхэр (Tsenkher structure). На снимке обозначена территория Монголии. Изображение на основе использования комбинированного метода визуализации высотных данных RRIM. Базовый слой: World Hillshade (Dark), Esri (версия 2023). Масштаб 1 : 800 000

**Fig. 20**

Position of the Tsenkher impact structure. The image shows the territory of Mongolia. Image based on the combined method of visualization of high-altitude data RRIM. Base layer: World Hillshade (Dark), Esri in version 2023. Scale 1 : 800,000

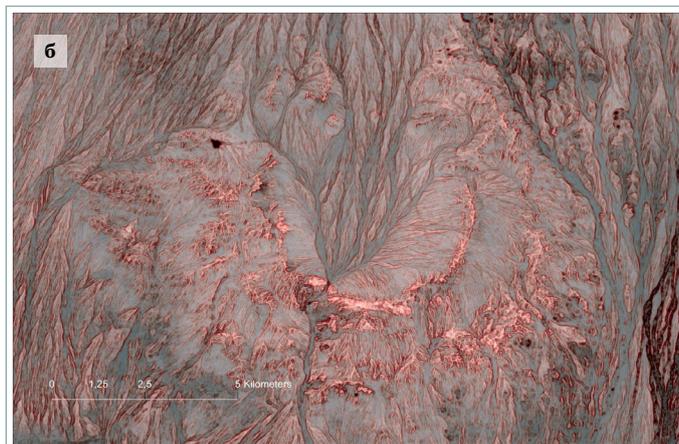


**Рис. 21** ➤

Вид на кратер Цэнхэр. Landsat 8 OLI\_TIRS от 20.06.2014, Landsat ID: 2014-06-20.04:06:36.0711040Z-LC08\_L1TP\_135030\_20140620\_20200911\_02\_T1. Band 8 PAN (a). Обработка данных снимка. Изображение на основе использования комбинированного метода визуализации высотных данных RRIM (б). Масштаб 1 : 12 000

**Fig. 21**

View of Tsenkher crater. Landsat 8 OLI\_TIRS from 20.06.2014, Landsat ID: 2014-06-20.04:06:36.0711040Z-LC08\_L1TP\_135030\_20140620\_20200911\_02\_T1. Band 8 PAN (a). Image data processing. Image based on the combined method of visualization of vertical data RRIM (б). Scale 1 : 12,000

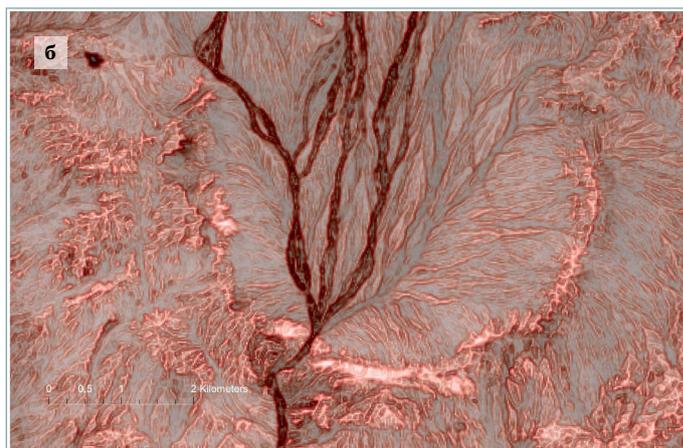
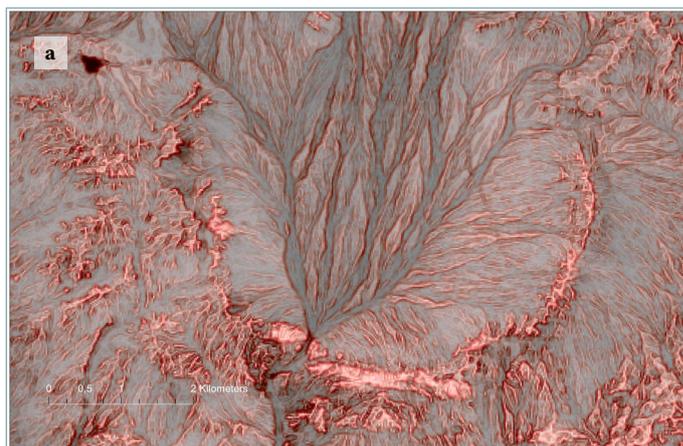


**Рис. 22** ➤

Вид на кратер Цэнхэр. Сезонные изменения — рисунок и глубина водотоков. Обработка данных снимка. Landsat ID: 2014-06-20. 04:06:36.0711040Z (a). Обработка данных снимка. Landsat ID: 2023-09-09. 04:06:55.4259660Z. Изображения на основе использования комбинированного метода визуализации высотных данных RRIM (б). Масштаб 1 : 6 000

**Fig. 22**

View of Tsenkher crater. Seasonal changes – the pattern and depth of streams. Image data processing. Landsat ID: 2014-06-20. 04:06:36.0711040Z (a). Image data processing. Landsat ID: 2023-09-09. 04:06:55.4259660Z. Images based on the use of a combined method of visualizing vertical data RRIM (б). Scale 1 : 6,000

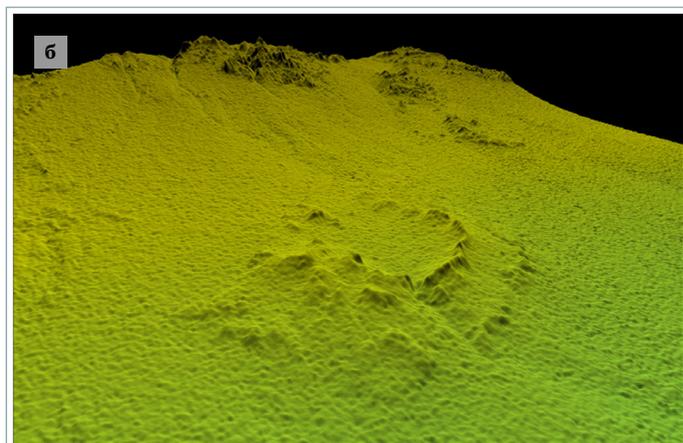
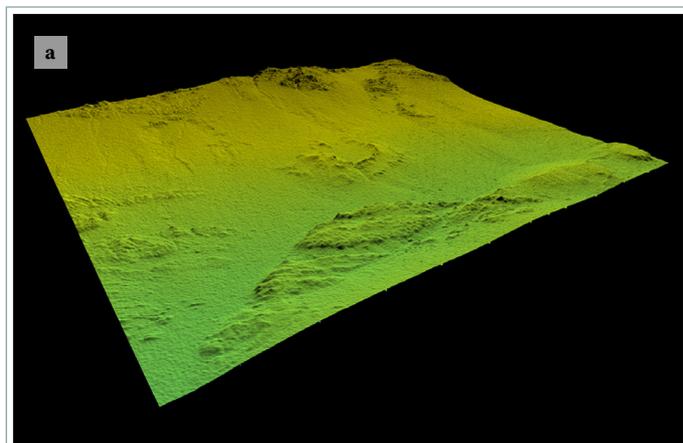


**Рис. 23** ➤

Трехмерная модель участка, созданная на основе данных цифровой модели поверхности NASADEM. Вид на метеоритный кратер Цэнхэр с юго-запада. Положение импактной структуры на склоне (а), крупный план, хорошо виден пролом кратера на юго-западе (б). Результат использования приложения Global Mapper v21.00. Вертикальный масштаб 1 : 15

**Fig. 23**

A 3D model of the site created from NASADEM digital surface model data. View of the Tsenkher meteorite crater, from the southwest. The position of the impact structure on the slope (a), close-up, the crater breach in the southwest is clearly visible (б). Result of using the Global Mapper v21.00 application. The vertical scale is 1 : 15





# Visualization of data on the morphological features of ring structures: using the example of the Tsenkher meteorite crater (Gobi Altai)

Said N. Abdulmyanov<sup>1,2</sup>✉, S. Khadbaatar<sup>3</sup>, Ilya K. Semerenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Vernadsky State Geological Museum, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Mongolian National University of Education, Ulaanbaatar, Mongolia

✉ [abdulmyanov@gmail.com](mailto:abdulmyanov@gmail.com)

**CITATION** Abdulmyanov SN, Khadbaatar S, Semerenko IK. Visualization of data on the morphological features of ring structures: using the example of the Tsenkher meteorite crater (Gobi Altai). *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(1): 64–89. DOI:10.30533/GiA-2025-004.

**KEYWORDS** terrain, satellite data, geomorphological features, field research methods, ring structures, astrobleme, analytical hillshading, depiction of landforms on maps

**ABSTRACT** Many of the known impact structures have been discovered by analyzing characteristic morphological features using geoinformation systems and remote sensing data. Satellite data and GIS capabilities allow for interpretation, visual assessment of meteorite craters, and presentation of morphological features of objects. However, obvious morphological expressions do not always correspond to structural forms. Morphological features of many geological objects, clearly visible when analyzing satellite images and displayed on maps, may be completely unobvious when passing field routes and conducting visual surveys. This is relevant for identifying many astroblemes. Among the huge number of astroblemes, only a small part of them has obvious morphological features. Impact structures have different preservation – deformation features, degree of surface destruction, burial conditions, and topographic openness. As a result of conducting a full cycle of research works on studying geomorphology, lithology, petrography, conducting field work including passing routes, conducting surveys, sampling and subsequent office processing, it becomes possible to diagnose the genesis of asteroid craters. Using the example of meteorite craters, it is possible to trace the tasks of decoding ring structures of varying degrees of complexity. Well-preserved ring structures are examples of data visualization and visual representation of surface relief.

**ACKNOWLEDGEMENTS** The authors thank the researcher of the nature and mineral resources of Mongolia, candidate of geological and mineralogical sciences M.N. Grechukhin, who provided assistance in working on the substantive part of this review, and also express gratitude to R.Ch. Arifulov for his leadership of this information project and its technical support.

- REFERENCES**
- Gurevich DV. Kol'cevye struktury: vazhnejshie mehanizmy obrazovaniya [Ring structures: the most important mechanisms of formation]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2009;39: 14–23. (In Russian).
  - Becker L, Poreda RJ, Basu AR, et al. Bedout: A possible end-Permian impact crater offshore of Northwestern Australia. *Science*. 2004;304(5676): 1469–1476. DOI:10.1126/science.1093925.
  - Macdonald FA, Bunting JA, Cina SE. Yarrabubba – a large, deeply eroded impact structure in the Yilgarn Craton, Western Australia. *Earth and Planetary Science Letters*. 2003;213(3-4): 235–247. DOI:10.1016/S0012-821X(03)00322-4.
  - Erickson TM, Kirkland CL, Timms NE, et al. Precise radiometric age establishes Yarrabubba, Western Australia, as Earth's oldest recognised meteorite impact structure. *Nature Communications*. 2020;11(1): 300. DOI:10.1038/s41467-019-13985-7.
  - Meschede M, Warr LN. Asteroid Craters. *The Geology of Germany. Regional Geology Reviews*. Springer, Cham; 2019: 251–257. DOI:10.1007/978-3-319-76102-2\_15.
  - Kenkmann T. The terrestrial impact crater record: A statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more. *Meteoritics & Planetary Science*. 2021;56(5): 1024–1070. DOI:10.1111/maps.13657.
  - Kennelly P, Kimerling AJ. Modifications of Tanaka's Illuminated Contour Method. *Cartography and Geographic Information Science*. 2001;28(2): 111–123. DOI:10.1559/152304001782173709.
  - Chiba T, Kaneta S, Suzuki Y. Red Relief Image Map: New visualization method for three dimensional data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008;37(B2): 1071–1076.
  - Chiba T, Hasi B. Ground surface visualization using Red Relief Image Map for a variety of map scales. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016;41(B2): 393–397. DOI:10.5194/isprsarchives-XLI-B2-393-2016.
  - No T, Hiramatsu T, Sato T, et al. Red relief image map and integration of topographic data in and around the Japan Sea. *JAMSTEC Report of Research and Development*. 2016;22: 13–29. (In Japanese). DOI:10.5918/jamstecr.22.13.
  - Samsonov T. Granularity of Digital Elevation Model and Optimal Level of Detail in Small-Scale Cartographic Relief Presentation. *Remote Sensing*. 2022;14(5): 1270. DOI:10.3390/rs14051270.
  - Sparavigna AC. *Craters in Maps given by Spaceborne Digital Elevation Models*. 2022. Available from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03607208> (Accessed 29 September 2024).
  - Douglass NAK, Fish CS. That's a Relief: Assessing Beauty, Realism, and Landform Clarity in Multilayer Terrain Maps. *Cartographic Perspectives*. 2022;100: 43–66. DOI:10.14714/CP100.1727.
  - Schmieder M, Seyfried H, Gerel O. The circular Uneged Uul structure (East Gobi Basin, Mongolia) – Geomorphic and structural evidence for meteorite impact into an unconsolidated coarse-clastic target? *Journal of Asian Earth Sciences*. 2013;64(5): 58–76. DOI:10.1016/j.jseaes.2012.11.042.
  - Amgaa T, Mader D, Reimold WU, et al. Tabun Khara Obo impact crater, Mongolia: Geophysics, geology, petrography, and geochemistry. *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution VI: Geological Survey of America*. Reimold W.U., Koeberl C. (eds.). 2021;550: 81–132. DOI:10.1130/2021.2550(04).
  - Cohen KM, Finney SC, Gibbard PL, et al. The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*. 2013;36(3): 199–204. DOI:10.18814/epiiugs/2013/v36i3/002.
  - Komatsu G, Olsen JW, Ormö J, et al. The Tsenkher structure in the Gobi-Altai, Mongolia: Geomorphological hints of an impact origin. *Geomorphology*. 2006;74(14): 164–180. DOI:10.1016/j.geomorph.2005.07.031.
  - Komatsu G, Ormö J, Bayaraa T, et al. The Tsenkher structure in the Gobi-Altai, Mongolia; preliminary results from the 2007 expedition. *39th Lunar and Planetary*

- Science Conference (Lunar and Planetary Science XXXIX) (League City, Texas, March 10–14, 2008)*. 2008;1391: 1622.
19. Komatsu G, Ormö J, Bayaraa T, et al. Further evidence for an impact origin of the Tsenkher structure in the Gobi-Altai, Mongolia: Geology of a 3.7 km crater with a well-preserved ejecta blanket. *Geological Magazine*. 2019;156(1): 1–24. DOI:10.1017/S0016756817000620.
  20. Saltykovskiy AYa, Tselmovich VA, Bayaraa T, et al. Impaktnyj krater i sostav kosmicheskogo veshhestva v rannepaleozojskoj strukturnoj zone Juzhnoj Mongolii [Impact crater and composition of cosmic matter in the early Paleozoic structural zone of Southern Mongolia]. *Proceedings of XII International Conference “Physicochemical and Petrophysical Problems in Earth Sciences” (Moscow, October 3–5, 2011; Borok, October 6, 2011)*. Moscow, 2011: 274–279. (In Russian).
  21. Saltykovskiy AYa, Nikitin AN, Tselmovich VA, et al. *Impaktnyj krater i sostav kosmicheskogo veshhestva v Central'noj Azii* [Impact crater and composition of cosmic matter in Central Asia]. 2012: 1–16. (In Russian). DOI:10.13140/RG.2.2.17623.68003.
  22. Tselmovich VA. Samorodnye metally i kosmicheskie mineraly iz astroblemy Cjenhjer [Native metals and space minerals from the Tsenkher astrobleme]. *Minerals: structure, properties, research methods: Proceedings of the IV All-Russian youth scientific conference (Ekaterinburg, October 15–18, 2012)*. Ekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2012: 257–259. (In Russian).
  23. Goudie A. *Arid and Semi-Arid Geomorphology*. Cambridge University Press, 2013. 454 p.
  24. Beresneva IA. *Klimaty aridnoj zony Azii* [Climates of the arid zone of Asia]. Gunin PD. (ed.). Moscow: Nauka; 2006. 286 p. (In Russian).
  25. Heiner M, Batsaikhan N, Galbadrakh D, et al. Towards a National GIS Model to Map Terrestrial Ecosystems in Mongolia: A Pilot Study in the Gobi Desert Region. *Proceedings of the Trans-disciplinary Research Conference: Building Resilience of Mongolian Rangelands (Ulaanbaatar, Mongolia, June 9–10, 2015)*. Ulaanbaatar, 2015: 24–34. Available from: <https://mountainscholar.org/items/f270edf3-2db1-47f5-91a4-b1fd6d8367e4> (Accessed 29 September 2024).
  26. Reynard E, Coratza P, Regolini-Bissig G. *Geomorphosites*. Munchen: Verlag Dr. Friedrich Pfeil; 2009. 240 p.

**AUTHORS Said N. Abdulmyanov**

Vernadsky State Geological Museum, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;  
National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russia  
Geocology Department, Faculty of Petroleum Geology and Geophysics  
PhD in Geography, Associate Professor  
 0000-0003-2053-8230

**Sandag Khadbaatar**

Mongolian National University of Education, Ulaanbaatar, Mongolia  
Geocology Department, Institute of Mathematics and Natural Sciences  
PhD in Geography, Professor

**Ilya K. Semerenko**

National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russia  
Geocology Department, Faculty of Petroleum Geology and Geophysics

Submitted: October 03, 2024. Accepted: February 21, 2025. Published: February 28, 2025.