



## Криогенные формы рельефа массива Цэнгэл-Хайрхан (Монгольский Алтай)

С.Н. Абдульмянов<sup>1,2</sup>✉, Н.Н. Михайлов<sup>3</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> Государственный университет управления, Москва, Россия

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

**ЦИТИРОВАНИЕ** Абдульмянов С.Н., Михайлов Н.Н. Криогенные формы рельефа массива Цэнгэл-Хайрхан (Монгольский Алтай) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 46–68. DOI:10.30533/GiA-2025-013.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** спутниковые данные, цифровая модель рельефа, полевые методы исследований, геоморфологические особенности, криогенные формы рельефа, визуализация форм рельефа на картах, Монгольский Алтай

**АННОТАЦИЯ** Горные ландшафты, интерес к которым объединяет исследователей разных стран, сложны, сильно расчленены, фрагментарны и ставят перед специалистами сложные задачи визуализации данных о поверхности. Особенности Алтайской горной системы посвящено большое количество научных публикаций. Значимыми являются материалы комплексного описания территории Монгольского Алтая, собранные в экспедициях В.В. Сапожникова в 1905–1909 годах. По завершении полевых исследований в выводах и в картографическом произведении (карте) сведения о формах древнего и современного оледенения систематизированы и представлены в наглядном виде. В статье рассматриваются фрагмент изолированного массива Цэнгэл-Хайрхан с мало-мощным оледенением и троговая долина р. Хоромд-Булак, правого притока р. Харгантын-Гол (Караганты) бассейна р. Ховд (ранее Кобдо-Гол). По мере совершенствования методов изучения земной поверхности, накопления крупных массивов исследовательских данных, появления новых методик изображения рельефа поверхности возникают и новые возможности визуализации данных о местоположении и морфологических особенностях природных объектов. Вместе с тем значимость маршрутных наблюдений как основного метода непосредственного визуального восприятия, выявления важных особенностей

и характеристик исследуемого объекта велика. Без данных, поступающих с исследовательских маршрутов, проведения детального картирования объектов невозможно реализовать задачи изучения геоморфологических и ряда других особенностей горных территорий. В статье на основе использования спутниковых данных и новых методик визуализации выделены и изображены криогенные формы рельефа ледникового комплекса Цэнгэл-Хайрхан разного уровня и генезиса.

## 1 Введение

Гляциальные и мерзлотные формы рельефа, обусловленные в значительной степени экзогенными процессами, являются типичными для высокогорной зоны Монгольского Алтая. Объект, выбранный для рассмотрения, представляет собой изолированный массив с современным оледенением и репрезентативными криогенными формами рельефа.

Цель исследования — сбор актуальных полевых материалов об особенностях криогенных объектов территории Монгольского Алтая, дешифрирование, верификация и анализ спутниковых данных. В процессе исследования были определены следующие задачи:

- 1) провести полевой этап исследования, выбрать репрезентативный участок высокогорной зоны с яркими формами криогенного рельефа, собрать информацию об особенностях природных объектов;
- 2) обработать полевые материалы на основе использования возможностей ГИС, интерпретации спутниковых данных, визуализации данных цифровой модели высот (ЦМВ);
- 3) подготовить раздел каталога объектов, содержащий унифицированные иллюстрации геоморфологических особенностей территории, информацию, значимую для развития геотуризма.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Территориальные границы исследования

Массив Цэнгэл-Хайрхан (3943,8 м, также Ценгел Хаерхан, *англ.* Tsengel Khairkhan uul) расположен на северо-западе хребта с одноименным названием Цэнгэл-Хайрхан-Нуруу, на востоке от крупного пресноводного озера Хара-Нур (*англ.* Khar Nuur). Эта возвышенная территория Западной Монголии расположена в непосредственной близости от Джунгарской части Большого Алтая, находящегося в Китае. Территория, прилегающая к ледниковому массиву Алтай-Таван-Богд, была известна исследователям. Первые упоминания о ярких следах древнего оледенения в долинах р. Харгартын-Гол (у В.В. Сапожникова она обозначена как р. Караганты) есть в материалах экспедиции 1909 года<sup>1</sup>. Детально изучалась территория и в советский период.

Массив сложной, изогнутой формы вытянут с северо-запада на юго-восток. Наиболее высокая часть хребта расположена на северо-западе и носит название *Нортын-Нуруу*. С севера горные сооружения Цэнгэл-Хайрхан-Нуруу продолжают хребтом Тэшир-Хэрбейн-Нуру (2600–2900 м). С запада и юго-запада

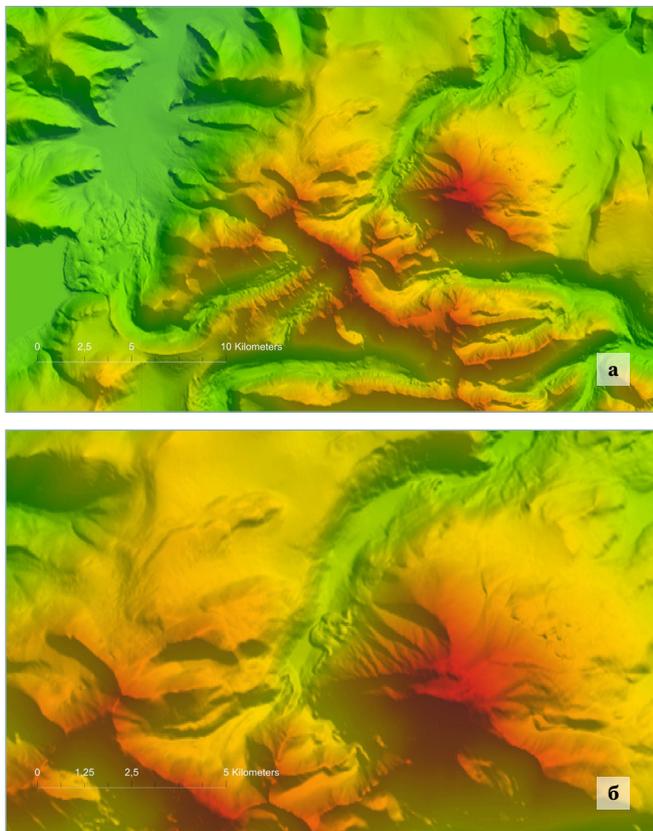
<sup>1</sup> Сапожников В.В. Монгольский Алтай в истоках Иртыша и Кобдо: путешествия 1905–1909 гг. Томск: Типо-литография Сибирского Т-ва печатного дела, 1911. С. 235–238.

**Рис. 1**

Цифровая модель поверхности северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан. Дополнительно цветом выделены высоты. На основе интерпретации данных FABDEM V1-2, 2021. Масштаб 1 : 24 000 (а) – 1 : 12 000 (б)

**Fig. 1**

Digital model of the terrain of the northern macroslope of the Tsengel Khaikhan uul. Additionally, the heights are highlighted in colors. Based on the interpretation of the FABDEM V1-2 data, 2021. Scale 1 : 24 000 (a) – 1 : 12 000 (b)

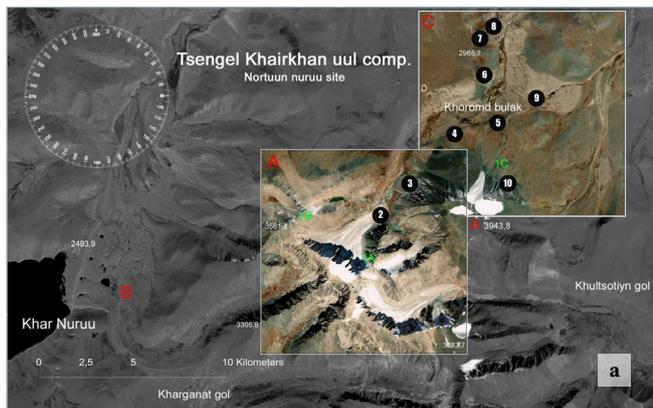


**Рис. 2**

Справочная карта северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан. Выделены сектора А и С, основные объекты, высоты. Базовый снимок. Landsat 9 OLI\_TIRS, “2022-08-29. 04:54:58.3812950Z”. ID: LC09\_L1TP\_143026\_20220829\_20230331\_02\_T1. USGS. Масштаб 1 : 24 000 (а) – 1 : 9 000 (б)

**Fig. 2**

Reference map of the northern macroslope of the Tsengel Khaikhan uul massif. Sectors A and C, main objects, and heights are highlighted. Base image. Landsat 9 OLI\_TIRS, “2022-08-29. 04:54:58.3812950Z”. ID: LC09\_L1TP\_143026\_20220829\_20230331\_02\_T1. USGS. Scale 1 : 24 000 (a) – 1 : 9 000 (b)

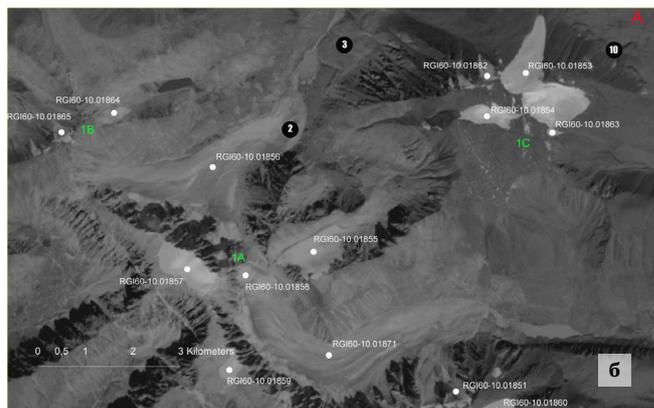


массив ограничивают бессточная котловина оз. Хар-Нуур (урез воды 2493,9 м, высота по топографической карте) и впадина Хара-Борэг (с высотами 2200–2400 м). Восточной границей массива является долина р. Сагсай-Гол (2000–2200 м). Самая южная часть хребта Цэнгэл-Хайрхан-Нуруу оканчивается у самой границы у массива Увчун-Ула (3575 м) и озера Хуримп-Нуур<sup>2,3,4</sup>.

Массив дренируется р. Харганын-Гол, Цаган-Асгын-Гол, Джелтын-Гол и Хулцотийн-Гол (англ. Khargantyn gol, Tsagan Asgyn gol, Djeltyun gol, Khultsotiyn gol). Западный макросклон массива Цэнгэл-Хайрхан, где расположены объекты исследования, относится к долине р. Хоромд-Булак (англ. Khoromd-Bulak), левому ее притоку р. Модин-Сала (англ. Modin Sala gol), правому притоку р. Харганын-Гол. Все водотоки относятся к бассейну р. Ховд (ранее Кобдо-Гол). С запада, юго-запада и юга от массива находятся крупные пресноводные озера возвышенной части Монгольского Алтая — Хурган-Нуур, Хотон-Нуур и Даян-Нуур (у В.В. Сапожникова они обозначены как Верхнее и Нижнее Кобдосские озера, Даян-Гол; англ. Khurgan Nuur, Khotoon Nuur, Dayan Nuur). С востока от массива расположено крупное озеро Толбо-Нуур (англ. Tolbo Nuur). Это существенно влияет на морфологию и динамику современных ледников, региональные климатические особенности [1]. Цифровая модель поверхности северного макросклона Цэнгэл-Хайрхан и справочная карта территории исследования представлены на рис. 1–2.

По результатам последних инструментальных исследований приводятся следующие характеристики для озера Хар-Нуур: высота (GNSS) — 2488 м (2016), 2487 м (2010), 2486 м (2006) над уровнем моря;

- 1 Цифровая модель поверхности северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан. Масштаб 1 : 24 000 (а) – 1 : 12 000 (б).
- 2 Карта Монгольского Алтая в истоках Иртыша и Кобдо: по маршрутам экспедиций профессора В.В. Сапожникова 1905–1909 гг. / сост. на основании оригинальной съемки и др. материалов В.В. Обручевым; чертил Д. Ильин. Масштаб 1 : 840 000, 20 верст в англ. дюйме. Лейпциг: А. Брокгауз, 1911.
- 3 Топографическая карта. Масштаб 1 : 1 000 000. М.: ГШ ВС СССР, 1982. Л. М-45-119, М-45-130, М-45-131.
- 4 Топографическая карта. Масштаб 1 : 2 000 000. М.: ГШ ВС СССР, 1982. Л. М-45-30, М-45-36.



площадь водосбора — 44,8 км<sup>2</sup>, площадь водной поверхности — 13,9 км<sup>2</sup> (2006), 13,8 км<sup>2</sup> (2010), 13,5 км<sup>2</sup> (2016). Максимальная глубина озера, согласно результатам измерений, проведенных с помощью эхолота (2016), составляет 58 м, средняя — 28 м [2].

**Таблица 1** 

Современное оледенение массива Цэнгэл-Хайрхан (Монгольский Алтай)

**Table 1**

Modern glaciation of the Tsengel Khairkhan uul (Mongolian Altai)

**Примечание.**

RGI 6 20110823 — Randolph 6 Glacier Inventory 20110823.

В отличие от крупных ледниковых комплексов Монгольского Алтая (Алтай-Таван-Богд, Цамбагарав, Сутай и ряда других), площадь современного оледенения данного массива совсем невелика и размеры ледников миниатюрные (до 1,523 км<sup>2</sup>)<sup>5</sup>. Тем не менее рассматриваемая территория обладает набором значимых природных объектов и в достаточной степени привлекательна в силу незначительного размера криогенных объектов, климатических условий, отсутствия лесной растительности, малой удаленности от населенных пунктов, хорошей транспортной доступности. В табл. 1<sup>6,7</sup> [3] представлены данные по современному оледенению массива Цэнгэл-Хайрхан.

Номер ледника RGI 6 20110823	Площадь, км <sup>2</sup>	Высота, м		
		минимальная	средняя	максимальная
RGI60-10.01856	<b>1,523</b>	<b>2951</b>	<b>3166</b>	3799
RGI60-10.01871	1,009	3009	3248	3588
RGI60-10.01855	0,487	3085	3365	3552
RGI60-10.01853	0,403	3250	3691	3900
RGI60-10.01877	0,376	3088	3245	3473
RGI60-10.01872	0,326	3149	3277	3474
RGI60-10.01852	0,305	3157	3283	3538
RGI60-10.01851	0,260	3372	3538	3682
RGI60-10.01857	0,252	3656	3742	3796
RGI60-10.01860	0,246	3114	3416	3617
RGI60-10.01880	0,190	3247	3409	3491
RGI60-10.01879	0,186	3293	3444	3538
RGI60-10.01854	0,167	3845	3900	3920
RGI60-10.01861	0,166	3149	3424	3585
RGI60-10.01859	0,136	3653	3693	3709
RGI60-10.01858	0,133	3360	3451	3583
RGI60-10.01887	0,106	3228	3384	3462
	<b>6,138</b>			
RGI60-10.01878	0,099	3026	3225	3402
RGI60-10.01864	0,075	3301	3386	3496
RGI60-10.01863	0,068	3495	3554	3624
RGI60-10.01870	0,056	3150	3205	3240
RGI60-10.01865	0,047	3417	3543	3612
RGI60-10.01868	0,047	3432	3575	3630
RGI60-10.01867	0,044	3265	3333	3387
RGI60-10.01862	0,043	3682	3779	3858
RGI60-10.01869	0,04-	3437	3534	3595
RGI60-10.01889	0,032	3269	3315	3377
RGI60-10.01890	<b>0,032</b>	3306	3370	3430
	<b>0,583</b>			
<b>Всего</b>	<b>6,721</b>			

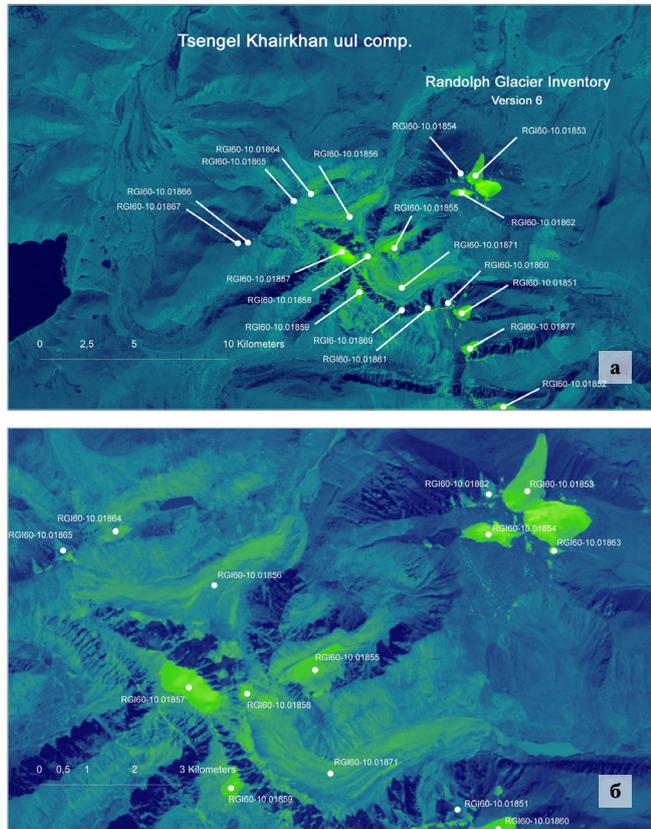
- Windnagel A. A Summary of the Global Glacier Landscape: The Largest Glaciers and Glacier Complexes in the 19 Glacial Regions of the World. NSIDC Special Report 23. Boulder CO, USA: National Snow and Ice Data Center, 2022. 73 p.
- Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS). Monitoring the World's Changing Glaciers, GLIMS Glacier Viewer. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.glims.org/maps/glims> (дата обращения: 20.10.2024).
- Использованы данные каталогов ледников RGI v6, версия 2011.

**Рис. 3** 

Справочная карта современного оледенения северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан. Нумерация согласно каталогу RGI v6. Базовый снимок. Landsat 8 OLI\_TIRS от 2022-08-29, USGS. Псевдоцвета. Масштаб 1 : 24 000 (а) – 1 : 9 000 (б)

**Fig. 3**

Reference map of modern glaciation of the northern macroslope of the Tsengel Khairkhan uul. Numbering according to the RGI v6 catalog. Base image. Landsat 8 OLI\_TIRS from 2022-08-29, USGS. The infrared channel B8-PAN (NIR) and pseudo colors. Scale 1 : 24 000 (a) – 1 : 9 000 (b)

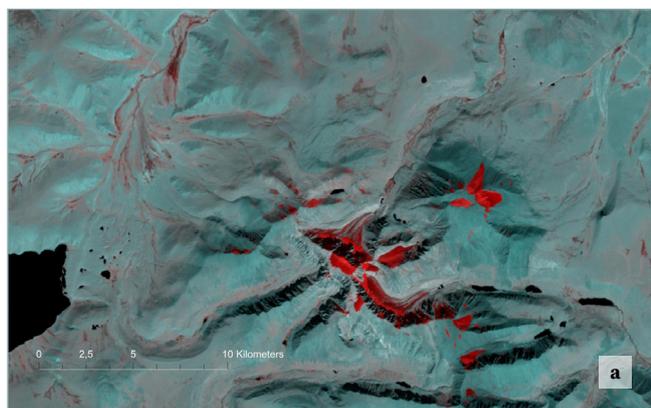


**Рис. 4** 

Справочная карта современного оледенения северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан. Базовый снимок – Sentinel-2A от 2016-09-06, ЕСА. Для визуализации данных использованы комбинация каналов инфракрасного и видимого диапазона B12-B8A-B4 (SWIR-1, NIR-2, Red) и псевдоцвета. Масштаб 1 : 24 000 (а) – 1 : 9 000 (б)

**Fig. 4**

Reference map of modern glaciation of the northern macroslope of the Tsengel Khairkhan uul and sector A. Base image – Sentinel-2A from 2016-09-06, ESA. For data visualization, a combination of infrared and visible range channels B12-B8A-B4 (SWIR-1, NIR-2, Red) and pseudocolors. Scale 1 : 24 000 (a) – 1 : 9 000 (b)



Справочная карта современного оледенения северного макросклона массива Цэнгэл-Хайрхан приводится на рис. 3–4.

На западе и юге от объекта расположена охраняемая территория – национальный парк Алтай-Таван-Богд с крупнейшим центром оледенения Северной Азии. Административно территория относится к сомонам Баян-Улгийского аймака Улаанхус, Сагсай.

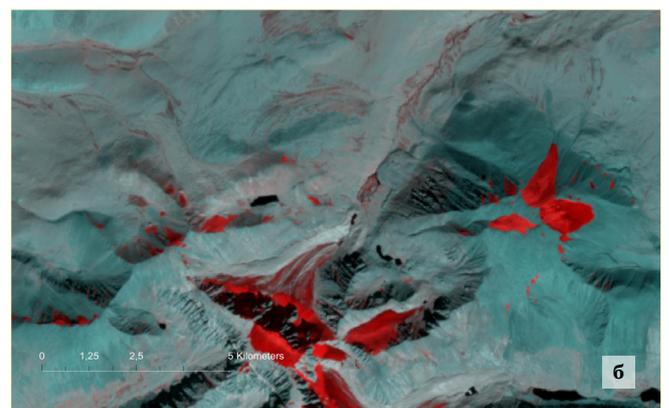
## 2.2 Объекты и методы исследования

В отличие от полярных территорий, горных стран высоких широт, криогенные формы данной части Большого Алтая имеют меньшие размеры и фрагментарное распространение. Высокогорный район Монгольского Алтая отличается повсеместным распространением многолетней мерзлоты, существованием специфических мерзлотных форм рельефа горных склонов и долин, глубоким промерзанием грунтов, редкими фрагментами реликтовой мерзлоты, отсутствием речного стока большую часть года, наледями на реках, экстремальными экологическими особенностями природной среды, суровыми условиями жизни населения. Выделенные далее криогенные формы обладают характерными морфологическими особенностями поверхности.

При подготовке материала были использованы следующие **методы**: информационно-картографический, дистанционного зондирования и полевых наблюдений.

Полевой этап проходил в два периода: сбор полевого материала в сентябре 2022 года и в августе 2024 года. Короткая рекогносцировочная поездка состоялась также в январе 2024 года. Метод включал прохождение пеших маршрутов, сбор первичных данных, выделение ключевых участков поверхности, фотофиксацию объектов.

Верификация данных с полевых маршрутов проходила с использованием материалов дистанционного зондирования Земли и возможностей ГИС-приложений. При подготовке карт использовались

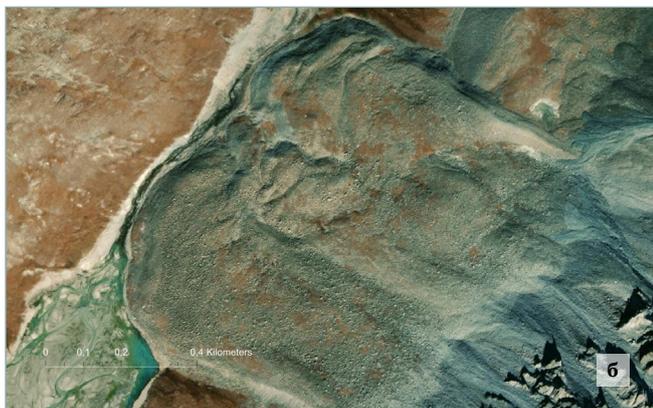


**Рис. 5** 

Сектор А. Вид на крупные каменные потоки (участок 3) комплекса Цэнгэл-Хайрхан. Базовое изображение – World Imagery (Clarity), Esri, версия 2024 г. Масштаб 1 : 2 800 (а) – 1 : 1 200 (б)

**Fig. 5**

Sector A. View of the slope large rock streams (site 3), Tsengel Khairkhan uul complex. Base image – World Imagery (Clarity), Esri, version 2024. Scale 1 : 2 800 (a) – 1 : 1 200 (б)

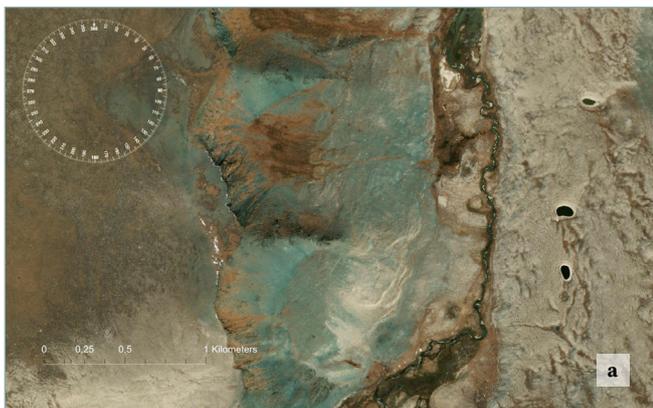


**Рис. 6** 

Сектор С. Вид на солифлюкционные потоки склона восточной экспозиции (участки 6, 7), долины р. Хоромд-Булак. Базовое изображение – World Imagery (Clarity), Esri, версия 2024 г. Масштаб 1 : 2 800 (а) – 1 : 1 200 (б)

**Fig. 6**

Sector C. View of solifluction flows of the eastern slope (sites 6, 7), Khoromd-Bulak river valley. Base image – World Imagery (Clarity), Esri, version 2024. Scale 1 : 2 800 (a) – 1 : 1 200 (б).



открытые данные о высотных характеристиках поверхности Земли, полученные с помощью радарной съемки SRTM, ALOS GDEM, NASAGEM, FABDEM, серия многозональных снимков USGS (*англ.* United States Geological Survey – Геологическая служба США) Landsat MS 8 и 9, обновляемые спутниковые мозаики World Imagery, ESRI. При анализе характеристик ледниковых комплексов использовались данные специализированных каталогов Randolph Glacier Inventory (RGI) и GLIMS Glacier Database.

**Объектами исследований** стали формы ледникового рельефа, обусловленные геологической деятельностью ледников, и формы криогенного (мерзлотного) рельефа, связанные с широким распространением льда в рыхлых отложениях в высокогорном поясе. Объекты криогенного генезиса представлены различными формами рельефа, снежно-ледяными, каменно-ледяными образованиями (каменными глетчерами, каменными потоками), солифлюкционными формами, участками с буграми пучения, полигональными и структурными грунтами и др.

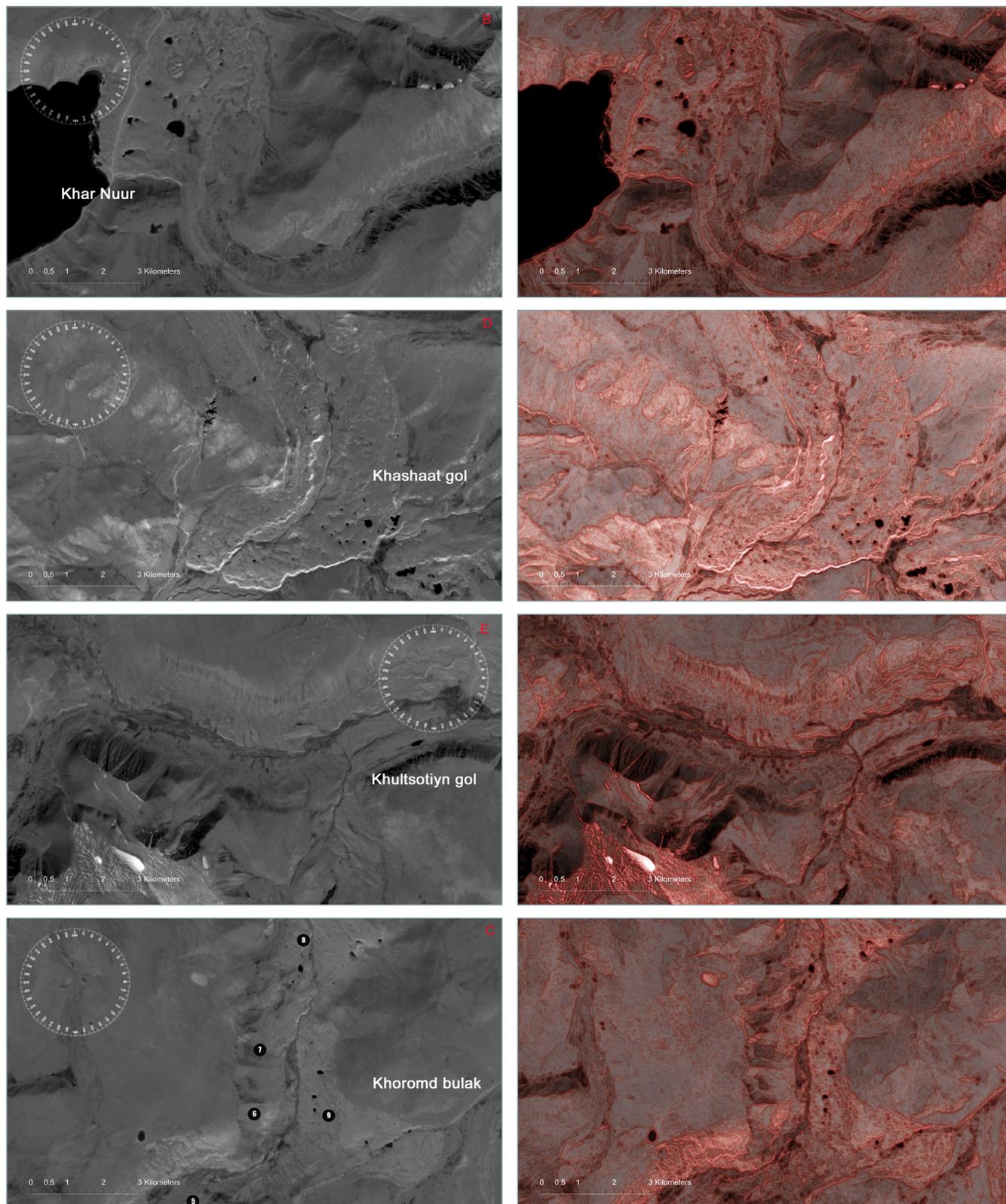
Характеристикам и особенностям объектов северо-западной части Монгольского Алтая посвящено множество научных работ<sup>8,9,10</sup> [4–6]. Территория, где расположены массив Цэнгэл-Хайрхан и прилегающие долины, разделена нами на сектора, которые на карте обозначены буквами латинского алфавита **A, B, C, D, E, F**. Районы проведения работ на северо-восточном склоне (сектора **A** и **C**) разделены на две зоны, выделено 9 участков. Формы криогенного рельефа разделены на 6 групп. Изображение объектов и выделенные сектора приводятся на рис. 5–8.

- 8 Геокриологические условия Монгольской Народной Республики: монография / отв. ред. П.И. Мельников. М.: Наука, 1974. 208 с.
- 9 Ревякин В.С. Природные льды Алтае-Саянской горной области (внутриконтинентальный вариант гляциосферы Земли). Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 288 с.
- 10 Мудров Ю.В. Мерзлотные явления в криолитозоне равнин и гор. Основные понятия и определения: иллюстрированный энциклопедический справочник. М.: Научный мир, 2007. 312 с.

**Рис. 7** 

Виды на сектора: В — восточное побережье озера Хар-Нуур; Е, D — долины р. Харгалант-Гол, Хулцотийн-Гол, конечная морена позднеплейстоценового комплекса; С — формы мерзлотного рельефа долины р. Хоромд-Булак. Базовый снимок. Landsat 8 OLI\_TIRS от 2022-08-29, USGS (слева). Акцент — крутизна склонов. Изображение на основе снимка Landsat и комбинированного метода визуализации данных RRIM. Масштаб 1 : 9 000 (справа)

**Fig. 7**  
Views of sectors: В - the eastern coast of Lake Khar Nuur; Е, D - the valleys of the Khargalant gol and Khultsotiin gol rivers - terminal moraine of the late Pleistocene complex; С - permafrost relief forms of the Khoromd-Bulak river valley. Base image. Landsat 8 OLI\_TIRS from 2022-08-29, USGS (on the left). Emphasis on the steepness of the slopes. Image based on Landsat image and RRIM® combined method of visualizing data. Scale 1 : 9 000 (on the right)

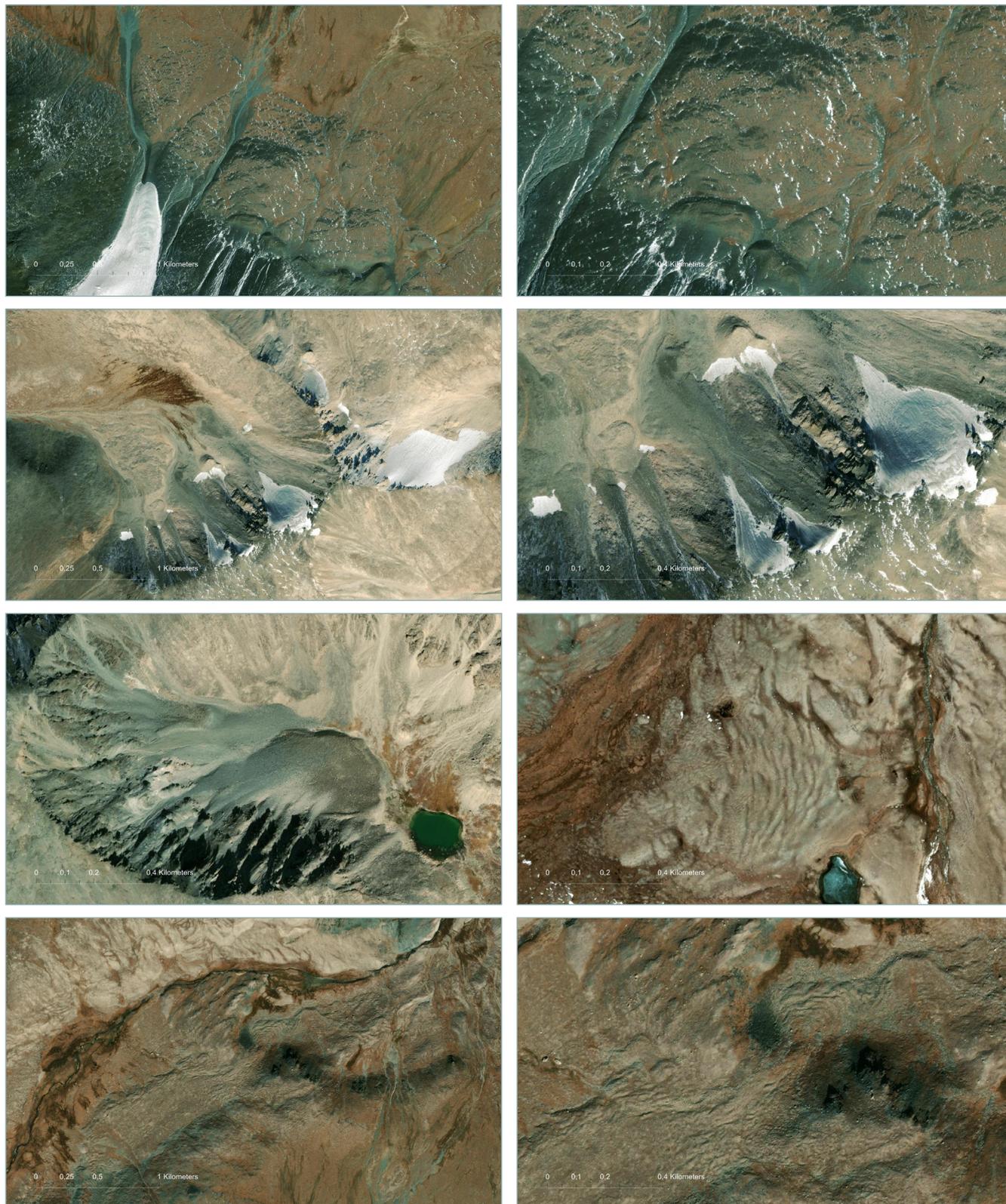


**Рис. 8** 

Вид на сектора А и С ледникового комплекса Цэнгэл-Хайрхан и долины р. Хоромд-Булак. Серия изображений – мелкие формы гляциального и мерзлотного рельефа (участки 4–9). Базовое изображение – World Imagery (Clarity), версия 2024 г. Масштаб 1 : 2 800 – 1 : 1 200

**Fig. 8**

View of sectors A and C of the Tsengel Khairkhan uul glacier complex and the Khoromd-Bulak river valley. A series of images – small forms of glacial and permafrost relief (sites 4–9). Base image – World Imagery (Clarity), Esri, version 2024. Scale 1 : 2 800 – 1 : 1 200



## 2.3 Источники пространственных данных

1. Для анализа состояния поверхности участка в качестве основного источника применялись многозональные снимки среднего разрешения оптического диапазона USGS Landsat 8 OLI\_TIRS, Landsat 8 и 9 OLI\_TIRS за 10-летний период (с 31 августа 2014 года по 27 августа 2024 года)<sup>11</sup>. Для создания изображений использован восьмой спектральный канал B8 PAN (OLI), панхроматический (*англ.* panchromatic, PAN) — длина волны 0,503–0,676 мкм, разрешение 15 м/пиксель. В качестве дополнительных применялись каналы B2 (Blue) — длина волны 0,452–0,512 мкм; B5 (Near-Infrared, NIR) — 0,851–879 мкм; B6 (Short Wavelength Infrared, SWIR 1) — 1566–1651 мкм. Кроме того, при создании композитов использована серия многозональных снимков среднего разрешения оптического диапазона ESA — Sentinel-2A<sup>12</sup> MSI. Базовый снимок — Sentinel-2A “L1C\_T45UXP\_A006308\_20160906T05652 2023-10-23T01:58:25.000000Z”. Лучшие результаты для представления данных о современном оледенении были получены при использовании комбинации каналов инфракрасного и оптического диапазонов: B12 (Short Wave Infrared, SWIR-2) — длина волны 2,081–2,323 мкм; B8A (Narrow Near Infrared, NIR-2) — 0,848–0,883 мкм; B4 (Red) — 0,645–0,683 мкм. Разрешение выбранных каналов — 20–10 м/пиксель.
2. Для анализа состояния поверхности участка были использованы подготовленные на основе доступных радарных данных цифровые модели рельефа (ЦМР). Были проанализированы доступные данные ЦМВ: The NASA Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM Version 4 (SRTM 30m, 2008)<sup>13</sup>; ALOS Global Digital Surface Model (DSM), ALOS World 3D-30m (AW3D30), Version 4,0 (2023)<sup>14</sup>; NASADEM Merged DEM Global 1 Arc Second V001 (2020)<sup>15</sup> — и их последующие интерпретации. Данные ЦМВ ALOS на Монголию были подготовлены компанией NextGIS<sup>16</sup>. Были также использованы высотные данные, входящие в комплект многозональных снимков Landsat 9 OLI\_TIRS. Лучшие результаты были получены при применении цифровой модели поверхности (ЦМП) DTM FABDEM 30m, V1-2<sup>17</sup> [7, 8].
3. В качестве дополнительного источника данных использовались спутниковые мозаики World Imagery, World Imagery (Clarity), World Hillshade (Dark), данные о гидросети HydroSHEDS (*англ.* Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales)<sup>18</sup>, ArcGIS Living Atlas<sup>19</sup> (Esri Inc.).

Материалы подготовлены в системе Geographic Coordinate System (GCS Datum): World Geodetic System, WGS 1984 (EPSG: 4326) в конической картографической проекции (World Equidistant Conic), оптимальной для Большого Алтая. Центральный меридиан: 90,0. Масштаб 1 : 55 000 – 1 : 2 000.

- 
- 11 Earth Resources Observation and Science Center (EROS). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 07.05.2024).
  - 12 Sentinel Online / Copernicus Open Access Hub. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://spacedata.copernicus.eu> (дата обращения: 20.02.2022).
  - 13 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).
  - 14 ALOS Science Project. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://earth.jaxa.jp/en/research/projects/alos/index.html> (дата обращения: 05.01.2024).
  - 15 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).
  - 16 NextGIS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nextgis.ru/datasets> (дата обращения: 30.04.2024).
  - 17 FABDEM V1-2 / The University of Bristol Research Data Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://data.bris.ac.uk/data/dataset/s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn> (дата обращения: 05.01.2024).
  - 18 HydroSHEDS / World Wildlife Fund US. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.hydrosheds.org> (дата обращения: 25.05.2021).
  - 19 ArcGIS Living Atlas of the World / Esri Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://livingatlas.arcgis.com/en/> (дата обращения: 20.04.2024).

## 2.4 Визуализация данных

Порядок работ по визуализации данных представлен ниже.

1. Анализ и выбор сцен (снимков) из серии многозональных снимков среднего разрешения оптического диапазона Landsat 8 и 9 OLI\_TIRS и Sentinel-2A. В качестве базовых при составлении карт были выбраны снимки летнего периода с наименьшей площадью оледенения массива.
2. Анализ и выбор файлов ЦМБ (HDR/HGT – SRTM и GeoTIFF – ALOS GDEM, NASADEM, DTM FABDEM) в Global Mapper v21.00 и ArcGIS Desktop.
3. Визуализация геоморфологических показателей территории. Визуализировался один показатель — крутизна склонов (углы). Данные ЦМБ, снимков Landsat, спутниковых мозаик обрабатывались с помощью инструментов ArcGIS Spatial Analyst Tools (Esri Inc.). Для отображения мерзлотных склонов использованы алгоритм математической обработки данных Quantile и 25 классов градиентной шкалы. Для карт поверхности крутизны склонов масштабов 1 : 55 000 – 1 : 9 000 применялись данные ЦМБ (ALOS GDEM и DTM FABDEM), панспектральный канал (PAN-8) спутниковых снимков. Для карт поверхности склонов масштабов 1 : 9 000 – 1 : 1 200 в отсутствие лидарных данных использовались данные спутниковых мозаик World Imagery ESRI. Использование изобразительных методов для создания реалистичной модели поверхности и форм рельефа имеет давнюю историю. Имитация различных методов освещения объектов, поглощения солнечных лучей поверхностью, отражения и переотражения света от объектов, появление световых эффектов и оптических иллюзий — это арсенал средств, используемых в работе художниками, дизайнерами и инженерами. В отличие от изображений, создаваемых вручную, современные методы работы, в том числе и картография, требуют от специалистов технической грамотности, знания возможностей конкретных приложений. Создание креативных картографических изображений, подчеркивающих особенности поверхности объектов, также предполагает знание теории цвета, цветовых созвучий, правил композиции, владение другими художественными приемами<sup>20,21</sup>. Примером реализации масштабного национального проекта по визуализации особенностей горной территории является Атлас Швейцарии<sup>22</sup>.
4. В целях лучшего представления данных об особенностях земной поверхности, форм современного и древнего оледенения использованы возможности ИК-диапазона, псевдоцвета и современные методики создания изображений [9, 10]. При подготовке картографических изображений ледников массива использована методика создания подсвеченных объектов (*англ.* Illumination Cartography)<sup>23</sup>. При подготовке изображений поверхности, показывающих мерзлотные склоны, применялся комбинированный метод RRIM (*англ.* Red Relief Image Map). Он использовался для визуализации данных ЦМП, отдельных каналов спутниковых снимков и спутниковых мозаик на их основе [11, 12]. В качестве основного инструмента применялись возможности ГИС ArcGIS Desktop v10.3.0 (ESRI Inc.), Global Mapper v21.00<sup>24</sup> и Google Planet Earth Pro<sup>25</sup>.

20 Иттен И. Искусство цвета / пер. с нем. М.: Д. Аронов, 2000. 96 с.

21 Арнхейм Р. Искусство и визуальное восприятие / пер. с англ. М.: Архитектура-С, 2007. 392 с.

22 Atlas of Switzerland. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.atladerschweiz.ch/portfolio/> (дата обращения: 05.12.2023).

23 Nelson J.M. Illumination Cartography. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://adventuresinmapping.com/2024/04/08/illumination-cartography> (дата обращения: 25.10.2024).

24 Global Mapper / Blue Marble Geographics. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper.php> (дата обращения: 20.04.2024).

25 Google Planet Earth Pro / Google Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.google.com/earth> (дата обращения: 05.12.2023).

Дополнительным источником стали данные топографических карт Генерального штаба ВС СССР и карт Госгисцентра РФ (листы М-45-30, М-45-36, масштаб 1 : 200 000; листы М-45-119, М-45-130, М-45-131, масштаб 1 : 100 000).

В результате на северо-восточный склон массива Цэнгэл-Хайрхан подготовлены ГИС-проект и серия изображений участков с формами криогенного рельефа.

### 3 Результаты

Криогенные формы рельефа северо-восточного склона массива Цэнгэл-Хайрхан и долины р. Хоромд-Булак представлены объектами разного генезиса и высотного уровня, классифицированы и указаны в табл. 2. Созданные в результате интерпретации спутниковых данных картографические изображения территории исследования, выделенных участков, фотографии объектов с полевых маршрутов приведены далее.

**Таблица 2**   
Криогенные объекты массива Цэнгэл-Хайрхан и долины р. Хоромд-Булак (Монгольский Алтай)

**Table 2**  
Cryogenic objects of the Tsengel Khairkhan uul and the river valley Khoromd-Bulak, Mongolian Altai

**Примечание.** Обозначения СВ, СЗ, С, В указывают на экспозицию склонов.

Категории и виды объектов, участки А и С	Склон	Координаты, °	
<b>Формы, связанные с современным оледенением</b>			
1А, RGI60-10.01856. Зона ледопада, снежных лавин	СВ	48,632009	89,104735
1А, RGI60-10.01856. Конечная морена (2)	В	48,643090	89,101959
1В, RGI60-10.01865. Группа миниатюрных ледников	СЗ	48,646952	89,070870
1С, RGI60-10.01853. Висячий ледник	СВ	48,657284	89,159113
1С, Группа миниатюрных селей и осыпей (10)	СЗ	48,659515	89,170345
Крупные каменные потоки (3), правый борт	СЗ	48,658717	89,123033
<b>Формы, связанные с подземным оледенением (ММ)</b>			
Солифлюкционный поток, правый борт (4)	СВ	48,679034	89,150325
Солифлюкционные потоки, правый борт (5)	С	48,675542	89,149976
Солифлюкционные склоны, высота 2962,4 м (6)	В	48,692673	89,164659
Солифлюкционные склоны (7)	В	48,702532	89,163682
Солифлюкционные валы или гряды (8)	СВ	48,719014	89,170155
Термокарстовые воронки (правый борт долины) (9)	СЗ	48,689421	89,175888
Термокарстовые котловины в средней части долины	С	48,699602	89,177696

#### 3.1 Современное оледенение

Граница самого крупного современного гляциального комплекса массива Цэнгэл-Хайрхан долинного ледника (RGI60-10.01856) соотносится с долиной р. Хоромд-Булак, хорошо выражена в современном рельефе, маркируется высоким моренным валом, подпрудным озером, снежниками, крупными каменными потоками и другими миниатюрными объектами, расположенными в долине (1А). Координаты: 48,646145° / 89,113529°. Высота 2970 м, превышения до 50 м.

К формам современного оледенения относятся элементы ледниковой поверхности, формы, характерные для фирновой зоны и зоны абляции ледников. Данные особенности горных склонов хорошо известны альпинистам и горным туристам, от прохождения таких участков зависят степень риска, квалификация, требования к снаряжению и категоричность пеших маршрутов. Сюда можно отнести видимые фрагменты фирновой зоны, места схода снежных

лавины, участки перегибов ледникового тела (ледопады, крутые ледниковые склоны северной и северо-восточной экспозиции), исключительно опасные для передвижения.

Фотографии высокогорной зоны, опасные для передвижения участки склонов ледникового комплекса (RGI60-10.01856), высокого моренного вала, самого крупного ледника комплекса представлены на рис. 9–10.

Для контраста необходимо выделение группы из миниатюрных висячих ледников на склоне северо-западной экспозиции (**1B**). Координаты (RGI60-10.01865):  $48,646952^\circ / 89,070870^\circ$ . Высота 3565 м.

Второй по размерам и четвертый в массиве современного гляциального комплекса Цэнгэл-Хайрхан висячий ледник (RGI60-10.01853) площадью  $0,403 \text{ км}^2$  также соотносится с долиной р. Хоромд-Булак. Граница его менее выражена в современном рельефе, маркируется группой эрратических валунов на фронте и другими миниатюрными объектами криогенного генезиса, расположенными вниз по склону (**1C**). Координаты:  $48,678976^\circ / 89,149965^\circ$ . Высота 2800 м. С ним соотносится группа миниатюрных селей и осыпей на склоне северо-западной экспозиции (**10**). Координаты:  $48,659515^\circ / 89,170345^\circ$ . Высота 3225 м.

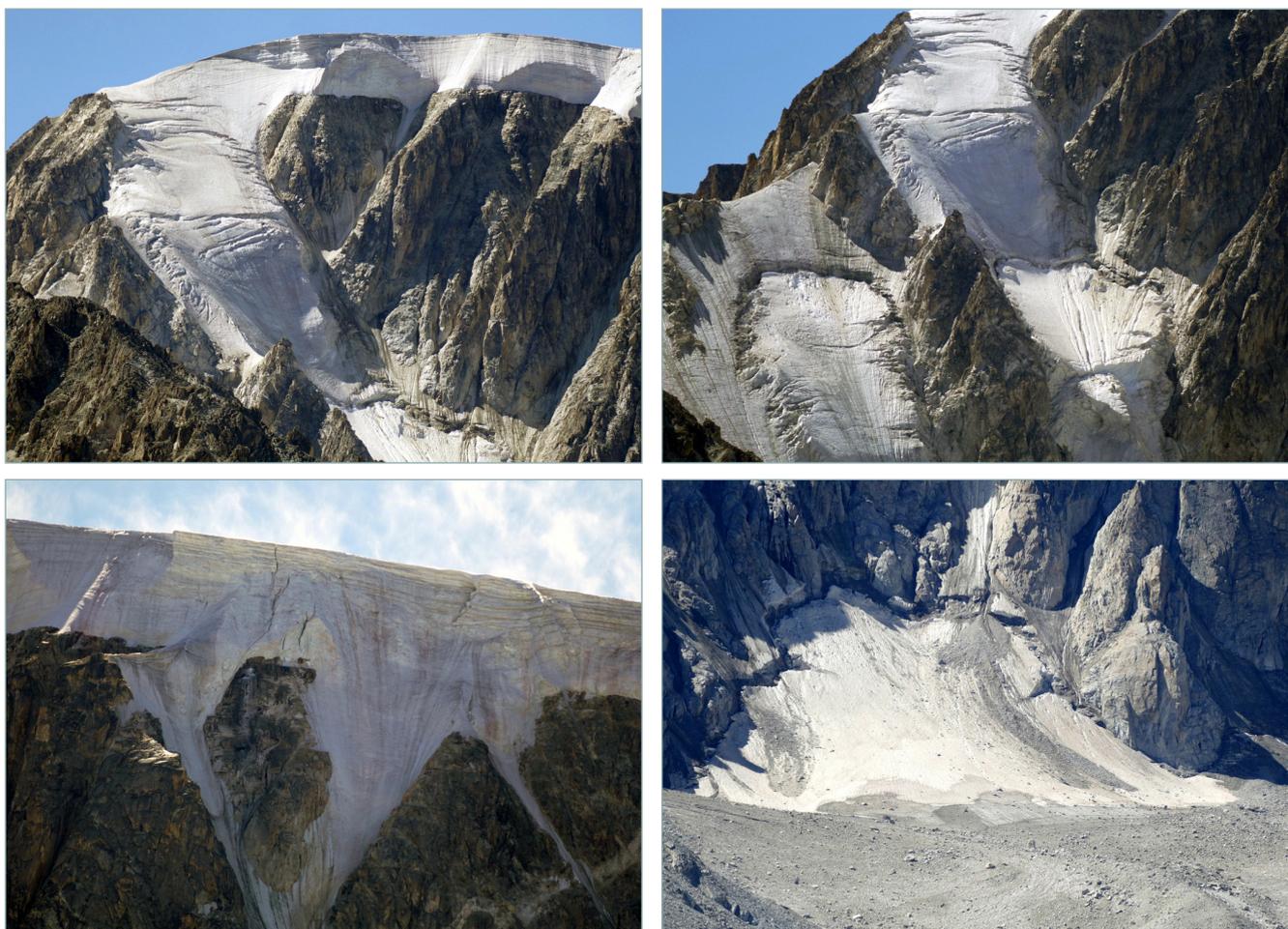
Фотографии висячего ледника и криогенных объектов на фронте (конечная морена, каменные потоки и мелкие формы криогенного рельефа, группы эрратических валунов) представлены на рис. 11.

### Рис. 9

Вид на зону абляции ледника (RGI60-10.01856) комплекса Цэнгэл-Хайрхан. Зона ледопада и схода снежных лавин. Склон северо-восточной экспозиции. Сектор А, участки 1А, 1, 2.  
Снимки 2024.08.16. 08.23.15 / 2024.08.20. 10.30. GMT 5 +

### Fig. 9

View of the glacier ablation zone (RGI60-10.01856) of the Tsengel Khairkhan uul complex. Icefall and avalanche zone. Slope of north-eastern exposure. Sector A, sites 1A, 1, 2.  
Photos 2024.08.16. 08.23.15 / 2024.08.20. 10.30. GMT 5+



**Рис. 10** 

Вид на конечную морену, ледниковое озеро, крупные каменные потоки, снежник на фронте ледника (RGI60-10.01856) комплекса Цэнгэл-Хайрхан. Сектор А, участки 1А, 2, 3. Снимки 2024.08.16. 08.23 / 2024.08.20. 10.30. GMT 5+

**Fig. 10**

View of the terminal moraine, glacial lake, large rock streams, snow field on the glacier front (RGI60-10.01856) of the Tsengel Khairkhan uul complex. Sector A, sites 1A, 2, 3. Photos 2024.08.16. 08.23 / 2024.08.20. 10.30. GMT 5+



**Рис. 11** 

Вид на фронт висячего ледника (RGI60-10.01853), склон и миниатюрный селевой поток комплекса Цэнгэл-Хайрхан. Склон северо-восточной экспозиции. Сектор С, участки 1С, 10. Снимки 2024.08.23. 12.03. GMT 5+

**Fig. 11**

View of the front of the hanging glacier (RGI60-10.01853), slope and miniature mudflow of the Tsengel Khairkhan uul complex. Slope of north-eastern exposure. Sector C, sites 1C, 10. Photos 2024.08.23. 12.03. GMT 5+



### 3.2 Древнее оледенение

Граница позднеплейстоценового гляциального комплекса Цэнгэл-Хайрхан, ясно читающаяся на спутниковых снимках, состоит из нескольких крупных участков. Следы деградации ледников хорошо видны. При анализе снимков просматриваются шесть направлений деградации ледникового покрова. Из них особенно зрелищные три: **В**, **С**, **Д**, находящиеся на северо-западе, юго-западе и востоке от массива. Полевые исследования на данный момент проходили только на участке **С**.

Хорошо выраженный конечно-моренный комплекс позднеплейстоценового возраста находится на высоте 2400 м в верховьях долины р. Харганат-Гол и является моренно-подпрудной плотиной озера Хар-Нуур. Озеро располагается в котловине, образованной западным склоном долины Харганат-Гол, невысоким отрогом горного массива Цэнгэл (между долиной р. Харганат-Гол и Годон-Гол, правым притоком р. Ховд) и упомянутым выше конечно-моренным комплексом древнего ледника.

Ниже по долине р. Харганат-Гол при впадении в нее р. Модон-Сала находится еще один мощный конечно-моренный комплекс ледников, занимавших долины р. Модон-Сала, Хоромд-Булак, Талды-Булак и их притоков. Этот древний ледник заполнял долину Харганат-Гол до высоты 2240 м.

Авторы сочли, что данные интересные объекты, значимые для дальнейшего исследования, и их детальное рассмотрение заслуживают отдельной работы. Масштабы природных объектов этой группы велики для полевой фотографии и больше подходят для верификации на основе спутниковых снимков аэрофотосъемки, картирования с помощью беспилотных летательных аппаратов.

Картографические изображения крупных конечных морен позднеплейстоценового возраста, расположенных к западу и юго-западу от массива (участки **В** и **Д**), созданные на основе использования обработки спутниковых данных, приведены на рис. 7.

Закономерности в размещении криогенных форм рельефа исследуются научными группами и проявляются в зависимости от высоты, экспозиции и части склона, определяющих режим и количество осадков, наличия многолетне-мерзлых пород и увлажненности грунтов. Верхние пределы распространения мерзлотных форм рельефа смыкаются с геоморфологическими объектами более высокого уровня и значительных масштабов. К ним относятся формы альпийского рельефа, флювиогляциальные отложения, современные гляциальные комплексы. Главным элементом, «ядром» для закономерно расположенных, сопряженных криогенных форм являются ледники. Репрезентативными объектами служат формы рельефа, связанные с наличием мерзлотных грунтов.

### 3.3 Формы рельефа, связанные с наличием мерзлотных грунтов

Ценным научным материалом являются данные об условиях формирования многолетней мерзлоты, полученные исследователями в советский период. Среди последних работ заслуживают внимания данные, собранные в рамках международной программы по изучению мерзлотных грунтов TOPP-modelling, данные 2010–2016 годов по плейстоценовому оледенению района и ряда других исследований ледниковых массивов Монгольского Алтая<sup>26</sup> [13, 14]. Актуальные данные о территории получены из пяти скважин глубиной 10 м, пробуренных в мерзлотных грунтах в долине Харгантын-Гол. Две из пяти скважин расположены в долине (2238 и 2240 м), а три находятся на ее склонах (2500, 2556 и 2557 м) равной высоты, северной, южной и юго-восточной экспозиции

26 Jambaljav Y., Gansukh Y., Temuujiin K., et al. Permafrost Map of Mongolia. Scale 1 : 1,000,000. Gazriin Zurag: Ulaanbaatar, Mongolia, 2016.

на северо-западном макросклоне массива Цэнгэл-Хайрхан. Температура фиксировалась на семи глубинах. Для рассматриваемой территории симптоматичны два показателя: среднегодовая температура грунта (MAGT) изменяется от  $-0,1$  °C до  $-3,3$  °C. Толщина активного сезонно-талого слоя СТС (ALT) показательна и находится на глубине 2,1–6,0 м. Большинство из представленных на фотоснимках объектов расположены выше.

Особенного внимания заслуживают участки многолетних мерзлотных грунтов, с которыми связаны ценные археологические находки, имеющие значение для истории расселения и жизни древнего человека и содержащие многочисленные органические субстанции. В данном высокогорном районе Большого Алтая они многочисленны [15].

**Каменные потоки** долины р. Хоромд-Булак относятся преимущественно к склонам западной экспозиции и являются наиболее значимыми по масштабу объектами района исследований. Серия из двух крупных объектов расположена в верхней части долины, на правом борту (3). Размеры  $1,37 \times 1,15$  км, периметр 2,35 км, их расчетная площадь составляет около  $0,46$  км<sup>2</sup>. Именно они изображены на карте, составленной В.В. Обручевым на основании оригинальной маршрутной съемки и записей дневников экспедиции В.В. Сапожникова на Монгольский Алтай 1909 года. Объекты упоминаются как граница древних моренных комплексов. На рис. 5 приводятся изображения участка, подготовленные на основе использования спутниковых мозаик на исследуемый участок долины. На рис. 12 представлены фотографии двух крупных каменных потоков.

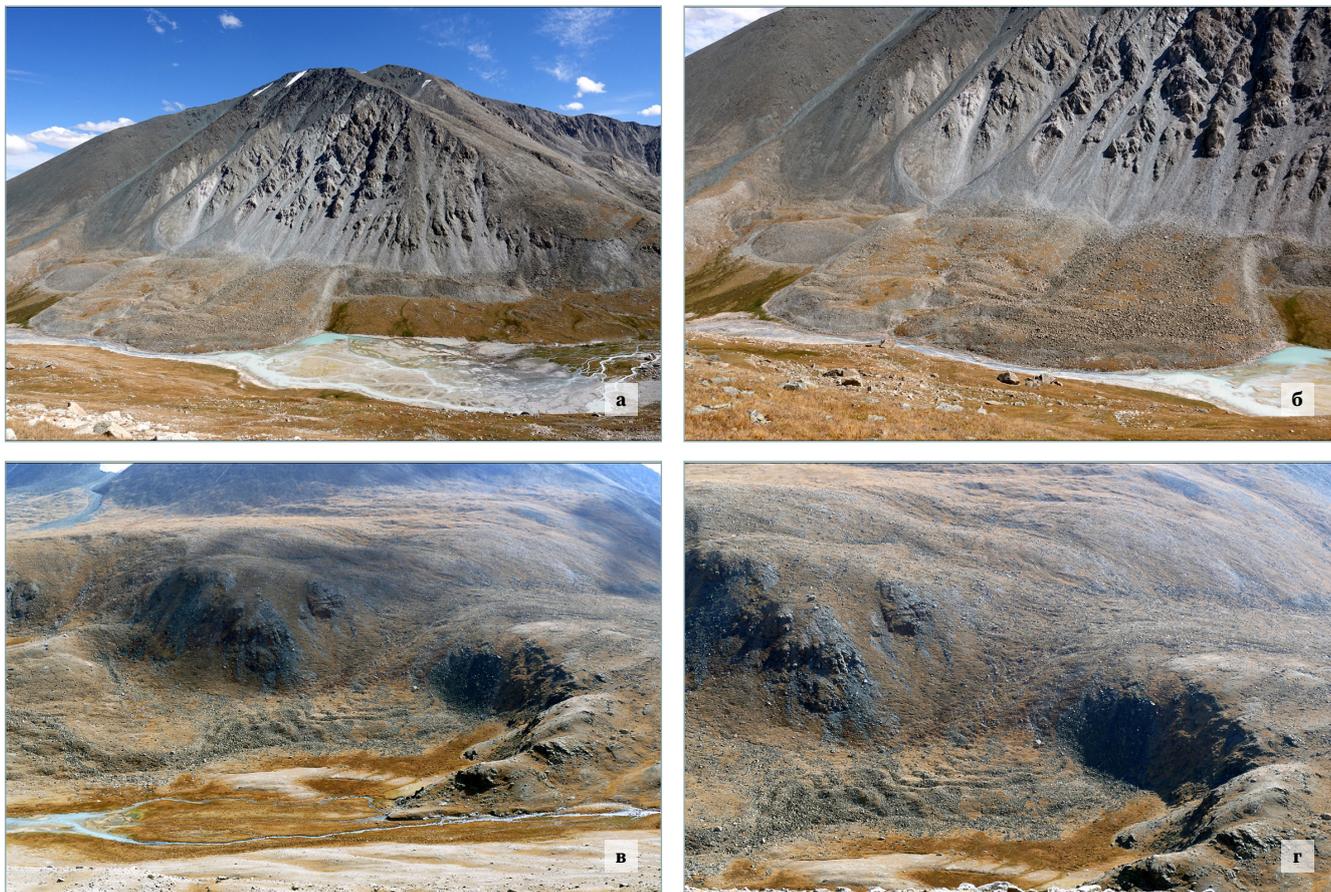
#### Рис. 12

Вид на крупные каменные потоки на склоне северо-западной экспозиции (а, б) и каменный поток на склоне северо-восточной экспозиции (в, г) комплекса Цэнгэл-Хайрхан. Сектор С, участки 3, 5.

Снимки 2024.08.20. 09.50 / 2022.09.08. 11.40. GMT 5+

#### Fig. 12

View of the slope large rock streams on the north-western slope (a, б) and the rock flow on the north-eastern slope (в, г) of the Tsengel Khairkhan uul complex. Sector C, sites 3, 5. Photos 2024.08.20. 09.50 / 2022.09.08. 11.40. GMT 5+



Многочисленные **мелкие каменные потоки** долины р. Хоромд-Булак относятся преимущественно к правому борту, склонам северо-западной, северной и северо-восточной экспозиции, в меньшей степени — к склонам юго-западной и восточной экспозиции.

**Солифлюкционные потоки** хорошо просматриваются на склонах северо-восточной и восточной экспозиции массива, расположенных на разных высотах и бортах, в долине р. Хоромд-Булак.

Репрезентативным является находящийся в средней части долины, на левом борту, солифлюкционный поток (4). Координаты:  $48,678976^{\circ} / 89,149965^{\circ}$ . Высота 2800 м. Далее вниз по склону долины следует целый каскад подобных миниатюрных объектов (5) — участок с координатами  $48,682092^{\circ} / 89,166599^{\circ}$  и высотой 2740 м. Крупным объектом является расположенный в нижней части долины массив с высотными отметками 2962,4 м (6) и его яркий склон восточной экспозиции. Координаты:  $48,692673^{\circ} / 89,164659^{\circ}$ .

Примечательными объектами являются расположенные в нижней части долины широкие солифлюкционные потоки (7). Координаты:  $48,702392^{\circ} / 89,163613^{\circ}$ . Высота 2725 м.

Значимым объектом с девятью крупными валами (или серией волн) является расположенный в нижней части долины участок с озерной котловиной с южного направления (8). Координаты:  $48,719014^{\circ} / 89,170155^{\circ}$ . Высота 2604 м.

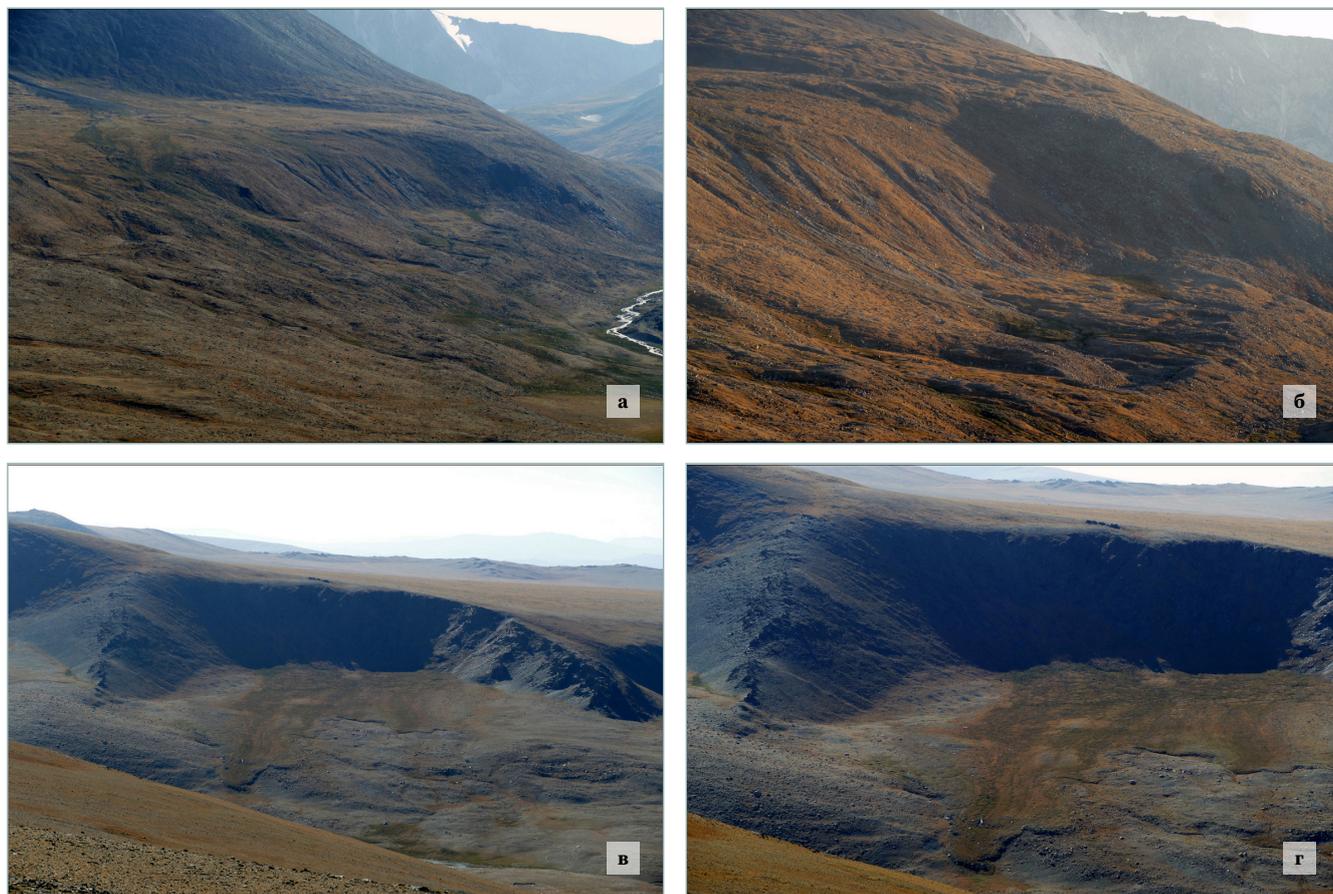
На рис. 6 приводятся изображения участка, подготовленные на основе использования спутниковых мозаик на исследуемый участок долины. На рис. 13–15 представлены фотографии участка долины с миниатюрными формами криогенного рельефа склонов.

### Рис. 13

Вид на солифлюкционные потоки на склоне северной экспозиции (а, б), склоне восточной экспозиции (в, г) долины р. Хоромд-Булак. Сектор С, участки 5, 7. Снимки 2024.08.24. 13.10 / 2024.08.25. 15.25. GMT 5+

### Fig. 13

View of solifluction flows on the northern slope (a, b), eastern slope (v, r) of the Khoromd-Bulak river valley. Sector C, sites 5, 7. Images 2024.08.24. 13.10 / 2024.08.25. 15.25. GMT 5+



**Рис. 14** 

Вид на солифлюкционные потоки склонов восточной экспозиции при разном освещении. Сектор С, участок 6, левый борт долины р. Хоромд-Булак. Отметка высоты (2962,4 м). Снимки 2024.08.25. 05.08 (а, б) и 13.47 (в, г). GMT 5+

**Fig. 14**

View of solifluction flows of the eastern slopes under different lighting conditions. Sector C, site 6, left side of the Khoromd-Bulak river valley. Elevation mark (2962.4 m). Photos 2024.08.25. 05.08 (a, б) и 13.47 (в, г). GMT 5+

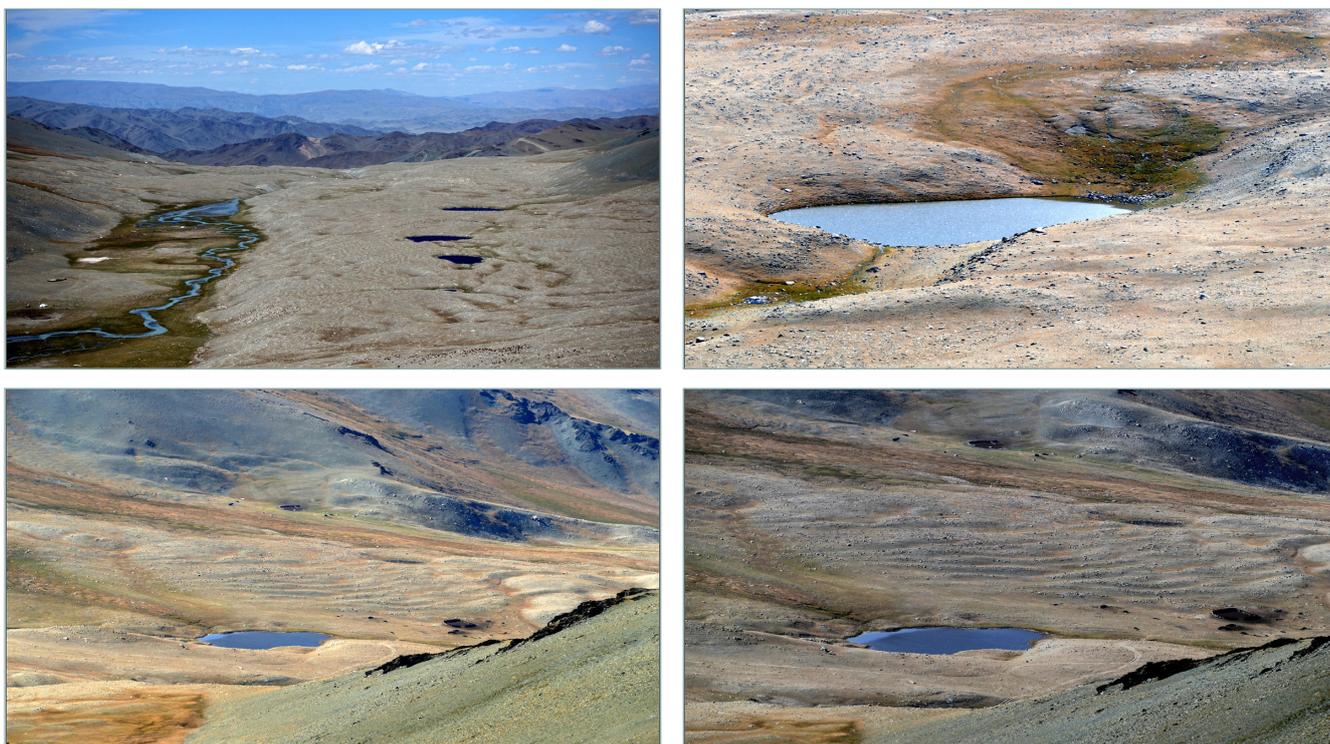


**Рис. 15** 

Вид на солифлюкционные потоки склонов восточной экспозиции, термокарстовые озера. Сектор С, участок 8, левый борт долины р. Хоромд-Булак. Снимки 2022.09.05. 09.50 и 2024.08.25. 15.25. GMT 5+

**Fig. 15**

View of solifluction flows of the eastern slopes, thermokarst lakes. Sector C, site 8, left side of the Khoromd-Bulak river valley. Photos 2022.09.05. 09.50 and 2024.08.25. 15.25. GMT 5+



**Рис. 16** ✓

Вид на миниатюрные участки термокарстового рельефа и мерзлотные бугры пучения. Сектор С, участок 9, правый борт долины р. Хоромд-Булак. Снимки 2024.08.25. 15.25. GMT 5+

**Fig. 16**

View of miniature areas of thermokarst relief and frozen frost mounds. Sector C, site 9, right side of the Khoromd-Bulak river valley. Photos 2024.08.25. 15.25. GMT 5+



Участки с **развитием термокарста и структурными грунтами** и другими мелкими объектами расположены в долине р. Хоромд-Булак практически повсеместно. Яркими образцами являются три группы мелких озер в термокарстовых котловинах, в средней части долины (9). Координаты (наиболее крупное):  $48,699602^{\circ} / 89,177696^{\circ}$ . Высота 2675 м. На правом борте средней части долины находятся миниатюрные участки со структурными грунтами и развитием термокарста. Координаты:  $48,689421^{\circ} / 89,175888^{\circ}$ . Высота 2713 м. Фотографии участка долины с развитием термокарста и структурными грунтами на левом борту долины представлены на рис. 16.

## 4 Обсуждение

В результате проведения полевого этапа исследования — сбора материалов об особенностях территории Монгольского Алтая — был выбран репрезентативный участок высокогорной зоны с хорошо выраженными формами криогенного рельефа. На основе ГИС проведены обработка полевых материалов, интерпретация спутниковых данных, визуализация данных ЦМР.

Подготовлен раздел каталога географических объектов с унифицированными иллюстрациями геоморфологических особенностей территории, а также информацией, значимой как для образования, так и для развития геотуризма. Теоретическое обоснование, критерии выделения и варианты классификации географически значимых объектов («геотопов») ранее опубликованы, приведены в работах, посвященных горным территориям мира [16–19].

Выделенные объекты криогенного генезиса являются типичными объектами высокогорной зоны, расположены на северо-западном, северо-восточном макросклонах массива Цэнгэл-Хайрхан, в долине р. Хоромд-Булак вне пределов

охраняемой территории. Объекты располагаются на обоих бортах долины. При движении по долине они закономерно проявляются на разных высотах. Гляциальные и нивальные формы верхнего яруса сменяются мерзлотными, расположенными в нижней части долины. Далее, за пределами выделенных участков, по мере спуска и потери высоты, в нижней части долины будут располагаться формы рельефа флювиального происхождения — аккумулятивные и эрозионные формы, водно-ледниковые отложения.

## 5 Выводы

Выбранная территория Монгольского Алтая — труднодоступный, высокогорный, мерзлотный район с набором характерных форм рельефа, следами масштабного древнего оледенения, динамично идущими современными процессами преобразования поверхности. На основе ГИС, интерпретации спутниковых данных, новых методик визуализации подготовлена серия унифицированных картографических изображений, подчеркивающих яркие геоморфологические особенности территории. Материалы находятся в свободном доступе.

Изолированный массив Цэнгэл-Хайрхан, несмотря на отсутствие крупных форм оледенения, является природным объектом с набором репрезентативных участков — ярких форм рельефа криогенного генезиса разного возраста, значимых для научных исследований.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят исследователей — преподавателей и студентов кафедры географии Института математики и естественных наук Монгольского национального университета образования, кафедры географии Ховдского филиала Монгольского государственного университета и лично Чойжинжавын Лхагвасурэн, Хадбаатар Сандаг, Батцогт Алдарцогт и Эрдэнэжаргал Наранхуу за помощь в организации и проведении краткой экспедиционной поездки на Монгольский Алтай в январе 2024 года. Авторы выражают благодарность за оказанную помощь водителям Алтанбеку Ш., Нурболу Х., Нурбеку М., ставшим верными спутниками в экспедиционных поездках. Авторы также признательны помогавшим им в работе жителям населенных пунктов Алтынцугс, Саксай, Цэнгэл, Улаанхус (Баян-Ульги).

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Ганюшкин Д.А. Гляциогенные комплексы резконтинентального района северо-запада Внутренней Азии: дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2016. 430 с.
2. Walther M., Dashtseren A., Kamp U., et al. Glaciers, Permafrost and Lake Levels at the Tsengel Khairkhan Massif, Mongolian Altai, During the Late Pleistocene and Holocene // *Geosciences*. 2017. Vol. 7. No. 73. P. 1–20. DOI:10.3390/geosciences7030073.
3. Pfeffer W.T., Arendt A.A., Blissl A., et al. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers // *Journal of Glaciology*. 2014. Vol. 60. No. 221. P. 537–552. DOI:10.3189/2014JoG13J176.
4. Михайлов Н.Н., Останин О.В., Фукуи К. Гляциально-мерзлотные каменные образования Алтая и их изменения // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология, география*. 2007. Т. 3. С. 91–99.
5. Останин О.В., Михайлов Н.Н. Современные изменения высокогорных геосистем (на примере Центрального и Юго-Восточного Алтая): монография. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2013. 171 с.
6. Ganyushkin D., Chistyakov K., Derkach E., et al. Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 6. 1508. DOI:10.3390/rs14061508.
7. Hawker L., Uhe P., Paulo L., et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17. No. 2. 024016. DOI:10.1088/1748-9326/ac4d4f.
8. Guth P.L., Trevisani S., Grohmann C.H., et al. Ranking of 10 Global One-Arc-Second DEMs Reveals Limitations in Terrain Morphology Representation // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. No. 17. 3273. DOI:10.3390/rs16173273.

9. 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.
10. Kokalj Z., Somrak M. Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. No. 7. 747. DOI:10.3390/rs11070747.
11. 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.
12. 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.
13. Obu J., Westermann S., Bartsch A., et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km<sup>2</sup> scale // *Earth-Science Reviews*. 2019. Vol. 193. P. 299–316.
14. Klinge M., Schlüt F., Zander A., et al. Late Pleistocene lake level, glaciation and climate change in the Mongolian Altai deduced from sedimentological and palynological archives // *Quaternary Research*. 2021. Vol. 99. P. 168–189. DOI:10.1017/qua.2020.67.
15. Taylor W., Hart I., Pan C., et al. High altitude hunting, climate change, and pastoral resilience in eastern Eurasia // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. 14287. DOI:10.1038/s41598-021-93765-w.
16. Lagally U., Rohrmuller J., Glaser S., et al. Hundert Meisterwerke – Die schönsten Geotope Bayerns. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012. Augsburg 2. 288 s.
17. Абдульмянов С.Н. Геотопы юго-востока Горного Алтая // *Вестник МГПУ. Серия: Естественные науки*. 2008. № 1. С. 127–135.
18. Reynard E., Coratza P., Regolini-Bissig G. *Geomorphosites*. Munchen: Verlag Dr. Friedrich Pfeil, 2009. 240 p.
19. Chlachula J. Geoheritage of East Kazakhstan // *Geoheritage*. 2020. Vol. 12. 91. DOI:10.1007/s12371-020-00514-y.

**АВТОРЫ** **Абдульмянов Саид Нурмухамматович**

ФГБУН «Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН»  
(ГТМ 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

**Михайлов Николай Николаевич**

 nn\_mikhaylov@guu.ru

ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», Москва, Россия  
канд. геогр. наук, доцент

Поступила 06.11.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



# Cryogenic landforms of the Tsengel Khairkhan uul, Mongolian Altai

Said N. Abdulmyanov<sup>1,2</sup>✉, Nikolay N. Mikhailov<sup>3</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> State University of Management, Moscow, Russia

✉ abdulmyanov@gmail.com

**CITATION** Abdulmyanov SN, Mikhailov NN. Cryogenic landforms of the Tsengel Khairkhan uul, Mongolian Altai. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 46–68. DOI:10.30533/GiA-2025-013.

**KEYWORDS** satellite data, digital surface model, field research methods, geomorphological features, cryogenic landforms, depiction of landforms on maps, Mongolian Altai

**ABSTRACT** Mountain landscapes are complex, highly dissected, fragmented and pose complex problems for specialists in visualizing surface data. A large number of scientific publications are devoted to the features of the Altai mountain system. Significant are the materials of the complex description of the territory of the Mongolian Altai, collected during the expeditions of V.V. Sapozhnikov in the period 1905–1909. Upon completion of field research, information on the forms of ancient and modern glaciation is systematized and presented in a visual form in the conclusions and in the cartographic work (map). The article considers a fragment of the isolated Tsengen-Khaikhan uul massif with thin glaciation and the trough valley of the Khoromd-Bulak river, the right tributary of the Khargantyn gol (Karaganty) river, the Khovd river basin, formerly Kobdo). As the methods of studying the earth’s surface improve, large arrays of research data accumulate, and new methods of depicting surface relief appear, new opportunities for visualizing data on the location and morphological features of natural objects arise. At the same time, the importance of route observations as the main method of direct visual perception, identifying important features and characteristics of the object under study is great. Without data coming from research routes, detailed mapping of objects, it is impossible to implement the tasks of studying geomorphological and a number of other features of mountainous areas. In the article, based on the use of satellite data and new methods, cryogenic relief forms of the Tsengen-Khaikhan uul glacial complex of different levels and genesis are identified and depicted. Interest in the study of the features of mountain landscapes unites researchers from different countries.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the researchers – teachers and students of the Department of Geography of the Institute of Mathematics and Natural Sciences of the Mongolian National University of Education (MNUE), the Department of Geography of the Khovd Branch of the National University of Mongolia and personally Lhagvasuren Choijinjav, Khadbataar Sandag, Battsoigt Aldartsogt and Erdenejargal Narankhuu for their assistance in organizing and conducting a short expedition trip in January 2024 to the Mongolian Altai. The authors thank the drivers Altanbek Sh., Nurbol Kh., Nurbek M. for their assistance, who became faithful companions in expedition trips. The authors are also grateful to the residents of the settlements: Altyntsugs, Saksai, Tsengel, Ulankhus (Bayan-Ulgi), who helped in the work.

## REFERENCES

- Ganyushkin DA. *Gljaciogenyye komplekсы rezkokontinental'nogo rajona severo-zapada Vnutrennej Azii* [Glaciogenic complexes of the sharply continental region of the north-west of Inner Asia] [dissertation]. St. Petersburg, 2016. 430 p. (In Russian).
- Walther M, Dashtseren A, Kamp U, et al. Glaciers, Permafrost and Lake Levels at the Tsengel Khairkhan Massif, Mongolian Altai, During the Late Pleistocene and Holocene. *Geosciences*. 2017;7(73): 1–20. DOI:10.3390/geosciences7030073.
- Pfeffer WT, Arendt AA, Blissl A, et al. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *Journal of Glaciology*. 2014;60(221): 537–552. DOI:10.3189/2014JoG13J176.
- Mikhailov NN, Ostanin OV, Fukui K. Glacial-permafrost rock formations of Altai and their changes [Glacial'no-merzlotnye kamennye obrazovaniya Altaja i ih izmeneniya]. *Bulletin of the St. Petersburg University. Series 7. Geology, Geography*. 2007;3: 91–99. (In Russian).
- Ostanin OV, Mihajlov NN. *Sovremennyye izmeneniya vysokogornyyh geosistem (na primere Central'nogo i Jugo-Vostochnogo Altaja)* [Modern changes in high-mountain geosystems (on the example of Central and South-Eastern Altai)] [monograph]. Barnaul: Publishing House of the Altai University; 2013. 171 p. (In Russian).
- Ganyushkin D, Chistyakov K, Derkach E, et al. Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum. *Remote Sensing*. 2022;14(6): 1508. DOI:10.3390/rs14061508.
- Hawker L, Uhe P, Paulo L, et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*. 2022;17(2): 024016. DOI:10.1088/1748-9326/ac4d4f.
- Guth PL, Trevisani S, Grohmann CH, et al. Ranking of 10 Global One-Arc-Second DEMs Reveals Limitations in Terrain Morphology Representation. *Remote Sensing*. 2024;16(17): 3273. DOI:10.3390/rs16173273.
- 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.
- Kokalj Z, Somrak M. Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping. *Remote Sensing*. 2019;11(7): 747. DOI:10.3390/rs11070747.
- 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.
- Obu J, Westermann S, Bartsch A, et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km<sup>2</sup> scale. *Earth-Science Reviews*. 2019;193: 299–316.
- Klinge M, Schlüt F, Zander A, et al. Late Pleistocene lake level, glaciation and climate change in the Mongolian Altai deduced from sedimentological and palynological archives. *Quaternary Research*. 2021;99: 168–189. DOI:10.1017/qua.2020.67.
- Taylor W, Hart I, Pan C, et al. High altitude hunting, climate change, and pastoral resilience in eastern Eurasia. *Scientific Reports*. 2021;11:14287. DOI:10.1038/s41598-021-93765-w.
- Lagally U, Rohrmüller J, Glaser S, et al. *Hundert Meisterwerke – Die schönsten Geotope Bayerns*. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2012. Augsburg 2. 288 s. (In German).

17. Abdulmyanov SN. Geotopy jugo-vostoka Gornogo Altaja [Geotopes of the south-east of the Altai Mountains]. *Bulletin of Moscow State Pedagogical Univ. Series: Natural Sciences*. 2008;1: 127–135. (In Russian).
18. Reynard E, Coratza P, Regolini-Bissig G. *Geomorphosites*. Munchen: Verlag Dr. Friedrich Pfeil; 2009. 240 p.
19. Chlachula J. Geoheritage of East Kazakhstan. *Geoheritage*. 2020;12: 91. DOI:10.1007/s12371-020-00514-y.

**AUTHORS** **Said N. Abdulmyanov**

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

**Nikolay N. Mikhailov**

 nn\_mikhaylov@guu.ru  
State University of Management, Moscow, Russia  
PhD in Geography, Associate Professor

Submitted: November 06, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.