

## Исследование динамики расширения Батагайского термокарстового провала в период с 2000 по 2025 г. по данным дистанционного зондирования

В. В. Суханова, А. В. Бородицкая

Дальневосточный центр НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия  
E-mail: ovp@dvrspod.ru

Представлены результаты комплексного исследования динамики развития Батагайского термокарстового провала — крупнейшего в мире образования подобного типа, расположенного в Верхоянском районе Республики Саха (Якутия). Исследование основано на анализе серии многолетних спутниковых изображений высокого разрешения с космических аппаратов Landsat-7, -8, -9 и Sentinel-2A. В ходе работы были оцифрованы контуры провала для каждого года наблюдений, что позволило с высокой точностью количественно оценить изменения его площади и линейных размеров. Результаты исследования наглядно подтверждают эффективность методов дистанционного зондирования для мониторинга динамичных и труднодоступных криогенных объектов. Несмотря на снижение относительных темпов расширения, абсолютный рост провала продолжается, что подчёркивает необходимость его непрерывного мониторинга. Это необходимо для оценки рисков инфраструктуры Верхоянского района Якутии и прогнозирования дальнейшего изменения ландшафтов в условиях меняющегося климата.

**Ключевые слова:** Батагайский провал, термокарст, вечная мерзлота, деградация мерзлоты, дистанционное зондирование Земли, Якутия, арктические районы

Одобрена к печати: 03.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-426-430

Термокарстовые провалы, образующиеся в результате протаивания вечной мерзлоты, представляют собой важный объект для изучения последствий изменения климата в криолитозоне. Крупнейшим образованием такого типа является Батагайский провал, который расположен между посёлками Батагай и Эсэ-Хайя на юго-восточной седловине горы Киргиллях в бассейне реки Яны в Верхоянском улусе на северо-востоке Якутии.

Возникновение Батагайского кратера — классический пример взаимодействия антропогенного фактора и естественных природных процессов, усиленных изменением климата. Его формирование, начавшееся во второй половине XX в., продолжается с нарастающей скоростью и сегодня. Первоначальной причиной образования провала стала масштабная вырубка таёжного леса на склоне горы Сыгынастаах в 1960-х гг. для нужд строительства посёлка Батагай (Куницкий и др., 2013). Лишившись этого буфера, тёмная поверхность почвы стала активно поглощать солнечную энергию. Это привело к резкому увеличению глубины сезонного протаивания поверхностного слоя почвы и запустило процесс протаивания подземных льдов и последующего сползания оттаявшего грунта (Кирпотин и др., 2008). Сейчас глубина Батагайского провала по данным различных источников достигает 100–115 м.

Настоящее сообщение посвящено исследованию площадных изменений Батагайского провала за последние 25 лет. Для исследования отбирались безоблачные изображения с космических аппаратов Landsat-7 ETM+ (англ. Enhanced Thematic Mapper Plus), Landsat-8, -9 OLI (англ. Operational Land Imager), Sentinel-2. Разрешение всех мультиспектральных каналов были приведены к разрешению панхроматического канала при помощи процедуры паншарпенинга (англ. pan-sharpening).

Далее были оцифрованы контуры Батагайского провала, созданы shp-файлы и рассчитана площадь провала. Наложение полученных контуров за период 2000–2025 гг. представлено на *рис. 1а* (см. с. 427).

Согласно полученным данным, площадь Батагайского провала увеличилась на 187 %. Тренд изменения его площади представлен на графике (см. *рис. 1б*).

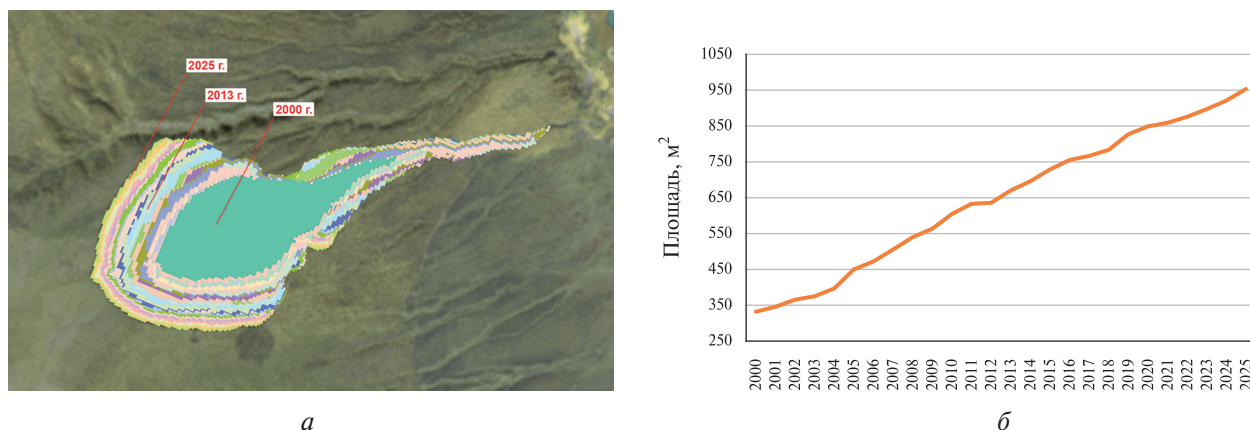


Рис. 1. Изображение с наложением оцифрованных контуров (а) и изменение площади (б) Батагайского провала за период 2000–2025 гг.

Комплексный анализ динамики Батагайского провала проводился на основе данных о средней скорости увеличения площади за пятилетние периоды начиная с 2000 г. (таблица), а также средней температуре ближайшей метеостанции Батагай за летний (рис. 2б) и зимний (см. рис. 2а) период в пятилетних интервалах начиная с 1949 г. Такой подход выявил ключевые этапы в жизни этого уникального природного объекта.

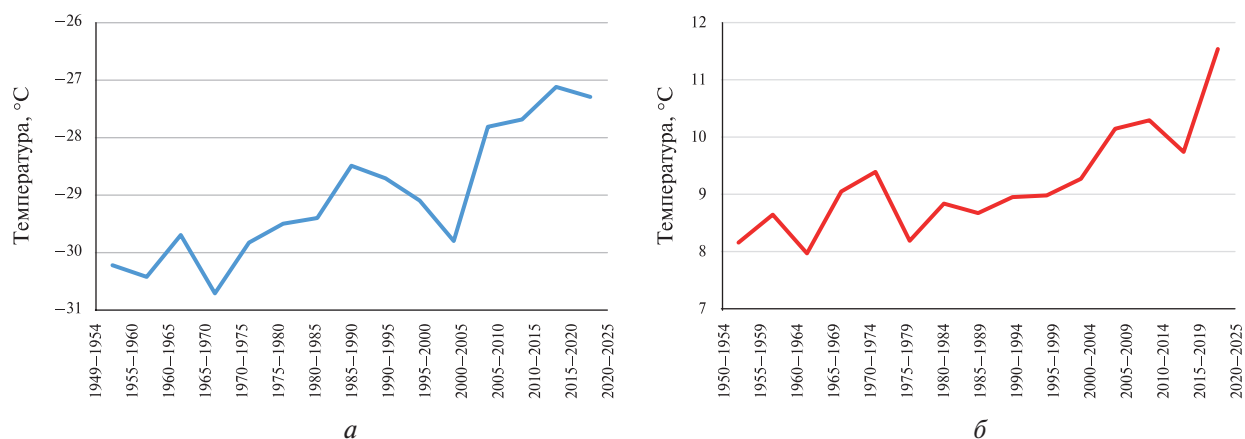


Рис. 2. Изменение температуры на метеостанции Батагай в пятилетних интервалах с 1949 г.: а — в зимний период (октябрь — апрель); б — в летний период (май — сентябрь)

Средняя скорость увеличения площади Батагайского провала за пятилетние периоды

Период, гг.	Средняя скорость увеличения площади каждые пять лет, %
2000–2005	8,986370
2005–2010	1,701550
2010–2015	0,527122
2015–2020	1,015462
2020–2025	0,624103

### 1. Фаза интенсивного роста (2000–2005).

Начало XXI в. ознаменовалось периодом экстремально высокой скорости расширения провала. За пять лет его площадь увеличилась почти на 9 %. Этот рост произошёл после десятилетий с относительно холодными зимами (среднезимняя температура ниже  $-29^{\circ}\text{C}$  в 1990–

2000 гг.). Этот период можно считать фазой наиболее активной и неустойчивой дестабилизации склона.

## 2. Переход к фазе стабилизации (после 2005).

После 2005 г. динамика процесса кардинально меняется. Наблюдается резкое, почти пятикратное, снижение скорости роста до 1,7 % в период 2005–2010 гг., а затем и до минимума в ~0,53 % в 2010–2015 гг. Этот процесс происходил на фоне продолжающегося роста летней температуры, что указывает на наличие иных факторов. Ключ к пониманию этой аномалии лежит в анализе зимнего термического режима. Именно в период 2005–2010 гг. зафиксирован качественный скачок в потеплении зимних сезонов, когда средняя пятилетняя температура резко повысилась на 2 °С, с –29,80 до –27,81 °С. Такое потепление сыграло критически важную роль в трансформации геоморфологических процессов (Мохов, 2020). Потепление зимнего периода выступило ключевой причиной, вызвавшей геоморфологическую перестройку провала и его переход в качественно новую, более стабильную фазу развития (Жижин и др., 2012).

## 3. Период умеренной и колеблющейся динамики (2015–2025).

В последнее десятилетие темпы роста провала остаются на низком уровне, что свидетельствует о переходе в новую фазу развития. Наблюдаемая корреляция позволяет выявить ключевые факторы этой стабилизации. Так, небольшой всплеск скорости в период 2015–2020 гг. совпал с аномально тёплой зимой (–27,12 °С), самой мягкой за весь ряд наблюдений. Относительно прохладное лето (9,74 °С) не активировало процессы таяния, поэтому этот эффект сохранился. Последующее снижение скорости до 0,62 % в интервале 2020–2025 гг. на фоне рекордно высокой летней температуры (11,54 °С) и стабильно тёплых зим окончательно подтверждает общую тенденцию.

Полученные данные позволяют заключить, что провал вышел на режим динамического равновесия. В этой фазе его расширение определяется уже не пиковыми летними оттепелями, а фоновым состоянием деградирующей мерзлоты, которое обусловлено в первую очередь устойчивым потеплением в зимний период.

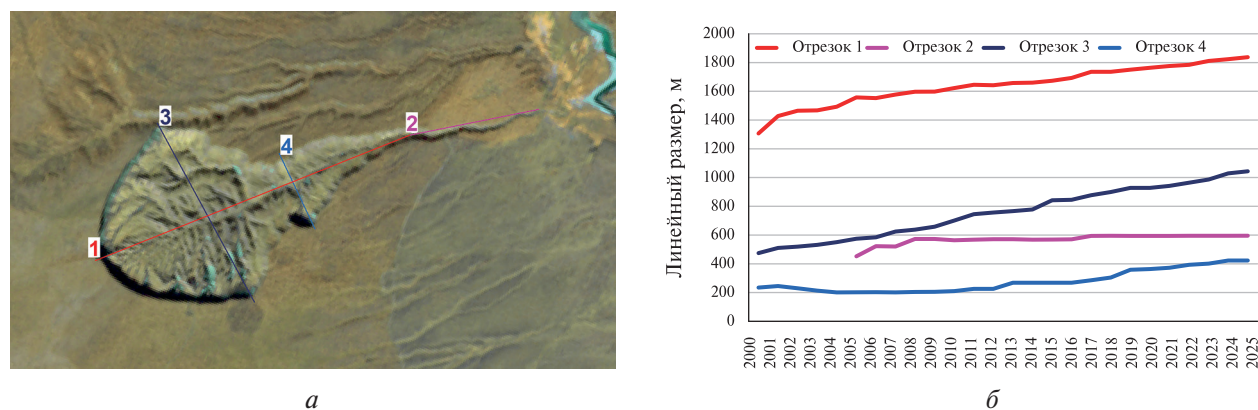


Рис. 3. Схема измерений (а) и тренд изменений (б) линейных размеров Батагайского провала

Морфологическая структура провала характеризуется сложной, динамично развивающейся формой. Если в фазе интенсивного роста протяжённость могла быть охарактеризована единым линейным замером по основной оси, то в фазах стабилизации и колеблющейся динамики наблюдается устойчивая тенденция к продольному росту, в первую очередь, за счёт расширения его каудальной хвостовой части. Для оценки пространственных измерений были взяты условные отрезки, представленные на рис. 3а. Следует отметить, что до 2005 г. отрезок 2 на спутниковых изображениях отсутствовал. Тренд изменений линейных размеров представлен на рис. 3б.

Анализ полученных результатов показывает, что произошло значительное увеличение длины всех наблюдаемых участков провала за исследуемый период. Прирост длины отрезка 1 составил 40,6 %, рост стабильный и практически линейный на протяжении всего периода. Среднегодовой прирост относительно постоянен, что может указывать на устойчивый процесс расширения. Прирост длины отрезка 2 составил 31,7 %. Активный рост отмечался в период 2005–2008 гг., далее он замедлился и с 2018 г. практически остановился. Длина отрезка 3 показала наибольшее увеличение, её прирост составил 120 %. При этом рост длины этого отрезка носит экспоненциальный характер, особенно заметный после 2014 г. Это указывает на активную и, возможно, усиливающуюся эрозию или таяние мерзлоты на данном участке. Длина отрезка 4 увеличилась на 80,2 %. До 2012 г. отмечался медленный и практически линейный рост, однако в 2013 г. наблюдается резкий скачок и последующий линейный рост. Ещё один значительный скачок отмечен в 2019 г.

Таким образом, несмотря на снижение относительной скорости расширения Батагайского провала, абсолютное увеличение его площади неуклонно продолжается.

Результаты исследования наглядно подтверждают эффективность методов дистанционного зондирования для мониторинга динамичных и труднодоступных криогенных объектов.

## Литература

1. Жижин В. И., Железняк М. Н., Пуляев Н. А. Криогенные процессы в формировании морфологии горного рельефа хребта Сунтар-Хаята // Вестн. Северо-Восточного федер. ун-та им. М. К. Аммосова. 2012. Т. 9. № 3. С. 73–79.
2. Кирпотин С. Н., Полищук Ю. М., Брыксина Н. А. Динамика площадей термокарстовых озёр в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестн. Томского гос. ун-та. 2008. № 311. С. 185–189.
3. Куницкий В. В., Сыромятников И. И., Ширрмейстер Л., Скачков Ю. Б., Гроссе Г., Веттерих С., Григорьев М. Н. Лыдистые породы и термоденудация в районе поселка Батагай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь) // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 1. С. 56–68.
4. Мохов И. И. Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 446–462. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.

## Investigating the dynamics of the Batagay thermokarst failure expansion from 2000 to 2025 using remote sensing data

**V. V. Sukhanova, A. V. Boroditskaya**

*Far Eastern Center of SRC “Planeta”, Khabarovsk, 680000, Russia  
E-mail: ovp@dvrcpod.ru*

The article presents the results of a comprehensive study of the dynamics of the Batagay thermokarst failure — the world’s largest feature of this type located in the Verkhoyansk District of the Republic of Sakha (Yakutia). The research is based on the analysis of a series of multi-year high resolution satellite images from the Landsat-7, -8, -9 and Sentinel-2A spacecrafts. The contours of the failure were digitized for each year of observation, allowing for a highly accurate quantitative assessment of changes in its area and linear dimensions. The results of the study clearly confirm the effectiveness of remote sensing methods for monitoring dynamic and hard-to-reach cryogenic features. Despite a decrease in the relative rates of expansion, the absolute growth of the failure continues, highlighting the need for its continuous monitoring. This is necessary for assessing infrastructure risks in the Verkhoyansk District of Yakutia and for predicting further landscape changes in the context of a changing climate.

**Keywords:** Batagay failure, thermokarst, permafrost, permafrost degradation, remote sensing, Yakutia, Arctic regions

Accepted: 03.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-426-430

## References

1. Zhizhin V. I., Zheleznyak M. N., Pulyaev N. A., Cryogenic processes in the formation of the mountain relief morphology of the Suntar-Khayata ridge, *Vestnik of North-Eastern Federal University*, 2012, V. 9, No. 3, pp. 73–79 (in Russian).
2. Kirpotin S. N., Polishchuk Yu. M., Bryksina N. A., Dynamics of thermokarst lake areas in the continuous and discontinuous cryolithozone of Western Siberia under global warming, *Tomsk State University J.*, 2008, No. 311, pp. 185–189 (in Russian).
3. Kunitsky V. V., Syromyatnikov I. I., Schirrmeister L., Skachkov Yu. B., Grosse G., Wetterich S., Grigoriev M. N., Ice-rich rocks and thermodenudation in the Batagay area (Yana Plateau, East Siberia), *Earth's Cryosphere*, 2013, V. 17, No. 1, pp. 56–68 (in Russian).
4. Mokhov I. I., Features of modern climate changes in the Arctic and their consequences, *Arctic and Antarctic Research*, 2020, V. 66, No. 4, pp. 446–462 (in Russian), DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.