

# Исследования газозрывоопасных объектов в верхней части разреза с применением беспилотных летательных аппаратов. Статья 2: Дедиловский карстовый провал

И.В. Богоявленский ✉

Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация  
✉ ivb@ipng.ru

**Резюме:** В статье показано, что опасность карстообразования в верхней части разреза усиливается за счет нередкого заполнения карстовых полостей газом с аномально высоким пластовым давлением, порождающим газодинамические процессы, разрушающие породы кровли полости и приводящие к выбросам / взрывам газа. Приведены результаты четырехлетнего мониторинга развития Дедиловского карстового провала в Тульской области (образовался 8 мая 2019 г.) с применением беспилотного летательного аппарата DJI Mavic Pro, в ходе которого выполнено 12 разновременных аэрофотосъемок и построено 12 трехмерных (3D) моделей в период с 18 мая 2019 г. по 1 июня 2023 г. Установлено максимальное изменение контура провала по поверхности земли в северо-западном направлении на 6,4–7,8 м в сторону жилого строения. Обосновано, что аэрофотосъемка опасных объектов с беспилотного летательного аппарата с последующей фотограмметрической обработкой данных позволяет оперативно создавать цифровые 3D-модели и изучать происходящие геодинамические, геологические и экологические процессы.

**Ключевые слова:** карст, выброс газа, Дедиловский провал, беспилотные летательные аппараты, БПЛА, фотограмметрическая обработка, трехмерные модели

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата» (122022800264-9).

**Для цитирования:** Богоявленский И.В. Исследования газозрывоопасных объектов в верхней части разреза с применением беспилотных летательных аппаратов. Статья 2: Дедиловский карстовый провал. *Горная промышленность*. 2024;(5):115–121. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-115-121>

## Research of gas-explosive objects in the upper part of the section using unmanned aerial vehicles. Article 2: Dedilovsky karst sinkhole

I.V. Bogoyavlensky ✉

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation  
✉ ivb@ipng.ru

**Abstract:** The article shows that the danger of karst formation in the upper part of the section is enhanced due to the frequent filling of karst cavities with gas at abnormally high pressure, generating gas-dynamic processes that destroy the roof of the cavity and lead to gas blowouts/explosions. The results of a four-year monitoring of the Dedilovsky karst sinkhole development in the Tula region (formed on May 8, 2019) using the DJI Mavic Pro unmanned aerial vehicle were presented, during which 12 multi-temporal aerial photographs were taken and 12 three-dimensional (3D) models were built in the period from May 18, 2019, until June 1, 2023. The maximum change in the sinkhole outlines along the surface of the earth in the northwestern directions was established at 6.4–7.8 m towards the residential building. It is shown that aerial photography of hazardous objects from unmanned aerial vehicle with subsequent photogrammetric data processing allows you to quickly create digital 3D models and study the ongoing geodynamic, geological and environmental processes.

**Ключевые слова:** karst, gas blowout, Dedilovsky sinkhole, unmanned aerial vehicles, UAVs, photogrammetric processing, three-dimensional models

**Acknowledgements:** The work was performed within the framework of the state assignment on the topic “Improving the efficiency and environmental safety of oil and gas resources development in the Arctic and subarctic zones of the Earth under changing climate conditions” (122022800264-9).

**Для цитирования:** Bogoyavlensky I.V. Research of gas-explosive objects in the upper part of the section using unmanned aerial vehicles. Article 2: Dedilovsky karst sinkhole. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):115–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-115-121>

**Введение**

Предыдущая работа автора, опубликованная в журнале «Горная промышленность» [1], была посвящена изучению широко распространенного (более 60% территории России <sup>1</sup>) опасного геологического явления (процесса) карстообразования. В работе [1] были приведены результаты аналитических исследований природной и техногенной карстовой угрозы в ряде регионов России (Башкирия, Пермский край, Тульская область и др.) и Туркменистана с глубиной поиска более 250 лет. При этом было показано, что опасность карстовых процессов заключается не только в неожиданном провале отложений верхней части разреза с катастрофическим нарушением ландшафта и разрушением объектов жизнедеятельности человека. Нередко они сопровождаются или даже инициируются мощной дегазацией Земли – выбросами, самовоспламенениями и взрывами газа, несущими значительные дополнительные угрозы. Обосновано, что наличие газа в карстовых полостях «может приводить к аномально высоким или даже сверхлитостатическим пластovým давлениям, порождающим газодинамические процессы, разрушающие породы кровли полости и приводящие к выбросам/взрывам газа» [1].

При региональных рекогносцировочных исследованиях в южной части Тульской области на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и с применением аэрофотосъемки с БПЛА было показано, что часто карстовые провалы образуются группами, формирующими прямолинейные или искривленные цепочки, подтверждающие подземную связь карстовых полостей [1]. В частности, по данным ДЗЗ на ограниченной площади около 45 км<sup>2</sup> в районе села Дедилово Тульской области было обнаружено 134 карстовых провала природного генезиса и, возможно, образовавшихся в процессе шахтной добычи угля, железных руд и соли. При этом средняя плотность распространения провалов на площади 1 км<sup>2</sup> составила 3,0, а их расположение на обособленных участках однозначно подтверждает подземную взаимосвязь.

В историческом прошлом (XIX в.) при образовании карстовых провалов в Тульской области неоднократно были зафиксированы выбросы, самовоспламенения и взрывы газа [2; 3], в том числе в селе Дедилово (1981 г.)<sup>2</sup>. Подобные взрывные явления часто фиксировались и во многих других регионах России и СССР [1; 4–7].

В последнее десятилетие при непосредственном участии автора данной статьи в Арктике проводятся исследования ранее неизвестного явления мощных выбросов газа из термокарстовых полостей в массивах подземного льда, в результате которых обнаружено около 20 гигантских кратеров [4; 8–13]. Эти процессы также часто сопровождаются самовоспламенениями и взрывами газа, причины которых обоснованы в [4; 8].

Основной целью данной статьи является логическое продолжение исследований опасных карстовых процессов [1; 14–16] на основе детальных четырехлетних (2019–2023 гг.) мониторинговых аэрофотосъемок с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) Дедиловского карстового провала (далее ДКП-2019), образовавшегося 8 мая 2019 г. в селе Дедилово Тульской области. В связи с вышесказанным данная статья является развитием начатого исследования [1].

**Методы**

Рекогносцировочные исследования в районе села Дедилово проведены на основе комплексного анализа доступных данных ДЗЗ из космоса (база данных ESRI, Google, Bing) и опубликованных картографических материалов. Работы на объекте ДКП-2019 были согласованы с местной администрацией, а также владельцем участка.

Для автоматического контроля и измерений содержания в воздухе рабочей зоны опасных газов (СО, О<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>С, СН<sub>4</sub>) использовался компактный 4-канальный газоанализатор «Джин-газ» ГСБ-3М-07<sup>3</sup>, предоставленный ЗАО «Фирма ВЕМ» и успешно применявшийся автором в ряде экспедиций на полуострове Ямал начиная с 2015 г.

Аэрофотосъемка проводилась с применением БПЛА (дрон) DJI Mavic Pro (DJI, Китай) со встроенной базовой фотокамерой (разрешение 12 Мрх) на стабилизаторе. Построение трехмерных (3D) моделей рельефа местности осуществлялось с применением программного обеспечения (ПО) Pix4Dmapper (Pix4D Pix4D SA, Швейцария)<sup>4</sup>, Agisoft Metashape (Geoscan, Россия)<sup>5</sup> и ArcGIS (ESRI, США). В ПО Pix4Dmapper и Agisoft Metashape реализованы высокотехнологичные алгоритмы фотограмметрического распознавания образов по серии аэрофотоснимков, получаемых по результатам перекрестных полетов. После обработки снимков в данных ПО строятся плотное облако точек объекта, ортофотопланы и цифровые модели рельефа (ЦМР). В ходе тестирования установлено более высокое качество 3D-моделей, построенных с применением ПО Agisoft Metashape.

Периодические аэрофотосъемки опасных геологических объектов и построение их цифровых 3D-моделей в ПО ArcGIS позволяют оперативно решать задачи по мониторингу их развития, строить разностные 4D-модели и рассчитывать скорости расширения границ объектов. На основе этих данных возможно прогнозирование критического времени возможного катастрофического влияния опасных объектов на окружающую среду и инфраструктуру жизнедеятельности человека.

Вершиной 3D-моделирования является формирование цифровых двойников изучаемых объектов и их перенос в виртуальную реальность (VR)<sup>6</sup> [16], позволяющую с применением специального оборудования погружаться в неё для исследования любых труднодоступных зон. При создании объекта в VR по облаку точек строится высокополигональная 3D-модель в реальном масштабе, в которой все точки связаны между собой плоскостями / полигонами. Модель с готовой текстурой грузится в специально подготовленный проект, сделанный в кроссплатформенной среде для разработки 3D и VR приложений панорамного видео в ПО Unity (Mortenson, США)<sup>7</sup>.

**Результаты**

Общая информация о результатах рекогносцировочных исследований ландшафта села Дедилово с его окрестно-

<sup>3</sup> Газоанализаторы «Джин-газ» ГСБ-3М-05, ГСБ-3М-06 и ГСБ-3М-07. М.: ООО «Фирма ВЕМ»; 2017. 24 с. Режим доступа: <http://www.firmavem.ru/assets/files/gin2.pdf> (дата обращения: 07.08.2024).

<sup>4</sup> Pix4Dmapper. Getting started manual. Translated by Unmanned Systems. 2018.

<sup>5</sup> Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.6. Agisoft LLC; 2020. 172 p. Available at: [www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_6\\_en.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf) (accessed: 07.08.2024).

<sup>6</sup> Welcome to Unity for AEC. Unity; 2024. Available at: [https://create-unity-com.translate.google/aec-onboarding-intro?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=ru&\\_x\\_tr\\_hl=ru&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://create-unity-com.translate.google/aec-onboarding-intro?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc) (accessed: 07.08.2024).

<sup>7</sup> Welcome to Unity for AEC. Unity; 2024. Available at: [https://create-unity-com.translate.google/aec-onboarding-intro?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=ru&\\_x\\_tr\\_hl=ru&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://create-unity-com.translate.google/aec-onboarding-intro?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc) (accessed: 07.08.2024).

<sup>1</sup> Карстовые пещеры. В кн.: Национальный атлас России. Т. 2: Природа и экология. М.: Роскартография; 2007. Режим доступа: <https://nationalatlas.ru/tom2/136-139.html> (дата обращения: 27.05.2024).

<sup>2</sup> Провал земли в Тульской губернии. В: Горный журнал. Санкт-Петербург, Изд. Горного ученого комитета, 1881, т. 3, С. 229.

стями и карстового провала ДКП-2019 (координаты центра 53,9847° N, 37,9209° E) достаточно подробно описана в работе [1]. ДКП-2019 образовался вблизи двух других провалов, при этом он лежит от них на северо-запад на одной линии по азимуту 339°. Эти два провала расположены всего в 10 и 100 м от ДКП-2019 и имеют диаметры соответственно около 40 и 20 м.

При анализе доступных данных ДЗЗ из космоса было установлено, что на расстоянии 3,5–5 км от ДКП-2019 существуют три бездействующие старые угольные шахты с терриконами отработанной породы и больше 70 объектов карстовых проявлений, большей частью группирующихся в многочисленные линейно-вытянутые структуры – линеаменты [15]. Наиболее близко расположенной к ДКП-2019 (3,5 км) является Липковская шахта (предположительно №16), от которой на удалении в 0,5–1,2 км расположено несколько групп старых техногенных карстовых провалов.

Потенциальный выброс газа при образовании ДКП-2019 никем официально не был зафиксирован, однако местное население утверждает, что в момент провала «гул стоял на все село» [5]. Обобщая вышесказанное, отметим, что генезис объекта ДКП-2019 однозначно неясен, он может быть как природным, так и техногенным из-за расположенных в районе Дедилово горных выработок.

Анализ содержания опасных газов в воздушной среде внутри и снаружи изучаемого объекта ДКП-2019, проведенный 18 мая 2019 г. с помощью газоанализатора «Джин-газ»<sup>8</sup>, не выявил никаких аномалий. При этом отметим, что замеры производились через 10 дней после образования провала и поэтому они не могут характеризовать состав газа в подземном пространстве на время образования провала. Однако отсутствие каких-либо кусков выброшенной породы вокруг провала, которые при взрывах газа обычно формируют бруствер [4; 8–13], позволяет считать, что провал произошел под действием собственного веса пород в кровле подземной карстовой полости, а не газодинамического взрывного процесса. Вероятно, основными триггерами образования провала послужили техногенная вибрация грунта, возникшая накануне провала во время распахивания участка земли над подземной полостью трактором, и прошедший дождь<sup>9</sup>, утяжеливший вес кровли подземного карста [5]. Отметим, что 19 сентября 2024 г. в Иркутской области убирающий урожай комбайн провалился в карстовый провал, при этом погиб комбайнер<sup>10</sup>.

Исследование объекта ДКП-2019 с применением аэрофотосъемки с БПЛА проводилось в течение 4 лет, начиная с 18 мая 2019 г., при этом завершающая 12-я аэрофотосъемка была выполнена 1 июня 2023 г. Периодичность измерений на начальной стадии активного развития ДКП-2019 (с 18 мая 2019 г. по 18 мая 2020 г.) была задана от 2 до 4 мес. (через 4 мес. в зимнее время), в результате чего было проведено 6 аэрофотосъемок. Начиная с 18 мая 2020 г. аэрофотосъемки проводились через полгода (6 съемок). Такие интервалы работы обусловлены активными оползневными явлениями в начальной стадии и их естественным замедлением с течением времени.

При каждой аэрофотосъемке задавалось единое задание

и маршруты полетов. В качестве примера на рис. 1 приведена схема полетов БПЛА во время аэрофотосъемки с высоты 50 м ДКП-2019 и прилегающей территории с жилой застройкой 19 июля 2019 г. (включая точки фотографирования). Во время данной съемки было сделано 126 аэрофотоснимков, которые были подвергнуты фотограмметрической обработке с применением ПО Agisoft Metashape. В нижней части рис. 1 приведена построенная 3D-модель рельефа местности и наземных объектов.



**Рис. 1**  
Схема аэрофотосъемки Дедиловского карстового провала с БПЛА 18 мая 2019 г. и результаты создания 3D-модели

**Fig. 1**  
A schematic plan of a UAV aerial survey of the Dedilovsky karst sinkhole on May 18, 2019, and the results of 3D model creation

В итоге четырехлетнего периода аэрофотосъемок объекта ДКП-2019 (с 18 мая 2019 г. по 1 июня 2023 г.) с применением БПЛА DJI Mavic Pro построено 12 разновременных 3D-моделей, приведенных на рис. 2 с единой цветовой легендой глубины. При этом различными оттенками красного цвета отображаются глубины провала относительно уровня моря, а в оттенках синего цвета – постройки и многочисленные деревья с листвой в летнее время, в зимнее время (например, 21 ноября 2019 г., 18 марта 2020 г. и др.) выделяются только стволы деревьев. В результате анализа 12 3D-моделей установлено, что за счет происходящих эрозионно-оползневых процессов площадь провала увеличилась с 407,2 до 727,8 м<sup>2</sup> (на 78,7%).

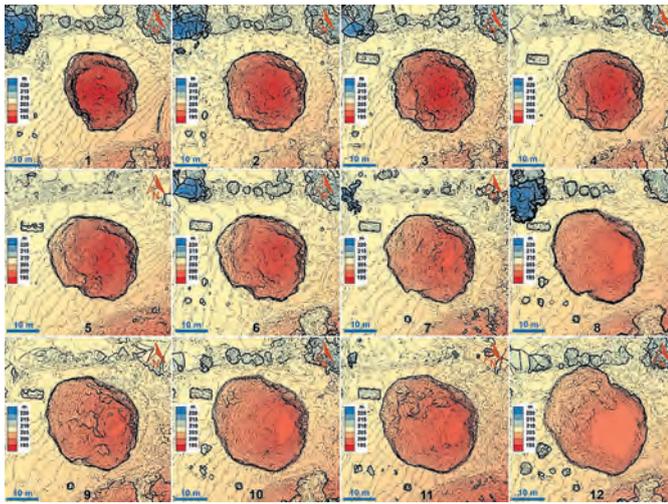
В связи с близким к моноклиальному наклоном поверхности земли в юго-восточном направлении первоначальная глубина провала в его северо-западной части составила около 14 м, а в юго-восточной – 12 м. На дату 1 июня 2023 г. эти глубины уменьшились соответственно до 9 и 7 м. Глубина провала в центральной части с 18 мая 2019 г. по состоянию на 18 мая 2020 г. уменьшилась на 3 м (с 12 до 9 м), а по состоянию на 1 июня 2023 г. видимая глубина относительно разных краев провала составила от 6 до 8 м (см. рис. 2 и 3). Уменьшение глубины центральной части объясняется замедлением или даже остановкой геологических процессов проседания дна провала, а также его заполнением за счет расширения и обрушения породы стенок провала.

Выполаживание дна карстового провала по состоянию на 25 мая 2021 г., 18 мая 2022 г. и 1 июня 2023 г. (см. рис. 3)

<sup>8</sup> Газоанализаторы «Джин-газ» ГСБ-ЗМ-05, ГСБ-ЗМ-06 и ГСБ-ЗМ-07. М.: ООО «Фирма ВЕМ»; 2017. 24 с. Режим доступа: <http://www.firmavem.ru/assets/files/gin2.pdf> (дата обращения: 07.08.2024).

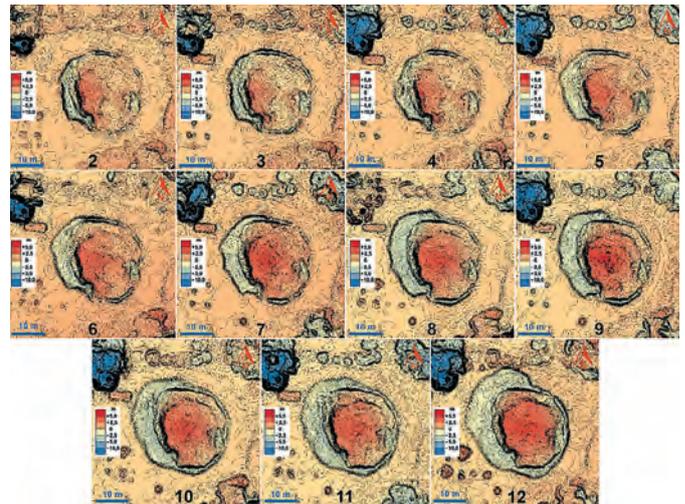
<sup>9</sup> Погода в Туле в мае 2019 года. Режим доступа: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/tula/may-2019/> (дата обращения: 07.08.2024).

<sup>10</sup> Фёдоров О. При падении в 10-метровую яму погиб комбайнер в Нукутском районе: Трагедия произошла во время уборки пшеницы. Режим доступа: <https://nts-tv.ru/news/94072/> (дата обращения: 07.08.2024).



**Рис. 2**  
Разновременные 3D-модели Дедиловского карстового провала по датам аэрофотосъемок:  
1 – 18.05.2019,  
2 – 19.07.2019,  
3 – 20.09.2019,  
4 – 21.11.2019,  
5 – 18.03.2020,  
6 – 18.05.2020,  
7 – 18.11.2020,  
8 – 24.05.2020,  
9 – 18.11.2021,  
10 – 18.05.2022,  
11 – 16.11.2023,  
12 – 01.06.2023

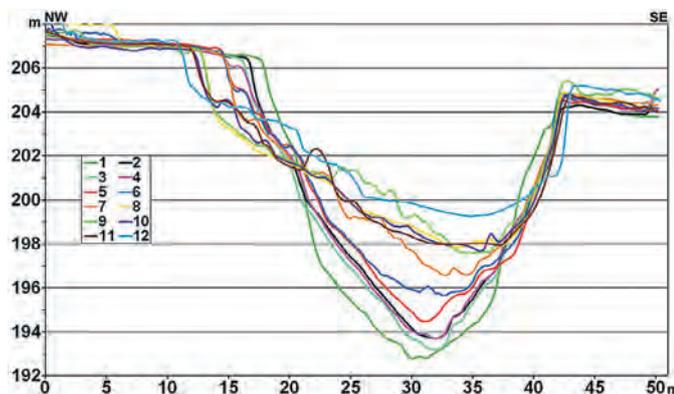
**Fig. 2**  
Multi-temporal 3D models of the Dedilovsky karst sinkhole by dates of the aerial surveys:  
1 – 18.05.2019,  
2 – 19.07.2019,  
3 – 20.09.2019,  
4 – 21.11.2019,  
5 – 18.03.2020,  
6 – 18.05.2020,  
7 – 18.11.2020,  
8 – 24.05.2020,  
9 – 18.11.2021,  
10 – 18.05.2022,  
11 – 16.11.2023,  
12 – 01.06.2023



**Рис. 4**  
Мониторинг изменений Дедиловского провала (разностные 4D-модели) по отношению в первой съемке 18.05.2019 (1). Обозначения моделей 2–12 по датам – см. рис. 2

**Fig. 4**  
Monitoring of changes in the Dedilovsky sinkhole (difference 4D models) in relation to the first survey on 18.05.2019 (1). Designations of models 2-12 by dates - see Fig. 2

ющих моделей (см. рис. 2) с построением в ПО ArcGIS разностных 4D-моделей (рис. 4). На этих моделях в различных оттенках красного цвета отображается процесс захоронения провала, а синие тона в основном отображают сезонные отличия растительности на деревьях.



**Рис. 3**  
Профильные разрезы Дедиловского карстового провала в направлении СЗ-ЮВ по разным датам аэрофотосъемок (легенда дат кривых – см. рис. 2)

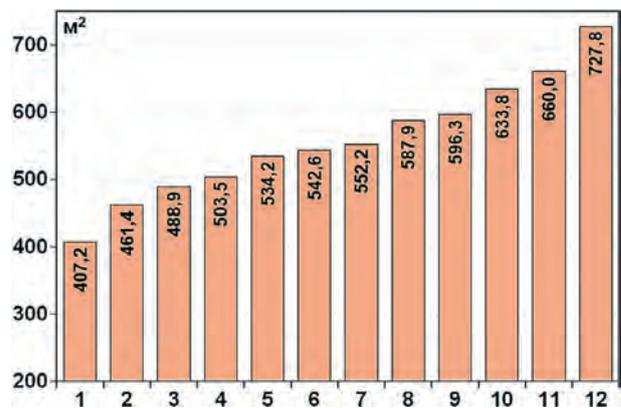
**Fig. 3**  
Profile sections of the Dedilovsky karst sinkhole in the NW-SE direction by different dates of aerial photography (Designations of the curve dates - see Fig. 2).

связано с тем, что дно провала имело сезонное затопление тальми водами, которые в другое время года, видимо, дренируются в грунт. В 2023 г. наблюдалось максимальное затопление дна карстового провала, возможно, связанное с ухудшением его проницаемости.

Для комплексного анализа изменений формы провала проведено вычитание первой 3D-модели (исходное состояние кратера по состоянию на 18 мая 2019 г.) из 11 последу-

**Обсуждение результатов**

Для комплексного анализа процессов четырехлетних изменений площади провала на поверхности земли была построена диаграмма с данными по каждой дате проведения аэрофотосъемок (рис. 5). В первый год, как самый активный период в изменениях карстового провала, измерения проводились каждые 2 мес. При этом за первые два месяца его площадь изменялась по сравнению с каждым предыдущим в среднем на 6,7%/мес, а в последующие че-



**Рис. 5**  
Изменение площади карстового провала по данным аэрофотосъемок и построений 3D-моделей (обозначения дат – см. рис. 2)

**Fig. 5**  
Changes in the area of the karst sinkhole based on the aerial survey data and 3D model creation (designations by dates - see Fig. 2).

тыре месяца процесс замедлился до 3,0 %/мес. В зимний период с 21 ноября 2019 г. по 18 марта 2020 г. площадь увеличивалась всего на 1,5 %/мес., что объяснимо некоторым укреплением стенок провала замороженностью грунта. В среднем за первый год измерений площадь изменялась на 3,3%/мес. За второй и третий года площадь менялась на 0,70 и 0,65 %/мес., что достаточно логично характеризует замедление процесса. Удивление вызывают результаты роста изменений площади провала в четвертый год измерений – 1,21 %/мес. При этом если в первые 6 мес. изменения площади были как и в предыдущие два года – около 0,69 %/мес., то в последние 6,5 мес. (преимущественно зимнее время с 16 ноября 2022 г. по 1 июня 2023 г.) они резко выросли до 1,58 %/мес. Однозначных объяснений данному явлению на данном этапе исследований нет.

Для анализа направлений преимущественного пространственного расширения контура карстового провала ДКП-2019 была построена 16-лучевая векторная диаграмма (рис. 6). По данной диаграмме видно, что в первый год после возникновения карстового провала его максимальное расширение шло узконаправленно преимущественно в западном направлении по азимуту 292°, а минимальное – было в восточном направлении. При этом за первое полугодие по азимуту 292° провал увеличился на рекордные 4,4 м. В течение четырех лет направленность векторной диаграммы постепенно расширялась, при этом макси-

мальная скорость увеличения размера провала все время была ориентирована по азимуту около 292°. Минимальные изменения размера провала были в диапазоне азимутов от 22 до 158°. Однако за последнее полугодие исследованных оползневые явления активизировались в более широком диапазоне направлений по азимутам от 270 до 360°. При этом максимальное суммарное изменение размера достигло 7,8 м по азимуту 270°, а максимальный полугодовой прирост 3,3 м – по азимуту 338°.

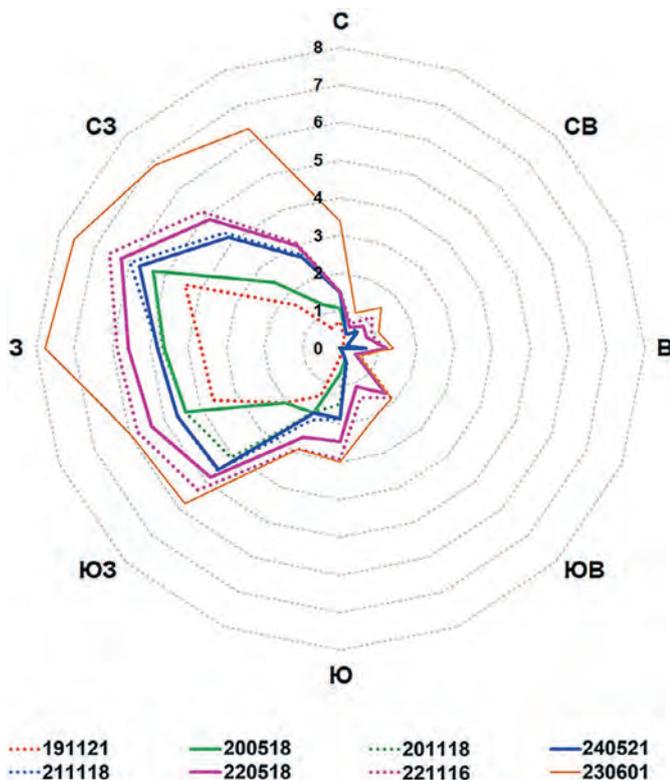
На основе проведенных выше исследований можно сделать вывод, что основное увеличение площади карстового провала так и продолжится преимущественно в северо-западном направлении по азимутам около 270–340° (см. рис. 6). Это, видимо, связано с постепенно идущим обрушением протяженной подземной полости, на которой юго-восточнее ДКП-2019 расположены описанные выше два соседних провала. Как было отмечено выше, все три провала расположены на одной линии по азимуту 339°.

### Заключение

На первом этапе исследований [1] было показано, что опасность карстообразования усиливается за счет нередкого заполнения карстовых полостей газом с аномально высоким давлением, порождающим газодинамические (включая газозрывные) процессы, разрушающие породы кровли полостей и приводящие к выбросу обломков этих пород, разлет которых несет дополнительные угрозы жизнедеятельности человека.

На втором этапе в итоге четырехлетнего периода мониторинга развития Дедиловского карстового провала (ДКП-2019) с применением БПЛА DJI Mavic Pro выполнено 12 разновременных аэрофотосъемки и построено 12 3D-моделей с периодичностью измерений на начальной стадии его активного развития (с 18 мая 2019 г. по 18 мая 2020 г.) от двух до четырех месяцев (через 4 мес. в зимнее время) – 6 аэрофотосъемок, а начиная с 18 мая 2020 г. с периодом через полгода – еще 6 аэрофотосъемок. Для выявления динамики изменения провала относительно первоначального проведена обработка с получением 11 разностных разновременных 4D-моделей. Установлено максимальное изменение контура провала по поверхности земли в западном и северо-западном направлениях 6,4–7,8 м, а минимальные от 0,5 до 1,3 м – в восточном направлении. Не вызывает сомнений, что карстовый провал будет и дальше расширяться при уменьшении его глубины в северо-западном направлении. Основное расширение карстового провала ориентировано в сторону жилых строений, при этом расстояние до них сократилось на 25%, что свидетельствует об угрозе их разрушения (жители предупреждены).

Особая значимость проведенных исследований ДКП-2019 заключается в том, что он послужил важным полигоном, на котором автором были отработаны необходимые технологические подходы и получен опыт проведения мониторинга развития опасных явлений с применением БПЛА и фотограмметрической обработки получаемых аэрофотоснимков. Благодаря приобретенному опыту были неоднократно успешно проведены экспедиционные исследования ИПНГ РАН объектов выбросов и взрывов газа в труднодоступных и экстремально сложных условиях Арктики, включая особенно важные объекты взрывной дегазации Земли на полуострове Ямал недалеко от поселка Сеяха (С11 в 2018–2021 гг.) и около Бованенковского месторождения (С17 в 2020 г., С22 и С23 в 2024 г.) [9–13].



**Рис. 6**  
Векторная диаграмма изменений контура карстового провала в метрах (0–8 м) с временным интервалом через полгода начиная с 18 мая 2019 г. (обозначения: код кривых – год, месяц, день)

**Fig. 6**  
Vector diagram of the karst sinkhole outline changes in meters (0–8 m) with a time interval of half a year starting from May 18, 2019 (designations: curve code - year, month, day)

Использование БПЛА для аэрофотосъемки рельефа земли и последующая обработка полученных снимков в программных комплексах Agisoft Metashape и ArcGIS позволяет оперативно изучать геодинамические, геологические и экологические процессы изменения рельефа местности, создавать цифровые модели наиболее значимых объектов, следя за их развитием. Оперативность проведения полевых исследований особо важна при изучении таких опасных геологических объектов, как бугры пучения в Арктике и грязевые вулканы.

Полученные автором результаты исследований ряда карстовых провалов и пещер в России легли в основу специального раздела в геоинформационной системе «Арктика и мировой океан» (ГИС «АМО»), созданной более 15 лет назад и постоянно развиваемой в ИПНГ РАН [4; 8–16].

### Список литературы / References

1. Богоявленский И.В. Исследования газозрывоопасных объектов в верхней части разреза с применением беспилотных летательных аппаратов. Статья 1. *Горная промышленность*. 2024;(4):147–154. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-147-154>  
Vogoyavlensky I.V. Research of gas-explosive objects in the upper part of the section using unmanned aerial vehicles. Article 1. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):147–154. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-147-154>
2. Федотов С.В., Федотов В.И. Карстовые и псевдокарстовые ландшафты в верховьях рек Оки и Дона на Среднерусской возвышенности. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География, геоэкология*. 2018;(1):5–18. Режим доступа: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/geograph/2018/01/2018-01-01.pdf> (дата обращения: 17.05.2024).  
Fedotov S.V., Fedotov V.I. Karst and pseudo-karst landscapes in the headwaters of the Oka and Don rivers on the Central Russian upland. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geocology*. 2018;(1):5–18. (In Russ.) Available at: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/geograph/2018/01/2018-01-01.pdf> (accessed: 17.05.2024).
3. Круббер А.А. О карстовых явлениях в России. М.: Тип. Мамонтова; 1901. 34 с.
4. Богоявленский В.И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли. *Горная промышленность*. 2020;(1):97–118. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-97-118>  
Vogoyavlensky V.I. Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere. *Russian Mining Industry*. 2020;(1):97–118. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-97-118>
5. Каширский В.И. Провал грунта в селе Дедилово Тульской области. Сравнительный анализ катастрофических явлений. *GeoИнфо*. 18 сентября 2019. Режим доступа: <https://geoinfo.ru/products-pdf/proval-grunta-v-sele-dedilovo-tulskoj-oblasti-sravnitelnyj-analiz-katastroficheskikh-yavlenij.pdf> (дата обращения: 17.05.2024).
6. Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г. *Карст и пещеры Пермской области*. Пермь: Изд-во Пермского ун-та; 1992. 200 с. Режим доступа: [http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng\\_0129.pdf](http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/ng_0129.pdf) (дата обращения: 17.05.2024).
7. Лаптев Б.В. Аварийные ситуации на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей. *Безопасность труда в промышленности*. 2009;(8):28–31. Режим доступа: <https://www.safety.ru/sites/default/files/2009-8-28-31.pdf> (дата обращения: 17.05.2024).  
Laptev B.V. Emergency situations at the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts. *Occupational Safety in Industry*. 2009;(8):28–31. (In Russ.) Available at: <https://www.safety.ru/sites/default/files/2009-8-28-31.pdf> (accessed: 17.05.2024).
8. Богоявленский В.И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике. *Арктика: экология и экономика*. 2021;11(1):51–66. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-1-51-66>  
Vogoyavlensky V.I. Fundamental aspects of the catastrophic gas blowout genesis and the formation of giant craters in the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*. 2021;11(1):51–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-1-51-66>
9. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования. *Арктика: экология и экономика*. 2021;11(3):362–374. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-362-374>  
Vogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N. Catastrophic gas blowout in 2020 on the Yamal Peninsula in the Arctic. Results of comprehensive analysis of aerospace RS data. *Arctic: Ecology and Economy*. 2021;11(3):362–374. (In Russ.) <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-362-374>

10. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А., Каргина Т.Н. Мониторинг развития Мордыяхского объекта взрыва газа на Ямале на основе данных дистанционного зондирования Земли. *Арктика: экология и экономика*. 2021;12(4):513–523. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-4-513-523>  
Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A., Kargina T.N. Monitoring of the Mordyyakha gas explosion object development on Yamal on the basis of Earth remote sensing data. *Arctic: Ecology and Economy*. 2021;12(4):513–523. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-4-513-523>
11. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Sizov O., Kishankov A., Kargina T. Seyakha catastrophic blowout and explosion of gas from the permafrost in the Arctic, Yamal Peninsula. *Cold Regions Science and Technology*. 2022;196:103507. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103507>
12. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. Мониторинг развития Дуплетного объекта взрыва газа C22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли. *Арктика: экология и экономика*. 2024;14(3):320–333. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-3-320-333>  
Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A. Development monitoring of the C22 gas blowout Doublet object on Yamal peninsula using remote sensing data. *Arctic: Ecology and Economy*. 2024;14(3):320–333. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-3-320-333>
13. Bogoyavlensky I.V. Digital remote sensing technologies for studying objects of powerful gas blowouts on the Yamal Peninsula using Unmanned aerial vehicles. In: *Geomodel 2021, Gelendzhik, Russia, September 6–10, 2021*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2021. 6 p. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202157120>
14. Bogoyavlensky I.V. Perspectives of implementing remote methods for geocological tasks with creating 3D models. In: *Third International conference on geology of the Caspian Sea and adjacent areas, Baku, Azerbaijan, October 16–18, 2019*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2019. 5 p. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201952014>
15. Bogoyavlensky I.V. Results of changes monitoring in the Tula karst sinkhole based on remote sensing from an unmanned aerial vehicle. In: *Geomodel 2020, Gelendzhik, Russia, September 7–11, 2020*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2020. 5 p. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202050100>
16. Богоявленский И.В., Гаврилов А.А. Технология виртуальной реальности при анализе данных дистанционного зондирования, полученных с беспилотного летательного аппарата. В кн.: *Новые идеи в науках о Земле: материалы 16-й Междунар. науч.-практ. конф. М.: Изд. РГГРУ (МГРИ) имени С. Орджоникидзе; 2023. Т. 1. С. 172–175.*

**Информация об авторе**

**Богоявленский Игорь Васильевич** – научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: [ivb@ipng.ru](mailto:ivb@ipng.ru)

**Information about the authors**

**Igor V. Bogoyavlensky** – Research Associate, Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: [ivb@ipng.ru](mailto:ivb@ipng.ru)

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 17.08.2024  
Поступила после рецензирования: 30.09.2024  
Принята к публикации: 30.09.2024

**Article info**

Received: 17.08.2024  
Revised: 30.09.2024  
Accepted: 30.09.2024