

Исследования газозрывоопасных объектов в верхней части разреза с применением беспилотных летательных аппаратов. Статья 1

И.В. Богоявленский✉

Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉ ivb@ipng.ru

Резюме: Целью исследования является изучение специфики карстовых провалов как особо опасного природного и природно-техногенного явления, образование которого нередко может быть связано с дегазацией Земли. Показано, что опасность карстообразования в верхней части разреза усиливается за счет нередкого заполнения карстовых полостей газом. Наличие газа в полостях может приводить к аномально высоким или даже сверхлитостатическим пластовым давлениям, порождающим газодинамические процессы, разрушающие породы кровли полости и приводящие к выбросам/взрывам газа. Приведены результаты аналитических исследований природной и техногенной карстовой угрозы в ряде регионов России и Туркменистана с глубиной поиска более 250 лет. На основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса и по данным беспилотных летательных аппаратов выполнены региональные и локальные исследования карстовых проявлений в Пермской области в районах деятельности ПАО «Уралкалий» (г. Березники и Соликамск) и в Тульской области в районе с. Дедилово. При дешифрировании космоснимков в районе с. Дедилово выделено более 130 карстовых провалов, часть которых связана с газодинамическими процессами. Это свидетельствует о повышенной опасности данного района исследований. Результаты исследований карстовых провалов и пещер в России, а также в других регионах мира, полученные автором, легли в основу специального раздела постоянно развиваемой базы данных в геоинформационной системе «Арктика и мировой океан» (ГИС «АМО»). В продолжении исследования (Статья 2) будет приведено детальное описание методики и результатов исследований Дедиловского карстового провала 2019 с применением беспилотных летательных аппаратов на основе фотограмметрической обработки с построением трехмерных моделей.

Ключевые слова: Дедилово, Дедиловский провал, карст, выброс газа, 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 1. *Горная промышленность*. 2024;(4):147–154. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-147-154>

Research of gas-explosive objects in the upper part of the section using unmanned aerial vehicles. Article 1.

I.V. Bogoyavlensky✉

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ ivb@ipng.ru

Abstract: The main goal of this work is to study the specifics of karst sinkholes as a particularly dangerous natural and man-made phenomenon, the formation of which can be often associated with degassing of the Earth. It is shown that the hazard of karst formation in the upper part of the section increases due to the uniform filling of karst cavities with gas. The presence of gas in cavities can lead to abnormally high or even superlithostatic reservoir pressure, creating gas-dynamic processes that destroy rocks, forming cavity roofs and leading to gas blowouts/explosions. The results of analytical studies of natural and man-made karst threats in a number of regions of Russia and Turkmenistan with a search time of more than 250 years are presented. Based on the Earth remote sensing data from space and UAV data, regional and local studies of the

karst phenomena were carried out in the Perm region in the areas of Uralkali PJSC operations (the cities of Berezniki and Solikamsk) and in the Tula region near the village of Dedilovo. When interpreting satellite images in the area of the village of Dedilovo, more than 130 karst sinkholes were identified, some of which are associated with gas-dynamic processes. This indicates the increased danger of this study area. The results of studying karst sinkholes and caves in Russia, as well as in other regions of the world, obtained by the author, formed the special section of a constantly expanding database in the Arctic and World Ocean Geoinformation System (AMO GIS). In continuation of this research, the Article 2 will provide a detailed description of the methodology and results of studying the DKP-2019 sinkhole in the vilage of Dedilovo using unmanned aerial vehicles based on photogrammetric processing with building 3D models.

Keywords: Dedilovo, Dedilovsky failure, karst, gas blowout, unmanned aerial vehicles, UAV, 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).

For citation: Bogoyavlensky 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>

Введение

Многие регионы России характеризуются наличием сильного влияния различных опасных геологических явлений (процессов), несущих значительные угрозы жизнедеятельности человека. Среди них особенно выделяется процесс карстообразования, которым в различной степени поражено более 60% территории России¹. Согласно ГОСТ 22.1.06–99, карст – «геологическое явление (процесс), связанное с повышенной растворимостью горных пород (преимущественно карбонатных, сульфатных, галогенных) в условиях активной циркуляции подземных вод, выраженное процессами химического и механического преобразований пород с образованием подземных полостей, поверхностных воронок, провалов, оседаний (карстовых деформаций)»².

Наиболее часто карстообразование встречается в породах, содержащих карбонатные отложения, в том числе смешанного карбонатно-терригенного и терригенно-карбонатного типов – в общем около 78%³. Обычно завершающим этапом развития карста является обрушение свода образовавшейся подземной полости с формированием карстового провала/воронки. Среди различных карстовых форм наибольшее распространение имеют пещеры (субгоризонтальные и наклонные полости), но также встречаются вертикальные полости – колодцы (глубина до 20 м) и шахты (глубже 20 м). В стратиграфическом плане карстообразование встречается в породах от архей-протерозойского до неогенового возраста⁴.

Самой протяженной в мире признана расположенная в штате Кентукки (США) Мамонтова пещера (Mammoth Cave) в известняках миссисипского периода (нижний карбон), имеющая общую протяженность с ответвления-

ми около 682 км⁵. На территории России самой длинной признана Ботовская пещера в Иркутской области, образовавшаяся в известняках нижнего ордовика и имеющая длину ходов около 70 км [1].

Высота карстовых полостей может достигать многих десятков и даже сотен метров. В частности, глубина самого глубокого в мире провала Сяочжай Тянкен (Xiaozhai tiankeng – Небесная Яма, Китай) достигает 662 м, при этом его стены преимущественно вертикальны, а горизонтальные размеры – около 400х600 м [2]. В России такие большие провалы неизвестны. В качестве примера отметим, что при бурении скважины Благодаровская-102 (Самарская область, Волго-Уральская провинция) при забое на глубине 2340 м произошел провал бурового инструмента в полость, высота которой оказалась 41 м [3; 4].

Основной целью данной работы является изучение карстовых провалов, образование которых сопровождается мощной дегазацией Земли – выбросами, самовоспалениями и взрывами газа, несущими значительные угрозы жизнедеятельности человека. В связи с большим объемом выполненных исследований результаты разделены и публикуются в виде двух самостоятельных частей/статей. Данная статья является первой частью общего исследования.

Методы

В данной работе приведены результаты, преимущественно полученные при аналитических исследованиях различных источников доступной опубликованной и фондовой геологической информации с глубиной поиска около 250 лет. Для иллюстрации районов и конкретных объектов исследований использованы дешифрованные данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса (космоснимки). Также использованы аэрофотоснимки, полученные автором с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) – дрон DJI Mavic Pro (DJI, Китай) со встроенной базовой фотокамерой (разрешение 12 Мрх) на стабилизаторе.

Во второй публикации будут приведены результаты

1 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).

2 ГОСТ 22.1.06–99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов. Общие требования. М.: Госстандарт России; 1990. 16 с.

3 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).

4 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).

5 Exploring the World's longest known cave. Mammoth Cave National Park. National Park Service, September 7, 2022. Available at: <http://www.nps.gov/articles/000/exploring-the-worlds-longest-known-cave.htm> (accessed: 27.05.2024).

детальных исследований Дедиловского карстового провала в Тульской области, образовавшегося в мае 2019 г., с применением БПЛА и фотограмметрической обработки аэрофотоснимков.

Анализ карстопроявлений и выбросов газа в ряде регионов России

В России наиболее широко карстообразующие (карстующиеся) породы распространены в ее европейской части – около 72%⁶. В азиатской части они имеют немного меньшее распространение – около 64%⁷, что, возможно, обусловлено ее меньшей изученностью. Многие древние города, включая Москву, Тулу, Нижний Новгород, Пермь, Березники, Соликамск, Казань и Уфу с прилегающими территориями, находятся в условиях в разной степени опасного развития карстовых явлений. В частности, по данным Института геологии УНЦ РАН город Уфа и его окрестности имеют очень сильное поражение карстообразованием преимущественно в сульфатных породах: здесь существуют «63 карстовых поля, в пределах которых плотность воронок от 10-20 до 100 на 1 км² и редко более... Воронки, увеличиваясь в размере и сливаясь друг с другом, образуют котловины и овраги эрозионно/карстового происхождения» [5, с. 208].

Карстообразование в Тульской области представляется самым опасным природным явлением, за период 1996–2008 гг. было зафиксировано 28 новых карстовых провалов, в том числе непосредственно в Туле [6]. Широкую известность получили карстовые провалы на территории АО «Конструкторское бюро приборостроения» (КБП), на которой в короткий период с 1 апреля по 11 мая 2005 г. образовались три провала под 9-этажным зданием инженерного корпуса, пришедшего в негодность и в результате этого снесенного. Здесь карстообразование было связано с известняками упинского горизонта нижнего карбона, а триггером послужила активная эксплуатация подземных вод [6].

В историческом плане большое внимание изучению карстовых пещер и провалов в различных регионах России уделяли многие выдающиеся ученые конца XVIII – начала XX веков, включая П.С. Палласа в Уфе и ее окрестностях в 1770 г. [7], а также Г. Абиха, А.А. Крубера, Ф.В. Лунсгергаузена и др. [8–13] в Тульской области, широко известной угольными, железорудными и другими месторождениями полезных ископаемых в палеозойском комплексе отложений. Отметим, что в регионах с развитой горнодобывающей промышленностью бывает сложно определить генезис наблюдаемых провалов, которые могут быть обусловлены как природными карстово-суффозионными процессами, так и техногенными из-за провалов приповерхностных пород в расположенные на небольших глубинах шахты. При этом «единственным диагностическим признаком, помогающим отличить естественные карстовые провалы от антропогенных воронкообразных форм, является приуроченность последних к шахтным штрекам» [14, с. 12].

Важно отметить, что «сильно закарстованные толщи карбонатных отложений часто являются коллекторами нефти и газа» [15, с. 178]. Особую опасность несут газона-

сыщенные карстовые полости, существование которых доказано во многих нефтегазоносных и угольных бассейнах, при этом в них нередко существуют аномально высокие пластовые давления (АВПД) или даже сверхвысокие (сверхлитостатические) давления (СВД) [16]. В подземных горных выработках угля часто происходят катастрофические выбросы и взрывы метана угольных пластов [16].

При бурении нефтегазопоисковых скважин нередко бывают провалы бурового инструмента в подземные карстовые полости с аварийным или даже катастрофическим поглощением бурового раствора [4; 5]. Отметим, что катастрофическими провалами бурового инструмента завершились его попадания в карстовые полости в центральной части Туркменистана в пустыне Каракумы, в том числе в загазованную полость на первой поисковой площади Дарваза Зиagli-Дарвазинской группы месторождений в терригенных отложениях нижнего-верхнего мела (до турона). При этом основной карстообразующей толщей является «неоген-четвертичный карбонатно-глинистый комплекс, сложенный известняками, мергелями и песчаниками миоцена» [17, с. 559, 563]. Из образовавшегося карстового провала «Дарваза», на дно которого упала буровая вышка и другое оборудование, более 60 лет выделяется и горит газ [16].

В Пермском крае в районах разработки Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей в г. Березники и Соликамск ОАО «Уралкалий» и ОАО «Сильвинит» (с 2011 г. – ПАО «Уралкалий») неоднократно происходили провалы и проседания грунта, при этом некоторые из провалов сопровождалось ощутимыми землетрясениями, выбросами, самовоспламенениями и взрывами газа. Первый зафиксированный провал, получивший народное название «Дальний родственник», произошел в ночь с 23 на 24 июля 1986 г. над одной из горных подземных выработок на глубине около 400 м Березниковского калийного производственного рудоуправления №3 (БКПРУ-3) [18, с. 134–138]. Провал образовался в лесном массиве в 500 м северо-западнее солеотвала БКПРУ-3 и сопровождался взрывом газа, мощными световыми вспышками и разбросом кусков породы на сотни метров [18; 19]. При этом первоначальные размеры провала составляли до 50x80 м, а глубина – 160 м. В дальнейшем его размеры по данным ДЗЗ из космоса достигли 100x210 м.

5 января 1995 г. на Соликамском руднике №2 (СКРУ-2) ОАО «Сильвинит» произошло подземное обрушение пород с выбросом и самовоспламенением около 1 млн м³ газа, которому сопутствовали землетрясение магнитудой 3,8 и проседание поверхности земли до 4,5 м [19]. Образовавшийся провал расположен в лесном массиве южнее г. Соликамск около садового товарищества «Ключики». 18 ноября 2014 г. на его территории образовался новый провал, получивший название «Скрудж». Его первоначальные размеры были 20x30 м (через несколько дней – 40x60 м), а глубина – около 45 м. По данным ДЗЗ в 2019 г. размеры провала достигли 150x180 м. Еще один небольшой провал размером 25x32 м был обнаружен 2 мая 2018 г. всего в 56 м к СЗ от «Скруджа». В 2019 г. его размеры достигли 65x75 м.

28 июля 2007 г. в г. Березники образовался гигантский провал «Большой брат» на территории шахтного поля БКПРУ-1 ОАО «Уралкалий». На следующий день из карстового провала произошел мощный выброс, самовоспламенение и взрыв газа с высоким содержанием сероводорода, вызвавший землетрясение [19; 20]. В настоящее время

6 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).

7 Там же.



Рис. 1
Космоснимок района катастрофического поражения карстовыми провалами в г. Березники (база данных ESRI). Обозначения:
1 – провал «Большой брат» на БПКРУ-1;
2 – провал «Малыш» на железнодорожной станции Березники;
3 – провал «Кроха» около шахтостроительного управления;
4 – солеотвал;
5 – шламохранилище

Fig. 1
A satellite image of the area of a disastrous karst sinkhole in the city of Berezniki (ESRI database). Legend:
1 – The Big Brother sinkhole at the Berezniki Potash Production Mining Department-1,
2 – the Malysh sinkhole at the Berezniki railway station,
3 – the Krokha sinkhole near the mine construction department;
4 – salt dump;
5 – sludge storage facility

подземные выработки БПКРУ-1 затоплены стихийным притоком воды, объем которой превысил 80 млн м³, максимальная глубина провала составила 83 м, а его первоначальные размеры – 55x80 м [19]. По данным ДЗЗ из космоса размеры его контура на поверхности земли в 2020 г. достигли 340x440 м, а по зеркалу воды с учетом проседания поверхности земли – 340x620 м. Имеется информация, что максимальная глубина воды в провале составляет около 110 м. Кроме того, в процессе затопления БПКРУ-1 в 900 и 1200 м к северу от провала «Большой брат» образовывались новые техногенные провалы «Малыш» (2010 г.), разрушивший железнодорожные пути, и «Кроха» под автодорожным полотном в районе круговой развязки (2011 г.) (рис. 1). Кроме того, многие дома в г. Березники оказались повреждены просадочными явлениями.

В Тульской области, богатой залежами угля, представляют несомненные угрозы не только провалы, но и неоднократно происходившие мощные выбросы, самовоспламенения и взрывы газа. Согласно новостному сообщению в газете «Тульские губернские ведомости»⁸ вблизи с. Мясоедово (15 км южнее Тульского кремля), видимо, произошел выброс и взрыв газа: «... при совершенно ясном небе, раздался и длился несколько секунд гул, подобный грому. Вскоре оказалось, что среди засеки произошел

провал земли на пространстве 400 кв. саженей... Ныне провал наполнился водой желтого цвета, но до поверхности не более 15 саженей. Края ямы продолжают еще обваливаться вместе с деревьями» [14, с. 6]. Из приведенной выше информации следует, что первоначальный диаметр провала составлял около 48 м, а его глубина однозначно превышала 32 м (примечание: сажень – 2,1336 м).

В 1901 г. один из основоположников русского карстоведения А.А. Крубер описал провал у деревни Крутой (в 10 км к юго-востоку от Тульского кремля), образовавшийся в XIX в. в результате мощного выброса газа, возможно с самовоспламенением и взрывом: «Восточный провал образовался на памяти местных крестьян в конце 60-х или в начале 70-х годов, причем по рассказам свидетеля во время образования провала глыбы глины большой величины выбрасывались на значительное расстояние от провала» [10, с. 24].

Большую известность приобрел карстовый провал, произошедший в 1881 г. в 29 км к юго-востоку от Тульского кремля в с. Дедилово (далее ДКП-1881). Согласно новостной публикации в Горном журнале 1881 г.⁹ ДКП-1881 образовался 21 мая в 3 часа утра и «поразил паническим страхом окрестных жителей. На огородах Дергелевой слободы, в расстоянии не более 106 метров от ближайших жилых домов, образовалась огромная цилиндрическая яма, с почти вертикальными берегами, глубиною 21,33 м и диаметром верхнего основания 10,66 м. Откосы ямы продолжали постепенно обваливаться до 12 часов дня и в настоящее время провал представляет вид опрокинутого конуса, глубиною 13,01 м и с эллиптическим основанием, коего большой диаметр 26,78 м и малый 23,68 м...». По описанию А.А. Крубера [10, с. 29] во время этого события «страшный гром и гул от разрушившейся массы обломков был слышен далеко в окрестности... Предвестником провала, по словам местных жителей, был огненный столб, поднявшийся накануне вечером над этим местом; столб этот был виден даже за 5 верст от места происшествия; кроме того, был слышен, хотя и слабый, подземный гул, а за несколько дней до самого провала образовалась глубокая дыра, явившаяся, очевидно, результатом постепенных подземных обвалов свода пещеры...» (примечание: 5 верст – 5334 м).

В 2014–2023 гг. в Арктике было обнаружено более 20 гигантских кратеров, образовавшихся в результате выбросов газа из термокарстовых полостей, сформировавшихся в массивах подземного льда, исследованиями которых стали активно заниматься сотрудники ИПНГ РАН, включая автора данной статьи [21–23]. Во всех четырех случаях, когда вблизи этих объектов находились очевидцы из коренного населения, были зафиксированы самовоспламенения и взрывы газа.

Приведенный выше краткий обзор карстовых провалов показал, что их образование достаточно часто сопровождается выбросами и взрывами газа, что делает эти явления еще более опасными для жизнедеятельности человека. В связи с этим изучение подобных опасных событий в различных регионах, включая многочисленные карстовые провалы в Тульской области, представляется весьма актуальным.

Основной целью данной работы является изучение карстового провала, образовавшегося в с. Дедилово Тульской области 8 мая 2019 г. (далее ДКП-2019). Кроме того, в свя-

⁸ 2014. 19 мая. Режим доступа: https://ti71.ru/news/society/19_maya_den_v_istorii19/ (дата обращения: 16.06.2024).

⁹ Провал земли в Тульской губернии. В: Горный журнал. Санкт-Петербург, Изд. Горного ученого комитета, 1881, т. 3, С. 229.

зи с относительно легкой доступностью было решено его использовать как опытный полигон отработки оптимальных технологических подходов для изучения и мониторинга развития подобных опасных объектов в Арктике, а также в других удаленных и труднодоступных регионах. При этом в качестве основных технических средств полевых исследований использованы беспилотные летательные аппараты (БПЛА) типа дрон. Предварительные результаты исследований объекта ДКП-2019 были доложены на международных конференциях, в том числе в РГГРУ (МГРИ) имени С. Орджоникидзе [24–27].

Рекогносцировочные исследования в районе карстопроявлений около с. Дедилово Тульской области

Тульская область является старым горнодобывающим регионом с активным освоением ресурсов многих полезных ископаемых, включая бурый уголь южной части Подмосковного угольного бассейна, торф, железные руды, известняки, соль, гипс и др. [28; 29]. Месторождения угля были открыты в отложениях нижнего карбона в 1772 г., а добыча угля началась более 170 лет назад (в 1853 г.). В 1958 г. в Тульской области был достигнут пиковый объем добычи угля – 43,5 млн т, при этом действовало 119 шахт [28; 29]. Из-за низкой калорийности и низкой рентабельности объемы добычи угля снижались в 1990 г. до 12,3 млн т, а в 2005 г. – до 0,6 млн т. В 2009 г. добыча в последней в центральной России шахте «Подмосковная» была остановлена, после чего ее затопили. Всего антропогенному воздействию было подвергнуто около 3,1 тыс. км² (12,1%) территории Тульской области.

Из-за сильного техногенного воздействия, а также в связи с широким развитием природных карстовых явлений в Тульской области широко распространены экзогенные геологические процессы, среди которых особо выделим провалы и проседания природного генезиса, а также карстоподобные провалы (псевдокарсты), связанные с шахтными выработками. По данным космоснимков в Тульской области, включая район с. Дедилово (рис. 2), видны терриконы выработанной породы (хвостохранилища), многочисленные карстовые проседания и провалы поверхности земли, местами формирующие на космоснимке прямолинейные или криволинейные цепочки. Генезис провалов может быть обусловлен как природными карстово-суффозионными процессами, так и техногенными из-за провалов приповерхностных пород в расположенные на небольших глубинах шахты. Как уже отмечалось выше, в ряде случаев подземные природные или техногенные полости заполнялись газом, сгенерированным в отложениях Подмосковного угольного бассейна, что приводило к взрывным газодинамическим процессам.

Рекогносцировочные исследования в районе с. Дедилово проведены на основе комплексного анализа доступных данных ДЗЗ из космоса и опубликованных картографических материалов. На рис. 2 приведен космоснимок WorldView-2 (база данных ESRI) района с. Дедилово, при дешифрировании которого выделено 20 потенциальных карстовых провалов, в том числе ДКП-2019.

Необходимо отметить, что с. Дедилово расположено в одном километре к северу от г. Киреевска, вокруг которого расположен ряд бездействующих в настоящее время угольных шахт с терриконами отработанных пород, при этом ликвидация шахт надлежащим порядком не выполнена [30]. В 3,5 км к северо-востоку от с. Дедилово располо-

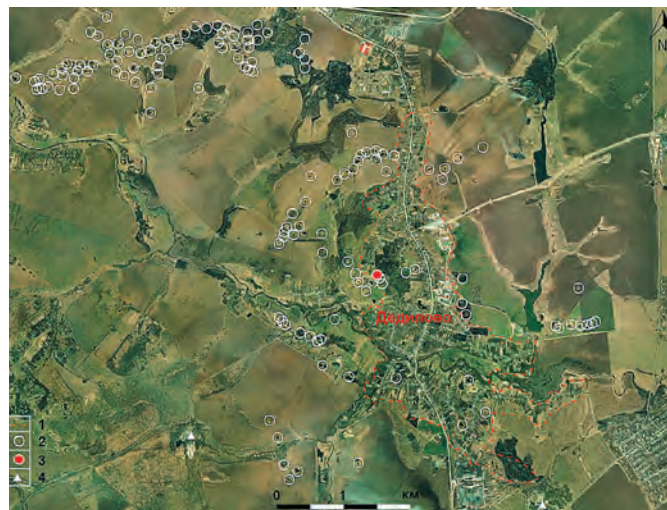


Рис. 2
Карстообразование в районе с. Дедилово Тульской области (космоснимок WorldView-2 базы данных ESRI).

Обозначения:
1 – контуры с. Дедилово;
2 и 3 – карстовые проявления, включая ДКП-2019 (3);
4 – угольные шахты с терриконами отработанных пород

Fig. 2
Karst formation in the vicinity of the Dedilovo village, the Tula region (WorldView-2 satellite image from the ESRI database).

Legend:
1 – boundaries of the Dedilovo village; 2 and 3 – karst manifestations, including DKP-2019 (3);
4 – coal mines with waste rock piles

жен Киреевский солепромысел (шахта Комсомольская), на котором соляной раствор добывается из девонских отложений (380 млн лет) методом выщелачивания, в результате чего образуются крупные техногенные полости в отложениях соли, также несущие угрозы провалов и взрывов газа. Кроме того, начиная с середины XVII в. в Дедилово добывалась железная руда [30].

Таким образом, с. Дедилово находится в районе активной добычи угля шахтным способом, в результате чего сформировалась широкая сеть подземных выработок, являющихся источниками образования провалов, в том числе с выбросом и взрывом метана угольных пластов.

Целевой объект исследований – провал ДКП-2019 – образовался 8 мая 2019 г. в западной части с. Дедилово на придомовом участке на улице Сурельникова всего в 16 м восточнее жилой постройки с подведенным магистральным газом, что несет дополнительные угрозы. Центр провала ДКП-2019 имеет координаты 53,9847° N, 37,9209° E. На рис. 3 приведены рекогносцировочные фотографии ДКП-2019, сделанные в разных ракурсах из БПЛА с высоты полета 150 м (А) и 50 м (В). Аэрофотосъемка проводилась с применением БПЛА DJI Mavic Pro. Работы на объекте ДКП-2019 были согласованы с местной администрацией, а также владельцем участка.

По состоянию на 18 мая 2019 г. размеры ДКП-2019 по поверхности земли были 26х21 м, а глубина – около 15 м (рис. 3, В) [24–27; 30]. Размеры ДКП-2019 существенно отличаются от первоначальных размеров упомянутого выше ДКП-1881: в среднем в 2,2 раза больше в диаметре, но в 1,4 раза меньше в глубину. В обнажении пород ДКП-2019 выделяются породы (см. рис. 3, В), подобные описанным для ДКП-1881 [10]: в самом верху – слой чернозема, ниже – глинисто-песчаные отложения,



Рис. 3
Аэрофотоснимки с БПЛА
18 мая 2019 г. карстового провала в с. Дедилово (1) в панорамном ракурсе (А) и с близкого расстояния (В). Обозначения: прямые белые пунктирные линии соединяют пять карстовых провалов (1, 2, 3 и 2, 4 и 5)



Fig. 3
UAV aerial photos of the karst sinkhole in the Dedilovo village (1) on May 18, 2019, in panoramic view (A) and at close range (B).
Legend: straight white dashed lines connect the five karst sinkholes (1, 2, 3 and 2, 4 and 5)

прослой бурого железняка, песчаники и, видимо, прослой известняка.

На основе дешифрирования рекогносцировочного аэрофотоснимка с БПЛА (рис. 3, А) установлено, что образовавшийся провал ДКП-2019 находится вблизи перекрестья двух линий, на которых расположено по три округлых карстоподобных провала поверхности земли: 1, 2, 3 и 2, 4, 5. На расстоянии всего 10 м к юго-востоку от контура ДКП-2019, в центре перекрестья линий расположено частично заросшее кустарником и деревьями округлое углубление диаметром около 30 м (см. рис. 3, А – 2), которое идентифицируется автором как старый карстовый провал. Также отметим, что эти два (1 и 2) соседствующих провала расположены практически на одной линии с третьим провалом. К северо-востоку от провала 2 в 375 и 540 м расположены провалы 4 и 5, имеющие размеры 50x50 м и 26x37 м. Кроме того, еще один (шестой) провал размером 20x26 м обнаружен в продолжении линии 5–4–2 к юго-западу на расстоянии около 270 м от провалов 1 и 2 за пределами аэрофотоснимка.

Заключение

На основе анализа ряда доступных источников информации показано, что карстообразование представляет собой широко распространенное опасное природное и природно-техногенное геологическое явление образования карстовых полостей в комплексах карстующихся пород разного литологического состава в широком диапазоне глубин. Опасность этого явления усиливается за счет нередкого заполнения полостей газом с сверхвысоким

давлением, порождающим газодинамические (включая газовзрывные) процессы, разрушающие породы кровли полости, и приводящие к выбросу обломков пород на расстояния в несколько сотен метров, разлет которых несет дополнительные угрозы жизнедеятельности человека.

Часто карстовые провалы образуются группами, при этом группы провалов могут формировать прямолинейные или искривленные цепочки. Природный или техногенный генезис провалов может быть установлен только при сравнении их положений с картами расположения подземных горных выработок.

Результаты исследований карстовых провалов и пещер в России, а также в других регионах мира, полученные автором, легли в основу специального раздела в постоянно развиваемой базы данных в геоинформационной системе «Арктика и мировой океан» (ГИС «АМО»), созданной более 15 лет назад и постоянно развиваемой в ИПНГ РАН [16; 21; 22].

В продолжении данного исследования (вторая статья) будет приведено детальное описание методики и результатов исследований провала ДКП-2019 с применением БПЛА на основе фотограмметрической обработки с построением трехмерных моделей. По итогам этих работ сделаны выводы о скорости роста карстового провала ДКП-2019 и дан анализ возможных угроз жилым постройкам.

Продолжение проведенных исследований (Статья 2) читайте в следующем номере журнала.

Список литературы / References

1. Филиппов А.Г. Пещера Ботовская. В кн.: Шелепин А.Л. (ред.) *Атлас пещер России*. М.: РГО; 2019. С. 623–635.
2. Waltham T. The 2005 Tiankeng Investigation Project in China. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*. 2006;4(1): 1–6. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/26448086> (accessed: 17.05.2024).

3. Максимович Г.А., Быков В.Н. Пещеристые полости и их роль в строении коллекторов нефти и газа. В кн.: *Пещеры*. Пермь: ПГУ; 1972. Вып. 12-13. С. 146–155. Режим доступа: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-v1213.pdf> (дата обращения: 17.05.2024).
4. Авдоница Л.И., Дахнов В.Н. Роль методов промысловой геофизики при изучении закарстованных зон в разрезах скважин. В кн.: *Труды Московский институт нефтехимической и газовой промышленности*. М.: Недра; 1966. Вып. 56.
5. Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г., Рождественский А.П., Смирнов А.И., Травкин А.И. *Карст Башкортостана*. Уфа: Институт геологии УНЦ РАН; 2002. 385 с.
6. Чекулаев В.В., Курбаниязова И.И. Краткий обзор современного карстообразования на территории Тульской области. В кн.: *Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов: сб. науч. тр. 5-й Междунар. науч.-техн. интернет-конференции*. Тула: ТулГУ; 2020. С. 348–354. Режим доступа: <http://kadastr.org/conf/2019/pub/geolog/kratkii-obzor-sovremennogo-karstoobrazovaniya-na-t.htm> (дата обращения: 16.06.2024).
7. Паллас П.С. Путешествие по разным местам Российского государства. СПб.: Императорская академия наук; 1786. Ч. 2, кн. 1. 476 с.
8. Abich H. Ueber einen in der Nähe von Tula stattgefundenen Erdfall. (mit einer Karte). *Melanges physiques et chimiques tires du Bulletin Physico-Mathématique de L'Académie Impériale Des Sciences de St. Peterbourg. Tome II*. St. Petersburg, Imprimerie de l'Académie des Sciences, 1855, pp. 252–279.
9. Абиц Г. *Кратерообразные впадины в южной части Тульской губернии*. В кн.: Ежегодник по минералогии, геогнозии, геологии и палеонтологии. Гейдельбергский университет; 1855. С. 581–582.
10. Круббер А.А. *О карстовых явлениях в России*. М.: Тип. Мамонтова; 1901. 34 с.
11. Лунгерсгаузен Ф.В. О провалах на юге Тульской губернии. В кн.: *Естествознание и география*. 1911. Кн. 3. С. 25–33.
12. Лунгерсгаузен Ф.В. О провалах на юге Тульской губернии. В кн.: *Естествознание и география*. 1911. Кн. 4. С. 30–43.
13. Рождественский Н. В. Фалдинские и Тихвинские провалы. В кн.: *Известия Тульского общества любителей Естествознания*. Тула; 1912. Вып. 1. С. 51–71.
14. 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. Geoecology*. 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).
15. Чикишев А.Г. *Карст Русской равнины*. М.: Наука; 1978. 194 с. Режим доступа: http://www.rgo-speleo.ru/books/chikishev-karst_rus_ravniny.pdf (дата обращения: 17.05.2024).
16. 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>
Bogoyavlensky 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>
17. Васильев В.Г. (ред.). *Газовые месторождения СССР. Справочник*. 2-е изд. М.: Недра; 1968. 688 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/10690> (дата обращения: 17.05.2024).
18. 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 (дата обращения: 17.05.2024).
19. 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).
20. Malovichko D.A., Dyagilev R.A., Shulakov D.Y., Butyrin P., Glebov S.V. Seismic monitoring of large-scale karst processes in a potash mine. In: *Controlling seismic hazards and sustainable development of deep mines*. New York: Rinton Press; 2009. Vol. 2, pp. 989–1002.
21. 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>

- Bogoyavlensky 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>
22. 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>
23. 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>
24. Bogoyavlensky I.V. Perspectives of implementing remote methods for geoecological 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>
25. 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>
26. Богоявленский И.В. Мониторинговые исследования геологических объектов с применением беспилотных летательных аппаратов. В кн.: *Молодые – Научкам о Земле: материалы 10-й Междунар. науч. конф. молодых ученых*. М.: Изд. РГГРУ (МГРИ) имени С. Орджоникидзе; 2022. Т. 3. С. 107–111.
27. 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.
28. Рябов Г.Г., Сарычев В.И., Жабин А.Б. Экологическая характеристика территории Подмосковского угольного бассейна. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2014;(4):25–36.
Riybov G.G., Sarichev V.I., Gabin A.B. Environmental characteristics of Moscow coal basin territory. *Izvestiya Tluskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2014;(4):25–36. (In Russ.)
29. Грязев М.В., Качурин Н.М., Захаров Е.И. Горнодобывающая отрасль в экономике Тульской области. Состояние и перспективы. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2015;(2):57–66.
Griyzev M.V., Kachurin N.M., Zakharov E.I. Mining branch of Tula region economy. condition and perspectives. *Izvestiya Tluskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2015;(2):57–66. (In Russ.)
30. Каширский В.И. Провал грунта в с. Дедилово Тульской области. Сравнительный анализ катастрофических явлений. *ГеоИнфо*. 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).

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

Information about the author

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.06.2024
Поступила после рецензирования: 18.07.2024
Принята к публикации: 19.07.2024

Article info

Received: 11.06.2024
Revised: 18.07.2024
Accepted: 19.07.2024