
EARTH DEGASSING IN THE ARCTIC: REMOTE AND FIELD STUDIES OF THE SEYAKHA CATASTROPHIC GAS BLOWOUT ON THE YAMAL PENINSULA

Bogoyavlensky V. I.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Sizov O. S.

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), "Russian Space Systems" (Moscow, Russian Federation)

Mazharov A. V.

Government of the Yamal-Nenets Autonomous Region (Salekhard, Russian Federation)

Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kishankov A. V.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Kargina T. N.

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

The article was received on December 12, 2018

Abstract

For the first time in the polar riverbed, a pingo (a blow-up) was detected, which was destroyed on June 28, 2017 by emission, self-ignition and gas explosion with the formation of a crater. Prompt expedition to the Seyakha crater (C11), formed in the Myudriyakha riverbed on the Yamal Peninsula, and analysis of remote sensing data allowed to reconstruct geodynamical processes of the pingo growth, caused by gas pressure, and active thermo-abrasive processes (speed up to 1,47-1,6 meters per day), destroying the crater walls. Assuming great remoteness of deep wells from the explosion site and determined microbial genesis of gas, a conclusion was made about high probability of natural occurrence of gas and formation of the crater C11. Based on the detection of numerous pingos (blow-ups) and lakes with bottom gas craters in the eastern and especially in the north-eastern parts of the Yamal Peninsula, it was concluded that these areas are characterized by gas explosion hazard.

Keywords. *Arctic, the Yamal, gas blowout (emission), ignition, gas explosion, crater, Seyakha crater, volcano, pingo (blow-up), monitoring, Earth remote sensing, RS, satellite images.*

Information about the authors

Bogoyavlensky Vasily Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Head Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Scientific Advisor of the Geoecology Department, Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: vib@pgc.su.

Sizov Oleg Sergeyevich, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), Head Specialist, "Russian Space Systems" (51-25, Dekabristov St., Moscow, Russia, 127490), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Mazharov Aleksandr Viktorovich, Vice Governor of the Yamal-Nenets Autonomous Region, Director of the Department of External Relations of the Yamal-Nenets Autonomous Region, Government of the Yamal-Nenets Autonomous Region (9, Molodezhi Prosp., Salekhard, Russia, 629008), e-mail: dmms@ved.gov.yanao.ru.

Bogoyavlensky Igor Vasilyevich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Head of Laboratory, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Nikonov Roman Aleksandrovich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Engineer, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Kishankov Aleksei Vladimirovich, Junior Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Postgraduate Student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Kargina Tatiana Nikolayevna, Junior Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: tatyana.nik92@gmail.com.

Bibliographic description

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kishankov A. V., Kargina T. N. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 1 (33), pp. 88—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. (In Russian).

© Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kishankov A. V., Kargina T. N., 2019

References

1. Atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga. [Atlas of Yamal-Nenets Autonomous Region]. Omsk, FGUP "Omskaya kartograf. f-ka", 2004, 303 p. (In Russian).
2. *Bogoyavlensky V. I.* Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. *Voronki Yamala i Taimyra*. [The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic permafrost]. *Burenie i neft'*, 2014, no. 9, pp. 13—18. (In Russian).
3. *Bogoyavlensky V. I.* Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. *Voronki Yamala i Taimyra*. Ch. 2. [The threat of catastrophic gas blowouts form the Arctic permafrost. Pt. 2]. *Burenie i neft'*, 2014, no. 10, pp. 4—8. (In Russian).
4. *Bogoyavlensky V. I.* Arktika i Mirovoi okean: sovremennoe sostoyanie, perspektivy i problemy osvoeniya resursov uglevodorodov. *Monografiya*. [Arctic and the World Ocean: current state, perspectives and challenges of hydrocarbon production. Monograph]. Moscow, Izd-vo VEO Rossii, 2014, pp. 12—175. (Tr. Vol'nogo ekon. o-va Rossii; vol. 182, no. 3). (In Russian).
5. *Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A.* Distantсионное выявление участков поверхности газопоявления и газových выбросов в Арктике: полуостров Ямал. [Remote detection of near surface gas shows and blowouts in Arctic: Yamal peninsula]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2016, no. 3 (23), pp. 4—13. (In Russian).
6. *Bogoyavlensky V. I.* Prirodnye i tekhnogennye ugrozy pri osvoenii mestorozhdenii nefti i gaza v Arktike. [Natural and man-made threats during the development of oil and gas fields in the Arctic]. *Sb. dokl. konferentsii "Dostizheniya nauki kak osnova nauchno-tekhnicheskogo progressa v ustoychivom perspektivnom razviti gazovoi otrasli"*. *Noosfera*, 2016, no. 1, pp. 48—67. (In Russian).
7. *Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A.* Rezul'taty aerokosmicheskikh i ekspeditsionnykh issledovaniy krupnykh vybrosov gaza na Yamale v raione Bovanenkovskogo mestorozhdeniya. [Results of aerial, space and field investigations of large gas blowouts near Bovanenkovskoye field on Yamal peninsula]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2017, no. 3 (27), pp. 4—17. DOI 10.25283/2223-4594-2017-3-4-17. (In Russian).
8. *Bogoyavlensky V. I., Boichuk V. M., Perekalin S. O., Bogoyavlensky V. I., Kargina T. N.* Katastrofa Kumzhi. [Disaster Kumzhi]. *Burenie i neft'*, 2017, no. 1, pp. 18—24. (In Russian).
9. *Bogoyavlensky V. I.* Gazogidrodinamika v kraterakh vybrosa gaza v Arktike. [Gas-hydrodynamics in the Arctic craters of gas blowout]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2018, no. 1 (29), pp. 48—55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55. (In Russian).
10. *Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V.* Prirodnye i tekhnogennye ugrozy pri poiske, razvedke i razrabotke mestorozhdenii uglevodorodov v Arktike. [Natural and technogenic threats in prospecting, exploration and development of hydrocarbon fields in the Arctic]. *Miner. resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2018, no. 2, pp. 60—70. (In Russian).
11. *Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V.* Degazatsiya Zemli. Formirovaniye zalezhei uglevodorodov v verkhnei chasti razreza i kraterov vybrosov gaza. [Formation of gas accumulations in the upper part of sedimentary cover and craters of gas blowouts]. *Neftegaz.RU*, 2019, no. 1, pp. 48—55. (In Russian).
12. *Bondur V. G., Kuznetsova T. V.* Vyyavleniye gazovykh sipov v akvatoriyakh arkticheskikh morei s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya. [Detection of gas seeps in the Arctic offshore areas, using remote sensing data]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, no. 4, pp. 30—43. DOI: 10.7868/S020596141504003X. (In Russian).
13. *Dvoretzkiy P. I., Goncharov V. S., Esikov A. D. et al.* Izo-topnyi sostav prirodnykh gazov severa Zapadnoi Sibiri: Obzor. [Isotopic composition of natural gases in the north of the Western Siberia: Overview]. Moscow, IRTs OAO "Gazprom", 2000, 80 p. (In Russian).

14. Kaledina V. F., Kaledina I. O., Sleptsov V. I. Zashchita v chrezvychaynykh situatsiyakh. [Protection in emergency situation]. Mosk. gos. gor. un-t. Moscow, 2004, 285 p. (In Russian).
15. Kizyakov A. I., Sonyushkin A. V., Khomutov A. V. et al. Otsenka rel'efoobrazuyushchego effekta obrazovaniya Antipayutinskoi voronki gazovogo vybroso po dannym sputnikovoi stereos"emki. [Assessment of the relief-forming effect of the Antipayuta gas emission crater formation using satellite stereo pairs]. Sovrem. problemy distants. zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 67—75. (In Russian).
16. Leibman M. O., Dvornikov Yu. A., Khomutov A. V. et al. Vodno-khimicheskie osobennosti vody ozer i voronok gazovogo vybroso, vlozhennykh v morskoe otlozheniya severa Zapadnoi Sibiri. [Water-chemical features of the water of lakes and funnels of the gas emission, invested in marine deposits of the north of Western Siberia]. Geologiya morei i okeanov: materialy XXII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii. Vol. 4. Moscow, IO RAN, 2017, pp. 117—121. (In Russian).
17. Loganov Yu. D., Sobolevskii V. V., Simonov V. M. Otkrytye fontany i bor'ba s nimi: Spravochnik. [Open fountains and dealing with them. Handbook]. Moscow, Nedra, 1991, 189 p. (In Russian).
18. Sizov O. S. Distanttsionnyi analiz posledstviy poverkhnostnykh gazoproyavlenii na severe Zapadnoi Sibiri. [Remote analysis of consequences of surface gas occurrence in the north of Western Siberia]. Geomatika, 2015, no. 1, pp. 53—68. (In Russian).
19. Yakushev V. S. Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone. [Natural gas and gas hydrates in cryolithic zone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (In Russian).
20. Andreassen K., Nilssen E. G., Degaard C. M. Analysis of shallow gas and fluid migration within the Pliocene Pleistocene sedimentary succession of the SW Barents Sea continental margin using 3D seismic data. Geomarine Letters, 2007, vol. 27, no. 2-4, pp. 155—171.
21. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge, 2007, 475 p.
22. Kizyakov A., Khomutov A., Zimin V. et al. Microrelief Associated with Gas Emission Craters: Remote Sensing and Field-Based Study. Remote Sensing, 2018, vol. 10, iss. 5. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs10050677>.
23. Vaughan A. BP's Deepwater Horizon bill tops \$65bn. The Guardian, 2018, 16 Jan. Available at: <https://www.theguardian.com/business/2018/jan/16/bps-deepwater-horizon-bill-tops-65bn>.

Information about the authors

Bogoyavlensky Vasily Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Head Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Scientific Advisor of the Geoecology Department, Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Pros., Moscow, Russia, 119991), e-mail: vib@pgc.su.

Sizov Oleg Sergeyevich, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Pros., Moscow, Russia, 119991), Head Specialist, "Russian Space Systems" (51-25, Dekabristov St., Moscow, Russia, 127490), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Mazharov Aleksandr Viktorovich, Vice Governor of the Yamal-Nenets Autonomous Region, Director of the Department of External Relations of the Yamal-Nenets Autonomous Region, Government of the Yamal-Nenets Autonomous Region (9, Molodezhi Pros., Salekhard, Russia, 629008), e-mail: dmms@ved.gov.yanao.ru.

Bogoyavlensky Igor Vasilyevich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Head of Laboratory, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Pros., Moscow, Russia, 119991), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Nikonov Roman Aleksandrovich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Engineer, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Pros., Moscow, Russia, 119991), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Kishankov Aleksei Vladimirovich, Junior Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Postgraduate Student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Pros., Moscow, Russia, 119991), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Kargina Tatiana Nikolayevna, Junior Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: tatyana.nik92@gmail.com.

Bibliographic description

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kishankov A. V., Kargina T. N. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula. Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 1 (33), pp. 88—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. (In Russian).

ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ В АРКТИКЕ: ДИСТАНЦИОННЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО СЕЯХИНСКОГО ВЫБРОСА ГАЗА НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ

В. И. Богоявленский

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

О. С. Сизов

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, АО «Российские космические системы» (Москва, Российская Федерация)

А. В. Мажаров

Правительство Ямало-Ненецкого автономного округа (Салехард, Российская Федерация)

И. В. Богоявленский, Р. А. Никонов, А. В. Кишанков

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

Т. Н. Каргина

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2018 г.

Впервые в русле заполярной реки выявлен бугор пучения, который был разрушен 28 июня 2017 г. выбросом, самовоспламенением и взрывом газа с формированием гигантского кратера. Оперативное проведение экспедиции на «Сеяхинский» кратер (С11), образовавшийся в русле реки Мюдрияха на полуострове Ямал, и анализ данных дистанционного зондирования Земли позволили восстановить геодинамические процессы роста бугра, обусловленные давлением газа, и активные термоабразионные процессы (скорость до 1,47–1,6 м/сут), разрушающие стенки кратера. С учетом большой удаленности глубоких скважин от места взрыва и установленного микробимального генезиса газа сделан вывод о высокой вероятности природного происхождения выброса газа и образования кратера С11. На основе обнаружения большого количества бугров пучения и озер с кратерами выброса газа на дне в восточной и особенно северо-восточной частях полуострова Ямал сделан вывод, что эти районы характеризуются повышенной газавзрывоопасностью.

Ключевые слова: Арктика, Ямал, выброс газа, воспламенение, взрыв газа, кратер, «Сеяхинский» кратер, вулкан, бугор пучения, мониторинг, дистанционное зондирование Земли, ДЗЗ, космоснимки.

© Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В.,
Богоявленский И. В., Никонов Р. А., Кишанков А. В.,
Каргина Т. Н., 2019

Введение

Нефтегазопроисковые работы, строительство и функционирование объектов нефтегазодобычи, включая промыслы и их инфраструктуру, несут значительные риски для персонала и для экосистемы не только на локальном, но и на региональном, а возможно, даже и на глобальном уровнях. При освоении ресурсов углеводородов (УВ) в арктических и субарктических природно-климатических условиях возникают дополнительные риски, обусловленные тяжелыми природно-климатическими особенностями и наличием криогидро- и криолитосфер, что отражено во многих работах отечественных и зарубежных авторов [1—23].

Добыча, транспортировка и переработка УВ сопряжены с высокой пожаро- и взрывоопасностью. В 2010 г. весь мир был потрясен взрывом буровой платформы «Deepwater Horizon», проводившей геолого-разведочные работы на месторождении Macondo в Мексиканском заливе [4; 11; 23]. Последствия произошедшей катастрофы для экосистемы Мексиканского залива еще полностью не изучены и не осознаны, а экономический ущерб оператора работ компании BP составил около 65 млрд долл. [23], что близко к стоимости отечественных гигантов нефтегазовой индустрии ПАО «Газпром» и ПАО «НК «Роснефть».

Аномально высокие пластовые давления (АВПД) — одно из самых опасных природных явлений, которое тысячи раз приводило к самым серьезным аварийным и катастрофическим ситуациям во всех осваиваемых нефтегазовых регионах. По данным MMS (Minerals Management Service), в 1980—2006 гг. в мире произошло более 500 выбросов газа и смесей УВ, включая 165 в США [4].

Выбросы смесей УВ происходили и, к сожалению, будут продолжаться во всех нефтегазодобывающих странах. Они многократно приводили к катастрофам на территории СССР, в том числе в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ). При этом в ряде случаев объемы выброшенных и сгоревших смесей УВ были многократно больше, чем при катастрофе 2010 г. в Мексиканском заливе [4; 8; 11].

Наличие криолитосферы и многолетнемерзлых пород (ММП) на большей части территории России привносит большие проблемы при строительстве жилых и промышленных объектов и является сильным осложняющим фактором при освоении ресурсов УВ, включая бурение нефтегазопроисковых и эксплуатационных скважин. В мегарегиональном масштабе ММП и залежи газовых гидратов (ГГ) сдерживают перманентную дегазацию Земли, экранируя субвертикальную миграцию газа. За счет этого под толщами ГГ и/или ММП (нередко и внутри ММП) накапливаются большие объемы газа и возникают АВПД, способные прорвать (взорвать) природный экран (покрышку) и выбросить большие массивы ММП и ледогрунта. Сочетание в зонах развития ММП нескольких опасных явлений дополнительно повышает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС).

Более 10 лет в Институте проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН собирались и анализировались данные по различным опасным природным и техногенным явлениям, угрожающим жизнедеятельности человека, с особым вниманием к регионам освоения ресурсов УВ в Арктике и Мировом океане [4; 10; 11]. Большинство опасных явлений имеет прямые или косвенные причинно-следственные связи (землетрясения, оползни, стратовулканы, грязевые вулканы, сипы газа и нефти, образование и диссоциация ГГ и др.) [2—11; 21]. По выявленным объектам ЧС ведется мониторинг на этапах возникновения и ликвидации, а также анализируются их последствия. При этом активно используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), включающие космо- и аэросъемку, и результаты наземных экспедиционных исследований. Исходные и результирующие материалы загружаются в созданную геоинформационную систему «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО» [2—11]) и постоянно дополняются.

Важным направлением работы ИПНГ РАН является комплексное изучение процессов дегазации Земли в гидросферу и атмосферу во всех ее проявлениях. При этом особое внимание уделяется мощным природным и техногенным выбросам газа, несущим серьезные (нередко катастрофические) последствия для экосистемы. В частности, с 2014 г. исследуются выбросы газа с формированием гигантских кратеров на суше и дне озер АЗРФ. На рис. 1 показаны основные районы исследований на севере Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), включая шесть гигантских кратеров выброса газа, получивших в ГИС «АМО» индексы С1, С2, С3, С9, С11 и С12.

Проведенные в 2014—2018 гг. исследования показали явную высокую опасность дегазации недр в регионах существования криолитосферы для жизнедеятельности человека. Кратер С1 образовался в 3 км от газопровода высокого давления, а С9 — вблизи железной дороги. При этом разброс кусков мерзлой породы и ледогрунта в различных случаях достигал 300—900 м.

Выброс, воспламенение и взрыв газа с формированием гигантского «Сеяхинского» кратера С11 28 июня 2017 г. отличается от предыдущих тем, что он произошел из русла реки Мюджрия, вследствие чего кратер немедленно был полностью затоплен водой. Однако выходящий газ продолжал гореть не менее часа, чему есть свидетели.

Свидетели взрыва на реке Мюджрия 28 июня

28 июня 2017 г. представители коренного населения Ямала М. Н. Окоэтто и Я. Б. Вэнго стали очевидцами мощного выброса, самовоспламенения и взрыва газа из русла реки Мюджрия в 33 км к северо-западу от поселка Сеяха. При этом М. Н. Окоэтто находился на расстоянии около 20 км и оперативно проинформировал первого автора данной статьи по телефону в реальном времени. Также он смог сделать видеозапись поднимающегося вер-

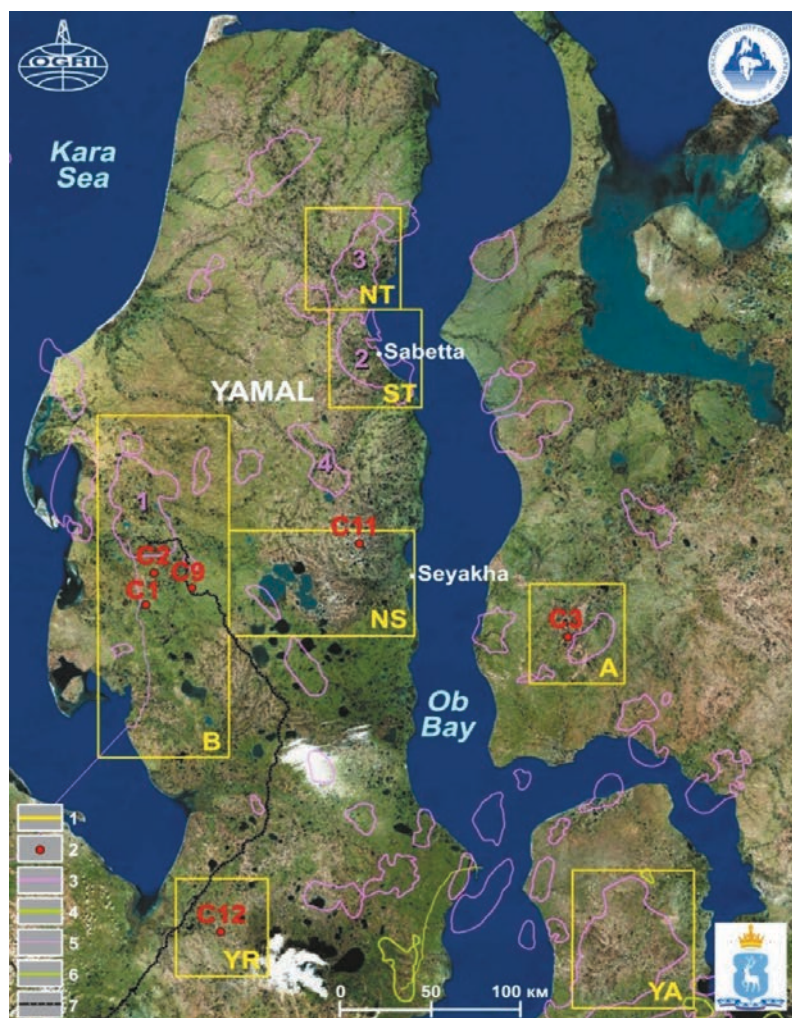


Рис. 1. Кратеры выбросов газа на Ямале C1, C2, C3, C9, C11 и C12.

Обозначения: 1 — участки детальных исследований ИПНГ РАН и НП РЦОА (B — Бованенковский, ST — Южно-Тамбейский, NT — Северо-Тамбейский, NS — Нейтинско-Сеяхинский, YR — Еркутинский, YA — Ямбургский); 2 — кратеры выбросов газа C1, C2, C3, C9, C11 и C12; 3 и 4 — месторождения газа (3) и нефти (4), включая показанные розовым цветом Бованенковское (1), Южно-Тамбейское (2), Северо-Тамбейское (3) и Западно-Сеяхинское (4); 5 — газопровод Бованенково — Ухта; 6 — нефтепровод; 7 — железная дорога.

Картографическая основа — Bing

Fig. 1. Craters of Gas blowout on the Yamal C1, C2, C3, C9, C11 and C12.

Signs: 1 — areas of the OGRI RAS and RCAE detailed studies (B — Bovanenkovo, ST — South Tambei, NT — North Tambei, NS — Neito-Seyakha, YR — Yerkuta, YA — Yamburg), 2 — craters of gas blowouts C1, C2, C3, C9, C11 and C12, 3 and 4 — gas (3) and oil (4) fields, including those marked with pink color: Bovanenkovo (1), South Tambei (2), North-Tambei (3) and West-Seyakha (4), 5 — gas pipeline Bovanenkovo-Ukhta, 6 — oil pipeline, 7 — railroad. Base map — Bing

Это подтверждает нашу гипотезу газовзрывного происхождения в Арктике многочисленных маломagnitudeных сейсмических событий, зарегистрированных в Баренцево-Карском регионе Норвежской сейсмической службой NORSAR [4; 6; 11 и др.].

Воспламенения и взрывы газа

Природные и техногенные выбросы газа пожаро- и взрывоопасны. Взрывоопасной является концентрация метана в воздухе 5—16%, а самая взрывоопасная — 9,5% [4; 14]. Газ обладает свойством быстрого и всепроникающего распространения, а объемные взрывы газовоздушной смеси характеризуются большой разрушительной силой.

Воспламенения и взрывы наблюдались на вулканах в Азербайджане (Локбатан, Гил, Гарасу, Харе-Зирия и др.), Тамани (Карabetова гора, Шуго и др.), в Азовском море (Голубицкий), в Черном море около Крыма и во многих других регионах [2—4; 11]. При этом высота факелов неред-

тикально до и выше облаков столба белесого дыма (возможно, пара) от сгоревшего газа, которую он любезно нам предоставил. По двум кадрам, приведенным на рис. 2 и выбранным нами из видеозаписи с интервалом 32 с, видно характерное грибовидное завершение поднимающегося выше облаков газового плюма (рис. 2, справа). Вечером 30 июня М. Н. Окоэттэ побывал на месте взрыва и зафиксировал обстановку фотоаппаратом [11].

Я. Б. Вэнго с семьей и стадом оленей 28 июня находился в нескольких сотнях метров от места выброса газа, на котором ранее была небольшая сопка. Члены его семьи часто использовали ее для выявления мест нахождения оленей. По словам Я. Б. Вэнго, после мощной краткосрочной вспышки (взрыва) в 10:25 местного времени газ продолжал гореть около одного-полутора часов, при этом размер пламени был, как чум (т. е. до 4—5 м). Весь день ушел на сбор разбежавшихся от испуга оленей.

Дополнительные подтверждения о чрезвычайной ситуации на Ямале поступили из Единой геофизической службы РАН (ЕГС РАН, Обнинск). Информация о сейсмическом событии была зарегистрирована сейсмостанциями, установленными в 2016 г. в поселках Сабетта, Бованенково и Харасавэй по рекомендациям и при непосредственном участии авторов данной статьи силами Некоммерческого партнерства «Российский центр освоения Арктики» (НП РЦОА). В результате обработки сейсмических записей в ЕГС РАН были определены примерные координаты сейсмического события (погрешность до 20 км).



Рис. 2. Кадры выброса газа из видеозаписи М. Н. Окоэтто, 28 июня 2017 г.
Fig. 2. Shots of gas blowout from video by M. N. Okotetto, June 28, 2017

ко достигала 100—500 м. Статистический анализ крупных извержений грязевых вулканов (Локбатан и др.) в Азербайджане показал, что вероятность взрыва газа составляет около 60%. Примерно такая же статистика наблюдается при выбросах газа при бурении скважин.

Самовоспламенения и взрывы газа наблюдались и в процессе ряда природных и техногенных выбросов газа в различных регионах АЗРФ. При этом они происходили не только в последние десятилетия потепления климата, но и более полувека назад [8; 11].

Одной из причин самовоспламенения мощных выбросов газа является возникающая электризация пространства и электростатические разряды: «Накоплено много фактов, позволяющих считать статическое электричество основной причиной самовоспламенения фонтанирующей струи» [17, с. 85—86]. В частности, в АЗРФ на севере Красноярского края во время фонтанирования газа с дебитом более 2,5 млн м³/сут из скважины № 11 Пеляткинского газоконденсатного месторождения (ГКМ) (запасы газа 260 млрд м³, 69,62° с. ш., 81,76° в. д.) возникла сильная электризация, которая наблюдалась в виде свечения. Через пять суток фонтан самовоспламенился [17, с. 85—86].

Краткая географическая характеристика района взрыва

«Сеяхинский» кратер выброса газа (С11) образовался в пределах Нейтинско-Сеяхинского участка наших исследований (см. рис. 1 — NS) непосредственно в русле реки Мюдрияха на участке с абсолютной высотой около 6 м над уровнем моря (балтийская система высот). Эта река является левым притоком реки Турмаяха — крупного водотока в восточной части Центрального Ямала. Мюдрияха

протекает по поверхности первой морской террасы с максимальными высотами до 20—24 м над уровнем моря, сложенной аллювиально-морскими отложениями (пески, супеси, суглинки с гравием и галькой) [1]. Поверхность морской террасы осложнена значительным количеством термокарстовых котловин, в большинстве случаев заполненных водой. В хасыреях (котловинах спущенных озер) нередко наблюдается развитие бугров пучения, высота которых превышает 3 м.

Рассматриваемый участок находится в зоне распространения слитного залегания ММП, мощность которых в русле реки Мюдрияха может достигать 150 м, а температура — до –6...–8°С. Глубина сезонного протаивания поверхности ММП в русле и на сопредельной территории колеблется в пределах 0,5—1,5 м. Длительность периода активного протаивания не превышает 80 дней [1].

В восточной части полуострова Ямал выявлена наибольшая плотность расположения озер с кратерами выбросов газа на дне (см. ниже) и потенциально взрывоопасных бугров пучения. Всего таких озер и бугров на Ямале нами обнаружено соответственно более 300 и 7000. Особенно много таких озер в северо-восточной части Ямала в районах расположения Северо-Тамбейского и Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) (см. рис. 1 — участки NT и ST). Отдельные озера сезонно полностью или частично высыхают, и кратеры оказываются обнаженными на суше. На многих озерах количество кратеров измеряется сотнями и даже тысячами. «Сеяхинский» кратер выброса газа С11 расположен примерно на одной широте с четырьмя другими кратерами (см. рис. 1: С1, С2, С3 и С9), образовавшимися на месте бугров пучения (булгунях — пинго) [4; 7; 9; 11]. Таким образом, район об-



Рис. 3. Озеро с кратерами выброса газа в рельефе дна (фото из вертолета В. И. Богоявленского, 2 июля 2017 г.)

Fig. 3. Lake with gas craters in the bottom relief (photo from helicopter by V. I. Bogoyavlensky, July 2, 2017)

разования «Сеяхинского» кратера выброса газа С11 относится к одному из наиболее газовзрывоопасных на Ямале.

Важным является факт, что в наиболее изученных кратерах выброса газа С1, С2, С3 и С4 (С4 расположен на севере Красноярского края за пределами карты на рис. 1) ранее было доказано существование мощных ледовых массивов [4; 7; 9; 11; 15; 16; 22].

По отношению к имеющимся в районе кратера С11 техногенным объектам, нарушившим сплошность недр, отметим, что ближайшая к кратеру С11 скважина Сеяхинская-1 расположена в 15 км к юго-востоку, а ближайшее Западно-Сеяхинское ГКМ (открыто в 1989 г.) — в 40 км к северо-западу.

Обстановка в районе взрыва 2 июля 2017 г.

Экспедиционное обследование места выброса газа было организовано Правительством ЯНАО (губернатор Д. Н. Кобылкин, заместитель губернатора

А. В. Мажаров), ОАО «Ямал СПГ» (генеральный директор Е. А. Кот), Некоммерческим партнерством «Российский центр освоения Арктики» (НП РЦОА, директор А. В. Барышников) и «Научным центром изучения Арктики» (директор А. И. Синицкий). Заместитель директора ИПНГ РАН В. И. Богоявленский был отозван из отпуска, оперативно вернулся в Москву и вылетел в Сабетту с Е. А. Котом 2 июля. В тот же день все участники объединились на объекте исследований С11, к которому прибыли на вертолетах (рис. 5).

При подлете к месту выброса газа С11 в полутора километрах севернее было обнаружено озеро с многочисленными кратерами в рельефе дна (рис. 3). У большин-

ства кратеров сохранились брустверы, отображаемые на фотоснимке в виде светлых кольцевых структур, обрамляющих темные жерла кратеров. Большая часть из более чем 300 подобных озер, обнаруженных в 2014—2018 гг., находится в северо-восточной части полуострова Ямал, особенно в районе Южно-Тамбейского и Северо-Тамбейского НГКМ (см. рис. 1 — СТ и NT) [10; 11].

Обнаруженный кратер С11 (координаты 70,302° с. ш., 71,746° в. д.) был затоплен (рис. 4), так как его центр расположен у правого берега реки Мюдрияха (определено при визуальной аппроксимации). Кратер имел несимметричную вытянутую вдоль реки форму с размерами по уровню воды ниже бруствера около 50×70 м. Вблизи от правого берега было обнаружено сильное локальное «кипение воды» из-за выходящего газа диаметром до 3—4 м, при этом поток пузырей газа сформировал слегка выпуклое поднятие на поверхности и завихрения воды (рис. 6).



Рис. 4. Сеяхинский кратер выброса газа: фотографии из вертолета со сторон левого (1) и правого (2) берегов (фото В. И. Богоявленского, 2 июля 2017 г.)

Fig. 4. Seyakha crater of gas blowout: photos from helicopter from the left (1) and right (2) river banks (photos by V. I. Bogoyavlensky, July 2, 2017)



Рис. 5. Участники полевых исследований Е. А. Кот, В. И. Богоявленский и М. Н. Окоэтэто. На переднем плане видны куски выброшенной породы из «Сеяхинского» кратера (фото В. И. Богоявленского, 2 июля 2017 г.)
Fig. 5. Participants of the field studies E. A. Kot, V. I. Bogoyavlensky and M. N. Okotetto. Blocks of rocks, blasted-out from the Seyakha crater, are visible in the foreground (photo by V. I. Bogoyavlensky, July 2, 2017)

Исследования дна кратерного озера проводились с двух надувных лодок «Лоцман». Имевшийся портативный эхолот «Deeper» показал резкое погружение дна в направлениях от берегов к центру, но глубина кратера превышала пределы его чувствительности (0,3—15 м). С надувных лодок были выполнены промеры глубины кратера с помощью веревки с грузом, превысившие 50 м, и взяты пробы газа. Позднее проведенный Ф. М. Ривкиным (ОАО «Ямал СПГ») лабораторный анализ газа показал, что он состоит преимущественно из метана с легким изотопным составом углерода метана $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4) = -80,6\text{‰}$. Это однозначно свидетельствует о его бактериальном генезисе. Из опубликованных данных следует, что на различных площадях Ямала изотопный состав углерода биогенного метана $\delta^{13}\text{C}$ меняется от -55‰ до -88‰ – -92‰ [9; 13; 19 и др.].

Рис. 6. Зона выхода газа в кратерном водоеме (фото В. И. Богоявленского, 2 июля 2017 г.)
Fig. 6. Zone of gas release in the crater pond (photo by V. I. Bogoyavlensky, July 2, 2017)

Очевидно, что при падении кусков выброшенного мерзлого грунта в жерло кратера оно оказалось частично завалено, и канал подтока газа был в значительной степени перекрыт. Поэтому замеренная глубина кратера около 50 м не является первичной, а его реальная первоначальная глубина могла быть существенно больше.

Во время обследования местности 2 июля 2017 г. было обнаружено и зафиксировано на фото- и видеоматериалах с географической привязкой более 100 наиболее значимых (по размерам или специфике падения) кусков льда и породы, а также углубления в рельефе местности ударного (импактного) происхождения (рис. 7 и 8). Среди них особо выделим гигантские глыбы мерзлой породы и ледогрунта, из которых самая большая разломившаяся на две части глыба располагалась в русле реки на юго-западном краю кратера и имела примерные размеры $4 \times 8 \times 10$ м (объем 100—150 м³) (рис. 7-1). Возможно, она имела еще большие размеры, так как ее подводную часть трудно оценить. На





Рис. 7. Панорамные фотографии места взрыва с трех сторон левого берега реки (1–3) и вид на остатки свода взорвавшегося бугра (4) (фото В. И. Богоявленского, 2 июля 2017 г.)

Fig. 7. Panoramic photos of the explosion site from three sides of the river left bank (1–3) and a view on the arch remains of the exploded pingo (4) (photos by V. I. Bogoyavlensky, July 2, 2017)



Рис. 8. Выброшенные взрывом крупные глыбы ледогрунта (1) и песчано-суглинистой породы (2) (фото В. И. Богоявленского, 2 июля 2017 г.)

Fig. 8. Blasted-out massive blocks of ice-soil (1) and sandy loam rock (2) (photos by V. I. Bogoyavlensky, July 2, 2017)

Таблица 1. Краткие характеристики использованных данных ДЗЗ

Спутник	Разрешение, м	Источник	Страна
Landsat-8	15	USGS	США
Sentinel-2	10	ESA	ЕС
PlanetScope — Dove/Flock	3	Planet	США
WorldView-1, 2, 3	0,3—0,5	Terraserver	США-Канада
WorldView-1, 2, 3	2	NGA (ЦМР ArcticDEM)	США
«Ресурс-П» № 1	0,5—0,6	ГК «Роскосмос»	Россия

фотографии, предоставленной М. Н. Окоэтто и сделанной через два дня после взрыва (30 июня), видна еще одна глыба на месте бруствера в центре русла реки в нижней (южной) части кратера, но 2 июля ее уже размывло речной водой.

Удаление зоны сплошного (100%) поражения территории обломками льда и мерзлой породы в отдельных направлениях достигает 100 м (включая бруствер с крупными глыбами пород), а максимальный разлет — до 370 м. Некоторые глыбы ледогрунта около кратера и местами соседняя тундровая растительность имеют характерный обгоревший вид. Масштабного возгорания почвенного покрова не произошло из-за его повышенной весенней влажности.

Многочисленные обнаруженные крупные обломки ледогрунта на объекте С11 позволяют утверждать, что на месте взрыва существовал ледовый массив, как и на месте ряда других кратеров (см. выше). Интересен установленный факт, что практически все куски ледогрунта (во многих случаях чистого льда) оказались выброшенными на левый (юго-восточный) берег реки. На противоположном более высоком правом берегу они не обнаружены (возможно, небольшие куски льда растаяли). На обоих берегах

наблюдаются многочисленные крупные и мелкие массивы песчано-суглинистой породы, часть которых оттаяла и сформировала россыпи (местами чистого песка). Объяснение данного феномена было найдено позднее на основе анализа данных ДЗЗ (см. ниже).

Дистанционные исследования Сеяхинского выброса газа

Для дистанционного изучения геодинамических изменений на участке С11 использовались различные типы исходных данных ДЗЗ за период 2013—2018 гг., представленные в табл. 1. Анализ доступных данных ДЗЗ на участке формирования кратера выброса газа С11 показал, что уже в 2013 г. здесь происходили активные геодинамические процессы, выраженные в быстром росте бугра пучения в русле реки Мюдрияха.

В 2013 г. по данным космоснимков WorldView-2 (WV-2) высокого разрешения (до 0,5 м) 22 июня в русле реки наблюдаются локальное инородное строение дна и малозаметное искривление левого (юго-восточного) берега (рис. 9-1). На цифровой модели рельефа (ЦМР) ArcticDEM, построенной на основе данных WV-2 от 16 марта 2013 г. (разре-



Рис. 9. Космоснимок WV-2, 22 июня 2013 г., (1) и ЦМР ArcticDEM WV-2, 16 марта 2013 г., (2)
Fig. 9. Satellite image WV-2, June 22, 2013 (1) and DEM ArcticDEM WV-2, March 16, 2013 (2)

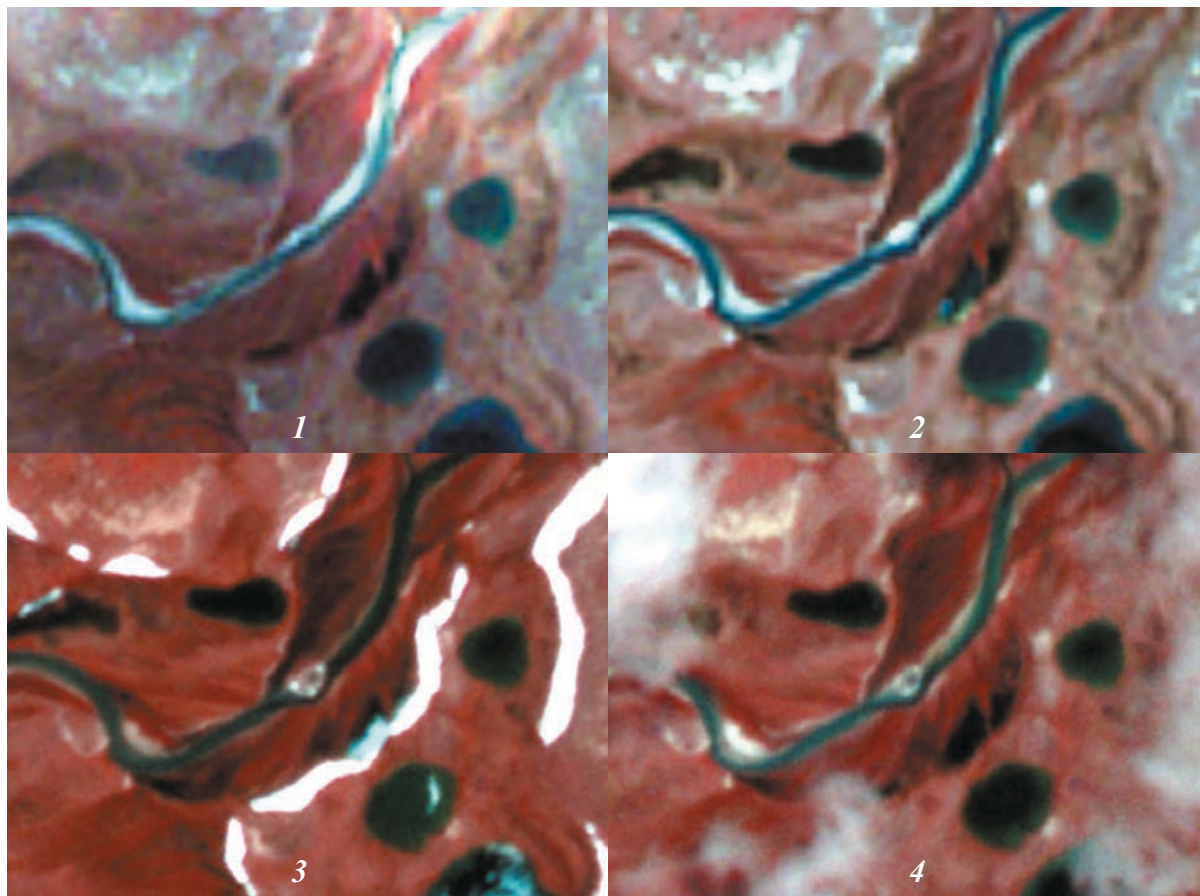


Рис. 10. Космоснимки площади выброса газа: Sentinel-2 4 сентября 2015 г. и 17 июня 2016 г., (1 и 2), PlanetScope, 18 и 27 июня 2017 г., (3 и 4)

Fig. 10. Satellite images of the gas blowout area: Sentinel-2, September 4, 2015 and June 17, 2016 (1 and 2), PlanetScope, June 18 and 27, 2017 (3 and 4)

шение 2 м), видно, что на обоих берегах существуют локальные приподнятые подмываемые участки (возвышенности) с относительным превышением рельефа порядка 1—1,4 м (рис. 9-2), отображаемые светло-желтым цветом. Они образовались как остаточные недоразмытые части бугра пучения. Сводовая часть этого бугра расположена прямо в русле реки и была размыта, что привело к формированию на дне неоднородного объекта (см. рис. 9-1). Река преодолевала бугор через его свод до 2015 г. включительно, что видно на снимке Sentinel-2 во время низкого уровня воды 4 сентября 2015 г. (рис. 10-1).

В 2016 г. река Мюдрияха, встречая более твердые (чем рыхлые отложения реки) ММП активно растущего бугра, не смогла преодолеть это препятствие и проложила себе новый обходной путь. Судя по летней съемке Sentinel-2 (рис. 10-1 и 10-2), боковой врез русла в левый берег реки начал формироваться в весеннее половодье 2016 г. и продолжил расти вплоть до взрыва (рис. 10-3 и 10-4) 28 июня 2017 г. Общая глубина бокового вреза за 10 дней до взрыва составляла около 17 м. Это существенное значение для небольшой мелководной реки, которая слабо меандрирует и сохраняет устойчивость русла не менее полувека, что подтверждается крупномасштабными

топографическими картами и архивной космической фотосъемкой 1970-х годов. По снимкам PlanetScope 18 и 27 июня 2017 г. (за 10 и 1 день до взрыва), представленным на рис. 10-3 и 10-4, размеры бугра в его видимой (выше уровня воды) части составляли около 40×51 м. Сравнение этих снимков показывает активное подмывание северо-восточной стороны бугра речным потоком и увеличение за счет этого ширины реки. Таким образом, в изучаемом районе ЧС наиболее активные локальные воздымательные геодинамические процессы произошли в течение трехлетнего периода 2015—2017 гг.

На рис. 11 приведена серия космоснимков 2013—2018 гг. высокого разрешения (около 0,5 м) до (1—3) и после (4—6) образования кратера выброса газа С11. По данным WV-1 19 апреля 2016 г., в ледовом покрове бугра (возможно, в самом его своде) видны две обнажившиеся трещины до 20 м в длину. Свод поднятия находился около правого более высокого берега реки, при этом его центральная часть, расположенная в русле реки, постоянно размывалась речной водой.

На снимке 2 мая 2017 г. (за 57 сут до взрыва) на фоне заснеженной территории четко прослеживаются освещенная солнцем размывная часть бугра

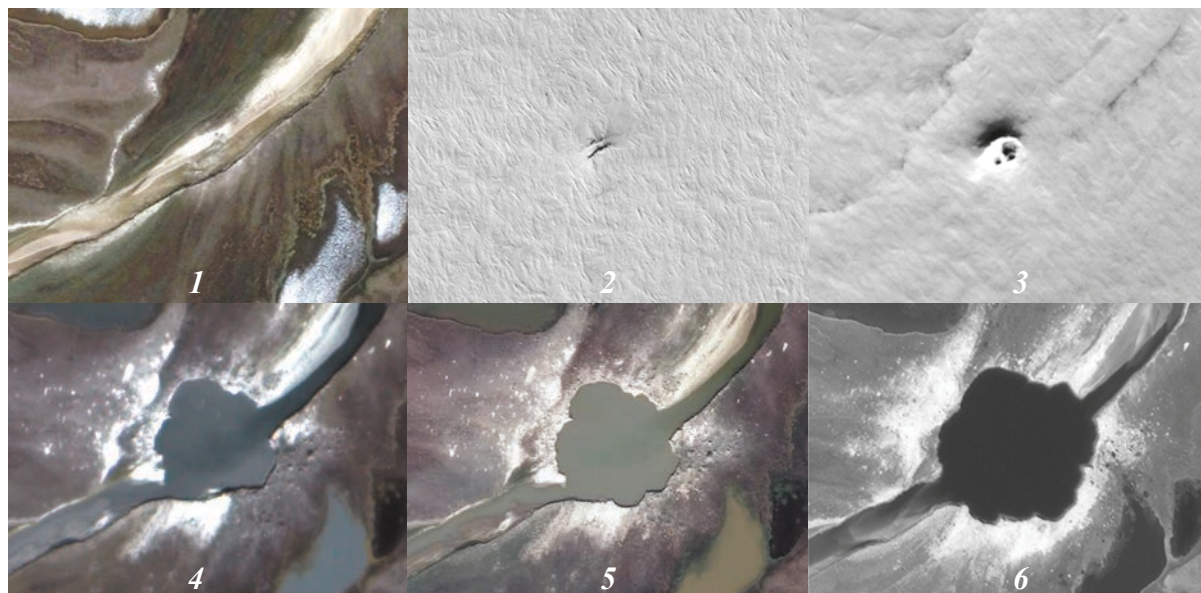


Рис. 11. Космоснимки площади выброса газа: WV-2 22 июня 2013 г. (1), WV-1 19 апреля 2016 г. (2), «Ресурс-П» 2 мая 2017 г. (3), «Ресурс-П» 22 июля 2017 г. (4), WV-3 27 июля 2017 г. (5), WV-1 20 июля 2018 г. (6)
Fig. 11. Satellite images of the gas blowout area: WV-2, June 22, 2013 (1), WV-1, April 19, 2016 (2), "Resurs-P", May 2, 2017 (3), "Resurs-P", July 22, 2017 (4), WV-3, July 27, 2017 (5), WV-1, July 20, 2018 (6)

в русле реки и его почти черная теневая сторона на северо-западном (правом) берегу (рис. 11-3). На самом же бугре на фоне снежно-ледового покрова видны три черных объекта, весьма вероятно, образовавшиеся за счет протаивания от выходящего газа (сипы) или пробоев мощными струями газа. Суглинистая порода в русле реки имеет светлый оттенок и не может дать столь сильного светопоглощения, поэтому других объяснений происхождения этих объектов мы не видим. Наличие подобных неоднородностей в снежно-ледовом покрове является одним из характерных признаков дегазации недр, рассмотренных в [5; 10; 12; 18].

После взрыва 28 июня на снимках «Ресурс-П» 22 июля 2017 г. и WV-3 27 июля 2017 г. (рис. 11-4 и 11-5) наблюдается активная термоабразия берегов кратера. Кроме того, на темном фоне воды видны три слабых просветления (рис. 12-11), обусловленные увеличением отражения светового потока (альбедо). Такое явление характерно для площадей дегазации недр через водную толщу (см. рис. 6), когда за счет поднятия пузырей газа, имеющих форму сфер, увеличивается альбедо (коэффициент отражения светового потока стремится к единице, как для снега).

На рис. 12 на основе космоснимка WV-3 27 июля 2017 г. приведены цветные линии, характеризующие изменения очертаний бугра, реки и кратера выброса газа в период 2013—2018 гг. По данным космоснимка PlanetScore 18 июня 2017 г. площадь бугра по видимому контуру составляет около 1600 м². По данным снимка PlanetScore 5 июля (не приводится из-за невысокого качества) самая крупная глыба в русле реки на юго-западном краю кратера была

большой частью размыта, но берега кратера сохраняли форму, близкую к зафиксированной 2 июля. Самая активная термоабразия происходила в период 5—22 июля (17 сут). Наибольшее отступление берега кратера в юго-восточном направлении достигло 13 м, т. е. средняя скорость составила около 0,94 м/сут. Максимальное отступление берега кратера было в северо-западном направлении и составило около 25 м, т. е. скорость составила около 1,47 м/сут. Такие значительные изменения за столь короткий срок могли произойти только в результате обрушения крупных кусков береговых ММП. Это, видимо, обусловлено неполным разрушением сводовой северо-западной части бугра (купол — крышка подземной полости) во время взрыва 28 июня за счет подмыва (ослабления) бугра с его восточной стороны. При этом в день обследования 2 июля часть свода, видимо, еще сохранялась, что наблюдается на рис. 6-4 (нависающая обожженная глыба около лодки). Отметим, что часть сохранившегося свода наблюдалась и на одном из кратеров, образовавшихся около шести лет назад в районе Бованенковского НГКМ (имеются подтверждающие фото- и видеоматериалы). Также мощные обрушения возможны за счет активной термоабразии подземного льда, при которой образуются козырьки ММП, обрушивающиеся под собственным весом (имеются подтверждающие примеры с кратера C2 [7]).

Очевидно также, что во время проведения работ 2 июля существовал высокий уровень риска для участников обследований, так как суммарный объем обрушившихся кусков ММП превышал тысячу кубометров. В период 22—27 июля 2017 г. в юго-восточной части выявлено обрушение (возможно,

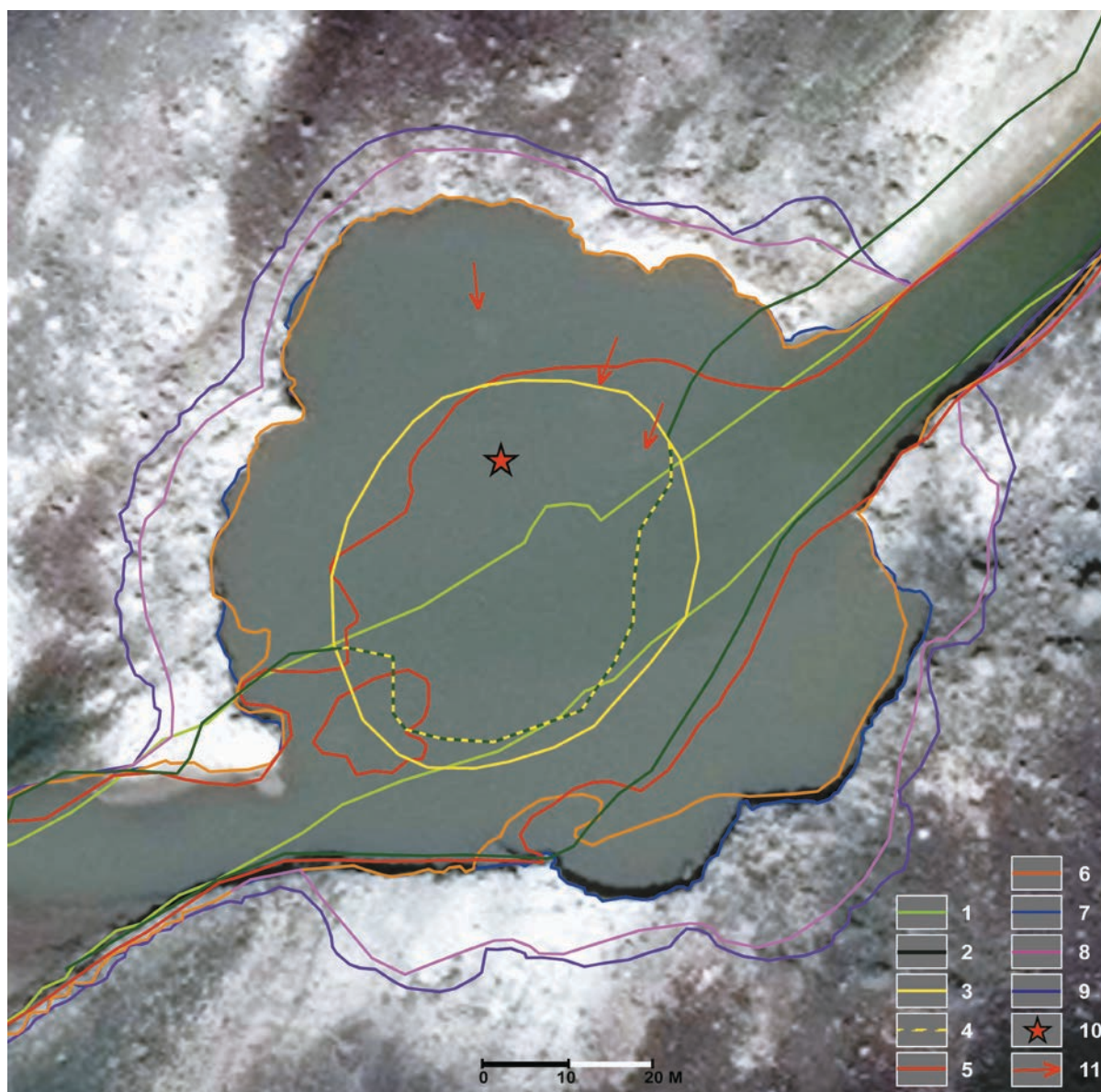


Рис. 12. Динамика изменения участка выброса газа C11 в 2013–2018 гг. Примечания: 1 и 2 – русло реки 22 июня 2013 г. и 27 июня 2017 г.; 3 и 4 – контуры бугра по PlanetScope 18 и 27 июня 2017 г.; 5–9 – контуры кратера – вертолет 2 июля 2017 г. (5); «Ресурс-П» 22 июля 2017 г. (6); WV-3 27 июля 2017 г. (7) – основа рисунка; «Ресурс-П» 16 июля 2018 г. (8); WV-1 20 июля 2018 г. (9); 10 и 11 – зоны выхода газа 2 и 27 июля 2017 г. при обследовании на месте (10) и по космоснимку WV-3 (11)

Fig. 12. Change dynamics of gas blowout area C11 in 2013–2018. Notes: 1 and 2 – the riverbed, June 22, 2013 and June 27, 2017; 3 and 4 – the pingo out-line, based on PlanetScope, June, 18 and 27, 2017; 5–9 – the crater out-line – from helicopter, July 2, 2017 (5); “Resurs-P”, July 22, 2017 (6); WV-3, July 27, 2017 (7) – figure background; “Resurs-P”, July 16, 2018 (8); WV-1, July 20, 2018 (9); 10 and 11 – zones of gas seepage, July, 2 and 27, 2017, based on the field study (10) and satellite image WV-3 (11)

оползень) участка шириной около 8 м, т. е. зафиксированная рекордная скорость отступления границы кратера составила 1,6 м/сут. В итоге к 20 июля 2018 г. общая площадь кратера C11 изменилась в 3,2 раза (табл. 2).

На рис. 13 на основе космоснимка WV-3 27 июля 2017 г. показано положение зафиксированных во время осмотра местности 2 июля и выявленных по данным ДЗЗ 708 кусков мерзлой породы и ледогрунта, а также участков поражения почвенного покрова – воронок, образовавшихся при падении

этих кусков и во многих случаях заполненных водой. Имеются фотоматериалы, свидетельствующие, что многие воронки образовались при падении не мерзлых пород, а ледогрунта – местами практически чистого льда, который растаял в течение нескольких дней после взрыва. Наибольшее удаление выявленного поражения почвенного покрова достигает 370 м. По рис. 13 и другим приведенным материалам видно, что самое сильное поражение территории произошло на удалениях от центра кратера до 50–95 м. Здесь сформировались брустверы выбро-

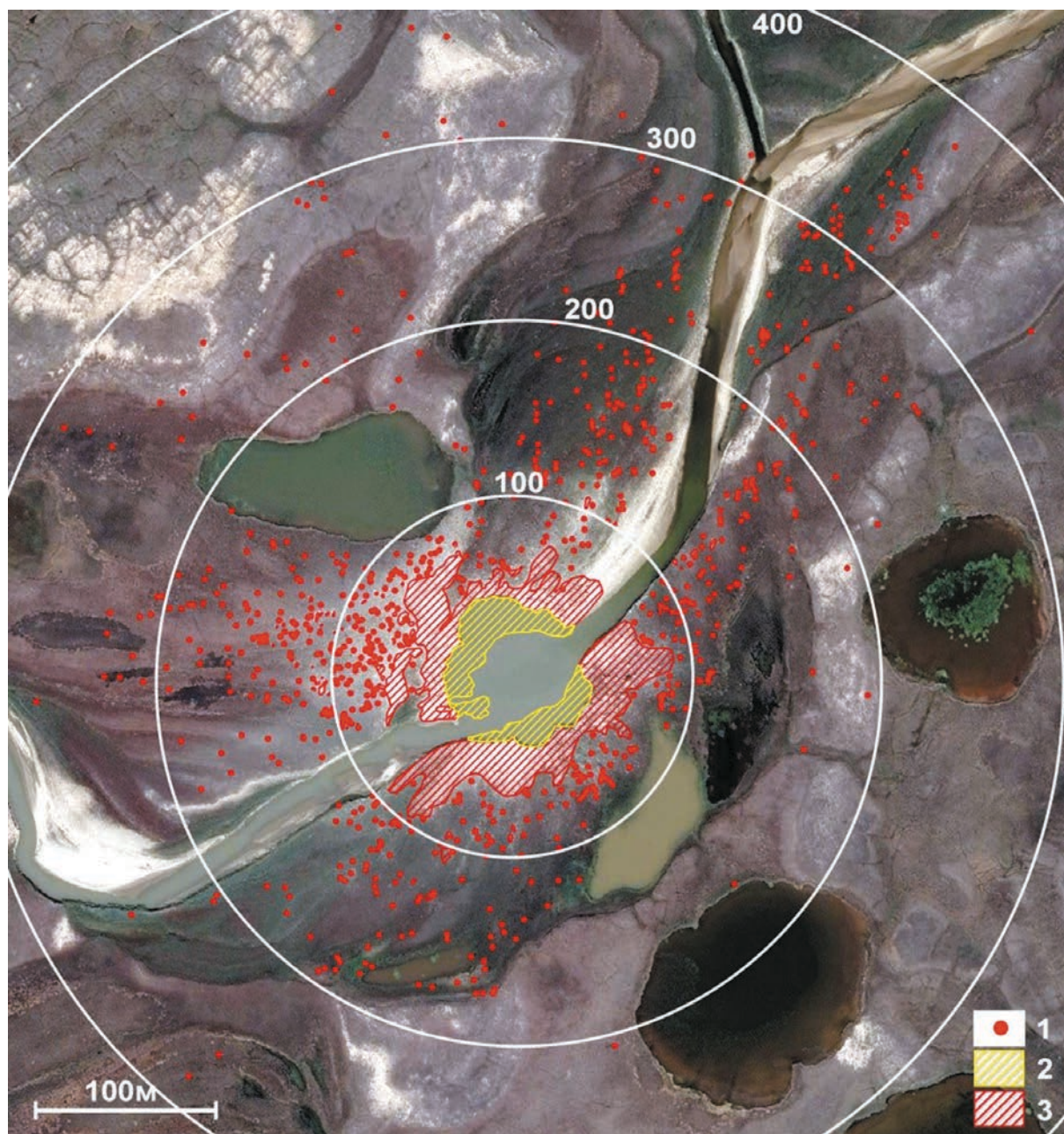


Рис. 13. Схема разлета кусков выброшенной породы (1) с зонами брестеров и сплошного поражения территории (2 и 3) вокруг кратера С11, выявленными в 2017 г. при экспедиционном обследовании 2 июля (2 и 3) и по космоснимку WV-3 27 июля (3)
Fig. 13. Scattering pattern of blasted-out rocks (1) with zones of breastworks and severe coverage of the territory (2 and 3) around the crater C11, detected in 2017 during the field survey, July 2 (2 and 3) and by the satellite image WV-3, July 27 (3)

Таблица 2. Динамика площади кратера выброса газа С11

Источник данных	Дата	Площадь, м ²	%
Вертолет	02.07.2017	2780	32,8
«Ресурс-П»	22.07.2017	4998	59,0
WV-3	27.07.2017	5237	61,8
«Ресурс-П»	16.07.2018	7740	91,4
WV-1	20.07.2018	8468	100,0

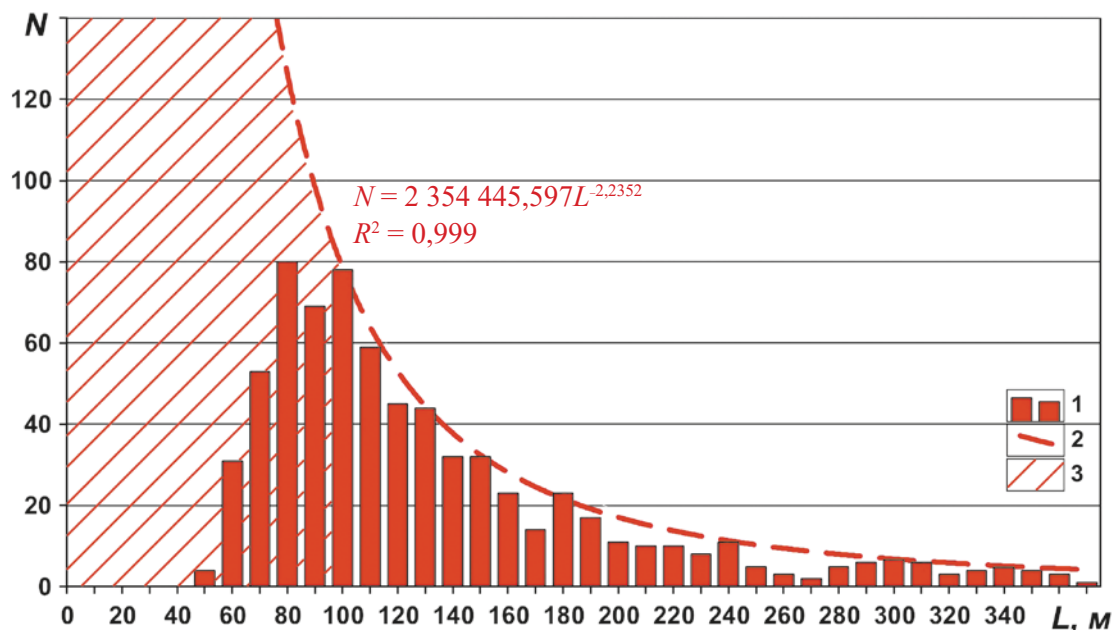


Рис. 14. Распределение количества кусков выброшенной породы и льда N в зависимости от расстояния до центра кратера L . Обозначения: 1 – N , 2 – линия аппроксимации $N(L)$, 3 – зона сплошного поражения (L до 95 м)
Fig. 14. Quantity distribution of blasted-out rock and ice blocks N depending on the distance to the crater center L . Signs: 1 – N , 2 – approximation line $N(L)$, 3 – zone of severe coverage (L up to 95 m)

шенной породы и обнаружены огромные обособленные куски, а количество небольших кусков столь велико, что не поддается учету.

На рис. 14-1 приведено графическое распределение 708 выделенных на схеме рис. 13 кусков в зависимости от их удаления L от центра кратера. Отметим, что количество кусков в интервале 50–95 м (N в диапазоне 5–80) сильно занижено и абсолютно не отображает реальности, так как этот интервал для ряда направлений полета кусков относится к зоне сплошного поражения.

С помощью метода наименьших квадратов была рассчитана функция степенной регрессии, формула и график которой показаны на рис. 14. Степенная регрессия в данном случае наилучшим образом отражает тренд распределения количества обломков N в зависимости от дальности разлета L . Полученная зависимость (см. рис. 14-2) показывает абсолютно нормальное распределение $N(L)$ для дальностей разлета 100–370 м по семи локальным экстремумам N (удаления L : 100, 130, 150, 180, 240, 300 и 340 м). При этом коэффициент корреляции $R = 0,9996$, а средняя ошибка аппроксимации не превышает 3%. Это свидетельствует о том, что разлет обломков определяется в основном естественными факторами мощности газового выброса, монолитностью ММП и ледогрунта и силой земного притяжения. Исходя из полученного распределения, можно предположить, что большая часть обломков оказалась выброшена вертикально вверх и обрушилась непосредственно в жерло кратера,

в образовавшуюся воронку и на ее края, образовав бруствер (оценка массы грунта на бруствере не проводилась).

В сентябре 2018 г. при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), ПАО «НОВАТЭК» и ОАО «Ямал СПГ» была проведена комплексная многодневная экспедиция на трех площадях Сеяхинско-Сабеттинского района Ямала на ряд объектов на участках исследований NS и ST (см. рис. 1), одним из которых был кратер С11. При этом применялось различное оборудование, включая эхолоты «Garmin Striker Plus 7сv» и «Deeper Smart Sonar», георадар «Око-3» производства Группы компаний «Логис Геотех» (ООО «НПЦ Геотех»), квадрокоптер «DJI Mavic». Полученные материалы легли в основу отдельных исследований. Однако в качестве логического завершения данной статьи мы приводим трехмерную модель рельефа дна кратера С11, реки и прилегающей территории по состоянию на 18–19 сентября 2018 г. (рис. 15). Уровень воды в это время был примерно на 1 м ниже, чем во время половодья 28 июня 2017 г., и глубина реки в фарватере во многих частях оказалась меньше 30–40 см. Размеры кратера за прошедший период увеличились примерно в три раза по площади, а его максимальная глубина уменьшилась почти в пять раз. Это произошло за счет термоабразии стенок кратера и активного привноса осадочного материала рекой. Вследствие этого русло реки, примыкающее к кратеру в его северо-восточной части (входное),

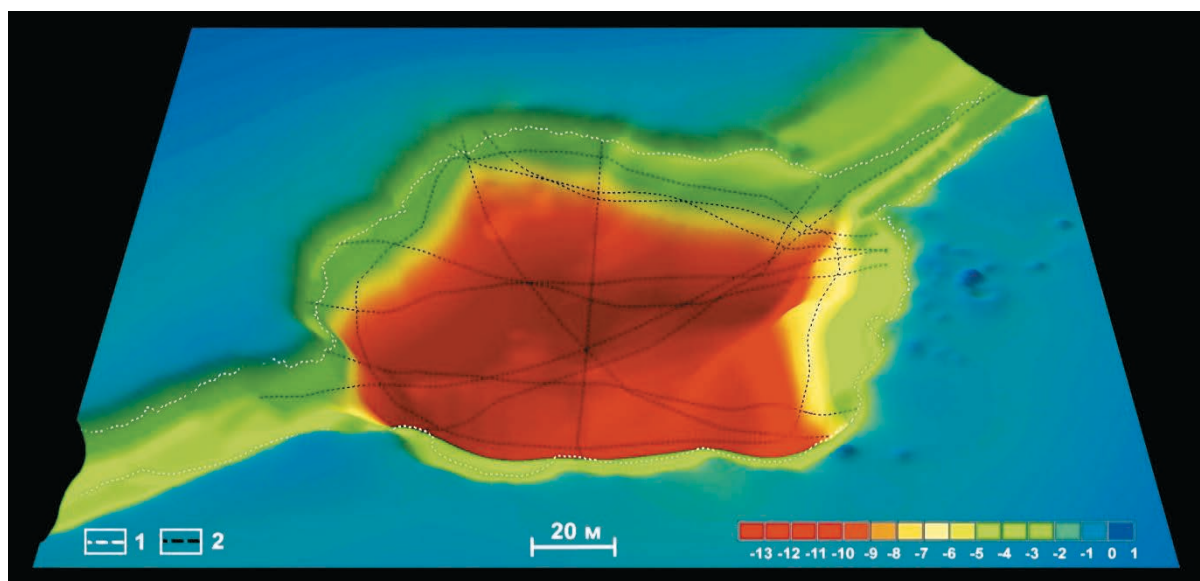


Рис. 15. Трехмерная модель рельефа дна «Сеяхинского» кратера C11 и прилегающей территории по состоянию на 18–19 сентября 2018 г. Обозначения: 1 — уровень воды, 2 — профили исследований глубины дна

Fig. 15. 3D model of the Seyakha crater bottom relief C11 and adjacent territory, as of September 18–19, 2018. Signs: 1 — water level, 2 — profiles of bottom depth studies

на 30—40 см глубже, чем в юго-западной части (выходное).

19 сентября 2018 г. эмиссия газа на Сеяхинском кратере продолжалась, но была незначительной — в воде наблюдались одиночные слабые струи поднимающихся пузырей газа. Возможно, идет накопление новой порции газа (новой залежи), которая с ростом давления приведет к повторному выбросу подобно механизму грязевого вулканизма [2—4; 9; 10].

Заключение

В итоге исследований констатируем, что впервые в русле заполярной реки выявлен бугор пучения, который был разрушен 28 июня 2017 г. мощным выбросом, самовоспламенением и взрывом газа. Оперативное проведение экспедиции и анализ данных ДЗЗ (особенно полезными были снимки отечественного спутника «Ресурс-П») позволили восстановить геодинамические процессы до и после выброса газа, которые кратко можно сформулировать следующим образом:

1. 2015—2018 гг. — период наиболее активных локальных геодинамических и термоабразионных процессов в районе взрыва на объекте C11. Анализ данных ДЗЗ показал активный рост бугра пучения под руслом реки Мюджрияха в зоне возможного разлома.

2. Весной 2016 г. бугор достиг размеров, достаточных, чтобы полностью перегородить русло реки Мюджрияха, в результате чего на локальном участке она поменяла русло и стала огибать и подмывать бугор с юго-восточной стороны.

3. В зимне-весеннее время 2017 г. происходила частичная утечка газа (сипы) из подземного резервуара по микротрещинам в своде бугра, что зафик-

сировано данными ДЗЗ в виде трех неоднородностей в снежно-ледовом покрове.

4. В результате термоабразии речной водой в северо-восточной стороне бугра была смыта значительная часть почвенного покрова и ослаблена прочность подземного ледогрунта, сдерживавшего вертикальную миграцию газа. Этим объясняется наличие практически всех глыб ледогрунта на левом (юго-восточном) берегу и наибольшей части песчано-суглинистых глыб на правом (северо-западном) берегу. Термоабразия бугра ускорила процесс его взрыва.

5. Разрушение бугра вследствие выброса и мощного взрыва газа с формированием кратера и уцелевшая часть свода бугра позволяют предполагать, что до взрыва в ММП существовала термокарстовая полость — камера, заполненная газом с АВПД. Именно наличие АВПД привело к быстротечному (около трех лет) формированию бугра пучения.

6. По данным ДЗЗ зафиксирована высокая средняя скорость термоабразии берегов кратера — до 1,47—1,60 м/сут в июле 2017 г. Наибольшего масштаба она достигла в северо-западной части кратера, в которой был самый высокий бруствер из выброшенной породы. Это, видимо, обусловлено неполным разрушением сводовой части поднятия (купол — крышка подземной полости) в момент взрыва и/или активной термоабразией подземного ледогрунта, при которой образуются козырьки ММП, обрушивающиеся под собственным весом. Площадь кратера за период с 2 июля 2017 г. по 20 июля 2018 г. увеличилась в 3,05 раза.

В связи с большой удаленностью глубоких скважин (15 км и более) от места взрыва C11 вероятность техногенного подтока газа из-за утечек по

заколонному пространству очень мала. С учетом того, что пробы газа показали его микробиальный генезис, можно с высокой степенью вероятности утверждать о природном происхождении выброса газа и образования кратера С11.

С учетом специфики выявленной в криосфере Арктики длительной эмиссии газа на кратере С11 с возможными повторными мощными выбросами газа (подобно произошедшему на Антипаютинском кратере СЗ [9]) можно говорить о новом типе вулканических проявлений — криовулканизме.

На основе обнаружения большого количества бугров пучения и озер с кратерами выброса газа на дне в восточной и особенно северо-восточной частях полуострова Ямал можно сделать вывод, что эти районы характеризуются повышенной газовой опасностью.

Авторы признательны: Российской академии наук и Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку научных и экспедиционных работ (грант РФФИ № 18-05-70111); министру природных ресурсов и экологии России, бывшему губернатору ЯНАО Д. Н. Кобылкину за многолетнюю поддержку научных исследований в ЯНАО; ПАО «НОВАТЭК», ОАО «Ямал СПГ» и лично Е. А. Коту за большую неоднократную помощь в проведении экспедиционных работ; представителям коренного населения и особенно М. Н. Окозэто за предоставление важной информации; ООО «НПЦ Геотех» за помощь в проведении полевых работ в сентябре 2018 г.

Литература

1. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. — Омск: ФГУП «Омская картограф. ф-ка», 2004. — 303 с.
2. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. — 2014. — № 9. — С. 13—18.
3. Богоявленский В. И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. — Ч. 2 // Бурение и нефть. — 2014. — № 10. — С. 4—8.
4. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография. — М.: Изд-во ВЭО России, 2014. — С. 12—175. — (Тр. Вольного экон. о-ва России; т. 182, № 3).
5. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 3 (23). — С. 4—13.
6. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений нефти и газа в Арктике // Сб. докл. конференции «Достижения науки как основа научно-технического прогресса в устойчивом перспективном развитии газовой отрасли» // Ноосфера. — 2016. — № 1. — С. 48—67.
7. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 4—17. — DOI 10.25283/2223-4594-2017-3-4-17.
8. Богоявленский В. И., Бойчук В. М., Перекалин С. О. и др. Катастрофа Кумжи // Бурение и нефть. — 2017. — № 1. — С. 18—24.
9. Богоявленский В. И. Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 1 (29). — С. 48—55. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55.
10. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Природные и техногенные угрозы при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов в Арктике // Минер. ресурсы России. Экономика и управление. — 2018. — № 2. — С. 60—70.
11. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Дегазация Земли. Формирование залежей углеводородов в верхней части разреза и кратеров выбросов газа // Neftegaz.RU. — 2019. — № 1. — С. 48—55.
12. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С. 30—43. — DOI: 10.7868/S020596141504003X.
13. Дворецкий П. И., Гончаров В. С., Есиков А. Д. и др. Изотопный состав природных газов севера Западной Сибири: Обзор. — М.: ИРЦ ОАО «Газпром», 2000. — 80 с.
14. Каледина В. Ф., Каледина И. О., Слепцов В. И. Защита в чрезвычайных ситуациях / Моск. гос. гор. ун-т. — М., 2004. — 285 с.
15. Кизяков А. И., Сонюшкин А. В., Хомутов А. В. и др. Оценка рельефообразующего эффекта образования Антипаютинской воронки газового выброса по данным спутниковой стереосъемки // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2017. — Т. 14, № 4. — С. 67—75.
16. Лейбман М. О., Дворников Ю. А., Хомутов А. В. и др. Водно-химические особенности воды озер и воронок газового выброса, вложенных в морские отложения севера Западной Сибири // Геология морей и океанов: материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. — Т. 4. — М.: ИО РАН, 2017. — С. 117—121.
17. Логанов Ю. Д., Соболевский В. В., Симонов В. М. Открытые фонтаны и борьба с ними: Справочник. — М.: Недра, 1991. — 189 с.
18. Сизов О. С. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. — 2015. — № 1. — С. 53—68.
19. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.
20. Andreassen K., Nilssen E. G., Degaard C. M. Analysis of shallow gas and fluid migration within the Plio-Pleistocene sedimentary succession of the SW Barents Sea continental margin using 3D seis-

- mic data // Geo-Marine Letters. — 2007. — Vol. 27, № 2-4. — P. 155—171.
21. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. — Cambridge, 2007. — 475 p.
22. Kizyakov A., Khomutov A., Zimin V. et al. Microrelief Associated with Gas Emission Craters: Remote Sensing and Field-Based Study // Remote Sensing. — 2018. — Vol. 10, iss. 5. — URL: <https://doi.org/10.3390/rs10050677>.
23. Vaughan A. BP's Deepwater Horizon bill tops \$65bn // The Guardian. — 2018. — 16 Jan. — URL: <https://www.theguardian.com/business/2018/jan/16/bps-deepwater-horizon-bill-tops-65bn>.

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), научный руководитель кафедры геоэкологии, профессор, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: vib@pgc.su.

Сизов Олег Сергеевич, кандидат географических наук, доцент, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), главный специалист, АО «Российские космические системы» (127490, Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Мажаров Александр Викторович, заместитель губернатора ЯНАО, директор департамента внешних связей ЯНАО, Правительство ЯНАО (629008, Россия, Салехард, просп. Молодежи, д. 9), dmms@ved.gov.yanao.ru.

Богоявленский Игорь Васильевич, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), заведующий лабораторией, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Никонов Роман Александрович, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), инженер, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Кишанков Алексей Владимирович, младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Каргина Татьяна Николаевна, младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: tatyana.nik92@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 88—105. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105.

EARTH DEGASSING IN THE ARCTIC: REMOTE AND FIELD STUDIES OF THE SEYAKHA CATASTROPHIC GAS BLOWOUT ON THE YAMAL PENINSULA

Bogoyavlensky V. I.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Sizov O. S.

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), "Russian Space Systems" (Moscow, Russian Federation)

Mazharov A. V.

Government of the Yamal-Nenets Autonomous Region (Salekhard, Russian Federation)

Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kishankov A. V.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

- mic data // Geo-Marine Letters. — 2007. — Vol. 27, № 2-4. — P. 155—171.
21. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. — Cambridge, 2007. — 475 p.
22. Kizyakov A., Khomutov A., Zimin V. et al. Microrelief Associated with Gas Emission Craters: Remote-Sensing and Field-Based Study // Remote Sensing. — 2018. — Vol. 10, iss. 5. — URL: <https://doi.org/10.3390/rs10050677>.
23. Vaughan A. BP's Deepwater Horizon bill tops \$65bn // The Guardian. — 2018. — 16 Jan. — URL: <https://www.theguardian.com/business/2018/jan/16/bps-deepwater-horizon-bill-tops-65bn>.

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), научный руководитель кафедры геоэкологии, профессор, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: vib@pgc.su.

Сизов Олег Сергеевич, кандидат географических наук, доцент, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), главный специалист, АО «Российские космические системы» (127490, Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Мажаров Александр Викторович, заместитель губернатора ЯНАО, директор департамента внешних связей ЯНАО, Правительство ЯНАО (629008, Россия, Салехард, просп. Молодежи, д. 9), dmms@ved.gov.yanao.ru.

Богоявленский Игорь Васильевич, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), заведующий лабораторией, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Никонов Роман Александрович, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), инженер, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Кишанков Алексей Владимирович, младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Каргина Татьяна Николаевна, младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: tatyana.nik92@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В. и др. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 88—105. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105.