

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВОРОНКИ ГАЗОВОГО ВЫБРОСА И ДИНАМИКА ЭТОЙ ФОРМЫ НА ЦЕНТРАЛЬНОМ ЯМАЛЕ

А.И. Кизяков¹, А.В. Сонюшкин², М.О. Лейбман^{3,4}, М.В. Зимин², А.В. Хомутов³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; akizyakov@mail.ru

² Инженерно-технологический центр “СКАНЭКС”, 123995, Москва, Бережковская наб., 20, стр. 10, Россия

³ Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия

⁴ Тюменский государственный нефтегазовый университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

Приведена характеристика рельефа участка образования воронки на Центральном Ямале по результатам анализа данных дистанционного зондирования, включая данные космической стереосъемки сверхвысокого разрешения, и материалов полевого обследования. Определен временной интервал образования воронки поздней осенью 2013 г. Получены сведения о морфологии изучаемого участка до и после образования воронки, в частности, документально подтверждено существование бугра диаметром основания 45–58 м и высотой около 5–6 м на месте воронки. В результате анализа разновременных цифровых моделей рельефа рассчитан объем воронки и отложенного на бруствере материала. Объем вынесенного материала почти в шесть раз больше объема материала, обнаруженного в бруствере. Разница определяется значительным количеством льда, составлявшего основную часть материала бугра и оттаявшего после выброса. По результатам полевых наблюдений этот лед вскрывается в стенках цилиндрической части воронки. Определены темпы роста диаметра внутренней части воронки вследствие таяния ее ледяных стенок и темп ее затопления водой за летний период.

Воронка газового выброса, подземный лед, дистанционные данные, стереосъемка, цифровая модель рельефа

GEOMORPHOLOGICAL CONDITIONS OF THE GAS-EMISSION CRATER AND ITS DYNAMICS IN CENTRAL YAMAL

A.I. Kizyakov¹, A.V. Sonyushkin², M.O. Leibman^{3,4}, M.V. Zimin², A.V. Khomutov³

¹ Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; akizyakov@mail.ru

² ScanEx Research and Development Center, 119021, Moscow, Berezhkovskaya embank., 20/10, Russia

³ Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia

⁴ Tyumen State Oil and Gas University, 625000, Tyumen, Volodarskogo str., 38, Russia

This paper presents the characteristics of the relief within the area of crater formation in Central Yamal, based on the analysis of remote sensing data, including stereo-pair very high resolution data as well as field observations. Time interval of the crater formation was defined as late fall 2013. Data on the morphology of the studied area before and after the crater formation were obtained. The existence of the bulge with the base diameter 45–58 m and height of about 5–6 m in place of the crater was documented. Analysis of multi-temporal digital elevation models allowed calculating the volume of the crater and the parapet formed around it. The volume of discharged material is almost 6 times larger than the volume of material found in the parapet. The difference is due to a significant amount of ice that, according to the results of field observations, is exposed in the walls of the cylindrical portion of the crater, and, apparently, comprised a major part of bulge material that thawed after ejection. The rate of the crater increase in diameter due to melting of its ice walls and the rate of its filling with water over the summer period were determined.

Gas-emission crater, ground ice, remote-sensing data, satellite stereo pair, digital elevation model

ВВЕДЕНИЕ

Обнаруженная в центральной части полуострова Ямал воронка (рис. 1) сразу стала объектом, который привлек к себе пристальное внимание специалистов-мерзлотоведов, изучающих особенности строения толщ многолетнемерзлых пород и развитие криогенных процессов, а также специалистов, обеспечивающих безопасность хозяйственных объектов в криолитозоне.

Губернатором Ямало-Ненецкого автономного округа с целью первичного обследования было организовано посещение объекта группой специалистов, в состав которой вошла М.О. Лейбман. В ходе рекогносцировочного обследования воронки в июле 2014 г. было составлено первое описание этого уникального природного образования, получены фактические данные по морфометрии и

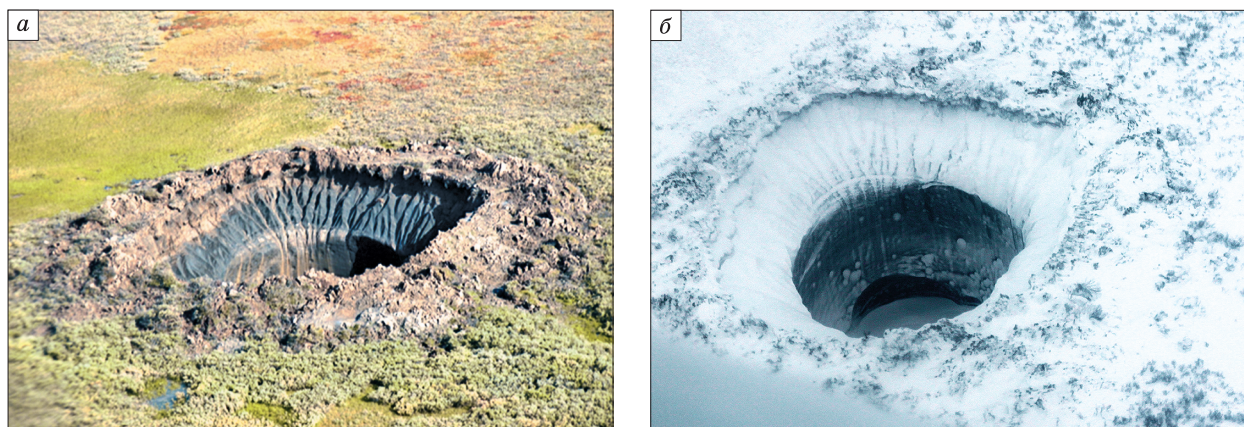


Рис. 1. Внешний вид воронки газового выброса:

а – 25.08.2014 (фото М.О. Лейбман); *б* – 08.11.2014 (фото А.И. Кизякова).

составу пород. По результатам обследования был подготовлен отчет, представленный в правительство Ямало-Ненецкого автономного округа. Для обозначения этого необычного природного образования исследователями был предложен термин “воронка газового выброса” [Лейбман, Плеханов, 2014].

В районе воронки распространены фрагменты четвертой террасы высотой 40–60 м, сложенной верхнечетвертичными отложениями казанцевской свиты (m, mlQ_{III}^1), сформированной в морских и прибрежно-морских условиях [Ананьева, 1997]. Сама воронка находится на границе хасырея и склона террасовидной поверхности, расчлененной эрозионно-термокарстовыми процессами. В 4 км западнее проходит магистральный газопровод “Бованенково–Ухта”.

В ходе второго кратковременного обследования воронки в августе 2014 г. были выполнены измерения основных параметров воронки, документирование разреза, вскрывающегося в стенках. В сентябре 2014 г. геолого-геофизические и геохимические исследования (с отбором проб почв, воды из озера) проведены экспедицией Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН при участии ООО “Газпром ВНИИГАЗ” [Эпов и др., 2014].

В ноябре 2014 г. Российским центром освоения Арктики и Департаментом по науке и инновациям ЯНАО было организовано новое обследование с целью уточнения строения воронки и отбора образцов льда и вмещающих отложений из стенок воронки. Тогда же авторами статьи был проведен анализ космических снимков для определения времени образования воронки.

Следующим этапом исследований стал подбор и анализ космических снимков оптического диапазона для геоморфологической характери-

ки местности до образования воронки, после ее возникновения и при ее дальнейшем развитии.

Целью настоящей статьи является выявление произошедших изменений рельефа участка образования воронки и определение ее морфометрических характеристик. Для этого были привлечены материалы полевых обследований и данные дистанционного зондирования.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОГО ИНТЕРВАЛА ОБРАЗОВАНИЯ ВОРОНКИ

Для определения времени образования воронки были проанализированы космические снимки спутниковых систем Landsat 8 и SPOT 5. Используемые для решения данной задачи снимки со спутника Landsat 8 имеют ряд неоспоримых достоинств: 1) достаточное пространственное разрешение снимков (15 м в панхроматическом канале) для дешифрирования форм мезорельефа размерностью более 15 м; 2) достаточно высокая для некоммерческих данных периодичность съемки одного и того же участка земной поверхности; 3) бесплатный и удобный доступ к архивам снимков.

Космические снимки Landsat 8 получены из базы данных USGS через сервис EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Снимок SPOT 5 от 01.10.2013 г. получен из архива ИТЦ “СканЭкс” в рамках проекта “Геопортал МГУ”. На этом снимке с высоким пространственным разрешением (2,5 м на местности) зафиксировано наиболее позднее из отснятых состояние поверхности “до образования воронки” (рис. 2). Полный перечень использованных материалов дистанционного зондирования представлен в табл. 1.

Для пространственного совмещения космических снимков в качестве базового использовался снимок SPOT 5 с наиболее высоким разреше-

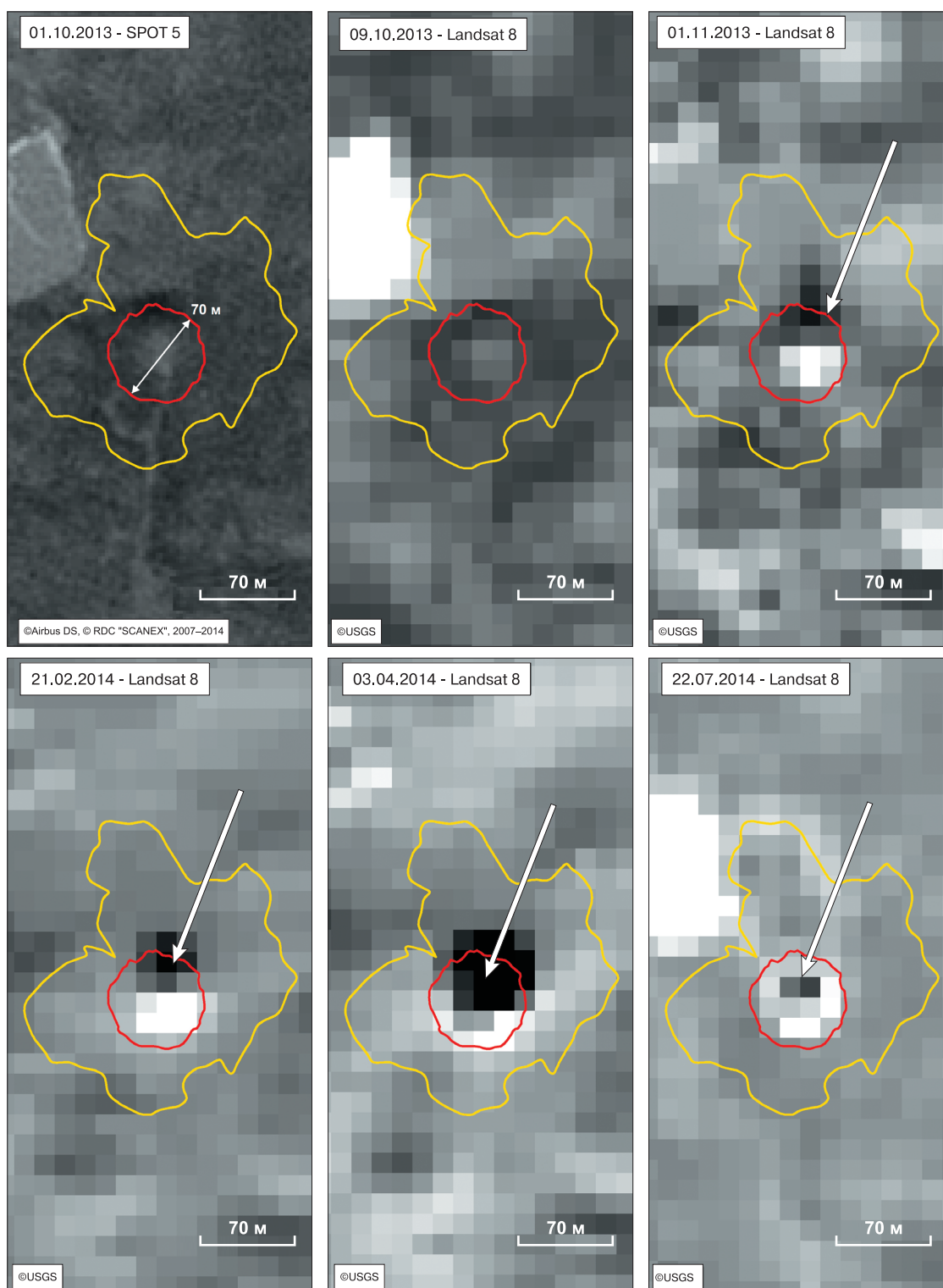


Рис. 2. Последовательное состояние изучаемого участка на данных дистанционного зондирования. Пятно с низкой отражательной способностью появляется на снимках (показано стрелкой), начиная с 01.11.2013. Красной линией оконтурен брусстер воронки, желтой – зона обнаружения выброшенного из воронки материала.

Таблица 1.

**Космические снимки, использованные
для определения временного интервала образования воронки**

Дата	Съемочная система	ID сцены	Пространственное разрешение панхроматического канала, м
22.07.2014	Landsat 8	LC81670112014203LGN00	15
03.04.2014	Landsat 8	LC81650112014093LGN00	15
16.03.2014	Landsat 8	LC81670112014075LGN00	15
21.02.2014	Landsat 8	LC81660112014052LGN00	15
01.11.2013	Landsat 8	LC81660112013305LGN00	15
09.10.2013	Landsat 8	LC81650112013282LGN00	15
01.10.2013	SPOT 5	142204_1310010650116_1A	2,5
03.07.2013	Landsat 8	LC81670112013184LGN00	15

нием. На снимки наложен контур “бруствера”, окружающего кратер, оцифрованный по снимкам сверхвысокого разрешения 2014 г. Внешний диаметр бруствера около 70 м. На снимки также нанесена граница области, в пределах которой во время обследования 16.07.2014 г. были обнаружены фрагменты выброшенных пород.

Полевые наблюдения июля 2014 г. позволили предположить, что воронка образовалась не раньше осени 2013 г. Это следовало из характера растительности в зоне выброса (свежие листья ивы пробивались через комья супеси, покрывавшей ветви), состояния пород бруствера (остроугольные “обломки” суглинка и глины не были размыты дождями) и стенок воронки (заметны заколы и трещины, еще не сглаженные потоками, козырек из дернины вокруг воронки в значительной степени сохранился и нависал над отверстием). Это позволило сузить диапазон дат для отслеживания времени образования воронки до осенне-зимнего периода 2013–2014 гг. На космических снимках до 09.10.2013 г. на месте нынешней воронки находился бугор диаметром основания 45–58 м, что было подтверждено результатами дешифрирования материалов сверхвысокодетаальной съемки от 09.06.2013 г. На снимках этого участка, начиная с 01.11.2013 г., надежно дешифрируется пятно с низкой отражательной способностью. Размеры этого пятна увеличиваются до 03.04.2013 г. Предположительно пятно на снимке захватывает образовавшуюся воронку и выброшенный на бруствер минеральный сильнообводненный материал. Летом поверхность бруствера частично иссушилась,

и оголенный минеральный грунт (глины, суглинки) по периметру воронки дает высокое отражение – отображается на снимках светлым кольцом, окружающим центральную, внутреннюю часть воронки.

Таким образом, по результатам анализа космических снимков установлено, что воронка образовалась в интервале между 09.10.2013 г. и 01.11.2013 г.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОРФОЛОГИИ УЧАСТКА
ОБРАЗОВАНИЯ ВОРОНКИ**

Ввиду отсутствия как обновляемых крупномасштабных топографических карт, планов, так и инструментальных полевых измерений единственным вариантом реконструкции рельефа для определения произошедших изменений является использование стереорежима космической съемки сверхвысокого пространственного разрешения. Для нахождения морфологических характеристик рельефа исследуемого участка до и после образования воронки необходимо построение соответствующих цифровых моделей рельефа (ЦМР). С этой целью проведен анализ глобальных каталогов космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. В результате поиска выбраны и приобретены две разновременные стереопары космических снимков со спутника WorldView-1, наиболее близкие к временному интервалу образования воронки (табл. 2).

Фотограмметрическая обработка космических снимков проводилась в специализированном программном пакете ScanEx IMAGE Processor.

Таблица 2.

**Космические снимки, использованные
для определения морфологии рельефа изучаемого участка**

Дата	Съемочная система	ID снимка	Пространственное разрешение на местности, м	Стереопара
15.06.2014	WorldView-1	102001002FA53E00	0,5	+
15.06.2014	WorldView-1	102001002FE69600	0,5	
09.06.2013	WorldView-1	102001002255D700	0,5	+
09.06.2013	WorldView-1	1020010023D37800	0,5	

Она включала следующие этапы: 1) взаимное ориентирование левых и правых снимков для каждой стереопары; 2) трансформирование левых и правых снимков в базисную (эпилярную) плоскость; 3) автоматическое измерение связующих точек; 4) автоматическое стереотождествление одноименных точек с использованием метода глобальной оптимизации (*simulated annealing*); 5) пересчет карты параллакса в ЦМР и постобработка (сглаживание, интерполяция пустот); 6) ортотрансформирование левых и правых снимков при помощи коэффициентов дробно-рациональной функции (RPC) по полученным ЦМР. В результате обработки стереопар были получены ортофотопланы с проекцией пикселя на местности 0,5 м и ЦМР исследуемого участка с плотностью узлов 1 м по состоянию на 09.06.2013 и 15.06.2014 г. в универсальной поперечно-цилиндрической проекции Меркатора (UTM) и высотами относительно эллипсоида WGS84. Затем, для удобства интерпретации, эллипсоидальные высоты были приведены к высотам квазигеоида EGM96. Далее абсолютные высоты приведены по модели EGM96, которая отличается от Балтийской системы высот.

По материалам высокодетальной (2,5 м) и сверхвысокодетаальной (0,5 м) космической съемки надежно дешифрируются элементы формы рельефа, соответствующие состоянию ключевого участка до и после образования воронки.

Общая характеристика рельефа исследуемой территории

Для анализа изменения рельефа исследуемого участка использованы космические снимки середины июня 2013 и 2014 гг. В оба сезона пониженные элементы рельефа, подножия склонов покрыты нарастающим снегом, а в озерах сохранился ледовый покров.

В северной части изучаемого участка распространены узкие вытянутые останцы приводораздельной поверхности высотой 42–48 м (по модели EGM96), расчлененной эрозионно-термокарстовыми процессами (рис. 3). Вероятно, это поверхность четвертой казанцевской равнины. На отдельных участках террасовидной поверхности распространены полигональные формы микрорельефа, обусловленного морозобойным растрескиванием.

В верхней части некоторых долин, с различных сторон подрезающих водораздельную поверхность, расположены небольшие озера диаметром 80–230 м. Наличием озер и спущенных озерных котловин обусловлена округлая в плане форма расширенных эрозионных долин, врезающихся в приводораздельные поверхности. На склонах и берегах озер широко распространены криогенные оползни.

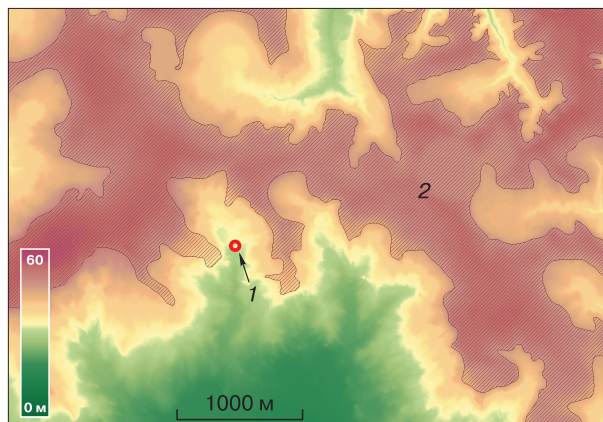


Рис. 3. Обзорная цифровая модель рельефа района расположения воронки.

ЦМР построена по стереопаре WorldView-1 от 15.06.2014; 1 – внешняя граница брусстера воронки; 2 – поверхность останцов четвертой казанцевской террасы.

Исследуемый объект расположен южнее останца четвертой казанцевской равнины на поверхности высотой 19–22 м. Эта поверхность представляет собой небольшой, относительно выровненный участок в верховье эрозионного вреза – субмеридиональной долины шириной 500–700 м, переходящей южнее в более крупную долину с высотой днища 10–12 м, через систему озер соединяющуюся с долиной р. Мьяронгъяха (бассейн р. Морды-Яха). В пределах неровной, расчлененной оврагами расширенной части в верховье долины можно выделить более низкую, относительно выровненную поверхность хасырея размером примерно 160 × 240 м. В 75 м к северо-западу от воронки в пределах хасырея расположено остаточное озеро размером 95 × 115 м (рис. 4).

В днище хасырея развита тундровая разнотравная луговая растительность. Склоны приводораздельной поверхности и частично поверхность днища долины покрыты кустарниковой растительностью.

Микрорельеф участка до образования воронки

Рельеф исследуемого участка до образования воронки был восстановлен по цифровой модели рельефа, построенной по стереопаре снимков WorldView-1 от 09.06.2013 г. В июле 2013 г. на месте воронки существовал бугор – положительная форма рельефа, диаметром в основании 45–58 м, относительной высотой 5–6 м (рис. 5; 6, а, б). Гипсометрические профили, пересекающие эту форму, представлены на рис. 7. Вершина бугра покрыта кочками с травянистой растительностью, у его подножия росли кусты ивы.

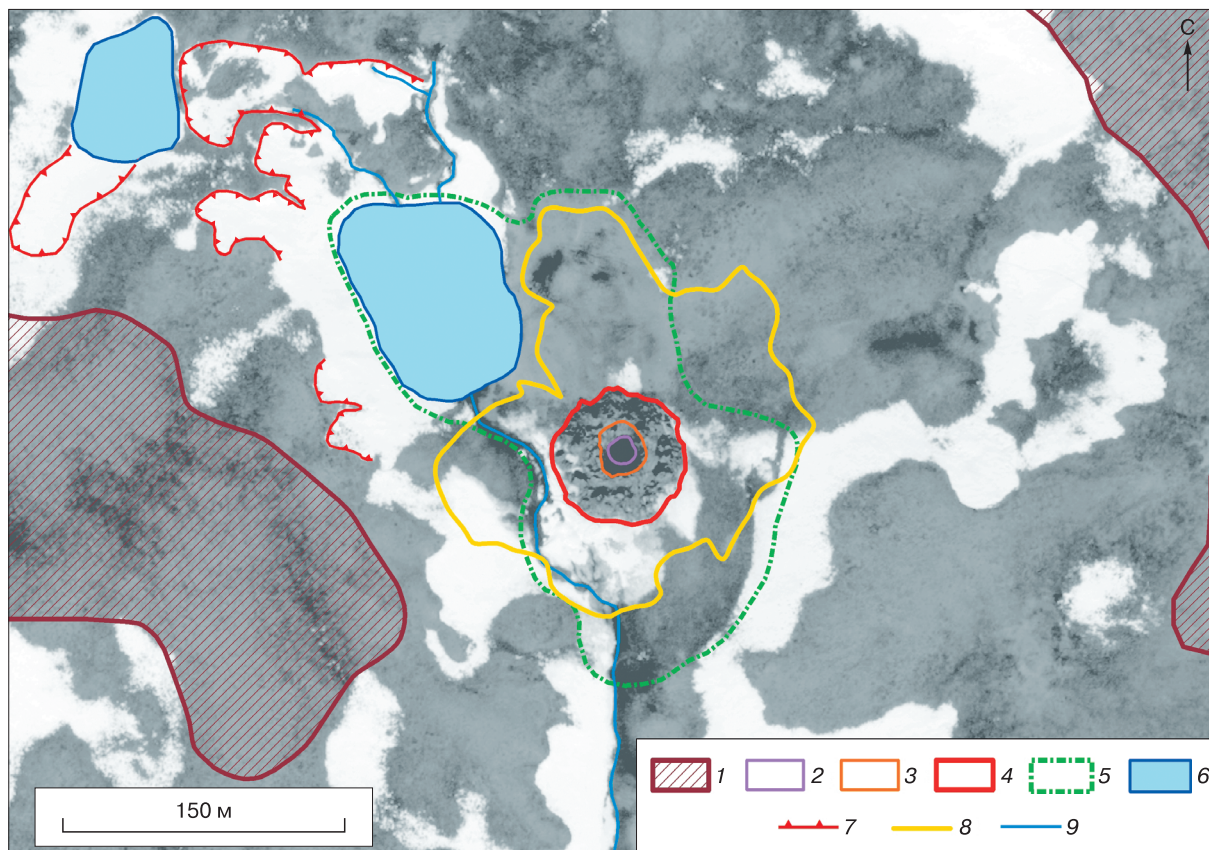


Рис. 4. Геоморфологическая схема изучаемого участка.

1 – приводораздельная поверхность; 2 – контур цилиндрической части воронки; 3 – бровка воронки; 4 – контур бруствера воронки; 5 – граница хасырея; 6 – озера; 7 – границы криогенных оползней; 8 – границы разлета блоков дернины и пород; 9 – водотоки.

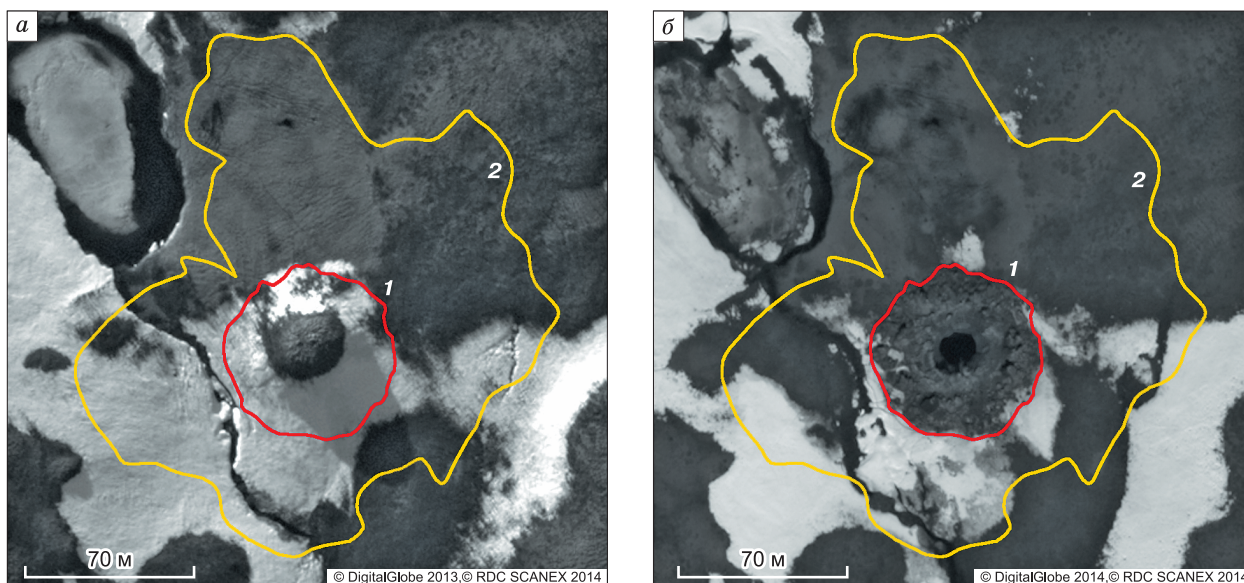


Рис. 5. Отображение изучаемого участка на космических снимках сверхвысокого разрешения.

а – состояние участка до образования воронки (снимок WorldView-1 от 09.06.2013); *б* – существующая воронка (снимок WorldView-1 от 15.06.2014); 1 – внешняя граница бруствера воронки; 2 – граница зоны разброса материала из воронки.

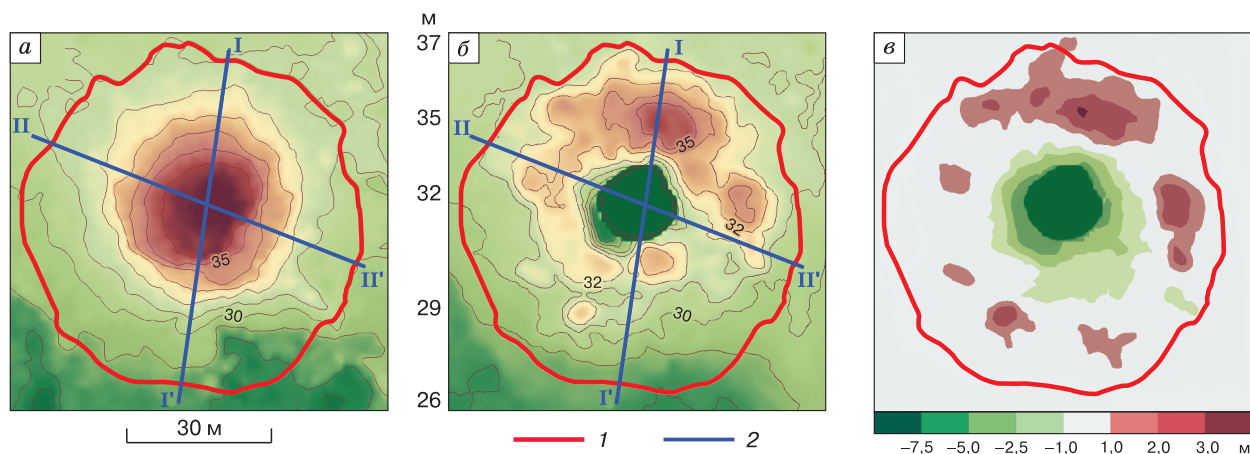


Рис. 6. Фрагменты цифровых моделей рельефа исследуемого участка, построенных в результате обработки стереопар космических снимков.

a – ЦМР по состоянию на 09.06.2013; *б* – ЦМР по состоянию на 15.06.2014; *в* – изменение гипсометрических отметок рельефа после образования воронки; 1 – внешняя граница бруствера воронки; 2 – гипсометрические профили I–I' и II–II'.

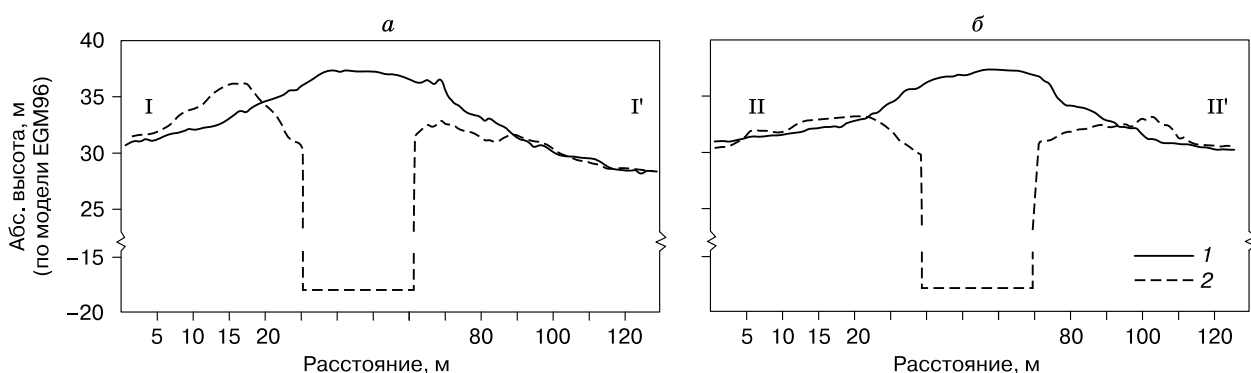


Рис. 7. Гипсометрические профили, построенные по цифровым моделям рельефа 2013 и 2014 гг.

a – по линии I–I'; *б* – по линии II–II' (см. рис. 6). 1 – профили по состоянию на 09.06.2013; 2 – профили на 15.06.2014.

Микрорельеф участка после образования воронки

Морфометрические характеристики образовавшейся формы определены в ходе полевых обследований и в результате дешифрирования космического снимка от 15.06.2014 г.

В строении образовавшейся формы выделяется верхняя часть (раструб), представляющая собой наклонную воронкообразную поверхность, переходящую через достаточно резкий перегиб в вертикальные стенки нижней части воронки (рис. 8). По результатам измерений, выполненных в ноябре 2014 г., перегиб в вертикальном профиле стенок воронки находится на глубине около 8 м от ее бровки. Верхняя наклонная часть воронки сложена высокольдистой толщей, представленной субвертикально ориентированными прослоями льда и суглинка (рис. 9). Ниже перегиба, в верти-

кальных и местами нависающих стенках цилиндрической нижней части, вскрывается залежь льда с редкими вертикально ориентированными, облекающими стенки воронки прослоями минеральных включений алевритового состава. В июне–июле 2014 г. в нижней части северо-восточной стенки воронки выше уровня воды находился грот, уходящий в глубь стенки примерно на 5–8 м.

Воронка окружена бруствером – набросанными блоками супеси, суглинка и глины, слагающими верхнюю часть разреза, и кусками дернины с кустами ивы. Высота бруствера изменяется по периметру воронки неравномерно, формируя холмики различной высоты – от 0,5 до 4,0 м (см. рис. 5, 6). Отдельные фрагменты породы и дернины обнаружены на удалении до 120 м. Размер обнаруженных блоков обратно пропорционален расстоянию от воронки. Вблизи воронки размеры

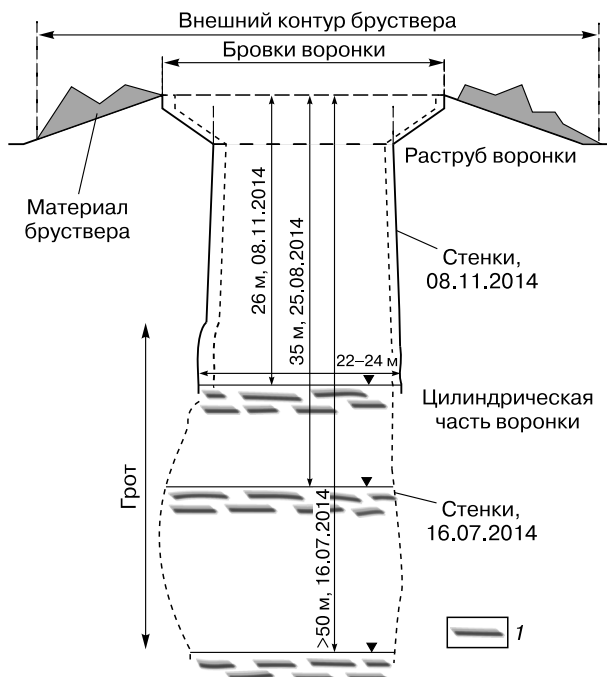


Рис. 8. Принципиальная схема строения воронки.

1 – вода озера на дне воронки.



Рис. 9. Вертикальная слоистость в толще, обнажающейся в наклонных стенках раструба воронки.



Рис. 10. Последовательные изменения грота в северо-восточной стенке воронки:

а – состояние на 25.07.2014 (В.А. Пушкарев, фото из вертолета); *б* – 25.08.2014 (М.О. Лейбман, фото с бровки воронки); *в* – 08.11.2014 (В.А. Пушкарев, фото со льда озера на дне воронки).

блоков от 1 м и более, на расстоянии 120 м – 10–20 см в поперечнике. Значительные куски дернины размером 50 × 100 см обнаружены на удалении 60 м [Лейбман, Плеханов, 2014].

На космических снимках WorldView-1 от 15.06.2014 г. нижняя цилиндрическая часть воронки отображается как темный центральный участок с низкой отражательной способностью из-за тени на внутренних стенках (см. рис. 5). Диаметр этой цилиндрической части воронки, по результатам дешифрирования космических снимков, составлял 15–16 м. Диаметр верхней части раструба воронки по бровкам с растительностью 25–29 м. Диаметр бруствера (по внешней границе выброшенного материала вокруг раструба воронки) составлял 70–72 м, как по данным дешифрирования снимков WorldView-1 от 15.06.2014 г., так и полевого обследования 16.07.2014 г.

Из-за небольшого размера воронки и особенностей стереосъемки, выполненной с углами, значительно отличающимися от надира, невозможно построить достоверный рельеф внутренней части воронки. В частности, в затененной центральной части воронки невозможно определить ее глубину. В связи с этим возникла необходимость корректировки полученной ЦМР. В июне 2014 г. инструментальных измерений глубины воронки не проводилось, участками обследования глубина оценена как превышающая 50 м. Это значение использовано при корректировке ЦМР на 15.06.2014 г., в пределах контура внутренней цилиндрической части воронки (уверенно дешифрируемого на космоснимках) назначена высота минус 8 м. Стенки цилиндрической части воронки приняты вертикальными.

В результате вычитания ЦМР 2014 и 2013 гг. (см. рис. 5) рассчитан объем вынесенного материала (объемы частично снесенного бугра и пород, выброшенных из воронки), составивший 11 200 м³, и объем материала, отложившегося по периферии в виде бруствера, – 1940 м³. Объем отложившегося материала почти в 6 раз меньше объема образовавшейся формы. Получившаяся разница (9260 м³) представляет собой объем льда, выброшенного из воронки на дневную поверхность и растаявшего весной–летом 2014 г.

На рис. 6, в представлена схема перераспределения высотных отметок в результате образования воронки. Отрицательные значения соответствуют области с выносом материала из воронки и разрушением бугра. Положительные ареалы соответствуют областям накопления материала в виде бруствера по периметру воронки. Эта схема получена в результате вычитания ЦМР 2014 и 2013 гг. Точности полученных ЦМР находятся в диапазоне 0,5–1,0 м. В связи с этим значения разности высот в диапазоне от плюс 1 до минус 1 м находятся в пределах погрешности моделей и отображены на

схеме белым цветом как область минимальных изменений в уровне поверхности. Для иллюстрации структуры выявленных изменений цветовая шкала создана с непостоянным шагом по высоте для положительных и отрицательных значений, поскольку отрицательные значения имеют более широкий диапазон.

Из рис. 6, в следует, что материал, отложившийся в виде бруствера, неравномерно распределен вокруг воронки по окружности. Наибольшую площадь имеют отложения бруствера с северной стороны воронки, здесь же отмечается максимальная мощность бруствера 3,2 м. В южной и западной частях бруствера отложения фрагментарны, на большей площади они находятся в пределах погрешности модели, т. е. не превышают 1 м по отношению к поверхности 2013 г. Вероятно, выявленная неравномерность распределения отложений бруствера связана со смещением оси выброса относительно вершины бугра либо с наклоном оси выброса.

В ходе полевых обследований, проведенных летом 2014 г., отмечалось интенсивное таяние мерзлых пород в стенках воронки, обрушение блоков пород с бровки. В нижней части воронки образовалось озеро. Скорость заполнения воронки водой определена на основе полевых измерений уровня воды, а также в результате сопоставления фотографий грота в нижней части северо-восточной стенки воронки.

Глубокий грот в нижней части воронки, фиксируемый на фотографиях июня–июля, был затоплен к концу августа 2014 г., подъем уровня озера с 16 июля по 25 августа составил около 15 м (рис. 10). В августе в стенках воронки отмечался значительно менее глубокий грот, который к ноябрю также оказался частично затоплен.

В ходе полевых работ 08.11.2014 г. удалось измерить рулеткой перепад высот от бровки воронки до льда озера, который составил 25,5–26,0 м. Уровень озера с 25 августа по 8 ноября поднялся примерно на 9 м. Этот подъем также фиксируется по изменению высоты от поверхности озера до свода грота. Одновременно с подъемом уровня воды происходило разрастание грота – отступление его тыловой стенки и подъем свода за счет оттаивания льда, в котором он сформирован, примерно на 3–4 м за теплый сезон. Таким образом, за 2014 г. уровень озера в воронке поднялся примерно на 24 м.

Опыт зимних работ на Центральном Ямале показывает, что за зимний период 2014/15 г. воронка может полностью заполниться снегом за счет метелевого переноса. В 2015 г. весеннее таяние снега, накопленного за зиму, приведет к подъему уровня озера минимум на 10 м (около 25 м снега со средней плотностью 0,4 г/м³). Отрыв и падение блоков пород с бровки воронки и таяние

мерзлых пород в раструбе также вносят свой вклад в повышение уровня озера.

Воронка будет полностью затоплена примерно через 1,5–2 года в условиях снегонакопления в зимний период при сохранении темпов оттаивания высокольдистых мерзлых пород, вскрывающихся в стенках.

В результате сопоставления внутреннего диаметра воронки, измеренного на космоснимках и в ходе полевых обследований, выявлено определенное увеличение размеров за период с июня по ноябрь 2014 г.

Диаметр цилиндрической части воронки определен в ходе полевого обследования 16.07.2014 г. путем измерения рулеткой ширины бруствера и вычитания этой величины из диаметра внешней части бруствера, полученного GPS-съемкой. В связи с несовершенством метода диаметр определен в диапазоне 25–30 м в верхней части раструба до 20–25 м в цилиндрической части.

Диаметр был измерен 25.08.2014 г. с помощью рулетки, натянутой между бровками. В измеренной величине (25 м) заложены некоторые погрешности, связанные с визуальным проецированием границ внутренней воронки на рулетку, натянутую в верхней части раструба. В связи со значительной неточностью данные приведенных выше измерений не использовались при расчете динамики размеров воронки. Ближкое значение диаметра внутренней части воронки (28 м) получено в ходе работ в сентябре 2014 г. [Эпов и др., 2014]. Вероятно, ближе к концу теплого сезона более интенсивно отступали верхние части воронки и часть нависающих стенок приобрела небольшой положительный уклон.

Диаметр цилиндрической части воронки с субвертикальными стенками был измерен с высокой точностью лазерным дальномером во время нового обследования 08.11.2014 г. Измерения выполнены на уровне поверхности замерзшего озера (примерно 24–26 м ниже бровки воронки). В этом сечении форма воронки близка к правильному кругу. Диаметры, измеренные в направлениях север–юг и запад–восток, были практически одинаковы 22,3–22,6 м. В гроте стенка воронки была углублена примерно на 2 м, диаметр составил 24,2 м.

Для оценки скорости отступления в расчет приняты только точные прямые измерения диаметра цилиндрической части воронки, составившие 15–16 м в верхней части цилиндра по космоснимкам от 15.06.2014 г., и 22–23 м, измеренные 08.11.2014 г. на глубине 24–26 м ниже бровки воронки. По этим данным размер цилиндрической части воронки увеличился на 7 м с июня по ноябрь 2014 г. Рост диаметра, по-видимому, связан с таянием ледяных стенок за счет прямой солнечной радиации, теплообмена с воздухом (перемешива-

ние воздуха происходит из-за ветра, что отмечено во время работ внутри воронки в ноябре 2014 г.) и стекания талой воды вниз по мерзлым стенкам. Скорость отступления ледяных стенок с июня по ноябрь (т. е. практически за весь теплый сезон 2014 г.) составила 3,5 м.

Данные по скоростям термоденудации стенок, сложенных многолетнемерзлыми породами с залежами подземных льдов на п-ове Ямал, приведены в монографиях Г.И. Дубикова [2002] и Л.Н. Крицук [2010]. Так, на берегу оз. Нейто в местах вскрытия пластовых льдов скорость отступления берега составляла 1,5–3,5 м/год, а на правом берегу р. Сеяха в пределах Бованенковского поднятия скорость отступления стенки ледяного льда на склоне террасы изменялась от 7 до 11 м/год [Дубиков, 2002]. В районе полярной станции Марре-Сале средняя многолетняя скорость отступления стенки льдогрунтовой толщи составляла около 3 м/год [Крицук, 2010]. На побережье Югорского полуострова в 2001–2003 гг. средние скорости роста термоцирков изменялись от 1,6 до 4,2 м/год, максимальные – от 3,3 до 5,8 м/год [Кизяков, 2005]. Средние скорости роста термоцирков на западном побережье острова Колгуев в 2002–2012 гг. составляли 1,3–3,2 м/год [Кизяков и др., 2013].

Рассчитанные нами темпы отступления стенок воронки близки к нижним значениям скоростей термоденудации, характерных для этого района. По-видимому, это объясняется формой обнажения, из-за которой стенки, сложенные льдом, оказываются затенены. В нижней части воронки все-таки возможно застаивание холодного воздуха, снижающее темп оттаивания стенок.

Полученные авторами данные по морфологии и динамике рельефа образовавшейся на Центральном Ямале воронки будут использованы в последующих исследованиях для выявления структуры образовавшейся формы, ее связи с криолитологическим строением вмещающих толщ. В конечном счете совместный анализ этих материалов позволит фактическими данными обосновать гипотезу образования данного объекта. В ноябре 2014 г. с целью уточнения криолитологического строения выполнено опробование стенок воронки.

Исследованный объект является уникальным образованием для криолитозоны. Впервые непосредственно в ходе полевых обследований наблюдается динамика воронки в заключительной фазе своего развития. В связи с этим представляется необходимым организовать полномасштабное изучение воронки и особенностей строения прилегающей территории. Геофизические работы должны быть дополнены бурением на глубину до 50–100 м с опробованием мерзлых монолитов. Организованная и спланированная система работ позволит определить генезис и условия образова-

ния воронки, а также выявить условия, способствовавшие ее образованию. Только на основе этих результатов можно будет приблизиться к прогнозированию возникновения подобных форм, выделению участков потенциально возможного распространения, в том числе с применением данных дистанционного зондирования.

Воронка газового выброса на Ямале была обнаружена в известной степени случайно с борта пролетавшего вертолета. Несмотря на имеющиеся объекты нефтегазового освоения, огромные пространства севера Западной Сибири (и Ямала, в частности) являются малообжитыми, коридоры полета вертолетов весьма узки. На этих территориях не проводится периодических наблюдений, поэтому образование подобных воронок может пройти незамеченным. В этих условиях космическая съемка высокого и сверхвысокого разрешения представляет собой достаточно эффективный инструмент для поиска и раннего обнаружения возникших воронок. Подобный мониторинг целесообразно применять на участках, в пределах которых имеется потенциальная возможность образования подобных форм и где их возникновение представляет опасность для хозяйственной инфраструктуры (поселков, промышленных объектов, линий газо- и нефтепроводов).

В ходе дальнейших исследований необходимо проведение дифференциальной GPS-съемки основных структурных линий образовавшейся воронки и окружающих форм для уточнения построенных ЦМР и определения динамики изменения морфологии воронки.

ВЫВОДЫ

Совместный анализ материалов полевых исследований и серии космических снимков с построением цифровых моделей рельефа “до” и “после” образования воронки позволил сделать следующие выводы.

1. Воронка газового выброса на Центральном Ямале образовалась в период с 09.10.2013 по 01.11.2013 г.

2. Изучаемая воронка пространственно совпадает с бугром (положительной формой рельефа), существовавшим на этом месте до 09.10.2013 г. Размеры бугра составляли: диаметр основания 45–58 м, относительная высота 5–6 м.

4. Верхняя часть воронки, представляющая собой раструб, расположена в пределах существовавшего ранее бугра. Граница между цилиндрической частью воронки и раструбом совпадает по высоте с уровнем поверхности, на которой был расположен бугор. Таким образом, раструб сформирован в пределах отложений, слагавших бугор.

5. Размеры воронки на начало теплого сезона 2014 г. составляли: диаметр цилиндрической части 15–16 м, диаметр по бровкам раструба 25–29 м, диаметр бруствера около 70 м, глубина от бровок до поверхности озера на дне превышала 50 м. К концу 2014 г. диаметр цилиндрической части увеличился до 22–23 м, глубина сократилась до 26 м.

6. За 2014 год уровень озера на дне воронки поднялся примерно на 24 м.

7. Объем вынесенного материала (выброшенного из воронки и частично разрушенного бугра) составляет 11 200 м³. Это почти в 6 раз больше объема материала, отложившегося по периферии воронки (1940 м³). Большая часть выброшенного материала (9260 м³) представляла собой лед, который по результатам полевых наблюдений вскрывается в стенках цилиндрической части воронки.

Полевое обследование уникального природного образования – воронки газового выброса на Центральном Ямале – было организовано НП “Российский Центр освоения Арктики” (директор В.А. Пушкарев), Департаментом международных и внешнеэкономических связей ЯНАО (директор, заместитель губернатора ЯНАО А.В. Мажаров) и Департаментом по науке и инновациям ЯНАО (директор А.Л. Титовский).

Литература

- Ананьева Г.В.** Особенности инженерно-геокриологических условий северного отрезка проектируемой трассы железной дороги Обская–Бованенково // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск, Наука, 1997, с. 116–123.
- Дубиков Г.И.** Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири / Г.И. Дубиков. М., ГЕОС, 2002, 246 с.
- Кизяков А.И.** Динамика термоденудационных процессов на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 1, с. 63–67.
- Кизяков А.И., Зимин М.В., Лейбман М.О., Правиков Н.В.** Мониторинг скорости термоденудации и термоабразии на западном побережье острова Колгуев с использованием материалов космической съемки высокого разрешения // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 4, с. 36–47.
- Крицук Л.Н.** Подземные льды Западной Сибири / Л.Н. Крицук. М., Науч. мир, 2010, 352 с.
- Лейбман М.О., Плеханов А.В.** Ямальская воронка газового выброса: результаты предварительного обследования // Холод'ОК, 2014, № 2(12), с. 9–15.
- Эпов М.И., Ельцов И.Н., Потапов В.В. и др.** Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук, 2014, № 5(59), с. 14–23.
- USGS EarthExplorer.** URL: <http://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 31.07.2014).

Поступила в редакцию
10 декабря 2014 г.