# Оценка рельефообразующего эффекта образования Антипаютинской воронки газового выброса по данным спутниковой стереосъемки

А.И. Кизяков<sup>1,3</sup>, А.В. Сонюшкин<sup>2</sup>, А.В. Хомутов<sup>3,4</sup>, Ю.А. Дворников<sup>3</sup>, М.О. Лейбман<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Москва, 119991, Россия E-mail: akizyakov@.mail.ru <sup>2</sup> Инженерно-технологический центр «СканЭкс», Москва, 121059, Россия E-mail: anvlason@gmail.com <sup>3</sup> Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень, 625000, Россия E-mail: moleibman@mail.ru <sup>4</sup> Тюменский государственный университет, Тюмень, 625003, Россия E-mail: akhomutov@gmail.com

Работа посвящена анализу рельефа, предшествовавшего возникновению Антипаютинской воронки газового выброса на полуострове Гыдан, а также его изменению вследствие образования воронки. Для этого созданы разновременные цифровые модели рельефа, построенные на основе обработки стереопар космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения как до, так и после образования воронки. С относительной точностью 0,35–0,55 м получены морфометрические характеристики форм рельефа рассматриваемого участка. Установлено, что воронка приурочена к бровке склона эрозионной формы — балки, врезанной в террасовидную поверхность высотой 30–50 м. Образованию Антипаютинской воронки предшествовало существование бугра высотой около 2 м, диаметром основания около 20 м. Размеры бугра, а также начальный диаметр цилиндрической части воронки меньше, чем у изученной ранее подобной формы на Центральном Ямале. Для Антипаютинской воронки характерно отсутствие выраженных в рельефе (высотой более 1 м) аккумулятивных тел из выброшенного материала, зафиксированных на цифровой модели рельефа, что также отличает ее от Ямальской воронки. Полученные данные показали, что поиск бугров-предшественников воронок газового выброса не может основываться на размерах бугров из-за их значительных вариаций.

Ключевые слова: воронка газового выброса, полуостров Гыдан, криогенный рельеф, дистанционное зондирование, стереосъемка, цифровая модель рельефа

Одобрена к печати: 17.05.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-67-75

## Введение

Воронка газового выброса (ВГВ), известная как Антипаютинская воронка (АнтВГВ), расположена в западной части полуострова Гыдан в 100 км к северо-западу от поселка Антипаюта, в верховьях реки Юрибей (*puc. 1A*). АнтВГВ образовалась в зоне тундры со сплошным распространением многолетнемерзлых пород, примерно на той же широте, что и первая известная Ямальская воронка (ВГВ-1). В этом районе приводораздельные пространства представлены останцами третьей аллювиально-морской террасы высотой 30–50 м. Останцы окружены более низкими аллювиальными террасами и поймой реки Юрибей и притоков. Антипаютинская воронка расположена на периферии останца третьей террасы, на склоне врезанной в него балки.

#### Методы и результаты обработки космических снимков

По данным, полученным от администрации Тазовского района на основании сведений от местных жителей, АнтВГВ образовалась 27 сентября 2013 г. Из глобальных каталогов космической съемки выбраны и заказаны сцены сверхвысокодетальной съемки, наиболее близкие ко времени образования АнтВГВ и составляющие стереопары. Минимальный временной интервал существующих в каталогах и возможных к заказу стереопар составил 13,5 мес (см. *maбл. 1*). Фотограмметрическая обработка стереопар космических снимков выполнялась в программном пакете ScanEx IMAGE Processor в следующей последовательности: взаимное ориентирование снимков по коэффициентам рационального многочлена третьей степени (Rational Polynomial Coefficients, RPC); автоматизированное измерение связующих точек; создание нормализованной стереопары (трансформирование снимков в эпиполярную плоскость); автоматизированное построение цифровых моделей поверхности; постобработка полученных цифровых моделей поверхности, в состав которой входило заполнение пустот и артефактов, являющихся следствием неточного вычисления продольного параллакса, при автоматизированном стереоотождествлении; трансформирование полученных моделей в ортографическую проекцию; автоматизированное построение ортофотопланов по левым и правым снимкам стереопар.



Рис. 1. Схема расположения воронок газового выброса и полевые фотографии АнтВГВ: А — расположение АнтВГВ на полуострове Гыдан показано кружком, ВГВ-1 на Центральном Ямале треугольником (в качестве картографической основы использовано покрытие с сервера http:// kosmosnimki.ru/); Б — фотография АнтВГВ с вертолёта (http://ura.ru/news/1052185773, автор — М. Лапсуй); В — фотография АнтВГВ от 09.07.2014 (автор — Х.С. Окотэтто)

таолица 1. космические снимки, использованные для построения цип	Таб	лица 1	l. K	Сосмические	снимки,	использованные	для пост	гроения	ЦM
--	-----	--------	------	-------------	---------	----------------	----------	---------	----

Съемочная система	Дата съемки	Азимут сканирования, град	Угол возвыше- ния, град	Высота съемки Н, км	Пространственное разрешение панхро- матического канала (GSD), м	Стерео- пара
WorldView-2	2013-08-21	27,5	77,0	770	0,48	
WorldView-2	2013-08-21	205,8	60,0	770	0,55	+
WorldView-1	2014-10-11	335,9	64,8	440	0,58	
WorldView-1	2014-10-11	258,1	63,6	440	0,62	

В результате обработки стереопар построены цифровые модели поверхности (ЦМР) с шагом сетки в 1 м в универсальной поперечно-цилиндрической проекции Меркатора (Universal Transverse Mercator, UTM) и высотой относительно эллипсоида WGS84. Эллипсоидальная высота приведена к высоте квазигеоида EGM2008 (*рис. 2*). Полученные значения абсолютной высоты отличаются на 2,5–5 м от Балтийской системы высот. Для рассматриваемого ключевого участка можно условно отождествить понятия цифровой модели рельефа и цифровой модели поверхности, так как высота тундровой растительности здесь не превышает 0,5 м.



Рис. 2. Космические снимки ключевого участка расположения АнтВГВ с наложенными горизонталями по построенным ЦМР: слева — снимок WorldView-2 от 21.08.2013 (до образования воронки); справа — снимок WorldView-1 от 11.10.2014 (после образования воронки). Сплошной белой линией обозначена бровка воронкообразной верхней части АнтВГВ, пунктирной белой линией — бровка цилиндрической части по состоянию на 11.10.2014

Для оценки относительной точности полученных ЦМР можно использовать упрощенную формулу:

$$E_{\text{OTH}} = \frac{H}{B} \cdot GSD,\tag{1}$$

где H — высота съемки; B — базис стереосъемки; GSD — размер проекции пикселя на местность. Для вычисления базиса стереосъемки использовались значения углов ориентации космических аппаратов в момент съемки, приведенные в файлах с сопроводительной информацией (см. *табл. 1*). Используя значения азимутов сканирования и углов возвышения по работе (Choi, Kang, Shin, 2012) вычислено отношение базиса стереосъемки к высоте съемки. Для стереопары за 2013 г. эта величина составила 0,73, а за 2014 г. — 0,55. Подставив в формулу (1) среднее значение размера проекции пикселя снимков, формирующих пары, получим значения относительной ошибки 0,7 м для пары 2013 г., и 1,1 м для пары 2014 г. Применение современных методов стереоотождествления с субпиксельной точностью позволяет уменьшить рассчитанные значения относительной ошибки по крайней мере в два

раза. Таким образом, относительную точность построенных ЦМР можно оценить как 0,35 м для 2013 г. и 0,55 м для 2014 г. Изменения высоты поверхности до 0,9 м нами не анализируются, поскольку находятся в пределах погрешности полученных продуктов стереосъемки.

Цифровая модель рельефа ключевого участка позволяют определить морфологические характеристики рельефа и их изменение в связи с образованием АнтВГВ. Распространенные в пределах рассматриваемого участка останцы третьей террасы значительно расчленены эрозионно-термокарстовыми процессами. Склоны изрезаны эрозионными формами — оврагами и балками, вдающимися вглубь останцов. Поверхность третьей террасы покрыта формами полигонального микрорельефа с пониженными канавками над жилами льда. На бровках склонов и вблизи водоразделов распространены ветровые раздувы, лишенные растительности. На перегибе склона с полигональным микрорельефом и ветровыми раздувами локализована АнтВГВ (*рис. 1Б* и *3А*).

Для характеристики изменений в рельефе построены гипсометрические профили, пересекающие сформировавшуюся воронку через ее центр (*puc. 3Б–Е*). Профиль А-О-В проведен вдоль водораздельной линии (отрезок А-О), и далее спускается в днище эрозионной долины (отрезок О-В) (*puc. 3Б*). На профиле С-О-D фиксируются склоны бугра по обе стороны от его центра (*puc. 3B*). На профиле Е-О-F центр сформировавшейся воронки локализован на перегибе склона, который был уничтожен газовым выбросом (*puc. 3Г*). Отрезок Е-О характеризует наиболее крутую часть исходного склона с наложенным бугром с наибольшим перепадом высот.

Из анализа профилей следует, что в августе 2013 г. на месте воронки существовал невысокий бугор относительной высотой около 2 м и диаметром основания около 20 м. Небольшая относительная высота бугра наиболее явно определяется при анализе гипсометрического профиля В-О-D, проложенного параллельно водораздельной линии снижающегося фрагмента террасовидной поверхности (*рис. 3Д*).

Для проверки, не является ли выявленный бугор типичной полигональной микроформой террасы и склона, построен профиль G-H (*puc. 3E*). Рельеф в створе G-H характеризуется минимальной дифференциацией по высоте, отсутствуют положительные формы относительной высотой 1–2 м, как на профиле B-O-D (см. *puc. 3Д*).

На снимках 2014 г. (см. *рис.* 1Б) и на профилях, построенных по ЦМР (см. *рис.* 3Б–Д) видна сформировавшаяся АнтВГВ, в пределах которой выделяются верхняя воронкообразная часть с наклонными стенками и расположенная ниже цилиндрическая часть с отвесными стенками. Поскольку АнтВГВ находится на перегибе склона, бровка воронки в пространстве имеет наклон — высотные отметки ее верхней части 46–48 м, нижней — около 43 м (*рис.* 3, профили А-О-В и Е-О-F). Диаметр проекции бровки воронки на горизонтальную плоскость к 11.10.2014 составлял 25–28 м. Нижняя часть бровки расположена на 1,5–2 м выше днища балки (см. *рис.* 3Б и  $\Gamma$ ). Таким образом, сохранилась нижняя часть исходного склона, которая отделила воронку от балки. На космических снимках 11.10.2014 на поверхности этой части склона дешифрируются борозды, которые мы связываем с эрозионным размывом выброшенных песчаных пород, перекрывших чехлом исходную поверхность.



Рис. 3. Морфометрические характеристики АнтВГВ и сопоставление с ВГВ-1: А — блокдиаграмма участка расположения АнтВГВ; Б-Е — гипсометрические профили. Сплошная линия — профили по ЦМР на 11.10.2014, пунктирная линия — профили по ЦМР на 21.08.2013; Ж — схема строения АнтВГВ по состоянию на 11.10.2014; И — схема строения ВГВ-1 по состоянию на 16.07.2014

На космических снимках 2014 г. цилиндрическая часть воронки затенена, поэтому мы не знаем, на какой глубине располагалось дно, и была ли там вода. Восстановить достоверный рельеф цилиндрической части по стереопаре невозможно. Наиболее глубокая точка, которую можно выделить коррелятором на стереопаре, имела глубину 10,5 м от верхней бровки. Поскольку цилиндрическая часть воронки и дно воронки на снимках представляют собой темный объект с низкой отражательной способностью, мы предполагаем, что на этой глубине (10–11 м от бровки) находился перегиб от воронкообразной части к цилиндрической. Диаметр центральной цилиндрической части воронки составлял 10–13 м. Основываясь на фотографиях воронки, сделанных летом 2014 г. (см. *рис. 1Б*), определили, что диаметр и глубина цилиндрической части воронки соотносятся как 1:1,9, соответственно, глубина оценивается в 5–6 м. Суммарная глубина воронкообразной и цилиндрической частей составляла примерно 15–19 м.

На летних полевых снимках 2014 г. (см. *рис. 1Б*) виден песчаный материал, выброшенный наружу и окружающий бровку воронки. Как упоминалось выше, песком был перекрыт и вал, отделяющий воронку от днища балки. Тем не менее, при расчете разности между ЦМР 2013 и 2014 гг. участки аккумуляции материала высотой более 1 м (относительная погрешность результатов вычитания ЦМР) не выявлены.

### Обсуждение результатов

В районе АнтВГВ расположены останцы террасы, значительно разрушенные процессами денудации. Рассматриваемая воронка приурочена к бровке балки в отличие от ВГВ-1 на Центральном Ямале, расположенной на подножии пологого склона, переходящего в днище хасырея (Кизяков и др., 2015). Цифровые модели рельефа подтверждают, что образованию АнтВГВ предшествовал небольшой бугор. Этот бугор был существенно меньше, чем предшествовавший образованию ВГВ-1, относительная высота которого составляла 5–6 м, диаметр основания — 45–58 м (Кизяков и др., 2015).

Ранее, основываясь на результатах исследования ВГВ-1, мы считали, что наличие значительного по размерам бугра, выступающего на фоне выровненного рельефа подножия склонов, является индикатором-предшественником воронок и его можно использовать для поиска и прогноза новых воронок. Для уверенного выявления подобных бугров достаточен анализ ЦМР, построенных на основании сверхвысокодетальных космических снимков. Однако новые данные по АнтВГВ свидетельствуют, что воронка образовалась на месте бугра, незначительно выраженного в рельефе. Подобный локальный перепад высот в 1–2 м является обычным для горизонтальных и слабонаклонных участков деградирующего полигонального микрорельефа, когда при частичном вытаивании полигонально-жильных льдов формируются выпуклые полигоны. Подобные перепады высот широко распространены и, соответственно, поиск-прогноз новых воронок, основывающийся на поиске бугров-предшественников, не даст результата.

Анализ изменений в рельефе, полученных вычитанием ЦМР 2013 и 2014 гг., с учетом погрешности метода, свидетельствует об отсутствии аккумулятивных тел, сформировав-

шихся и сохранившихся в этот временной интервал. Значит, если аккумулятивные образования и были в октябре 2014 г., то их мощность меньше относительной погрешности разности ЦМР — до 1 м. Отсутствие зафиксированных на ЦМР аккумулятивных тел можно объяснить следующим образом. На момент космической съемки 2014 г. прошел полный летний сезон существования АнтВГВ. Возможно, что за это время часть материала, выброшенного из АнтВГВ и отложенного непосредственно возле бровки, обрушилась в воронку в результате увеличения ее размера за счет отступания стенок, сложенных льдистыми мерзлыми породами.

На космических снимках 2014 г. визуально дешифрируются единичные крупные ванны 1,1–3 м в диаметре, представляющие собой импактные микроформы, образование которых связано с ударным эффектом от падения выброшенных из воронки крупных блоков мерзлых пород и льда. Поскольку ванны не заполнены оттаявшей породой, в составе упавших блоков в значительной степени преобладал лед. Отсутствие зафиксированных в ЦМР изменений микрорельефа (с учетом точности моделей) также подтверждает предположение, что выброшенный материал был представлен мерзлым песком (достаточно легко размываемым талой водой и дождями) и льдом, который растаял и оставил на месте падения следы включенных в него песчаных пород. Песок также обнажается в верхней части стенок воронки над пластовым льдом и в котловинах выдувания на поверхности. Обнажение пластового льда в стенках воронки отчетливо видно на фотографиях 2014 г. (*рис. 1B*). Возможно, в пределах бугра, на месте которого сформировалась АнтВГВ, была пониженная мощность песка, перекрывающего пластовый лед, за счет куполовидного поднятия кровли льда. Подобным сокращением мощности перекрывающего лед песка можно объяснить отсутствие значимых объемов песка, выброшенного на поверхность.

Отсутствие аккумулятивного бруствера является еще одним отличием АнтВГВ от ВГВ-1. Наличие и сохранность бруствера ВГВ-1 определялись тем, что на поверхность были выброшены суглинистые породы, более устойчивые к размыву дождевыми водами.

Диаметр верхней бровки АнтВГВ и ВГВ-1 через год после их образования был одинаков — около 25–28 м. Диаметр цилиндрической части АнтВГВ (10–13 м) на 20–30% меньше чем у ВГВ-1, однако эти отличия могут быть связаны с неточностью определения границ из-за затемнения внутри воронки.

#### Выводы

Антипаютинская воронка образовалась в тот же временной интервал, что и Ямальская воронка — осенью 2013 г. При сопоставлении двух воронок газового выброса выявлены следующие отличия: Антипаютинская воронка расположена на бровке склона вблизи линии водораздела террасы; относительная высота бугра, предшествовавшего образованию Антипаютинской воронки, составляла около 2 м, диаметр основания — около 20 м. Эти размеры значительно меньше, чем у бугра, на месте которого сформировалась Ямальская воронка; отсутствуют аккумулятивные тела мощностью более 1 м из выброшенного из Антипаютинской воронки материала, в то время как Ямальская воронка окружена высоким, до 4 м, бруствером из выброшенных пород; в окружении Антипаютинской воронки наблюдались ванны — импактные микроформы, образованные ударом блоков мерзлых пород и льда, выброшенных из Антипаютинской воронки. Бугры-предшественники не являются достаточным индикатором для поиска и прогноза образования новых воронок газового выброса при анализе цифровой модели рельефа, поскольку их размер не является решающим.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 16-17-10203).

## Литература

- 1. Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О., Зимин М.В., Хомутов А.В. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 2. С. 15–25.
- Choi S.Y., Kang J.M., Shin D.S. A comparison of accuracies of the RPC models: homo- and heterotype stereo pairs of GeoEye and WorldView images // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress, 25 Aug. – 1 Sept. 2012, Melbourne, Australia. 2012. Vol. I-4. pp. 65–69.

# Assessment of the relief-forming effect of the Antipayuta gas emission crater formation using satellite stereo pairs

A.I. Kizyakov<sup>1,3</sup>, A.V. Sonyushkin<sup>2</sup>, A.V. Khomutov<sup>3,4</sup>, Yu.A. Dvornikov<sup>3</sup>, M.O. Leibman<sup>3,4</sup>

 <sup>1</sup>M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia E-mail: akizyakov@.mail.ru
 <sup>2</sup>ScanEx Research and Development Center, Moscow 121059, Russia E-mail: anvlason@gmail.com
 <sup>3</sup>Earth Cryosphere Institute SB RAS, Tyumen 625000, Russia E-mail: moleibman@mail.ru
 <sup>4</sup>Tyumen State University, Tyumen 625003, Russia E-mail: akhomutov@gmail.com

The paper deals with the analysis of the relief preceding the appearance of gas emission Antipayuta crater on the Gydan Peninsula and topography change due to the crater formation. Digital elevation models were created based on processing very-high spatial resolution stereo pairs both before and after the formation of the Antipayuta crater to characterize the relief. Morphometric characteristics of the landforms in the study area were obtained with a relative accuracy of 0.35–0.55 m. It is established that the crater is confined to the upper edge of the slope of the erosion hollow cut in a terrace-like surface 30–50 m high. The formation of the Antipayuta crater was preceded by the existence of a mound about 2 m in height, with a base diameter of about 20 m. The dimensions of the mound, as well as the initial diameter of the cylindrical part of the Antipayuta crater are smaller than that of the previously studied landform in Central Yamal. For the Antipayuta crater, the absence of the accumulative bodies expressed in relief (more than 1 m high) formed of the ejected material fixed on the Digital Elevation Model, also distinguishes this landform from

the Yamal crater. The data obtained showed that the search for the mounds-predecessors of the gas emission craters cannot be based on the mound dimensions because of their considerable variations.

Keywords: gas emission crater, Gydan peninsula, cryogenic relief, remote sensing, satellite stereo pair, digital elevation model

*Accepted:* 17.05.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-67-75

### References

- Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Leibman M.O., Zimin M.V., Khomutov A.V., Geomorfologicheskie usloviya obrazovaniya voronki gazovogo vybrosa i dinamika etoy formy na Tsentralnom Yamale (Geomorphological conditions of the gas-emission crater and its dynamics in Central Yamal), *Earth Cryosphere*, 2015, No.2, pp. 15–25.
- pp. 15–25.
  Choi S.Y., Kang J.M., Shin D.S., A comparison of accuracies of the RPC models: homo- and heterotype stereo pairs of GeoEye and WorldView images, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress, 25 Aug. 1 Sept. 2012*, Melbourne, Australia, 2012, Vol.I-4, pp. 65–69.