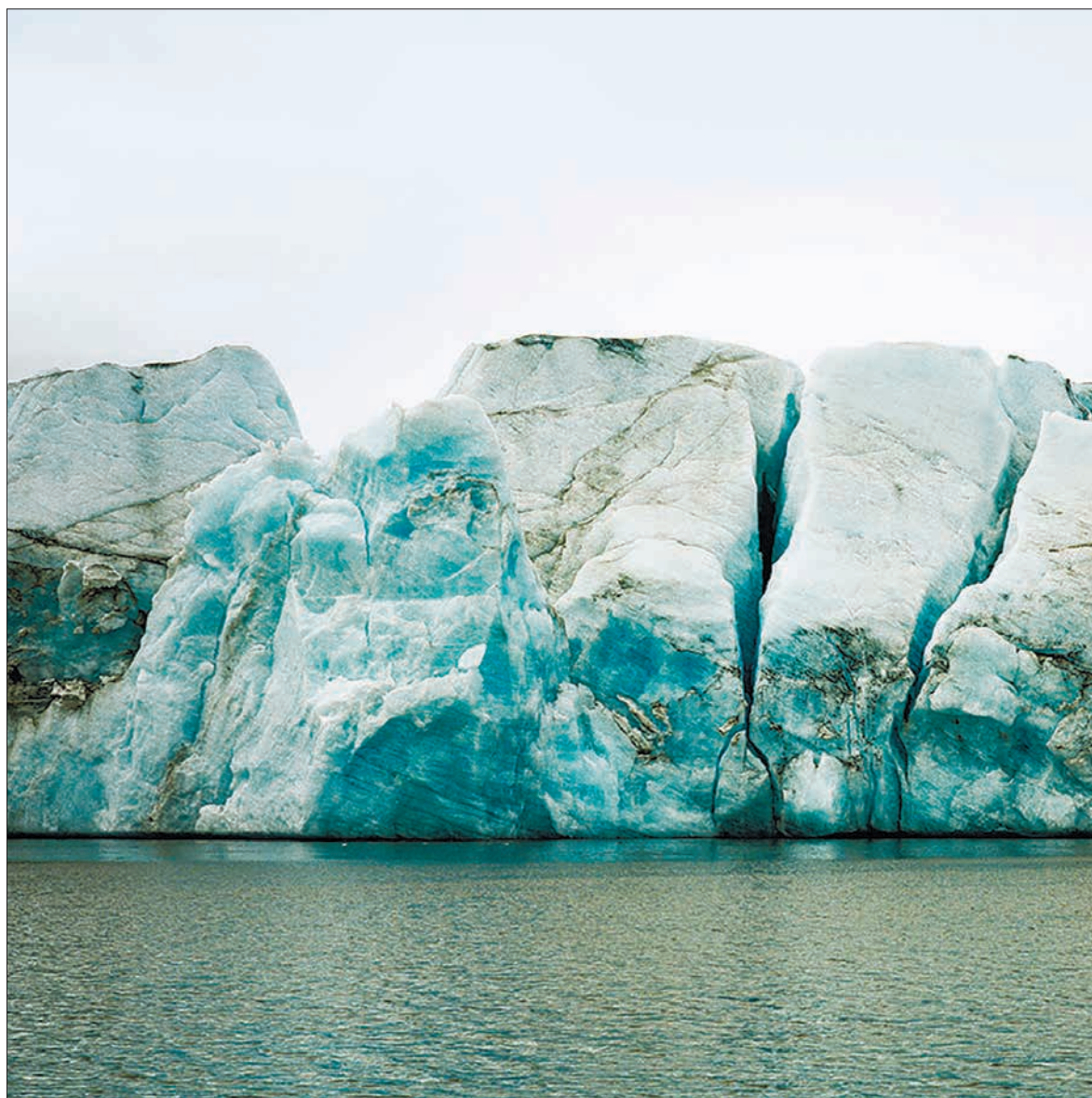


12+

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ЖУРНАЛ \ № 1 (15) 2017

ХОЛОД



ВОРОНКИ
ГАЗОВОГО ВЫБРОСА

стр. 5

ОСНОВНОЙ РЕСУРС
АРКТИКИ – ЧЕЛОВЕК

стр. 19

ИННОВАЦИИ
С ИСТОРИЕЙ
В ТЫСЯЧИ ЛЕТ

стр. 63

КОЛЛОИДНОЕ
СЕРЕБРО –
АЛЬТЕРНАТИВА
АНТИБИОТИКАМ
В ПТИЦЕВОДСТВЕ

стр. 84

ГРАФИЧЕСКИЙ ЯЗЫК
КОНЦЕПТУАЛЬНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЗНАНИЙ

стр. 104

ВОРОНКИ ГАЗОВОГО ВЫБРОСА: В ПРОЦЕССЕ ИЗУЧЕНИЯ УСЛОВИЙ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Хомутов А.В.

к. г.-м. н., ФИЦ Тюменский научный
центр СО РАН, Институт
криосферы Земли; Тюменский
государственный университет

Кизяков А.И.

к. г. н., Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова,
географический факультет;
ФИЦ Тюменский научный центр
СО РАН, Институт криосферы
Земли

Лейбман М.О.

д. г.-м. н., ФИЦ Тюменский научный
центр СО РАН, Институт
криосферы Земли; Тюменский
государственный университет

Дворников Ю.А.

к. г.-м. н., ФИЦ Тюменский научный
центр СО РАН, Институт
криосферы Земли



Рис. 1. Схема расположения воронок газового выброса:
1 – ВГВ-1, 2 – ВГВ-2, 3 – ВГВ-3, 4 – Сеяхинская ВГВ, 5 – Антипаютинская ВГВ (АнтВГВ)

С 2014 г., когда в средствах массовой информации появились первые сообщения об обнаружении относительно узких, глубоких воронок неизвестного происхождения, многие исследователи заинтересовались этим феноменом криолитозоны. Не остался в стороне и Институт криосферы Земли. Практически с самого момента обнаружения первой ямальской воронки (ВГВ-1) нашей группой начаты исследования условий

формирования «воронок газового выброса», как они были впоследствии названы. Наши исследования так или иначе охватывают пять воронок, расположенных на полуостровах Ямал и Гыдан. До 2016 г. небольшие экспедиции к воронкам были возможны только благодаря Департаменту по науке и инновациям Ямало-Ненецкого автономного округа, Российскому центру освоения Арктики и Межрегиональному экспеди-

ционному центру «Арктика», а с 2016 г. наши исследования стали поддерживаться Российским научным фондом в рамках проекта «Применение данных спутниковых и наземных инструментальных наблюдений для обнаружения, мониторинга и прогноза возникновения воронок газового выброса» (грант 16-17-10203). О результатах выполнения проекта и пойдет речь в этой статье.

Фото 1. Так выглядела первая ямальская воронка (ВГВ-1) в середине августа 2015 г. (фото А.В. Хомутова)

В результате обработки стереопар космических снимков сверхвысокого разрешения мы детально охарактеризовали рельеф участка образования ВГВ-1. Документально установлено, что на месте воронки существовал бугор. Рассчитан объем выброшенного из воронки материала [Кизяков и др., 2015]. Геохимические и дендрохронологические исследования (отбор проб и их лабораторные анализы) позволили сделать вывод, что бугор-предшественник ВГВ-1 образовался, вероятно, за счет давления метана на пластовый лед. Мы исключаем формирование бугра за счет инъекции воды при формировании бугра пучения (предположение, содержащееся в нескольких публикациях), поскольку такие бугры (булгунняхи) формируются тысячелетиями на участках спущенных озер при промерзании подозерных таликов. Бугор ВГВ-1 сформировался за несколько десятилетий на склоне, а не в днище, на поверхности, поросшей высокоствольной ивой (не встречается на поверхности спущенных озер), а значит, за формированием этого бугра стоит процесс гораздо более быстрый, чем промерзание талика, формирование криогенного напора и прорыв с образованием ледяного ядра. Пластовый лед в стенках воронки в зоне воздействия давления был деформирован, что неудивительно, если признать, что образование бугра связано с пластическими деформациями пластового льда. Однако его химический и изотопный состав при этом практически не изменился и соответствует таковому в большинстве обнажений пластового льда на Ямале, который достаточно хорошо изучен.

Помимо ямальской ВГВ-1 мы также изучаем другие ямальские воронки, а также единственную известную



Фото 2. Первые впечатления от увиденного вблизи ямальской ВГВ-1 в конце августа 2015 г. (фото А.В. Хомутова)



Фото 3. Отбор монолитов пластового льда из стенки ямальской ВГВ-1, сентябрь 2015 г. (фото А.В. Хомутова)

воронку на полуострове Гыдан в 106 км от поселка Антипаюта (АнтВГВ). Сопоставление результатов исследований ВГВ-1 и АнтВГВ позволяют дать количественную оценку изменениям размеров и формы этих объектов и тем самым предоставляют базу для поиска индикаторов аналогичного процесса (современного роста бугров или древнего образования воронок). Поиск круглых озер ранее представлялся (а некоторым исследователям и сейчас представляется) главным индикатором этого процесса. Однако нами установлено, что озера, сформировавшиеся на месте воронок, не сохраняют круглую форму в долгосрочной перспективе. ВГВ-1 за период с осени 2013 по осень 2016 г., то есть за 3 летних сезона,

преобразовалась из круглого, частично заполненного водой отверстия, в обычное озеро неправильной формы, почти слившееся с соседним озером. Пока остались небольшие фрагменты бруствера из выброшенного материала (это позволило собрать дополнительные образцы кустарника на дендрохронологию). А ВГВ-2, расположенная в 20 км к северу от ВГВ-1, судя по тому, что мы наблюдали летом 2015 г. и космоснимкам сверхвысокого разрешения, уже в 2015 г. лишилась всех признаков воронки кроме большого числа мелких озерков, образованных выброшенными из воронки блоками льда. Динамика формы образовавшихся озер определяется геоморфологическим расположением воронок. ВГВ-1 расположена на

очень пологом склоне и «перелив» воды начался, когда она почти полностью заполнилась. Вблизи ВГВ-2 было понижение рельефа, в которое начался слив воды, когда высокий, примыкающий к бугру берег был высоко над водой. Вблизи АнтВГВ с одной стороны высокий бугор, с другой низкая ложбина, поэтому вода почти сразу начала переливаться в самом низком месте и прорвала бруствер, оставив высокий сухой берег.

В 2016 году исследования, проведенные на внутреннем озере ВГВ-1, позволили выявить динамику морфометрических и гидрохимических показателей озерной воды. Так, в октябре 2016 года значения параметров рН и электропроводности на поверхности были соответственно равны 6,74 и 309 $\mu\text{S}/\text{cm}$, на глубине 7,5 метров – соответственно 6,31 и 429 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Это свидетельствует о том, что водородный показатель за один год практически не изменился, слегка повысилась соленость, видимо, за счет концентрирования воды в озере при промерзании с боков и с поверхности, однако, это увеличение меньше, чем могло быть из-за того, что вода в озере внутри ВГВ постоянно разбавляется дождевой и снеговой водой. В 2016 году значительно понизилась концентрация растворенного органического углерода (РОУ). На поверхности она составляла 12,23 мг/л, на глубине 7,5 метров – 12,46 мг/л, что более, чем в 4 раза меньше, чем в 2015 г. Это, видимо, связано с тем, что привнос РОУ в воду определялся площадью берегового уступа, который, по мере заполнения воронки, снизился с 8 м в 2015 г. до 2 м в 2016 г.



Фото 4. Антипаютинская воронка (АнтВГВ) на полуострове Гыдан, конец августа 2016 г. (фото М.О. Лейбман)



Фото 5. Батиметрическое обследование озера Антипаютинской воронки
(фото А.В. Хомутова)

Считаем доказанным, что в образовании сначала бугра, а потом на его месте воронки участвовал метан. Это заключение основано на том, что исходное содержание метана в воздухе ВГВ-1 до её заполнения водой намного превышало эту величину в окружающем воздухе. И впоследствии содержание метана в воде ВГВ значительно превышало значения этого параметра в воде ямальских озёр (примерно 500-1000 ppm в воде внутреннего озера ВГВ-1 по сравнению с 15 ppm в среднем для прочих озёр). Более высокие значения концентрации метана получены весной 2017 г., когда внутреннее озеро ВГВ-1 с поверхности замерзло, препятствуя эмиссии метана на поверхность и в атмосферу, тем самым подтверждая наличие источника метана в породах и льде, вскрытых воронкой.

Гыданская воронка АнтВГВ значительно отличается от 3-х известных ямальских воронок. Если изученные ямальские воронки расположены на пологом вогнутом склоне, поросшем более или менее густыми зарослями кустарника высокоствольной ивы, причем преимущественно на суглинистых грунтах, с пластовым льдом близко к поверхности, то АнтВГВ расположена практически на бровке террасовидной поверхности вблизи эрозионной долины, в стенках воронки выходят преимущественно песчаные породы, одна из стенок вскрывает вершинную песчаную поверхность с раздувами, а кустарник даже в днище долины развит отдельными куртинами.

На основании составленной нами по результатам предварительного дешифрирования космических снимков карты расположения потенциально

опасных бугров в 2016 году был осуществлен облет территории. Поскольку облет из-за карантина по сибирской язве перенесен на октябрь и светлое время заканчивается рано, время облета сократилось, тем не менее удалось просмотреть с воздуха несколько предварительно намеченных бугров и сделать выводы об их вероятном генезисе. Удалось совершить две посадки. При этом были отобраны образцы кустарников на дендрохронологию на одном из бугров (как представляется нам, это пока единственный способ определить возраст бугра), дополнительные образцы кустарников вокруг ВГВ-1, пробы воды из озера внутри воронки и зафиксированы новые контуры этого озера, а также термоцирков вокруг ближайшего озера, которые вовлечены в общий деструктивный процесс изменения рельефа поверхности.

Анализ архивов метеоданных, а также публикаций специалистов, показал, что теплый сезон 2016 г. характеризовался аномально высокими значениями температуры воздуха по сравнению с предыдущими годами наблюдений [Бардин и др. 2016] и, в целом, 2016 год гораздо более теплый по сравнению даже с 2012 годом. По данным метеостанции Марресале [Архив погоды, 2016] сумма положительных температур воздуха составила 1409 градусо-дней, максимальное значение за период с 2004 г. составляло 1057 градусо-дней в 2012 г. Теплый сезон (непрерывный период со среднесуточной температурой воздуха выше 0°C) продолжался с 4 июня по 11 октября, а с 9 по 20 июля среднесуточная температура воздуха не опускалась ниже 20°C, что не характерно для Заполярья [Хомутов и др. 2016]. Подтверждение

нашей гипотезы о климатическом триггере образования известных воронок практически одновременно, осенью 2013 года, и предположения о том, что «тепловой удар» 2016 г. может привести ко второму раунду образования воронок из тех бугров, которые удержали находящийся внутри газ в 2013 г., не заставило себя долго ждать. 28 июня 2017 г. в 34 км от села Сеяха на полуострове Ямал возникла новая воронка.

Изучение материалов, предоставленных участниками экспедиции к Сеяхинской воронке А.И. Синицким и А.В. Барышниковым, позволили заключить, что новая воронка также соответствует нашей гипотезе формирования воронок газового выброса, поскольку и после затопления речной водой она продолжала газировать, а в составе газа, как было измерено участниками экспедиции, преобладал метан. Сеяхинская воронка образовалась на песчаной поверхности, что отличает её от западно-ямальских воронок (ВГВ-1, 2 и 3), которые образовались на супесчано-суглинистой поверхности. Это объединяет Сеяхинскую ВГВ с гыданской АнтВГВ, которая вложена в породы, также сверху сложенные песком. И всё вместе означает, что условия формирования воронок в восточной части Ямала и на Гыдане, характеризующихся в целом более песчаным составом пород, отличаются от условий их формирования в западной части Ямала.

В 2017 г. во время весенней экспедиции к ямальской ВГВ-1, когда были получены данные о подледной концентрации метана, также был изучен снежный покров в окрестностях воронки. Поскольку геохимические свойства озерной воды частично определяются

свойствами снежного покрова, изучение последнего – одно из направлений исследования, которое дополнит знания о формировании состава воды в озерах и позволит выявить озера «газового» происхождения, отделив их от термокарстовых, образовавшихся при таянии подземного льда.



Фото 6. Озеро на месте ямальской ВГВ-1, покрытое тонкой коркой первого октябрьского льда в 2016 г. (фото А.В. Хомутова)



Фото 7. Трещины, образующиеся во льду озера ямальской ВГВ-1 вероятно за счет давления выходящего метана, апрель 2017 г. (фото Е.М. Бабкина)



Фото 8. Бурение льда озера ямальской ВГВ-1 для последующего отбора проб льда и воды, в том числе для определения концентрации растворенного метана (фото Е.М. Бабкина)



Фото 9. На месте Сеяхинской ВГВ продолжает выходить метан, июль 2017 г. ▲
(фото А.В. Барышникова)

▲ Фото 10. Мерзлые блоки песчаной породы с сохранившейся дерниной, выброшенные при образовании Сеяхинской ВГВ, июль 2017 г. (фото Д. Эрих)

Фото 11. Озеро на месте ямальской ВГВ-1 и спущенное ею соседнее озеро с криогенными оползнями и термоцирками с вытаивающим пластовым льдом, сентябрь 2017 г. ▼
Справа: лагерь исследовательской группы (фото А.В. Хомутова)

▼ Фото 12. Отступающая стенка ямальской ВГВ-1 с нависающими блоками дернины и нишами от вытаивающего пластового льда, сентябрь 2017 г. (фото Е.А. Бабкиной)



Фото 13. Озеро на месте ямальской ВГВ-2 на фоне переработанного
оползневыми процессами ландшафта, сентябрь 2017 г. (фото А.В. Хомутова)







Фото 15. Сохранившиеся «ударные кратеры» на месте падения блоков многолетнемерзлых пород и льда, частично заполненные водой, частично разрушенные при отступании бровки берега озера ВГВ-2, сентябрь 2017 г. (фото А.В. Хомутова)

метана, с составом воды других ямальных озер различного генезиса, зафиксирована динамика криогенных процессов. Поскольку ВГВ-2 посещалась нами только в 2015 г. и подробных исследований не проводилось, то на этот раз была проведена детальная батиметрическая съемка озера на ее месте и оценен характер разлета материала при выбросе, следы которого до сих пор наблюдаются.

На месте ВГВ-1 озеро продолжает увеличиваться, произошел прорыв существовавшей еще в октябре 2016 г. перемычки, отделяющей озеро воронки от соседнего термокарстового озера, приведшее к его спуску. При этом не очень дождливый летний сезон и постепенный размыв бруствера воронки, отделяющего объект от небольшого ручья, привели к значительному снижению уровня воды в озере воронки относительно прошлого года.

Темпы развития озера на месте ВГВ-2 не столь значительны по сравнению со временем ее последнего посе-

щения в сентябре 2015 г., но активное вытаивание ледогрунтовой залежи на участке высокого берега озера продолжается.

Помимо экспедиционных работ в 2017 г. проводилась обработка материалов дистанционного зондирования Земли из космоса. С использованием стереопар космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения до и после образования воронки проанализирован рельеф, предшествовавший возникновению АнТВГВ на полуострове Гыдан, и его изменения вследствие образования воронки. Выявлены сходные и отличные черты двух воронок газового выброса на полуостровах Ямал и Гыдан – ВГВ-1 и АнТВГВ. В результате обработки разновременных стереопар космических снимков сверхвысокого разрешения построены детальные цифровые модели рельефа (ЦМР) ключевых участков до и после появления воронок. Выявлены особенности рельефа, как бугров-предшественников, так и самих образовавшихся воронок, а также динамика развития этих форм. Полученные результаты легли в основу публикаций в российском [Кизяков и др. 2017] и зарубежном [Kizyakov et al. 2017] рецензируемых журналах.

Текст статьи частично составлен по материалам отчета по гранту РНФ 16-17-10203 за 2016 г.

Авторы выражают благодарность директору Департамента по науке и инновациям ЯНАО Алексею Титовскому, президенту Российского центра освоения Арктики Владимиру Пушкареву и директору Российского центра освоения Арктики Андрею Барышникову за плодотворное сотрудничество и поддержку при проведении исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архив погоды** в Марресале [Электронный ресурс] // Расписание погоды gp5.ru: сайт. — URL: http://gp5.ru/Архив_погоды_в_Марресале (дата обращения 06.11.2016).
2. **Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Самохина О.Ф.** Температурные экстремумы июня и июля 2016 года // *Фундаментальная и прикладная климатология*. Т. 2, 2016, С. 143–148.
3. **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. XIX, № 2. С. 15–25
4. **Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Хомутов А.В. и др.** Оценка рельефообразующего эффекта образования Антипаутинской воронки газового выброса по данным спутниковой стереосъемки // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 4. С. 67–75.
5. **Хомутов А.В., Лейбман М.О., Губарьков А.А. и др.** Мониторинг криолитозоны: новые данные на Центральном Ямале и организация наблюдений на Гыдане // *Научный вестник ЯНАО*, № 4 (93). 2016. С. 17–19.
6. **Kizyakov A, Zimin M, Sonyushkin A et al.** Comparison of Gas Emission Crater Geomorphodynamics on Yamal and Gydan Peninsulas (Russia), Based on Repeat Very-High-Resolution Stereopairs. *Remote Sensing*. 2017; 9(10): 1023. Doi:10.3390/rs9101023.
7. **Leibman M. O., Kizyakov A. I., Plehanov A. V., Streletskaia I. D.** New permafrost feature: deep crater in Central Yamal, West Siberia, Russia as a response to local climate fluctuations. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*. 2014. Vol. 7, no. 04. P. 68–80.

Фото 14. Исследователи на ямальской ВГВ-2. На переднем плане: часть бруствера «ударного кратера», сентябрь 2017 г. (фото Е.А. Бабкиной)