

3/2017 GeoRisk

ISSN 1997-8669 (Print)
ISSN 2587-8220 (Online)

ГеоРиск



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



ИГИИС

Саморегулируемая организация

АИИС

Ассоциация
«Инженерные изыскания
в строительстве»

	Обзор опасных природных явлений за май — сентябрь 2017 года ШАНИНА В.В. МГУ им. М.В. Ломоносова	
4	Причины и последствия шквалов в Московском столичном регионе РЕДАКЦИОННЫЙ ОБЗОР И ИНТЕРВЬЮ С П.И. КОНСТАНТИНОВЫМ	
14	Определение границ зон затопления рек города Москвы ТЕРСКИЙ П.Н., ФАТХИ М.О., ЦЫПЛЕНКОВ А.С., ЗЕМЛЯНОВ И.В., ГОРЕЛИЦ О.В., ПАВЛОВСКИЙ А.Е. ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова»	
20	Опасные проявления русловых процессов на реке Аваче Елизовского района Камчатского края ШКОЛЬНЫЙ ДИ., ЧАЛОВ С.Р., ЦЫПЛЕНКОВ А.С., ТЕРСКИЙ П.Н. МГУ им. М.В. Ломоносова	
30	Оползни северного Вьетнама и борьба с ними (на примере северо-западной части провинции Лаокай) НГУЕН Ч.К. Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ-РГГРУ) им. С. Орджоникидзе, Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий ФОМЕНКО И.К., ПЕНДИН В.В. Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ-РГГРУ) им. С. Орджоникидзе ЗЕРКАЛЬ О.В. МГУ им. М.В. Ломоносова	
42		
	Моделирование снежных лавин для обоснования выбора противолавинных мероприятий ЛАЗАРЕВ А.В., ТУРЧАНИНОВА А.С., СЕЛИВЕРСТОВ Ю.Г., ГЛАЗОВСКАЯ Т.Г., СОКРАТОВ С.А., КОМАРОВ А.Ю. МГУ им. М.В. Ломоносова	50
	Газовые выбросы в криолитозоне как новый вид геокриологических опасностей ХИМЕНКОВ А.Н., СЕРГЕЕВ Д.О., СТАНИЛОВСКАЯ Ю.В. Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН ВЛАСОВ А.Н., ВОЛКОВ-БОГОРОДСКИЙ Д.Б. Институт прикладной механики РАН	58
	ПРИЛОЖЕНИЕ Влияет ли человек на климат? Отрывок из книги А.М. Городницкого «Тайны и мифы науки. В поисках истины»	66
	Рефераты на английском языке	71

НАУЧНО-РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

БОГДАНОВ М.И. Председатель научно-редакционного совета, главный редактор, генеральный директор ООО «ИГИИС», к.г.-м.н.	ЛЕВИН Б.В. Председатель Сахалинского научного центра ДВО РАН, председатель комиссии по цунами Отделения наук о Земле РАН, д.ф.-м.н., профессор
АЛАБЯН А.М. Доцент кафедры гидрологии суши географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н.	МАКСИМОВИЧ Н.Г. Заместитель директора по научной работе Естественно-научного института Пермского государственного национального исследовательского университета, к.г.-м.н., доцент
ГОРОДНИЦКИЙ А.М. Заслуженный деятель науки РФ, академик РАЕН, главный научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, д.г.-м.н., профессор	РАЗУМОВ В.В. Профессор кафедры картографии и геоинформатики Северо-Кавказского федерального университета, главный научный сотрудник АО «Российские космические системы» Роскосмоса, д.г.н
ЗЕРКАЛЬ О.В. Заведующий лабораторией инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н.	САСОРОВА Е.В. Главный научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, д.ф.-м.н.
КАЗАКОВ Н.А. Директор Сахалинского филиала Дальневосточного геологического института ДВО РАН, заведующий лабораторией лавинных и селевых процессов, к.г.-м.н., доцент	СВЯТЕНКО И.Ю. Председатель комиссии по безопасности Московской городской думы, д.т.н.
КОСИНОВА И.И. Заведующая кафедрой экологической геологии геологического факультета Воронежского государственного университета, д.г.-м.н., профессор	ТРОФИМОВ В.Т. Советник ректората, заведующий кафедрой инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., профессор

	Review of natural hazardous events for May — September of 2017 SHANINA V.V. Lomonosov Moscow State University	
4	Reasons and consequences of the squalls in Moscow capital region EDITORIAL REVIEW AND INTERVIEW WITH P.I. KONSTANTINOV	
14	Flood zones delineation for Moscow city rivers TERSKII P.N., FATKHI M.O., TSYPLENKOV A.S., ZEMLYANOV I.V., GORELITS O.V., PAVLOVSKIY A.E. FSBI "State Oceanographic Institute named after N.N. Zubov"	
20	Hazardous manifestations of channel processes on the Avacha river (Yelizovsky District, Kamchatka Krai) SHKOLNYI D.I., CHALOV S.R., TSYPLENKOV A.S., TERSKII P.N. Lomonosov Moscow State University	
30	Landslides of the north Vietnam and preventive measures (a case study of the north-western part of Lao Cai Province) NGUYEN T.K. Russian State Geological Prospecting University name Sergo Ordzhonikidze (MGRI-RSGPU), Institute of Geological Sciences of Vietnam Academy of Science and Technology FOMENKO I.K., PENDIN V.V. Russian State Geological Prospecting University name Sergo Ordzhonikidze (MGRI-RSGPU) ZERKAL O.V. Lomonosov Moscow State University	
42		
	Snow avalanches modeling for justification of a selection of snow avalanches mitigation measures LAZAREV A.V., TURCHANINOVA A.S., SELIVERSTOV Yu.G., GLAZOVSKAYA T.G., SOKRATOV S.A., KOMAROV A.Yu. Lomonosov Moscow State University	50
	Gas emissions in the cryolithozone: a new type of geocryological hazards KHIMENKOV A.N., SERGEEV D.O., STANILOVSKAYA Yu.V. Sergeev Institute of Environmental Geosciences of Russian Academy of Sciences VLASOV A.N., VOLKOV-BOGORODSKY D.B. Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences	58
	APPENDIX Do humans influence the climate? A piece out of the book of «Mysteries and myths of the science. In search of the truth» by A.M. Gorodnitskiy	66
	Summaries in English	71

РЕДАКЦИЯ

ТОРБИНА ЕКАТЕРИНА

Генеральный директор

ВИСХАДЖИЕВА КАРИНА

Литературный редактор

КРЕНДЯСОВА ОЛЬГА

Корректор

КРЮКОВ ПАВЕЛ

Отдел рекламы
kpp@geomark.ru

ЛУЗГАНОВ ГРИГОРИЙ

Отдел подписки и распространения
pr@geomark.ru

ИП ГИЛМАНОВ М.А.

Дизайн и верстка
maratg70@mail.ru

107076, Москва,

ул. Электрозаводская, дом 60

Тел.: +7 (495) 210-63-90, 210-63-06

e-mail: info@geomark.ru

Редакция может не разделять точку зрения автора.

За содержание рекламных материалов редакция
ответственности не несет.

Подписано в печать 02.10.2017. Тираж 1000 экз.

Формат: 50x70/8.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС 77-48920 от 20 марта 2012 г.

Цена свободная. © ООО «Геомаркетинг»

Журнал включен в перечень ВАК

По вопросам подписки обращайтесь в редакцию.

Подписной индекс ОАО Агентства «Роспечать» 71510.

Подписные индексы в объединенном каталоге
«Пресса России»: 42192 (полугодовой), 42193 (годовой).

ГАЗОВЫЕ ВЫБРОСЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ КАК НОВЫЙ ВИД ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ

В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

GAS EMISSIONS IN THE CRYOLITHOZONE: A NEW TYPE OF GEOCRYOLOGICAL HAZARDS

ХИМЕНКОВ А.Н.

Ведущий научный сотрудник лаборатории геокриологии Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, к.г.-м.н., г. Москва, a_khimenkov@mail.ru

KHIMENKOV A.N.

Leading Research Scientist of the Laboratory of Geocryology, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, a_khimenkov@mail.ru

СЕРГЕЕВ Д.О.

Заведующий лабораторией геокриологии Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, к.г.-м.н., г. Москва, sergeevdo@mail.ru

SERGEEV D.O.

Head of the Laboratory of Geocryology, Sergeev Institute of Environmental Geosciences, Russian Academy of Sciences, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, sergeevdo@mail.ru

СТАНИЛОВСКАЯ Ю.В.

Научный сотрудник лаборатории геокриологии Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, stanik85@mail.ru

STANILOVSKAYA Yu.V.

Research Scientist of the Laboratory of Geocryology, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Moscow, stanik85@mail.ru

ВЛАСОВ А.Н.

Директор Института прикладной механики РАН, д.т.н., г. Москва, bah1955@yandex.ru

VLASOV A.N.

Director of the Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, DSc (Doctor of Science in Technics), Moscow, bah1955@yandex.ru

ВОЛКОВ-БОГОРОДСКИЙ Д.Б.

Старший научный сотрудник лаборатории неклассических моделей композитных материалов и конструкций Института прикладной механики РАН, к.ф.-м.н., г. Москва, volkov-bogorodskij@iam.ras.ru

VOLKOV-BOGORODSKY D.B.

Senior Research Scientist of the Laboratory of Nonclassical Models of Composite Materials and Designs, Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, PhD (Candidate of Science in Physics and Mathematics), Moscow, volkov-bogorodskij@iam.ras.ru

Ключевые слова: газовые гидраты; диссоциация; флюиды; воронка газового выброса; Ямальский кратер; стадийность; многолетнемерзлые породы.

Аннотация: в статье на примере Ямальского кратера описан новый вид геокриологических опасностей — газовые выбросы из многолетнемерзлых пород. Проведен анализ строения кратера, выявлена стадийность смены процессов его формирования. Установлены природные факторы, определяющие диссоциацию газогидратов при отрицательных температурах. Рассмотрены различные сценарии диссоциации газогидратов, содержащихся в многолетнемерзлых породах. Показана возможность формирования условий для диссоциации газовых гидратов и газовых выбросов при длительной эксплуатации инженерных сооружений.

Key words: gas hydrates; dissociation; fluids; gas emission crater; Yamal crater; stadiality; permafrost.

Abstract: a new type of geocryological hazards (a case study of the Yamal crater) is gas emissions from permafrost. This phenomenon is described in the article. To investigate it, the analysis of the crater structure was carried out. Besides, stadiality of crater formation processes was revealed. The natural factors were identified that determine the dissociation of gas hydrates at negative temperatures. The paper also contains, various scenarios of gas hydrates dissociation in permafrost. The setting for the gas hydrates dissociation and gas emissions during long-term operation of engineering structures is shown.

Введение

В 2014–2015 гг. на севере Западной Сибири была обнаружена серия сухих круглых в плане воронок. Данные образования ранее описаны не были, однако они отличаются рядом характерных особенностей, обуславливающих интерес к их изучению. Во-первых, вокруг

воронок наблюдается концентрический разброс льда и грунта на расстояние в десятки метров. Во-вторых, они имеют практически отвесные стенки и отличаются значительной глубиной (до нескольких десятков метров). Все это указывает на то, что процессы, приведшие к формированию этих воронок, имеют взрывной характер и представляют со-

бой новый вид геокриологических опасностей. Тем не менее угроза газопроявлений с образованием кратеров не учитывается ни при инженерных изысканиях, ни при строительстве, ни при эксплуатации сооружений [7].

Анализ спутниковых данных показал, что на месте большинства обнаруженных воронок существовали бугры пучения [1, 7, 12, 21] и что их морфология отличается от хорошо известных геокриологам воронок, формирующихся при взрывах гидроакколитов, расположенных вне районов с повышенной газонасыщенностью мерзлых пород. Большинство исследователей (В.П. Мельников, В.И. Богоявленский, М.О. Лейбман, А.И. Кизяков, В.В. Оленченко, М.И. Эпов, И.Н. Ельцов и др.), изучавших данные образования, сходятся во мнении, что их возникновение обусловлено выбросом газов, сформировавшихся при разложении газогидратов, входящих в состав многолетнемерзлых пород (ММП). В.И. Богоявленский выделяет исследуемые воронки как кратеры газо-

вого выброса [1, 2]. Это понятие и используется в данной статье. Авторы не включаются в терминологическую дискуссию о том, как называть процесс, формирующий рассматриваемые образования, — взрыв или выброс. Это отдельная тема, которая не влияет на содержание статьи и может стать предметом самостоятельной публикации.

К настоящему времени наибольший объем данных о кратерах газового выброса получен при изучении воронки, расположенной в 30 км к югу от Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) и получившей название Ямальский кратер [17] (рис. 1).

За три года (2014–2016 гг.) Ямальский кратер изучался более чем пятью экспедициями. По результатам исследований были опубликованы десятки статей, сделано большое количество докладов и дано множество интервью в СМИ [1, 7, 12, 13, 16, 17, 20, 21, 23, 27, 29, 30 и др.]. Однако, несмотря на то что в изучении данного объекта участвовали разные группы исследователей, которые занимались бурением до глубины в 17 м [23] и описанием льда в стенках кратера [16], выяснить главную причину его образования так и не удалось. В первую очередь это связано с тем, что ни в одной публикации для обоснования своих позиций авторы не приводят комплексный анализ данных по строению пород, слагающих непосредственно стенки кратера.

Целью данной публикации является рассмотрение нового вида геокриологической опасности — газовых выбросов в многолетнемерзлых грунтах при разложении газогидратов. Для этого был проведен анализ строения пород, слагающих Ямальский кратер; выделены стадии его развития; рассмотрены описанные в литературе процессы, сопровождающие диссоциацию газовых гидратов, содержащихся в ММП; наконец, проанализированы факторы, обуславливающие протекание процессов на каждой стадии формирования кратера.

В настоящее время не представляется возможным изучать Ямальский кратер, поскольку он уже затоплен тальми водами. Поэтому исследование авторов проводилось на основе анализа многочисленных фото- и видеоматериалов, а также изучения научных публикаций по данному объекту.

Строение Ямальского кратера

Анализ имеющихся материалов (публикации, видео- и фотосъемки кор-

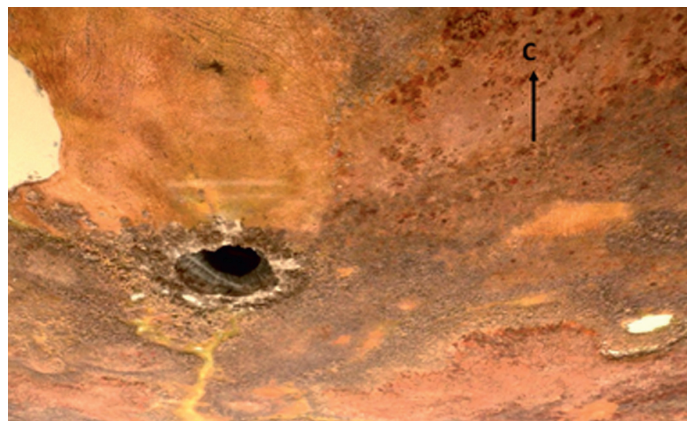


Рис. 1. Ямальский кратер (фото В.В. Оленченко, 2014 г.) [27]

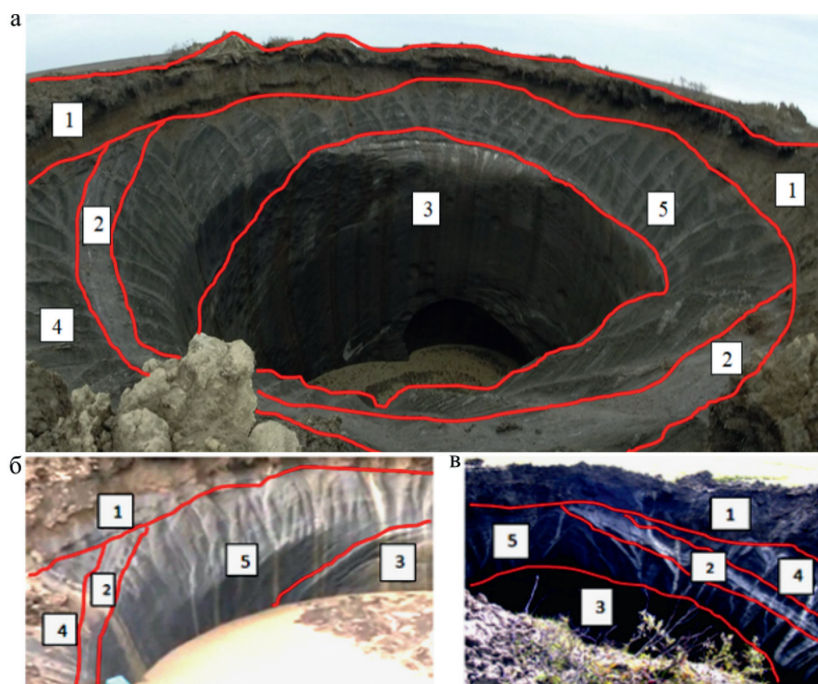


Рис. 2. Строение Ямальского кратера (фото В.А. Пушкарева): а — вид сверху; б — западная стенка кратера; в — восточная стенка кратера. Обозначения: 1 — покровный горизонт (слой 1); 2 — белый слоистый лед (слой 2); 3 — ячеистый лед (слой 3); 4 — слоистый лед (слой 4); 5 — слоистый ледогрунт, перекрывающий ячеистый лед (слой 5)

респондентов, интервью и доклады на конференциях) позволил выделить пять структурных элементов Ямальского кратера.

Слой 1 — покровный горизонт (рис. 2) — представляет собой переслаивающиеся ожелезненные и оторфованные суглинки и супеси мощностью 2–6 м [17, 23].

Слой 2 — белый слоистый лед, соответствующий границе подозерного талика, — в виде разорванного кольца охватывает борта кратера, занимая наиболее низкое положение в его южной стенке (рис. 2, а), а в западной (рис. 2, б) и восточной (рис. 2, в) поднимается и упирается с резким несогласием в покровный слой 1. Причиной деформации

и частичного разрушения описываемого слоя является появление бугра пучения на месте спущенного термокарстового озера. В литературе образование, аналогичное слою 2, который маркирует крайнее положение подозерного талика, описано И.Д. Даниловым [6].

Слой 3 — ячеистый лед (рис. 2, 3) со следами пластических и разрывных деформаций — формирует стенки кратера. Данный слой представляет собой остатки ледово-газово-грунтового штока, сформировавшегося в кратере.

Слой 4 — слоистый лед, предположительно инфильтрационно-сегрегационного происхождения (рис. 4), залегающий между слоем 2 и покровным горизонтом (слой 1). Прослеживается

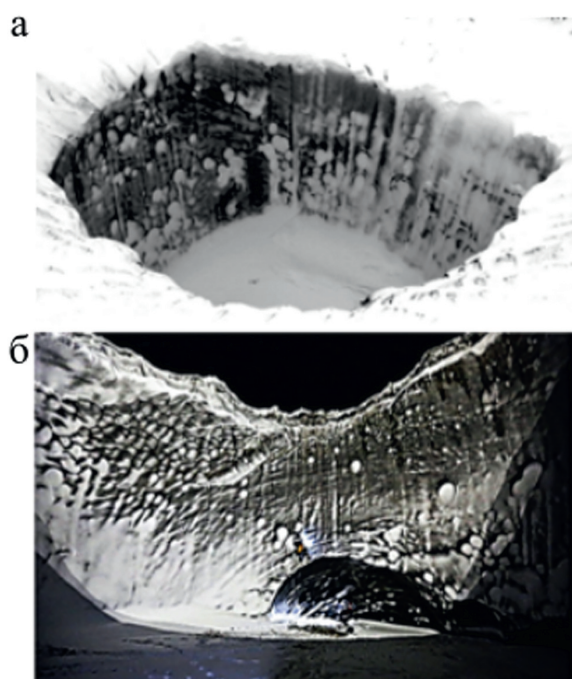


Рис. 3. Слой ячеистого льда (слой 3): а — западная и южная стенки кратера, б — северо-восточная стенка кратера (фото В.А. Пушкарева, ноябрь 2014 г.)

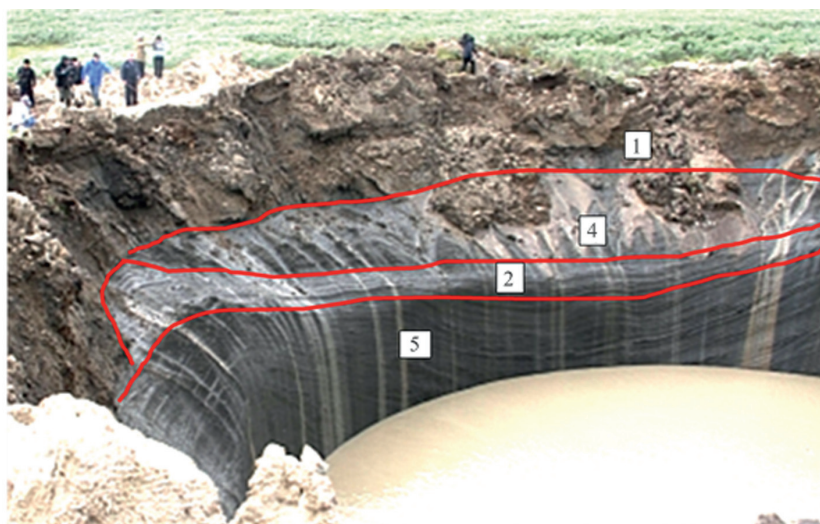


Рис. 4. Слой инфильтрационно-сегрегационного льда (слой 4) над слоем 2 на южной стенке кратера (фото В.И. Богоявленского, июль 2015 г.)

на южной стенке кратера и частично на восточной и западной.

Слой 5 — слоистая ледогрунтовая толща (рис. 2, 4, 5) со следами пластических деформаций, перекрывающая ячеистый лед (слой 3).

Общая схема соотношения слоев в структуре Ямальского кратера представлена на рис. 6.

Стадии развития Ямальского кратера

Основной, и пока не решенной, проблемой при изучении воронок газового выброса является выяснение причин начала диссоциации газогидратов, со-

державшихся в многолетнемерзлых породах. Вопрос состоит в том, что может вывести их на локальных участках в естественных условиях из состояния равновесия? На территории Западной Сибири газопроявления и связываемые с ними горизонты реликтовых гидратосодержащих пород имеют широкое распространение в диапазоне глубин от 20 до 100 м [15, 28].

Могут быть две основные причины начала диссоциации газогидратов: повышение среднегодовой температуры пород или уменьшение пластового давления. Глубина залегания горизонта гидратосодержащих пород не меняется, соответственно, здесь не меняется и

пластовое давление. Следовательно, основной причиной начала процессов диссоциации газогидратов будет повышение температуры пород. Источники тепла при этом могут быть разными: глобальное потепление климата, аномально теплые летние сезоны [7, 12, 16, 17, 30] или поступление теплых флюидов по разломам [1, 21, 27]. Не вдаваясь в дискуссию, кратко отметим, что потепление климата за последние десятилетия или аномально теплые летние сезоны не могут изменить температуру мерзлых пород на глубине 60–80 м. Г.И. Грива, занимавшийся разработкой комплексного мониторинга Бованенковского НГКМ [5], пришел к выводу, что сквозная миграция флюидов здесь также отсутствует. Выходы термальных вод или газов с глубоких горизонтов на поверхность земли не выявлены. Позиция авторов состоит в том, что наиболее действенным фактором локального прогрева многолетнемерзлых пород и начала диссоциации газогидратов, содержащихся в них, является отепляющее влияние поверхностных водоемов [31]. Материальным свидетельством наличия такого водоема в случае Ямальского кратера является слой 2.

Изучение соотношения льдов различного строения, слагающих Ямальский кратер, позволило определить последовательность сформировавшихся его процессов. Она включает несколько стадий.

I стадия. Образование термокарстового озера над многолетнемерзлыми породами, содержащими пластовую залежь подземного льда. Под озером формируется чаша протаивания и зона высокотемпературных ММП ($0 \div -1^\circ\text{C}$) [23].

II стадия. Зона повышения температуры в многолетнемерзлых породах достигает слоя гидратосодержащих многолетнемерзлых пород (рис. 8, II). Начинается процесс диссоциации газогидратов с выделением газа и переохлажденной воды. Газоводяные флюиды под воздействием давления начинают двигаться в наименее прочную область — зону повышенной температуры под озером — и насыщать первичный ледогрунтовой субстрат газом.

III стадия. Разложение метастабильного газового гидрата вызывает рост давления, которое значительно превышает пластовое [3]. В результате происходит движение флюидов, направленное вверх и сопровождающееся пластическими и разрывными деформациями. Рост давления в зоне миграции флюидов приводит к началу пучения

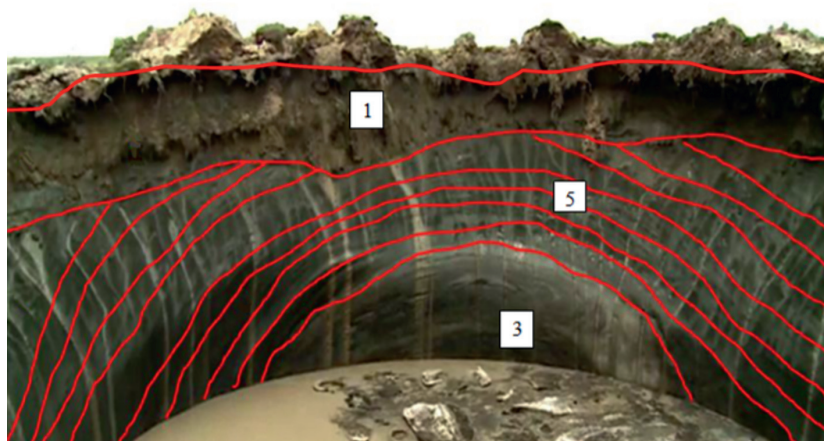


Рис. 5. Деформация первичной слоистости слоя 5 над слоем 3 (фото В.И. Богоявленского, июль 2015 г.)



Рис. 7. Полости, образованные скоплением газовых флюидов в нижней части Ямальского кратера (стенка грота) (фото В.А. Пушкарева, ноябрь 2014 г.)

под дном термокарстового озера. По мере обмеления водоема и начала промерзания талика на нижней границе последнего за счет миграции формируются инфильтрационно-сегрегационные льды [10]. Этот механизм приводит к образованию пластов и линз слоистого льда, который залегает согласно с вмещающими его озерными отложениями, образуя с ними единое целое. При последующем обмелении в верхней части разреза формируются льдонасыщенные слоистые отложения, обогащенные терригенным материалом, аналогичным по составу вмещающим породам — песок, алеврит, глина или их сочетание, а также прослоями и линзами растительного материала [6]. В нашем случае это слой 1, сформировавшийся над слоем 4. В литературе аналогичные образования описаны И.Д. Даниловым [6].

Переход из субаквального состояния в субэкральное понижает температуру верхнего слоя грунта, что увеличивает его прочность. При этом формируется

мерзлый куполовидный экран, фрагменты которого были зафиксированы при первичном обследовании Ямальского кратера. Этот экран является преградой для движения флюидов, поступающих снизу, что обеспечивает формирование бугра пучения высотой около 6 м и диаметром около 70 м [12]. По сообщению М.О. Лейбман, до своего разрушения бугор пучения развивался на месте воронки в течение не менее 70 лет [29]. Это привело к деформированию слоев 2, 4, 5 (рис. 2, а, б, в).

В первичной мерзлой породе, представленной слоем 5, за счет насыщения флюидами постепенно формируется шток, который состоит из слоистого газонасыщенного льда. В штоке наблюдаются многочисленные следы течения льда, грунта, пластические и разрывные деформации (рис. 8, III), его мощность составляет около 40 м, диаметр — около 20 м. Сформировавшийся ледовогазовый шток выпучивает вышележащий слой первичной породы (см. рис. 5).

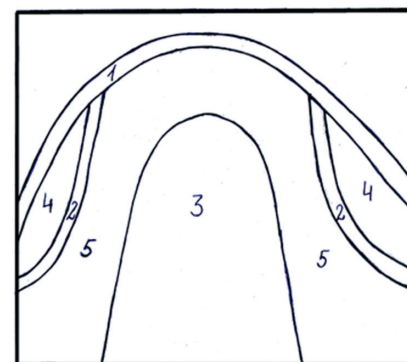


Рис. 6. Схема соотношения слоев, встречающихся в стенках Ямальского кратера (номера слоев и их описание приведены в тексте и на рис. 8)

В слое гидратосодержащих ММП вблизи зоны диссоциации формируется разуплотненная зона (см. рис. 8, III), выделенная Л.Б. Волкомирской как зона выветрелых пород [29]. Непосредственно к гидратосодержащему слою примыкает зона гротов и каверн различного размера, соединенных между собой (см. рис. 8, III). Аналогичные образования обнаружены в зонах выбросов газа (за счет разложения газогидратов) в окрестностях острова Беннетта (Новосибирские острова) и в Охотском море. Здесь, в районе газового фонтана, исследованы характерные формы: провальные воронки, ямы, поддонные ниши и пещеры, образующие систему сообщающихся гротов [9].

IV стадия. По мере того как пластические деформации в мерзлой кровле достигнут своего предела, в ней наступают хрупкие деформации разрушения. Газ, находящийся под давлением и понижающий шток деформированного льда на всю высоту от гидратосодержащего слоя до кровли, вырывается наружу вместе с грунтом и льдом. В результате формируется сухой кратер газового выброса (рис. 8, IV). Аналогичные выбросы происходят при взрывах метана в угольных шахтах.

Последовательность смены стадий развития Ямальской воронки приведена на рис. 8.

Факторы, обуславливающие возможность диссоциации газогидратов

Климат, поверхностные условия, геологическое строение. С конца 60-х годов XX века температура воздуха повысилась примерно на 2°C, а грунтов — не более чем на 1°C. В то же вре-

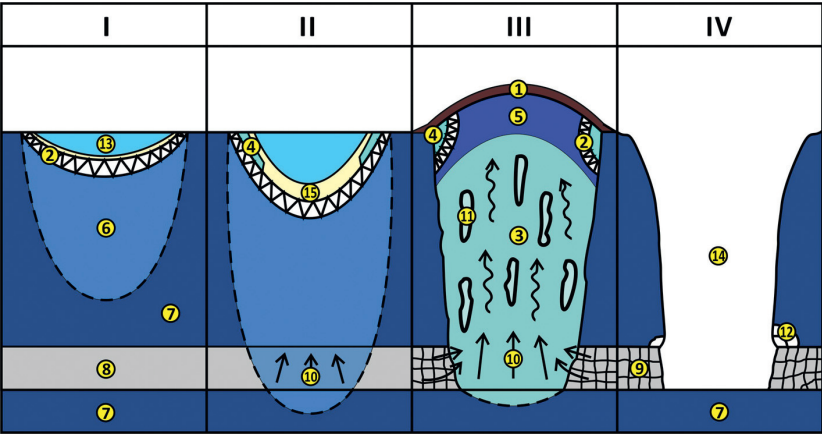


Рис. 8. Стадии развития Ямальского кратера (I, II, III, IV). Обозначения: 1 — слой 1 (покровный горизонт); 2 — слой 2 (слой белого слоистого льда, соответствующего максимальной глубине протаивания под озером); 3 — слой 3 (мерзлый газонасыщенный грунт со следами флюидодинамики в зоне повышения температуры под озером); 4 — слой 4 (слоистый лед, предположительно инфильтрационно-сегрегационного происхождения); 5 — слой 5 (газонепроницаемая кровля ММП); 6 — зона повышения температуры в ММП под озером; 7 — ММП вне обогревающего воздействия озера; 8 — слой гидратосодержащих ММП; 9 — зона разуплотнения в слое гидратосодержащих ММП, примыкающая к кратеру; 10 — направление движения флюидов; 11 — газожидкостные флюиды; 12 — гроты и каверны в нижней части кратера; 13 — озеро; 14 — кратер, сформировавшийся после газового выброса; 15 — талик. (Оформление Д. Волкова)

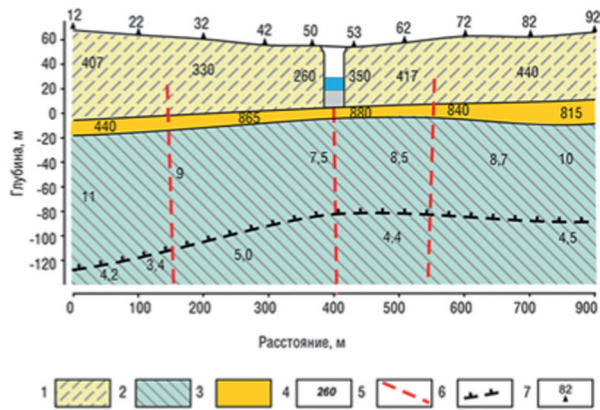


Рис. 9. Геологический разрез участка расположения Ямальского кратера [20, 27]: 1 — супесь, 2 — суглинок, 3 — коллектор газогидратов, 4 — удельное электрическое сопротивление пород (Ом·м), 5 — линия разлома, 6 — нижняя граница ММП, 7 — пункт зондирования

ма разброс температур для одной территории достигает 7°C, и даже для однородных урочищ в грунтах он может достигать 3–4°C [8, 15]. При среднегодовых температурах воздуха –9°C на территории Центрального Ямала среднегодовые температуры ММП должны находиться в пределах –5 ÷ –7°C [4]. Тем не менее здесь широко распространены более «теплые» ландшафты: косы, пляжи, береговые валы, нижние части пологих подветренных склонов (западной, юго-западной, южной экспозиции), поросшие ивняком высотой 1 м и более с температурами ММП в диапазоне от –0,5 до –3°C [5]. Наибольшее обогревающее воздействие на ММП оказывают поверхностные водоемы. То

есть в области низких температур устойчиво существуют многочисленные теплые участки, обусловленные ландшафтными особенностями и объясняющие повышение температур гидратосодержащих пород.

На Ямале, в центральной его части, на контактах водораздельных участков с пластовыми залежами и на низких пойменных уровнях наблюдается наибольший разброс температур ММП от –1 до –7,1°C [4]. Наиболее низкие значения соответствуют стабильным водораздельным участкам, а наиболее высокие — территориям, подвергшимся термоденудационному воздействию [14], которое приводит к повышению температуры ММП на 5–6°C.

Расположение Ямальского кратера соответствует этим условиям.

Исследования экспедиции кафедры геоэкологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова показали, что наиболее низкие температуры (–4 ÷ –5°C) формируются на водораздельных поверхностях III морской террасы в пределах ландшафтов кустарничково-моховой тундры. На пониженных участках — в днищах логов, солифлюкционных цирках и т.д. — вследствие накопления большого слоя снега среднегодовая температура повышается до –2 ÷ –3°C, а в днище эрозионно-термокарстовой котловины — до –1 ÷ –2°C. Под небольшими озерами и полосами стока среднегодовые температуры повышаются до значений 0 ÷ –1°C. Георадарное зондирование выявило несквозной талик мощностью 2–3 м, сформировавшийся под дном одного из современных термокарстовых озер [23]. То есть вблизи Ямальского кратера и сейчас существуют условия для локального прогрева ММП и формирования новых воронок газового выброса.

Геологическое строение района весьма благоприятно для образования воронок газового выброса за счет наличия слоя гидратосодержащих многолетнемерзлых пород на глубине 60–80 м, выделенного по геофизическим данным (см. рис. 8) [20, 27].

Температуры и давления при диссоциации газогидратов. Одним из главных косвенных признаков наличия газогидратных залежей являются газопроявления. Они выражаются в выбросах газа при бурении скважин в ММП [3]. Практически все газовые проявления, зафиксированные на Бованенковском НГКМ, приурочены к оторфованным пылеватым пескам, встречающимся в разрезе мерзлой толщи до глубин порядка 130 м. При этом более 85% газопоявлений в отложениях ямальской серии зафиксировано на глубинах около 60–80 м, а сам горизонт прослеживается на площади до 120 км² [15]. В области локального прогрева ММП, рассмотренной выше, развивается система пор, дефектов, ослабленных зон, в которой давление соответствует гидростатическому. На глубине 60–80 м, где выделяется гидратосодержащий слой [20, 27], гидростатическое давление составляет около 0,7 МПа. Разложение метастабильного газового гидрата вызывает рост давления, которое может значительно превышать не только гидростатическое, но и пластовое [3]. При тем-

пературах в диапазоне $0 \div -5^\circ\text{C}$ равновесное давление в системе «газ — вода (лед) — гидрат» находится в диапазоне 1,86–2,57 МПа [26]. На глубинах 60–80 м такие давления не смогут выбросить вышележащую толщу, но могут вызвать движение газовых флюидов по ослабленным зонам, направленное вверх, что и наблюдается в нижней части Ямальского кратера (см. рис. 7).

Исследования В.Г. Квона позволили ему сделать вывод, что при отрицательных температурах, близких к 0°C , не исключается процесс разложения газогидрата на переохлажденную воду и газ без самоконсервации [11]. Кроме того, В.Г. Квону удалось определить, что в системе «метан — гидрат метана — переохлажденная вода» последняя может устойчиво существовать при температурах от 0 до -7°C и давлениях 1,5–2,0 МПа [11]. В работе В.П. Мельникова (с соавторами) на примере гидрата пропана показана возможность его длительного сосуществования с переохлажденной водой без ее кристаллизации в лед при температуре приблизительно -2°C [18]. При этом диссоциация гидратов может протекать через долгоживущую стадию метастабильной воды, а корка льда образуется либо с задержкой, либо ее появление не оказывает существенного влияния на замедление скорости диссоциации вплоть до разложения основной массы гидрата пропана [19]. Из этих данных можно заключить, что на вышележащую толщу над зоной диссоциации газогидратов могут воздействовать газовые флюиды, содержащие переохлажденную воду. Сама диссоциация газовых гидратов будет происходить при отрицательных температурах. По сообщению В.С. Якушева [29], в проведенных им экспериментах газогидраты в образцах мерзлых глинистых грунтов из Ямальского кратера диссоциировали при отрицательных температурах в диапазоне всего лишь $0,5^\circ$ ($-6,4 \div -6,9^\circ\text{C}$). При этом происходило полное разложение газогидратов без самоконсервации. Это подтверждает предположение авторов статьи, что локальный прогрев под озером может вызвать диссоциацию газогидратов даже без полного оттаивания ММП. По расчетам В.И. Богоявленского и И.А. Гарагаша, для разрушения покрывки достаточно давления даже 1,25 МПа [2]. Из вышерассмотренных материалов следует, что давления, возникающие в слое газогидратов при их диссоциации

(1,86–2,57 МПа [26]), обеспечивают выброс мерзлой кровли и формирование кратера.

При разложении газогидратов соблюдается определенное равновесие между давлением и температурой. В случае неполного разложения при изменении термобарических условий происходит восстановление температуры или давления до равновесного значения [25]. В опытах Р. Ханта, моделирующих условия разложения газогидратов в кернах, показано, что после каждого сброса давления оно возвращалось к значениям, соответствующим пластовому [22].

В случае Ямальского кратера давление, возникающее при диссоциации газогидратов, будет поддерживаться на всем протяжении формирования газонасыщенного льда (см. рис. 6, слой 3). Газ,двигающийся в виде флюидов, будет постоянно восполняться в зоне диссоциации.

Сценарии развития процессов разложения газогидратов

Рассмотренный выше сценарий разложения газовых гидратов не единственный, поскольку один и тот же процесс их диссоциации в различных природных условиях приведет к различным результатам. В связи с этим можно прогнозировать несколько сценариев развития криогенных процессов, обусловленных разложением газогидратов.

При незначительном и кратковременном повышении температуры диссоциация газогидратов может быстро закончиться в результате самоконсервации. В результате в ММП сформируется зона повышенной пористости за счет небольших газовых полостей.

При достаточной глубине и ширине озера газ, высвободившийся при диссоциации, может не накапливаться в ММП, а выделяться из подозерного талика. Это наблюдается во многих озерах Ямала [21]. Выделение газа длится от нескольких месяцев до нескольких лет, но без взрыва, поскольку есть возможность свободного его выхода.

Если гидратосодержащие ММП залегают на незначительной глубине (20–30 м), то давление газов, образовавшихся при разложении газогидратов, минуя стадию миграции в виде флюидов, может вызвать выброс кровли. При этом не обязательно будет формироваться многолетний бугор пучения. Для неглубоко залегающих газогидратов то же самое может происходить в условиях, ко-

гда причиной локального повышения температуры является не термокарстовое озеро, а благоприятные ландшафтные условия.

Техногенные факторы возникновения воронок газового выброса

К факторам, влияющим на прогрев ММП, следует относить различного рода техногенные воздействия. В пределах расположенных кустовых площадок эксплуатационных скважин могут образоваться ореолы повышения температуры ММП площадью $1 \times 2 \text{ км}^2$ [15]. Эксплуатация кустов газодобывающих скважин с положительной температурой оказывает значительное отопляющее воздействие на мерзлую толщу, что сопровождается образованием цилиндрических ореолов оттаивания на значительном расстоянии от ствола скважины. Результаты математического моделирования теплового взаимодействия эксплуатационных скважин Бованенковского НГКМ показали, что максимальная зона их теплового влияния на толщу ММП через 25 лет эксплуатации может достигать 50 м и более [5].

Значительное воздействие на температурный режим ММП оказывают также подземные трубопроводы, в которых транспортируемые продукты имеют положительную температуру. Вокруг них могут образовываться техногенные талики размером от 1–2 до 5–6 м, что сопровождается термокарстовыми просадками и формированием водоемов на поверхности [5]. Кроме того, прямое тепловое воздействие на массив ММП оказывают здания и сооружения, среди которых наиболее мощным источником тепловых потоков являются аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа. На действующих газопромышленных объектах Ямбургского и Медвежьего месторождений кровля ММП в основании АВО газа понизилась до 7,5–8 м [5]. Учитывая тот факт, что газогидраты в многолетнемерзлых породах часто залегают на глубине нескольких десятков метров, можно полагать, что опасность начала диссоциации газогидратов и формирования условий для развития воронок газового выброса достаточно велика.

Заключение

Изучение бортов Ямальского кратера позволило выделить ряд однородных элементов его строения, каждый из которых соответствует определенному эта-

пу развития с характерным для каждого этапа набором процессов. Все вместе они формируют закономерную построенную криогенную геосистему [24].

Первичной причиной формирования Ямальского кратера является диссоциация газогидратов, которые предположительно залегают на глубине 60–80 м. Диссоциация при этом происходит вследствие локального прогрева многолетнемерзлых пород под термокарстовым озером, следы которого обнаружены в бортах кратера.

В результате диссоциации газовых гидратов формируется зона повышенного давления, превышающего гидростатическое. Вследствие этого газ и переохлажденная вода проникают в вышележащие слои. Эти процессы происходят при отрицательных температурах.

Напорное движение газовых флюидов формирует шток газонасыщенного

льда, имеющего цилиндрическую форму, поперечник которого примерно соответствует поперечнику ствола Ямальского кратера. Газовая составляющая штока связана с зоной диссоциации газогидратов и находится под давлением свыше 2 МПа, которое воздействует на многолетнемерзлую кровлю.

В последующем, когда пластические деформации мерзлой кровли достигнут предела прочности, происходит ее разрыв, выброс газа и газонасыщенного ледогрунта и формирование кратера.

Ямальский кратер является частным случаем целой группы явлений — воронок газового выброса.

Диссоциация газогидратов может осуществляться в локальных зонах повышения температуры многолетнемерзлых пород. Подобные зоны формируются под поверхностными водоемами, на участках с благоприятными по-

верхностными условиями или техногенных воздействий. Процесс диссоциации газогидратов протекает при отрицательных температурах.

В зависимости от соотношения различных факторов сценарии развития воронок газового выброса и, соответственно, их морфология могут различаться.

Воронки газового выброса в зоне распространения многолетнемерзлых пород представляют опасность при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Данный вид опасностей еще слабо изучен, поэтому необходимо проведение комплексных полевых, лабораторных и опытно-методических работ по их изучению. 

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-05-00294).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 2 // Бурение и нефть. 2014. № 10. С. 4–8.
2. Богоявленский В.И., Гарагаиш И.А. Обоснование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике математическим моделированием // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 12–17.
3. Васильева З.А., Джафаров Д.С., Аметова Т.А. Косвенные техногенные признаки индикации газогидратов в криолитозоне // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 1. С. 61–67.
4. Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. С. 159–262.
5. Грива Г.И. Геоэкологические условия разработки газовых месторождений полуострова Ямал: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Надым, 2006. 41 с.
6. Данилов И.Д. Пластовые льды и субаквальный криолитогенез // Геокриологические исследования. М.: Изд-во Московского университета, 1989. С. 16–29.
7. Денисевич Е.В., Кожина Л.Ю., Черкасов В.А., Севастьянов Д.Н., Сергеев Д.С., Попова М.И. Аэрокосмический мониторинг современных проявлений геокриологической активности, опасной для объектов нефтегазового комплекса // Газовая промышленность. 2015. № 732. С. 6–10.
8. Дроздов Д.С. Информационно-картографическое моделирование природно-техногенных сред в геокриологии: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Тюмень, 2004. 49 с.
9. Дядин Ю.А., Гуцин А.Л. Газовые гидраты // Соросовский Образовательный журнал. 1998. Вып. 3. С. 55–64.
10. Жесткова Т.Н., Шур Ю.Л. Об инфильтрационно-сегрегационном механизме образования пластовых льдов // Пластовые льды криолитозоны / отв. ред. А.И. Попов. Якутск: ИМ СО АН СССР, 1982. С. 105–115.
11. Кwon В.Г. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий углеводородных систем с водой и газовыми гидратами для повышения эффективности технологий в добыче газа: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2008. 24 с.
12. Кизяков А.И., Соношкин А.В., Лейбман М.О., Зимин М.В., Хомутов А.В. Геоморфологические условия образования воронок газового выброса и динамика этой формы на центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 2. С. 15–25.
13. Кожина Л.Ю., Микляева Е.С., Перлова Е.В., Синецкий А.И., Ткачева Е.В., Черкасов В.А. Опасные современные проявления криоактивности — основные результаты исследования Ямальского кратера // Научный вестник ЯНАО. 2015. № 2. С. 19–28.
14. Коробова Т.А. Картографо-математический анализ неоднородности морфологической структуры ландшафтов и геокриологических условий Западного Ямала // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 3. С. 87–93.
15. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / под общ. ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: ООО Газпром экспо, 2013. 424 с.
16. Лейбман М.О., Кизяков А.И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. 2016. Вып. 2. С. 15–24.
17. Лейбман М.О., Плеханов А.В. Ямальская воронка газового выброса // Холод'ОК. 2014. № 2 (12). С. 9–15.
18. Мельников В.П., Нестеров А.Н., Решетников А.М. Диссоциация газовых гидратов при атмосферном давлении // Газовая промышленность: спецвыпуск «Газовые гидраты». 2006. С. 55–61.

19. Мельников В.П., Нестеров А.Н., Решетников А.М. Механизм разложения газовых гидратов при давлении 0,1 МПа // Доклады Академии наук. 2003. Т. 389. № 6. С. 803–806.
20. Оленченко В.В., Сеницкий А.И., Антонов Е.Ю., Ельцов И.Н., Кушнарченко О.Н., Плотников А.Е., Потапов В.В., Эпов М.И. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальный кратер» // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 4. С. 94–106.
21. Сизов О.В. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопоявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. 2015. Вып. 1. С. 53–68.
22. Хант Дж. Геохимия и геология нефти и газа. М.: Мир, 1982. 704 с.
23. Хилимонюк В.З., Оспенников Е.Н., Булдович С.Н., Гунар А.Ю., Горшков Е.И. Геокриологические условия территории расположения Ямального кратера // Пятая конференция геокриологов России. М.: Университетская книга, 2016. Т. 2. С. 245–255.
24. Хименков А.Н. Геосистемный подход в геокриологии // Криосфера Земли. Т. XVII. 2013. № 2. С. 74–82.
25. Чувиллин Е.М., Буханов Б.А., Гребенкин С.И., Дорошин В.В., Иоспа А.В. Экспериментальное изучение прочности мерзлых гидратосодержащих грунтов в условиях проявления самоконсервации порового гидрата // Пятая конференция геокриологов России. М.: Университетская книга, 2016. Т. 3. С. 180–186.
26. Шостак Н.А. Моделирование образования и диссоциации гидратов при разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2015. 23 с.
27. Эпов М.И., Ельцов И.Н., Оленченко В.В., Потапов В.В., Кушнарченко О.Н., Плотников А.Е., Сеницкий А.И. Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук. 2014. Вып. 5 (59). С. 14–23.
28. Якушев В.С. Формирование скоплений природного газа и газовых гидратов в криолитозоне: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 2009. 47 с.
29. Ямальная воронка. Часть 2 // Семинар Сообщества молодых мерзлотоведов России. М.: Институт географии РАН, 16.12.2016.
30. 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. M.: Lomonosov Moscow State University, 2014. Vol. 7. № 4. P. 68–80.
31. Sergeev D., Khimenkov A., Topenko G., Vlasov A., Cauquil E., Green E., Dauboin P., Stanilovskaya J., Mnushkin M. Yamal craters: state of knowledge and wished in-situ investigations // XI International Conference on Permafrost: book of abstracts. Potsdam, 2016. P. 997.

ЭЛЕКТРОННАЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ», «ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ»,
«ГЕОТЕХНИКА» И «ГЕОРИСК»



Лузганов Григорий
+7 (495) 210-89-92
PR@GEOMARK.RU
WWW.GEOMARK.RU

www.geomark.ru

6. *Zarudnev V.M.* Lavinnaya opasnost' v bassejne r. Bol'shoj Zelenchuk [Snow Avalanche Hazard in the Bolshoy Zelenchuk River Basin] // Sb. rabot RGMO [Proceedings of RGMO]. L.: Gidrometeoizdat, 1980. Vol. 17. S. 17-33. (Rus.)
7. *Zarudnev V.M., Salpagarov A.D., Homa I.I.* Lavinnaya opasnost' bassejnov rek Teberda, Bol'shoj Zelenchuk, Mzymta i zashhita ot snezhnyh lavin i selej gornolyzhnyh kompleksov Dombaj, Arhyz, Krasnaya Polyana [Snow Avalanche and Debris Flow Hazard of the Teberda, Bolshoy Zelenchuk and Mzymta River Basins. Snow Avalanche and Debris Flow Preventive Measures for Dombay, Arkhyz and Krasnaya Polyana Ski resorts] // Trudy Teberdinskogo gosudarstvennogo zapovednika [Proceedings of the Teberda Nature Reserve]. Kislovodsk: Severo-Kavkazskoe izdatel'stvo «MIL», 2007. Vol. 46. 287 s. (Rus.)
8. SN 517-80. Instrukciya po proektirovaniyu i stroitel'stvu protivolavnyh zashhitnyh sooruzhenij [Instruction for the Design and Construction of Avalanche Protection Structures]. M., 1980. 17 s. (Rus.)
9. SP 116.13330.2012. Inzhenernaya zashhita territorij, zdaniy i sooruzhenij ot opasnyh geologicheskikh processov. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 22-02-2003 [Engineering Protection of Territories, Buildings and Structures from Dangerous Geological Processes. Basic principles. Revised edition of the SNiP 22-02-2003]. M., 2012. 59 s. (Rus.)
10. *Turchaninova A.S., Seliverstov Yu.G., Glazovskaya T.G.* Modelirovanie snezhnyh lavin v programme RAMMS v Rossii [Modeling of Snow Avalanche Using RAMMS in Russia] // Georisk [Georisk]. 2015. № 4. S. 50–55. (Rus.)
11. *Christen M., Bartelt P., Kowalski J.* RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain // Cold Regions Science and Technology. 2010. № 63. P. 1–14.
12. *Salm B.* Contribution to avalanche dynamics. International Association of Scientific Hydrology Publication 69 // Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches: Symposium in Davos 1965. Wallingford: IAHS Press, 1966. P. 199–214.
13. *Voellmy A.* Über die Zerstörungskraft von Lawinen // Schweizerische Bauzeitung. 1955. Vol. 73. P. 212–285.
14. RAMMS. Rapid mass movement simulation: RAMMS official web site. [Electronic resource]. URL: <http://ramms.slf.ch/ramms/>.

GAS EMISSIONS IN THE CRYOLITHOZONE: A NEW TYPE OF GEOCRYOLOGICAL HAZARDS

KHIMENKOV A.N.

Leading Research Scientist of the Laboratory of Geocryology, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, a_khimenkov@mail.ru

SERGEEV D.O.

Head of the Laboratory of Geocryology, Sergeev Institute of Environmental Geosciences, Russian Academy of Sciences, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, sergueevdo@mail.ru

STANILOVSKAYA Yu.V.

Research Scientist of the Laboratory of Geocryology, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Moscow, stanik85@mail.ru

VLASOV A.N.

Director of the Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, DSc (Doctor of Science in Technics), Moscow, bah1955@yandex.ru

VOLKOV-BOGORODSKY D.B.

Senior Research Scientist of the Laboratory of Nonclassical Models of Composite Materials and Designs, Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, PhD (Candidate of Science in Physics and Mathematics), Moscow, volkov-bogorodskij@iam.ras.ru

Summary

The history of studying the Yamal crater is considered. It is concluded that previous researchers didn't analyze the geological structure of the soils in walls inside the crater. But this analysis allows to identify a number of homogeneous elements in its structure. Each element corresponds to a certain

stage of crater development, and all together they form a regularly constructed cryogenic geosystem.

The stadiality of the Yamal crater formation are revealed. The primary reason for it is the dissociation of the gas hydrates, located at a depth of 60–80 m. The trigger of dissociation is local warming of permafrost under the thermokarst lake. Its imprint was discovered in the crater walls. The Yamal crater is a special case of a group of phenomena — gas emission craters. The gas hydrates dissociation can be carried out in local zones of temperature increase of permafrost under surface water bodies. These zones can be formed in areas with favorable surface conditions or under technogenic impacts. The gas hydrates dissociation occurs at negative temperatures.

Gas emission craters in permafrost are geohazard during the construction and operation of engineering structures. This type of geohazard is still poorly understood. Therefore, it is necessary to conduct comprehensive field, laboratory and experimental-methodological researches of this geohazard. 

REFERENCES

1. *Bogoyavlenskij V.I.* Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Yamala i Tajmyra. Chast' 2 [The Threat of Catastrophic Gas Emissions from the Cryolithozone of the Arctic. Yamal and Taymyr Craters. Part 2] // Burenie i nef' [Drilling and Oil]. 2014. № 10. S. 4–8. (Rus.)
2. *Bogoyavlenskij V.I., Garagash I.A.* Obosnovanie processa obrazovaniya kraterov gazovogo vybrosa v Arktike matematicheskim modelirovaniem [Substantiation of the Gas Emission Craters Formation Process in the Arctic by Mathematical Modeling] // Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]. 2015. № 3 (19). S. 12–17. (Rus.)

3. Vasil'eva Z.A., Dzhafarov D.S., Ametova T.A. Kosvennye tekhnogennye priznaki indikatsii gazogidratov v kriolitozone [Indirect Technogenic Signs of Gas Hydrates Indication in the Cryolithozone] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2011. T. XV. № 1. S. 61–67. (Rus.).
4. Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir' [Geocryology of the USSR. Western Siberia] / pod red. E.D. Ershova [Edited by E.D. Ershov]. M.: Nedra, 1989. S. 159–262. (Rus.).
5. Griva G.I. Geoekologicheskie usloviya razrabotki gazovykh mestorozhdenij poluostrova Yamal: avtoref. dis. ... d-ra geol.-min. nauk [Geocological Conditions for the Development of gas Fields in the Yamal Peninsula: Synopsis of Thesis of Doctor of Science in Geology Mineralogy]. Nadym, 2006. 41 s. (Rus.).
6. Danilov I.D. Plastovye l'dy i subakval'nyj kriolitogenez [Massive Ground Ice and Subaquatic Cryolithogenesis] // Geokriologicheskie issledovaniya [Geocryological Studies]. M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1989. S. 16–29. (Rus.).
7. Denisevich E.V., Kozhina L.Yu., Cherkasov V.A., Sevast'yanov D.N., Sergeev D.S., Popova M.I. Aerokosmicheskij monitoring sovremennykh proyavlenij geokriologicheskoy aktivnosti, opasnoj dlya ob"ektov neftegazovogo kompleksa [Aerospace Monitoring of Modern Geocryological Activity: Upstream Oil and Gas Hazard] // Gazovaya promyshlennost' [Gas Industry]. 2015. № 732. S. 6–10. (Rus.).
8. Drozdov D.S. Informacionno-kartograficheskoe modelirovanie prirodno-tekhnogennykh sred v geokriologii: avtoref. dis. ... d-ra geol.-min. nauk [Information-Cartographic Modeling of Natural and Technogenic Environments in Geocryology: Synopsis of Thesis of Doctor of Science in Geology and Mineralogy]. Tyumen', 2004. 49 s. (Rus.).
9. Dyadin Yu.A., Gushchin A.L. Gazovye gidraty [Gas Hydrates] // Sorosovskij Obrazovatel'nyj zhurnal [Sorosovsky Educational Journal]. 1998. Vol. 3. S. 55–64. (Rus.).
10. Zhestkova T.N., Shur Yu.L. Ob infiltratsionno-segregatsionnom mekhanizme obrazovaniya plastovykh l'dov [About Infiltration and Segregation Mechanism of Massive Ground Ice Formation] // Plastovye l'dy kriolitozony [Massive Ground Ice in Cryolithozone]. Yakutsk: IM SO AN SSSR, 1982 [Permafrost Institute of Siberian Branch of USSR Academy of Science]. S. 105–115. (Rus.).
11. Kvon V.G. Termodinamicheskoe modelirovanie fazovykh ravnovesij uglevodorodnykh sistem s vodoj i gazovymi gidratami dlya povysheniya effektivnosti tekhnologii v dobyche gaza: avtoref. dis. ... kand. geol.-min. nauk [Thermodynamic Modeling of Phase Equilibria of Hydrocarbon Systems with Water and Gas Hydrates for Increasing the Efficiency of Technologies in Gas Production: Synopsis of Thesis of Candidate of Science in Geology and Mineralogy]. M.: VNIIGAZ, 2008. 24 s. (Rus.).
12. Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Lejbman M.O., Zimin M.V., Homutov A.V. Geomorfologicheskie usloviya obrazovaniya voronki gazovogo vybrosa i dinamika etoj formy na central'nom Yamale [Geomorphological Conditions for the Gas Emission Crater and the Dynamics of This Form in Central Yamal] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2015. Vol. XIX. № 2. S. 15–25. (Rus.).
13. Kozhina L.Yu., Miklyaeva E.S., Perlova E.V., Sinickij A.I., Tkacheva E.V., Cherkasov V.A. Opasnye sovremennye proyavleniya krioaktivnosti — osnovnye rezul'taty issledovaniya Yamal'skogo kratera [Dangerous Contemporary Manifestations of Cryoactivity — the Main Results of the Yamal Crater's Study] // Nauchnyj vestnik YANAO [Scientific Herald of YaNAO]. 2015. № 2. S. 19–28. (Rus.).
14. Korobova T.A. Kartografo-matematicheskij analiz neodnorodnosti morfologicheskoy struktury landshaftov i geokriologicheskikh uslovij Zapadnogo Yamala [Cartographic and Mathematical Analysis of the Heterogeneity of the Landscapes Morphological Structure and Geocryological Conditions of Western Yamal] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2013. Vol. XVI. № 3. S. 87–93. (Rus.).
15. Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdenij poluostrova Yamal. T. 2. Kriosfera Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya [Cryosphere of Oil and Gas Condensate Fields of the Yamal Peninsula. Vol. 2. Cryosphere of the Bovanenkovo Oil and Gas Condensate Field] / pod obshch. red. Yu.V. Badu, N.A. Gafarova, E.E. Podbornogo [Edited by Yu.V. Badu, N.A. Gafarova, E.E. Podborny]. M.: OOO Gazprom ekspozitsiya [Gazprom Expo], 2013. 424 s. (Rus.).
16. Lejbman M.O., Kizyakov A.I. Novyj prirodnyj fenomen v zone vechnoj merzloty [New Natural Phenomenon in Permafrost] // Priroda [Nature]. 2016. Vol. 2. S. 15–24. (Rus.).
17. Lejbman M.O., Plekhanov A.V. Yamal'skaya voronka gazovogo vybrosa [The Yamal Gas Emission Crater] // Kholod'OK. 2014. № 2 (12). S. 9–15. (Rus.).
18. Mel'nikov V.P., Nesterov A.N., Reshetnikov A.M. Dissotsiatsiya gazovykh gidratov pri atmosfernom davlenii [Dissociation of Gas Hydrates at Atmospheric Pressure] // Gazovaya promyshlennost': specvypusk «Gazovye gidraty» [Gas Industry: special issue «Gas Hydrates»]. 2006. S. 55–61. (Rus.).
19. Mel'nikov V.P., Nesterov A.N., Reshetnikov A.M. Mekhanizm razlozheniya gazovykh gidratov pri davlenii 0,1 MPa [Mechanism of Gas Hydrates Decomposition at a Pressure of 0.1 MPa] // Doklady Akademii Nauk [Reports of the Academy of Sciences]. 2003. Vol. 389. № 6. S. 803–806. (Rus.).
20. Olenchenko V.V., Sinickij A.I., Antonov E.Yu., El'cov I.N., Kushnarenko O.N., Plotnikov A.E., Potapov V.V., Epov M.I. Rezul'taty geofizicheskikh issledovaniy territorii geologicheskogo novoobrazovaniya «Yamal'skij krater» [Results of Geophysical Researches of the Area of New Geological Formation «Yamal crater»] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2015. Vol. XIX. № 4. S. 94–106. (Rus.).
21. Sizov O.V. Distantsionnyj analiz posledstvij poverkhnostnykh gazoproyavlenij na severe Zapadnoj Sibiri [Remote Analysis of the Consequences of Surface Gas Emissions in the North of Western Siberia] // Geomatika [Geomatics]. 2015. Vol. 1. S. 53–68. (Rus.).
22. Hant Dzh. Geokhimiya i geologiya nefti i gaza [Geochemistry and Geology of Oil and Gas]. M.: Mir, 1982. 704 s. (Rus.).
23. Hilimonyuk V.Z., Ospennikov E.N., Buldovich S.N., Gunar A.Yu., Gorshkov E.I. Geokriologicheskie usloviya territorii raspolozheniya Yamal'skogo kratera [Geocryological Conditions of the Territory of the Yamal Crater Location] // Pyataya konferenciya geokriologov Rossii [Fifth Conference of Russian Geocryologists]. M.: Universitetskaya kniga, 2016. Vol. 2. S. 245–255. (Rus.).
24. Himenkov A.N. Geosistemnyj podhod v geokriologii [The Geosystem Approach in Geocryology] // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. 2013. Vol. XVII. № 2. S. 74–82. (Rus.).
25. Chuvilin E.M., Buhanov B.A., Grebyonkin S.I., Doroshin V.V., Iospa A.V. Eksperimental'noe izuchenie prochnosti myorzlykh gidratosoderzhashchih gruntov v usloviyakh proyavleniya samokonservatsii porovogo gidrata [Experimental Study of the Frozen Hydrate-Bearing Soils Strength Under Conditions of Self-Preservation of Pore Hydrate] // Pyataya konferenciya geokriologov Rossii [Fifth Conference of Russian Geocryologists]. Vol. 3. M.: Universitetskaya kniga, 2016. S. 180–186. (Rus.).

26. *Shostak N.A.* Modelirovanie obrazovaniya i dissociatsii gidratov pri razrabotke i ekspluatacii neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Modeling of the Formation and Dissociation of Hydrates in the Development and Operation of Oil and Gas Fields: Synopsis of Thesis of Candidate in Technical Sciences]. Krasnodar, 2015. 23 s. (Rus.).
27. *Erov M.I., El'cov I.N., Olenchenko V.V., Potapov V.V., Kushnarenko O.N., Plotnikov A.E., Sinickij A.I.* Bermudskij treugol'nik Yamala [The Bermuda Triangle of Yamal] // Nauka iz pervyh ruk [Science from the First Hands]. 2014. V. 5 (59). S. 14–23. (Rus.).
28. *Yakushev V.S.* Formirovanie skoplenij prirodnogo gaza i gazovyh gidratov v kriolitozone: avtoref. dis. ... d-ra geol.-min. nauk [Formation of Natural Gas and Gas Hydrates Clusters in the Cryolithozone: Synopsis of Thesis of Doctor of Science in Geology and Mineralogy]. M.: VNIIGAZ, 2009. 47 s. (Rus.).
29. Yamal'skaya voronka. CHast' 2 [Yamal crater. Part 2] // Seminar Soobshchestva molodyh merzlotovedov Rossii [Workshop of Permafrost Young Researchers Society of Russia]. M.: Institut geografii RAN [Institute of Geography RAS], 16.12.2016. (Rus.)
30. *Leibman M.O., Kizyakov A.I., Plehanov A.V., Streletskeya I.D.* New permafrost feature: deep crater in Central Yamal, West Siberia, Russia as a response to local climate fluctuations // Geography, environment, sustainability. M.: Lomonosov Moscow State University. V. 7. № 04, P. 68–80.
31. *Sergeev D., Khimenkov A., Tipenko G., Vlasov A., Cauquil E., Green E., Dauboin P., Stanilovskaya J., Mnushkin M.* Yamal craters: state of knowledge and wished in-situ investigations // XI International Conference on Permafrost: book of abstracts. Potsdam, 2016. P. 997.

ЭЛЕКТРОННАЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ», «ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ»,
«ГЕОТЕХНИКА» И «ГЕОРИСК»



Лузганов Григорий
+7 (495) 210-89-92
PR@GEOMARK.RU
WWW.GEOMARK.RU

www.geomark.ru