

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.345

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-6(21-32)

БУГРЫ ПУЧЕНИЯ НА ПЛОЩАДИ ГАЗОНОСНЫХ СТРУКТУР  
СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Ю.Б. Баду, К.А. Никитин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
географический ф-т, кафедра криолитологии и гляциологии,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; yubadu@mail.ru, nikitin.kirill@yandex.ru

Распространение бугров пучения рассматривается на основе концепции субаквального криолито-генеза газонасыщенных морских отложений криогенной толщи. Впервые отмечены максимумы их площадного распространения и показано, что бугры пучения на площадях газоносных структур приурочены к геолого-геоморфологическим уровням морских и лагунно-морских террас. Предполагается, что бугры пучения именно на таких участках могут естественно разрушаться с последующим взрывом газа из льдистого ядра и подстилающих его пород.

*Бугор пучения, воронка газового выброса, газоносная структура, геолого-геоморфологический уровень, морские отложения*

FROST MOUNDS WITHIN THE GAS-BEARING STRUCTURES AREAS,  
NORTHERN PART OF WEST SIBERIA

Yu.B. Badu, K.A. Nikitin

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,  
Department of Cryolithology and Glaciology, 1, Leninskie Gory, Moscow,  
119991, Russia; yubadu@mail.ru, nikitin.kirill@yandex.ru

The distribution of frost mounds is considered based on the concept of subaqueal freezing of gas-saturated marine sediments. For the first time, the areas with maximum density of frost mounds have been detected. Frost mounds in the areas of gas-bearing structures are confined to marine terraces of different ages. It is assumed that frost mounds in such areas can naturally collapse with subsequent explosion of gas from the ice core and the underlying deposits.

*Frost mound, gas-emission crater, gas-bearing structure, marine terraces, marine deposits*

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время группа криогенных процессов и явлений, тесно связанных с возникновением и развитием бугров пучения (БП), о которых известно достаточно давно [Андреев, 1936; и др.], вызывает повышенный интерес ученых [Васильчук и др., 2008, 2014; Пономарева и др., 2012; Богоявленский, 2014а,б, 2015, 2018; Касымская, 2014; Богоявленский, Гарагаш, 2015; Кизяков и др., 2015, 2017; Оленченко и др., 2015; Богоявленский и др., 2016, 2017, 2018а,б; Лейбман и др., 2016, 2018; Хилмонюк и др., 2016; Власов и др., 2017; Орехов и др., 2017; Перлова и др., 2017; Стрелецкая и др., 2017; Хименков и др., 2017а,б, 2018; Епифанов, 2018; Титовский и др., 2018; Якушев, 2018; Vorobyev et al., 2019]. Внешние газопроявления при образовании воронок газового выброса (ВГВ), криовулканизм в Восточной Сибири [Алексеев, 2012,

2013], грязевые вулканы [Нежданов и др., 2011; Хименков и др., 2017б; Богоявленский и др., 2019а,б], многие из которых расположены вблизи объектов газодобычи и трасс магистральных нефтегазопроводов, представляют серьезную опасность для эксплуатации и состояния объектов инфраструктуры Крайнего Севера [Богоявленский, 2014а,б].

Данная проблема изучается геофизиками, геологами и географами, которые используют различные полевые и камеральные методы (криолитологические, сравнительно-географические, картографические и др.), направленные на исследование сложного механизма и прогнозирование развития опасного криогенного процесса. Конкретные геокриологические и криолитологические данные по феномену Ямальского кратера

были получены сотрудниками кафедры геокриологии геологического факультета МГУ. В результате проведения комплекса исследований был показан наиболее реальный механизм развития БП и его превращения в воронку газового выброса [Хулимонюк и др., 2016; Buldovicz et al., 2018; Vorobyev et al., 2019].

По результатам комплексной геокриологической съемки территории Западно-Сибирской плиты, выполненной тюменской экспедицией геологического факультета МГУ в 1966–1978 гг. [Трофимов и др., 1980], выявлено, что, с одной стороны, в течение голоцена многие бугры пережили сложную историю развития и изменения природных обстановок промерзания, а с другой – особенности площадного распространения бугров различны на участках морских террас и водораздельных поверхностей, на поймах и лайдах, в устьях рек и их верховьях [Бадю и др., 1986].

Позднее в работе [Геворкян, Корейша, 1993] детально описан взрывной механизм роста бугра пучения и использован расчетный метод для изучения развития напряжений в ядре бугра и в породах, перекрывающих ядро.

Сегодня факты того, что на месте ВГВ располагались БП, позволяют утверждать, что воронка – закономерный этап развития бугров с газонасыщенным ледяным ядром. Но единое мнение о механизме формирования воронки отсутствует. В связи с этим анализ конкретных природных условий формирования БП и ВГВ на севере Западной Сибири является целью данной работы. Возникают вопросы: какие разновидности или типы бугров пучения могут быть предшественниками воронки газового выброса и только ли они могут быть таковыми; в каких ландшафтных обстановках они развиваются и существуют?

Какие бугры привлекают наше внимание – бугор пучения, грязевой вулкан, криовулкан, могильник или Патомский конус (в Восточной Сибири)? На рассматриваемой территории (севернее Полярного круга) заслуживают внимания все (кроме двух последних, восточно-сибирских) бугры пучения как поверхностные природные объекты выпуклой формы единого генетического типа, возникающие в промерзающей толще пород с открытой или закрытой системой водообмена, обеспечивающей либо неограниченный и напорный подток воды к фронту промерзания, либо ограниченный и безнапорный.

В задачи исследования включено изучение особенностей распространения БП на площадях газонасыщенных структур и в пределах различных геоморфологических уровней. Разработанные представления и гипотезы часто не учитывают конкретные природные условия развития феномена и могут быть объяснены только при географическом криолитологическом анализе распространения

бугров пучения, их связи с газонасыщенными породами верхней части разреза газонасыщенных структур с учетом ландшафтно-геоморфологических особенностей территории.

Результаты исследования бугров пучения, основных механизмов их образования и воронок газового выброса позволят в перспективе выделять потенциально опасные участки на севере Западной Сибири с теми БП, для которых велика вероятность превращения в ВГВ.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Ключевые участки выбраны для детального изучения площади распространения бугров пучения, геокриологических условий их размещения и развития в пределах области сплошного распространения мерзлых пород. Географическое положение объектов определено и зафиксировано по 67 листам топографических карт Генштаба СССР масштаба 1:200 000, изданных в 60–90-х гг. XX в. На этих картах бугры пучения (булгуннях, ледяной холм, ледяной бугор) обозначены внемасштабным знаком. На территории Ямальского, Гыданского и Тазовского полуостровов, ограниченной с юга широтой 66°30', выявлено 1425 бугров пучения (рис. 1). Воронки газового выброса нанесены на карту по данным из [Богоявленский и др., 2019а].

Для определения условий, в которых развиваются разнообразные БП и ВГВ, их связи с площадями газонасыщенных структур (ГС), на карту нанесены контуры 240 площадей газонасыщенных структур групп III, IV, V [Бадю, 2017а, 2018]. В приповерхностной части разреза ГС группы III залегают поздненеоплейстоценовые морские суглинки и глины с прослоями песков; группы IV – поздненеоплейстоценовые лагунно-морские суглинки, супеси и пески; группы V – среднееоплейстоценовые суглинки и глины с прослоями песков и супесей. В их пределах и на расстоянии 5–10 км за контуром ГС подсчитано количество бугров, определена плотность их распространения на площади ГС по каждому полуострову.

На рис. 1 приведены площади ГС и ключевые участки (КУ). При подготовке карты использованы карта льдистости [Карта... типов..., 1982], карта мощности и строения толщ многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты [Карта мощности..., 1984], карта нефтегазоносности ЯНАО в масштабе 1:1 000 000, топографические карты масштаба 1:200 000.

Воронки газового выброса быстро превращаются в озера с отступающими берегами [Корниенко и др., 2014; Кизяков и др., 2015, 2017; Хомутов и др., 2017], и динамика формы озер во многом зависит от геоморфологического положения ВГВ в котловинах, хасырях или на склоне [Кизяков и др., 2015], а по аэрофотоснимкам высокого разре-

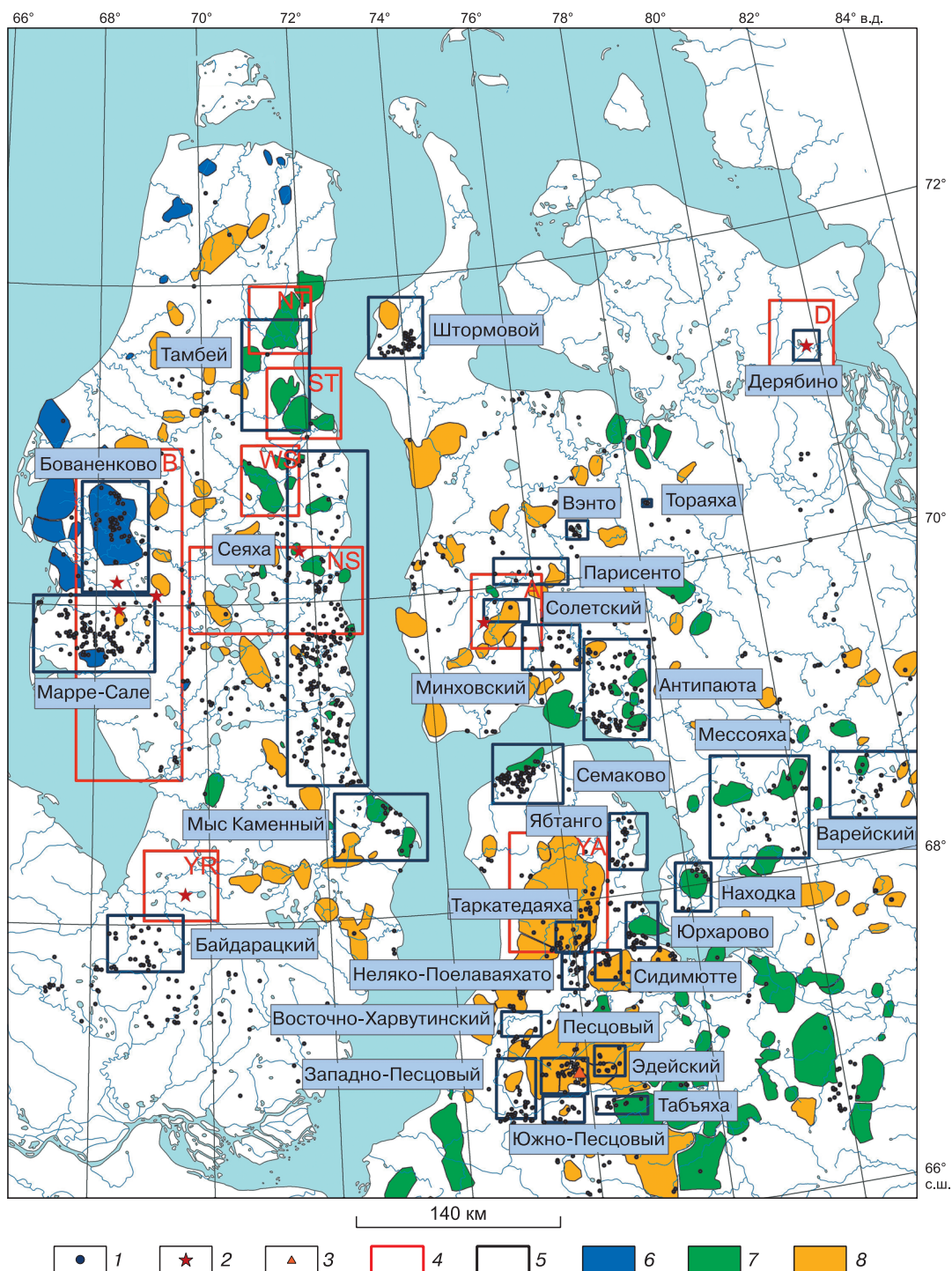


Рис. 1. Ключевые участки исследований.

1 – бугры пучения; 2 – воронки газового выброса [Богоявленский и др., 2019а,б]; 3 – грязевые вулканы [Нежданов и др., 2011]; 4 – участки детальных исследований Института проблем нефти и газа РАН: В – Бованенковский, ST – Южно-Тамбейский, NT – Северо-Тамбейский, WS – Западно-Сеяхинский, YR – Еркутинский, D – Дерябинский, YA – Ямбургский, А – Антипаютинский [Богоявленский, 2014а, б]; 5 – ключевые участки. Группы газоносных структур [Баду, 2017б,в, 2018]: 6 – группа III, 7 – группа IV, 8 – группа V.

шения достоверно определяются их характерные признаки [Хомутов и др., 2017; Титовский и др., 2018]. Термокарстовые озера на участках дегазации недр с многочисленными подводными кратерами также указывают на подток флюидов в криолитозону [Корниенко и др., 2014; Брыксина, Полищук, 2015; Богоявленский и др., 2019б]. Кроме того, в различных ландшафтных обстановках в таких местах появляются новые бугры [Богоявленский, Гарагаш, 2015], которые можно установить при сравнении топокарт масштаба 1:200 000 (на год их издания) с изображением на современном космическом снимке сверхвысокого разрешения.

Все многообразие точек зрения, гипотез и предположений анализируется при изучении конкретных данных по связи воронок с БП, с площадями ГС, с геоморфологическими, геокриологическими и ландшафтными условиями их распространения.

В соответствии с положениями криосистемного анализа [Бадю, 2016] в понятие криосистемы БП включаются бугры пучения с льдистым или ледяным ядром в пределах геоморфологического уровня с определенным типом структурной единицы ландшафта. Граница криосистемы БП оконтуривается по площади местности или урочища.

Для комплексной оценки и прогноза взрывоопасности криогенного процесса образования и развития БП выделено три вида криосистем БП с подвидами.

*Первый вид* – позднеголоценовые и современные БП в долинах рек:

- БП вблизи мелеющих старичных и термокарстовых озер поймы и крупных озерных котловин, со стоком в речную сеть; современные;

- БП на месте полностью спущенных озер в хасырях в пределах речных долин; современные и позднеголоценовые.

*Второй вид* – позднеголоценовые и современные БП на морских террасах:

- БП в террасированных котловинах и хасырях на поверхности средне- и поздненеоплейстоценовых морских равнин и террас; современные и позднеголоценовые;

- БП в поздненеоплейстоценовых хасырях на поверхности лагунно-морских террас; позднеголоценовые.

*Третий вид* – современные БП на склонах:

- БП вблизи верхних частей оврагов на пологих склонах поздненеоплейстоценовых морских равнин с тектонически ориентированной термоэрозионной сетью оврагов; современные;

- БП на склонах временных водотоков и балок древней и современной термоэрозионной сети.

Для характеристики и корреляции связей распространения БП с криогенными ландшафтами на площади ГС и геоморфологических уровней вводится коэффициент площадного распростране-

ния ПР (количество БП на 100 км<sup>2</sup>). Это дает возможность: 1) определить связи развития БП с газовой залежью газоносной структуры, учитывая вероятность наличия газа в породах подоцерного (подруслового и др.) талика, в пределах которого вырос БП и взорвался с образованием ВГВ либо стал потенциально взрывоопасен; 2) определить, связаны ли объекты с типичным геологическим разрезом поймы тектонически ориентированных речных долин, заложенных в конце позднего неоплейстоцена над тектоническими разломами в земной коре и прорезавших покров четвертичных отложений; 3) подтвердить приуроченность БП к определенному типу ландшафта.

Описания природных условий, в которых сформировались ВГВ, не всегда информативны и комплексны, поэтому необходимо исследовать геолого-геоморфологические особенности развития ВГВ на всей территории их существования в области сплошного распространения мерзлых пород. Южнее, там, где мерзлая толща протаивала в период климатического оптимума голоцена, возраст и продолжительность их роста могут быть ограничены длительностью периода заметного потепления климата, резко изменившего тепловое состояние пород верхней части разреза.

#### **Взаимосвязь расположения бугров пучения с газоносными структурами разных порядков**

В географическом и криолитологическом понимании нет сомнений в вероятностной связи БП и ВГВ с площадью крупных неотектонических структур, так как ГС как структуры третьего порядка, расположенные над мегавалами, мегапрогибами, валами и впадинами, являются источниками газов, мигрирующих из-под покрывки газовой залежи [Бадю, 2018]. Газ в мерзлых породах и подземных водах насыщает воды талика, которые при промерзании мигрируют или инжецируют вверх, образуя ядро БП. Их развитие нередко заканчивается естественным разрушением грунтовой кровли или нарушением ее сплошности от разрядки механических напряжений из-за роста ледяного ядра. При этом обнаженная часть льда при оттаивании испаряет поглощенный газ, насыщая окружающий воздух до концентрации 9–16 % [Вяхирев, Шушунова, 1975], и взрывается, охватывая подстилающие отложения и ледяной шток корневой системы инжекции.

Формулируя точку зрения на значение метана в образовании воронки газового выброса, авторы учитывают, что метан мантии и угленосных залежей перми–триаса мигрирует по тектоническим разломам и концентрируется в антиклинальных складках сеноманских отложений под мощным верхнемеловым экраном покрывки продуктивной газовой залежи. Заполнив ловушки полностью, газ устремляется в слои, расположен-



ные выше. Этот процесс происходит в течение многих миллионов лет. Из-за нарушенности покрывки газ постоянно выделяется в перекрывающую толщу, насыщая накопленные в плейстоцене и накапливающиеся современные морские осадки [Бадю, 2018]. Это значит, что образование как БП с газонасыщенным льдом или льдистым грунтом ядра, так и ВГВ в результате развития БП, связано с газонасыщенностью плейстоценовых морских отложений, в которых формируется талик. Это предположение подтверждается результатами конкретных геокриологических исследований, показавшими, что при промерзании и образовании БП большое количество газа сконцентрировано в ледяном или сильнольдистом ядре бугра [Курчатова, Розов, 2018].

Авторы не разделяют целый ряд общих представлений разных исследователей о ямальском феномене превращения БП в ВГВ: во-первых, когда в них не учитывается газонасыщенность плейстоценовых морских отложений региона, вмещающих подобные образования; во-вторых, когда говорится о газе как о болотном метане голоценового возраста, о наличии воздушных или газовых полостей в теле ледяного штока, о выдавливании газом ледяного штока; в-третьих, когда говорится об элементарном процессе вулканизма – “горячем” процессе, совершенно несравнимом с криогенным процессом по температуре, по энергетике и динамике, по характеру теплообмена между оболочками Земли, по условиям развития и последствиям, но только отдаленно – по форме залегания ледяной интрузии в разрезе. Конечно, в отличие от позиций П.А. Шумского, Б.П. Вейнберга и И.Я. Баранова, профессор О.К. Ланге и польский геолог А.Б. Добровольский относили продукт кристаллизации подземных вод (лед) к классу магматических горных пород, но только в сравнительном смысле [Бадю, 2010].

Авторские представления о развитии ВГВ на месте БП основаны на том, что бугор пучения образуется на месте талика по классической схеме промерзания пород в открытой или закрытой системе. Но при этом учитывается, что:

- только в пределах площади ГС породы криогенной толщи насыщены газом или вмещают его скопления в антиклинальных ловушках из литологической пары слоев глина–песок. Водоносные слои насыщены газом из вмещающих пород. Газ накапливался в породах в процессе их накопления и диагенетических преобразований до промерзания;

- рост БП обеспечивается формированием ядра из льдистого грунта или чистого льда, насыщенного газом. Когда прочность массива покрывки мерзлых пород над ядром будет нарушена силами пучения, массив разрывается (лопается). Лед

ядра обнажается, из него испаряется газ, при концентрации которого в воздухе 9–16 % бугор взрывается. Газ воспламеняется мгновенно весь: и из ядра, и из ледяного штока инъекции из водоносного пласта, и из подстилающей (возможно) пластовой залежи льда;

- пирогенная природа взрыва БП не обязательна, и внутреннее криогенное давление – первичная причина взрыва. Но случаи возгорания уже зафиксированы на Сеяхинской воронке [Богоявленский и др., 2019а].

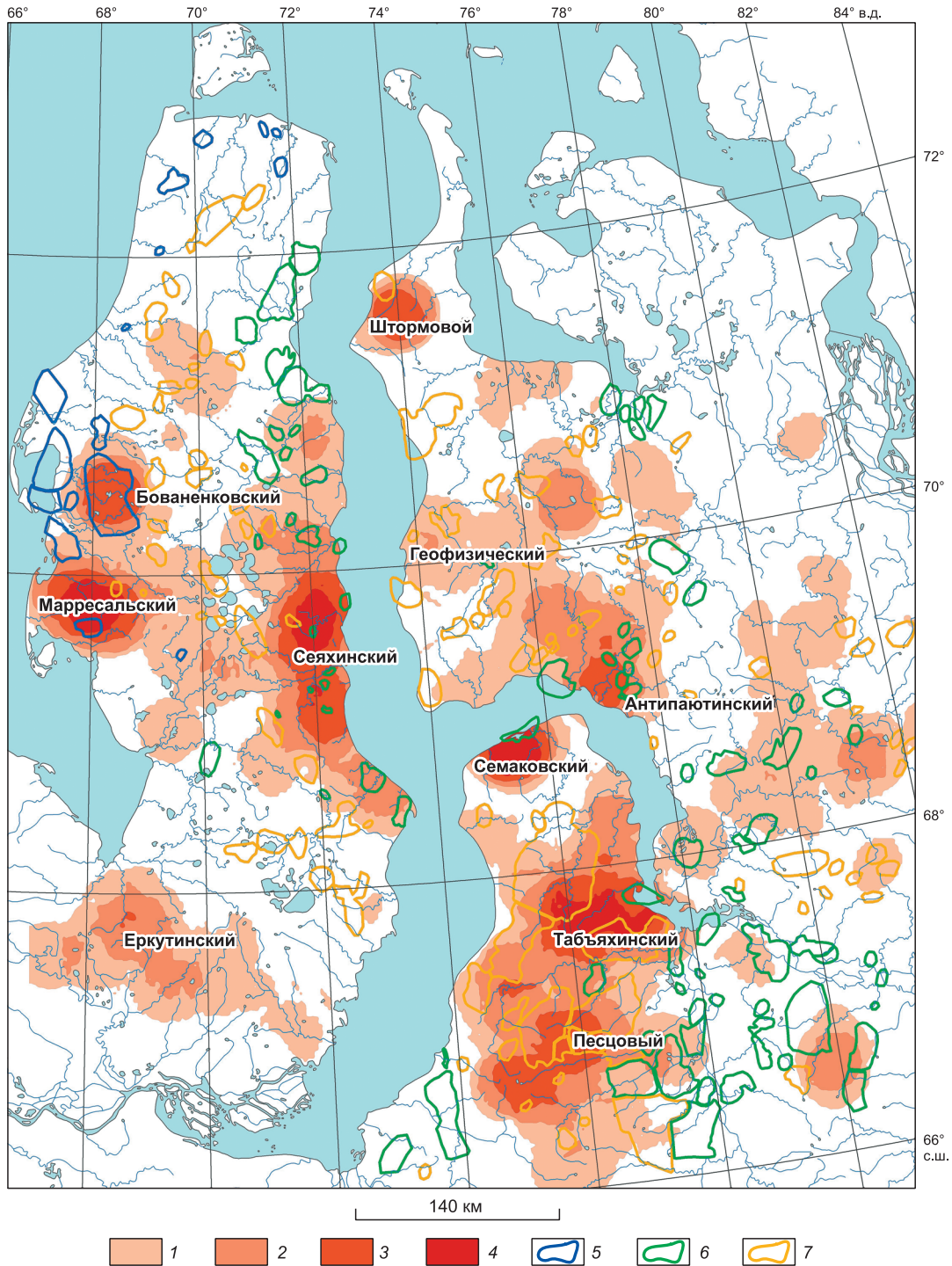
Из данных представлений и определения БП как начальной стадии развития ВГВ формируется авторская криолитологическая позиция: бугор, приуроченный только к площади ГС, расположенной в пределах как зон поднятий и прогибов, так и моноклиналей, может оказаться потенциально взрывоопасным, поскольку образуется в промерзающих породах талика, возникшего на участке термокарста по сильнольдистым грунтам, залегающим на морских и аллювиальных отложениях, насыщенных газом.

Согласно этой позиции, в пределах площади ГС (т. е. над газовой залежью) БП может превратиться в ВГВ или оказаться потенциально взрывоопасным, если совмещаются два условия – неотектоническое и геокриологическое. Рассмотрим первое из них, объясняющее причины газонасыщенности пород, перекрывающих залежь газа в пределах ГС.

**Неотектоническое условие.** В поиске связей БП и ВГВ с неотектоническим развитием территории следует обратить внимание на то, что в общем плане запад Ямала расположен над краем Ямальской моноклинали, а юг – над склоном Припайхойской моноклинали к Байдарацкому мегапрогибу. Восток п-ова Гыданский расположен над краем моноклинали, а Тазовский полуостров – над сложным сочетанием впадин, прогибов и групп куполовидных поднятий.

Максимальные значения коэффициента площадного распространения (ПР более 16/100 км<sup>2</sup>) приурочены к прибрежным участкам морских и лагунно-морских террас западного и восточного Ямала, севера и юга Гыданского, севера и центральной части Тазовского полуостровов (рис. 2). Территории с ПР менее 16/100 км<sup>2</sup> занимают наибольшую площадь в центральных частях водораздельных равнин на Тазовском полуострове и на Ямале.

При совмещении авторской карты “Площадное распространение БП на севере Западной Сибири” (см. рис. 2) и карты “Структурная схема и районирование чехла Западно-Сибирской плиты по подошве юрско-кайнозойского плитного комплекса” [Нестеров и др., 1984] оказывается, что площади с наибольшими величинами ПР бугров расположены следующим образом.



**Рис. 2.** Площадное распространение бугров пучения и его максимумы на территории исследования.

Количество бугров пучения на 100 км<sup>2</sup>: 1 – 2–8; 2 – 9–15; 3 – 16–22; 4 – более 22. Группы газонных структур [Бадю, 2017б,в, 2018]: 5 – группа III, 6 – группа IV, 7 – группа V. На карте даны названия максимумов площадного распространения бугров.

На Ямале:

в западной части – над краем Ямальской моноклинали, а ВГВ над Юмбдыяхинским прогибом (*марресальский и бованенковский максимумы ПР*);

в юго-западной части – над краем Припайхойской моноклизы в месте Байдарацкого мегапрогиба (*йоркутинский максимум ПР*);

на восточном побережье – над частью Сеяхинского мегапрогиба, пересекаемого Центрально-Ямальским мегавалом (*сеяхинский максимум ПР*).

На Гыданском полуострове:

в северо-западной части – над северным краем Ханарасалинского мегапрогиба (*итормовой максимум ПР*);

в центре – над северо-западным склоном Геофизического мегавала и восточным краем Центрально-Ямальского мегавала (*геофизический максимум ПР*);

на побережье Тазовской губы – над Антипаютинской впадиной, а северо-западнее – над Сыдыяхинским прогибом (*антипаютинский максимум ПР*).

На Тазовском полуострове:

в северной части – над группой куполовидных поднятий (*семаковский максимум ПР*);

южнее – над площадью сложного взаимного размещения впадин, прогибов и групп поднятий, расположенных к югу от склона Ямбургского куполовидного поднятия (*табьяхинский и песцовый максимумы ПР*).

**Геокриологическое условие.** Второе условие принятой криолитологической позиции заключается в том, что потенциально взрывоопасные БП развиваются в конкретной геокриологической обстановке – при промерзании таликов в газонасыщенных породах. Если в разрезе промерзших пород сверху вниз залегают торф, суглинок и песок водонасыщенный, то при их промерзании в открытой системе (с подтоком воды из напорного водоносного слоя) возникает БП с льдогрунтовым ядром из сегрегационного льда. В закрытой системе без подтока воды в замкнутом талике образуется бугор с ядром из инъекционного льда. Песчаные породы и вода водоносного слоя насыщены газом, как и газонасыщенные мерзлые и охлажда-

денные породы, залегающие вокруг талика. Разрезы такого строения могут подстилаться залежью пластового льда.

Итак, при наличии этих двух условий можно предполагать определенную связь географического расположения БП и ВГВ с территориями, где важнейший источник газа – газовая залежь газоносной структуры.

Бугры (взорванные, новообразованные, разрушенные) расположены на площади газоносных структур (см. рис. 1), которая определяется вертикальной проекцией плоскости газоводяного контакта на дневную поверхность [Баду, 2017а]. Из 680 бугров, расположенных в пределах площади ГС, наибольшее количество (350) находится на Тазовском полуострове (51.4 %), а на Гыдане и Ямале их существенно меньше – 30.3 и 18.3 % соответственно. В таком же порядке уменьшается и общая площадь ГС, для которых выполнены расчеты.

За пределами общей площади структур расположено 52 % из 1425 бугров, использованных для расчетов (табл. 1). Здесь следует учитывать, что, во-первых, геологическая граница ГС на Государственной геологической карте не совпадает с проведенными границами лицензионного землеотвода на эксплуатацию. Во-вторых, в расчет включены только БП, отмеченные на топокарте масштаба 1:200 000 выпуска 1967–1989 гг. Тем не менее предварительные расчеты приуроченности БП к площади ГС уже показывают слабую корреляцию (в среднем коэффициент корреляции  $r = 0.46–0.48$ ).

Коэффициент площадного распространения БП на площадях каждой группы ГС (табл. 2) характеризует общую картину, осредненную по исследованной территории. Наибольшее и наименьшее значения ПР свидетельствуют о том, что приповерхностный разрез отложений морских террас позднего неоплейстоцена является более благоприятной средой для формирования ВГВ на месте потенциально взрывоопасных БП. Эта среда связана с определенным типом геологического строения, с условиями осадконакопления, промерзания и газонасыщения пород верхней части их разреза.

Таблица 1. Количество бугров пучения в пределах и за пределами общей площади газоносных структур

Полуостров	Площадь ГС, км <sup>2</sup>	Количество бугров пучения*		
		общее	в пределах ГС	за пределами ГС
Ямал	17 400	576 (40.4)	206 (30.3)	370 (49.7)
Гыданский	11 000	344 (24.2)	124 (18.3)	220 (29.5)
Тазовский	20 500	505 (35.4)	350 (51.4)	155 (20.8)
Всего	48 900	1425	680	745

\* В скобках дана доля (%).

Таблица 2. Коэффициент площадного распространения бугров пучения по группам газоносных структур

Группа ГС	Количество бугров в группе ГС	Суммарная площадь группы, км <sup>2</sup>	Коэффициент площадного распространения бугров*	Доля площади группы от общей площади ГС, %
III	99	5791	1.71	11.8
IV	199	18 797	1.058	38.4
V	382	24 312	1.57	49.7

\* Количество бугров пучения на 100 км<sup>2</sup>.

Приуроченность БП к геолого-геоморфологическим уровням полуостровов уже подтверждается предварительными полученными данными (табл. 3). Согласно данным табл. 3, на Ямале в пределах площади ГС группы III сосредоточено наибольшее количество бугров: 48.1 % из 206 и по 25–26 % в пределах групп IV и V. Такое распределение подтверждает вероятность того, что для формирования бугров пучения в пределах средне- и поздненеоплейстоценовых лагунно-морских террас и морских равнин существуют сходные условия (см. табл. 2), но в пределах поздненеоплейстоценовых морских террас условия для формирования БП наиболее благоприятны именно на Ямале.

На Гыданском полуострове наибольшее количество БП сосредоточено в его возвышенных частях: 63.7 % из 124 бугров расположено в пределах площади ГС группы V, а 36.3 % в пределах группы IV. Здесь ситуация иная: в пределах средне-неоплейстоценовой морской равнины условия для развития бугров более благоприятны.

На Тазовском полуострове наибольшее количество БП сосредоточено в его центральной части: 71.4 % из 350 бугров расположено в пределах площади ГС группы V, а 28.6 % в пределах группы IV. Ситуация аналогична предыдущей: здесь в пределах поздненеоплейстоценовых лагунно-морских террас условия для возникновения бугров менее благоприятные, чем в пределах средне-неоплейстоценовой морской равнины.

Полученные данные предварительно показывают вполне достоверную специфичность регионального площадного распределения БП: их приуроченность к местностям или даже урочищам, где талики под спущенными озерами промерзали на участках, сложенных сильнольдистыми породами морских и лагунно-морских поздне-неоплейстоценовых террас, т. е. к участкам с определенным геологическим строением и неоднородным строением рельефа, к разрезам газонасыщенных пород. Эта приуроченность неоднозначна на каж-

дом из обследованных полуостровов и требует детального исследования на специально выделенных ключевых участках.

## ВЫВОДЫ

Единое мнение о происхождении воронок в различных природных обстановках до сих пор отсутствует. Предварительное исследование особенностей распространения бугров пучения по топографическим картам масштаба 1:200 000 позволяет определить ряд природных условий, в которых эти бугры возникали и развивались в течение последних 30–50 лет.

Предварительные результаты показывают, что на исследованной территории:

- плотность распространения бугров на полуостровах Ямал, Гыданский и Тазовский закономерно сконцентрирована над неотектонически однородной частью разреза осадочного чехла, в которой сосредоточены газовые залежи газонасыщенных структур на глубинах не более 700–900 м от дневной поверхности;

- в пределах площади ГС расположено менее половины (48 %) бугров пучения из 1425, отмеченных на картах разных годов выпуска; наибольшее количество бугров приурочено к ГС с площадью менее 50 км<sup>2</sup> и повышенной трещиноватостью пород;

- максимумы площадного распространения бугров приурочены к прибрежным участкам морских и лагунно-морских террас западного и восточного Ямала, севера и юга Гыданского полуострова, севера и центральной части Тазовского полуострова.

Неотектонические и геокриологические условия для формирования и развития бугров в пределах средне- и поздне-неоплейстоценовой морской равнины более благоприятны, чем в пределах поздне-неоплейстоценовых лагунно-морских террас.

В пределах площади каждого из полуостровов это соотношение неравнозначно, так как более важен факт, указывающий, что в пределах поздне-неоплейстоценовой прибрежно-морской и средне-неоплейстоценовой морской равнин совокупность природных условий (льдистость пород, песчано-глинистые переслаивания в геологическом разрезе, газонасыщенность пород, положение водоносных слоев, засоленность пород и др.) наиболее благоприятна для развития бугров пучения с образованием воронки газового выброса. Вопрос, почему так, – остается открытым.

*Работа выполнена в соответствии с фундаментальной темой “Изменение криосферы Земли под влиянием природных факторов и техногенеза” (ГЗ I.5 АААА-А16-116032810095-6) при поддержке РФФИ (проект № 18-05-60080).*

Таблица 3. Количество бугров пучения по группам газонасыщенных структур в пределах полуостровов

Полуостров	Количество БП в пределах ГС	Количество БП по площади групп ГС*		
		Группа V	Группа IV	Группа III
Ямал	206	53 (25.7)	54 (26.2)	99 (48.1)
Гыданский	124	79 (63.7)	45 (36.3)	0
Тазовский	350	250 (71.4)	100 (28.6)	0
Всего	680	382	199	99

\* В скобках дана доля (%) в пределах полуострова.

Примечание. Группа V – ледниково-морская и морская равнина gmII<sub>2-4</sub>; группа IV – прибрежно-морская равнина rmIII<sub>1</sub>; группа III – третья морская терраса mIII<sub>2-3</sub>.

Литература

- Алексеев В.Р.** Криовулканизм и загадка Патомского конуса // Геодинамика и тектонофизика, 2012, № 3 (3), с. 289–307.
- Алексеев В.Р.** Патомский кратер: могильник и булгуньях // Наука и техника Якутии, 2013, № 2 (25), с. 68–78.
- Андреев В.И.** Гидролакколиты (булгуньяхи) в западно-сибирских тундрах // Изв. Гос. геогр. о-ва, 1936, т. 68, вып. 2, с. 186–210.
- Баду Ю.Б.** Криолитология (учеб. пособие). М., Кн. дом “Университет”, 2010, 528 с.
- Баду Ю.Б.** Криосистемный анализ газоносных структур Ямала // Академ. журн. Западной Сибири, 2016, т. 12, № 2 (63), с. 8–12.
- Баду Ю.Б.** Газоносные структуры и криогенная толща криолитологических провинций Ямала // Инж. геология, 2017а, № 1, с. 39–50.
- Баду Ю.Б.** Газопроявления и природа криолитогеоза морских отложений полуострова Ямал // Криосфера Земли, 2017б, т. XXI, № 5, с. 42–54.
- Баду Ю.Б.** Основы концепции субаквального криолитогеоза морских отложений газоносных структур полуострова Ямал // Криосфера Земли, 2017в, т. XXI, № 6, с. 76–84.
- Баду Ю.Б.** Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи полуострова Ямал. М., Науч. мир, 2018, 232 с.
- Баду Ю.Б., Васильчук Ю.К., Кашперюк П.И. и др.** Геологические процессы и явления, обусловленные многолетними изменениями температур в слое многолетнемерзлых и промерзающих пород // Экогеодинамика Западно-Сибирской плиты (пространственно-временные закономерности) / Под ред. В.Т. Трофимова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1986, с. 92–166.
- Богоявленский В.И.** Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 1 // Бурение и нефть, 2014а, № 9, с. 13–18.
- Богоявленский В.И.** Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 2 // Бурение и нефть, 2014б, № 10, с. 4–8.
- Богоявленский В.И.** Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики Мирового океана // Бурение и нефть, 2015, № 6, с. 4–9.
- Богоявленский В.И.** Газогидродинамика в кратерах выброса газа в Арктике // Арктика: экология и экономика, 2018, № 1 (29), с. 48–55.
- Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. и др.** Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // Арктика: экология и экономика, 2019а, № 2 (34), с. 31–47.
- Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А.** Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // Арктика: экология и экономика, 2017, № 3 (27), с. 4–17.
- Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. и др.** Технологии дистанционного выявления и мониторинга дегазации Земли в Арктике: полуостров Ямал, озеро Нейто // Арктика: экология и экономика, 2018а, № 2 (30), с. 83–93.
- Богоявленский В.И., Гарагаш И.А.** Обоснование процесса образования кратеров газового выброса в Арктике математическим моделированием // Арктика: экология и экономика, 2015, № 3 (19), с. 12–17.
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В. и др.** Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика, 2016, № 3 (23), с. 4–13.
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В. и др.** Технология дистанционного мониторинга поверхностных газопроявлений в зоне распространения многолетней мерзлоты (на примере полуострова Ямал) // Актуальные пробл. нефти и газа, 2018б, т. 4, № 23, с. 75.
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Мажаров А.В. и др.** Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика, 2019б, № 1 (33), с. 88–105.
- Брыксина Н.А., Полищук Ю.М.** Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 114–120.
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К. и др.** Изотопный состав ледяного ядра позднеголоценового булгуньяха на месторождении Песцовое в долине реки Евояха на юге Тазовского полуострова // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 4, с. 47–58.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А. и др.** Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2008, 571 с.
- Власов А.Н., Хименков А.Н., Волков-Богородский Д.Б. и др.** Природные взрывные процессы в криолитозоне // Наука и технол. разработки, 2017, т. 96, № 3, с. 41–56.
- Вяхирев Д.А.** Руководство по газовой хроматографии / Д.А. Вяхирев, А.Ф. Шушунова. М., Высш. шк., 1975, 220 с.
- Геворкян С.Г., Корейша М.М.** Взрывы бугров пучения // Материалы гляциол. исслед., 1993, № 77, с. 120–130.
- Епифанов В.А.** Взрывные воронки-колодцы и актуальность изучения роли дегазации недр в климатических событиях и ландшафтных преобразованиях четвертичного периода // Бюл. Комиссии по изучению четвертичного периода, 2018, № 76, с. 5–40.
- Карта** генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты / Под ред. В.Т. Трофимова, Ю.Б. Баду. М., Главтюменьгеология; МГУ; ПНИИИС, 1982, 9 л.
- Карта** мощности и строения толщ многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты / Гл. ред. В.Т. Трофимов, В.В. Баулин. М., Главтюменьгеология; МГУ; ПНИИИС, 1984, 9 л.
- Касымская М.В.** Сезонные и многолетние бугры пучения северо-востока полуострова Ямал // Науч.-исслед. публикации, 2014, № 15 (19), с. 13–18.
- Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Лейбман М.О. и др.** Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 15–25.
- Кизяков А.И., Сонюшкин А.В., Хомутов А.В. и др.** Оценка рельефообразующего эффекта образования Антипаютинской воронки газового выброса по данным спутниковой стереосъемки // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса, 2017, т. 14, № 4, с. 67–75.
- Корниенко С.Г., Крицук Л.Н., Якубсон К.И. и др.** Исследование динамики озер и процессов новообразования многолетнемерзлых пород на полуострове Ямал на основе данных



аэрокосмических наблюдений // Актуальные пробл. нефти и газа, 2014, № 1 (9), с. 14–32.

**Курчатова А.Н., Рогов В.В.** Формирование геохимических аномалий при миграции углеводородов в криолитозоне Западной Сибири // Лед и снег, 2018, т. 58, № 2, с. 199–212.

**Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Стрелецкая И.Д. и др.** Связь формирования воронок газового выброса с эмиссией метана на севере Западной Сибири // Актуальные пробл. нефти и газа, 2018, т. 4, № 23, с. 1–4.

**Лейбман М.О., Кизяков А.И.** Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа, 2016, № 2, с. 15–24.

**Нежданов А.А., Новопашин В.Ф., Огибенин В.В. и др.** Грязевой вулканизм на севере Западной Сибири // Тр. ТюменНИИгипрогаз. Тюмень, Флат, 2011, с. 74–79.

**Нестеров И.И., Подсосова Л.Л., Рудкевич М.Я. и др.** Структурная схема и районирование Западно-Сибирской плиты по подошве юрско-кайнозойского плитного комплекса. М-б 1:500 000. М., Фонды Геол. ин-та РАН, 1984, 9 л. – www.neotec.ginras.ru

**Оленченко В.В., Синицкий А.И., Антонов Е.Ю. и др.** Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования “Ямальский кратер” // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 94–106.

**Орехов П.Т., Попов К.А., Слагода Е.А. и др.** Бугры пучения острова Белый в прибрежно-морской обстановке Карского моря // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 1, с. 46–56.

**Перлова Е.В., Микляева Е.С., Ткачева Е.В. и др.** Ямальский кратер как пример быстроразвивающегося криогенного процесса в условиях потепления климата в Арктике // Вести газ. науки, 2017, № 3 (31), с. 292–297.

**Пономарева О.Е., Гравис А.Г., Бердников Н.М.** Современная динамика бугров пучения и плоскобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского стационара) // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 4, с. 21–30.

**Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О., Кизяков А.И. и др.** Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2017, т. 1, № 2, с. 91–99.

**Титовский А.Л., Синицкий А.И., Пушкарев В.А. и др.** Комплексные исследования ямальских кратеров, новые факты // Актуальные пробл. нефти и газа, 2018, т. 4, № 23, с. 61–71.

**Трофимов В.Т.** Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты / В.Т. Трофимов, Ю.Б. Бадю, Г.И. Дубиков. М., Изд-во Моск. ун-та, 1980, 246 с.

**Хилимонюк В.З., Оспенников Е.Н., Булдович С.Н. и др.** Геокриологические условия территории расположения ямальского кратера // Материалы пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Изд-во Унив. книга, 2016, т. 2, с. 245–255.

**Хименков А.Н., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. и др.** Флюидодинамические геосистемы в криолитозоне. Часть 2. Криолитодинамические и криогазодинамические геосистемы // Арктика и Антарктика, 2018, № 2, с. 48–70.

**Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В. и др.** Газовые выбросы в криолитозоне как новый вид геокриологических опасностей // Геориск, 2017а, № 3, с. 58–65.

**Хименков А.Н., Станиловская Ю.В., Сергеев Д.О. и др.** Развитие взрывных процессов в криолитозоне в связи с формированием Ямальского кратера // Арктика и Антарктика, 2017б, № 4, с. 13–37.

**Хомутов А.В., Лейбман М.О., Дворников Ю.А.** Воронки газового выброса: в процессе условий их формирования // ХолодОк, 2017, т. 1, № 15, с. 5–13.

**Якушев В.С.** Механизмы концентрации природного газа в криолитозоне // Актуальные пробл. нефти и газа, 2018, т. 4, № 23, с. 71–75.

**Buldovics S.N., Khilimonyk V.Z., Bychkov A.Y. et al.** Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular in the Yamal Peninsula (Russia) // Sci. Rep. UK, Nature Publishing Group, 2018, vol. 8, p. 13534, DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9.

**Vorobyev S., Bychkov A., Khilimonyuk V. et al.** Formation of the Yamal crater in Northern West Siberia: evidence from geochemistry // Geosciences, 2019, vol. 9, No. 12, p. 515, DOI: 10.3390/geosciences9120515.

## References

Alekseev V.R. Cryovolcanism and the riddle of the Patom cone. Geodinamika i tectonofizika [Geodynamics and Tectonics], 2012, No. 3 (3), p. 289–307 (in Russian).

Alekseev V.R. Patom Crater: burial ground and bulgunnyakh? Nauka i tekhnika Yakutii [Science and Technology of Yakutia], 2013, No. 2 (25), p. 68–78 (in Russian).

Andreev V.I. Hydrolakkolithes (bulgunnyakhs) in West Siberian tundra. Izvestiya Gosudarstvennogo Geograficheskogo Obshchestva [Proceedings of the State Geographical Society], 1936, vol. 68, No. 2, p. 186–210 (in Russian).

Badu Yu.B. Kriolitologia [Cryolithology]. Moscow, Knizhniy Dom Universitet, 2010, 528 p. (in Russian).

Badu Yu.B. Cryosystem analysis of gas-bearing structures of the Yamal Peninsula. Akademicheskii zhurnal Zapadnoi Sibiri [Academic Journal of Western Siberia], 2016, vol. 12, No. 2 (63), p. 8–12 (in Russian).

Badu Yu.B. The gas-bearing structures and cryogenic strata of the Yamal peninsula cryolithology provinces. Inzhenernaya Geologiya [Engineering Geology], 2017а, No. 1, p. 39–50 (in Russian).

Badu Yu.B. Gas shows and the nature of cryolithogenesis in marine sediments of the Yamal Peninsula. Earth's Cryosphere, 2017b, vol. XXI, No. 5, p. 36–45.

Badu Yu.B. Foundations of the conception of subaqueal cryolithogenesis of marine deposits of gas-bearing structures of the Yamal Peninsula. Earth's Cryosphere, 2017с, vol. XXI, No. 6, p. 65–72.

Badu Yu.B. Kriogennaya tolschcha gasonosnykh struktur Yamala. O vliyaniyi gasovykh zalezhei na formirovaniye i razvitiye kriogennoy tolschchi poluostrova Yamal [Cryogenic strata of gas-bearing structures of the Yamal peninsula. On an influence of gas accumulations on cryogenic strata forming and development]. Moscow, Nauchniy Mir, 2018, 232 p. (in Russian).

Badu Yu.B., Vasil'chuk Yu.K., Kashperuk P.I. et al. Geological processes and phenomena caused by long-term temperature changes in the layer of permafrost and freezing rocks. In: Exogeodynamics of the West Siberian Plate (space-time patterns). Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1986, p. 92–166 (in Russian).

Bogoyavlenskiy V.I. The threat of catastrophic gas blowouts out of the Arctic Cryolithozone. Part 1. Burenkiye i nef't' [Drilling and Oil], 2014а, No. 9, p. 13–18 (in Russian).

Bogoyavlenskiy V.I. The threat of catastrophic gas blowouts out of the Arctic Cryolithozone. Part 2. Burenkiye i nef't' [Drilling and Oil], 2014b, No. 10, p. 4–8 (in Russian).

- Bogoyavlenskiy V.I. Emissions of gas and oil on land and waters of the Arctic of the World Ocean. *Bureniye i neft'* [Drilling and Oil], 2015, No. 6, p. 4–9, DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55.
- Bogoyavlenskiy V.I. Gas-hydrodynamics in gas-blowout craters in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2018, No. 1 (29), p. 48–55, DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-48-55.
- Bogoyavlenskiy V.I., Bogoyavlenskiy I.V., Kargina T.N. et al. Degassing of Earth in the Arctic: remote and field studies of the thermokarst lakes gas eruption. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2019a, No. 2 (34), p. 31–47, DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47.
- Bogoyavlenskiy V.I., Bogoyavlenskiy I.V., Nikonov R.A. Results of aerial, space and field investigations of large gas blowouts near the Bovanenkov gas field on Yamal Peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2017, No. 3 (27), p. 4–17, DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-4-17.
- Bogoyavlenskiy V.I., Bogoyavlenskiy I.V., Nikonov R.A. et al. Remote detection and monitoring of Earth degassing in the Arctic: Yamal Peninsula, Neito Lake. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2018a, No. 2 (30), p. 83–93 (in Russian).
- Bogoyavlenskiy V.I., Garagash I.A. Substantiation of the process of gas-blowout craters formation in the Arctic by mathematical modeling. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2015, No. 3 (19), p. 12–17 (in Russian).
- Bogoyavlenskiy V.I., Sizov O.S., Bogoyavlenskiy I.V. et al. Remote detection of near-surface gas shows and gas blowouts in Arctic: Yamal Peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2016, No. 3 (23), p. 4–13 (in Russian).
- Bogoyavlenskiy V.I., Sizov O.S., Bogoyavlenskiy I.V. et al. The technology of remote monitoring of surface gas showings in the permafrost zone (on the example of the Yamal Peninsula). In: *Actualnye problemy nefi i gaza* [Actual Problems of Oil and Gas], 2018b, vol. 4, No. 23, p. 75 (in Russian).
- Bogoyavlenskiy V.I., Sizov O.S., Mazharov A.V. et al. Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2019b, No. 1 (33), p. 88–105, DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105.
- Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Analysis of changes in the number of thermokarst lakes in the permafrost zone of Western Siberia based on satellite images. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 2, p. 100–105.
- Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Yoshikawa K., Podborny Ye.Ye., Chizhova Ju.N. Isotope composition of pingo ice core in the Yevo-Yakha river valley, north-west Siberia. *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. XVIII, No. 4, p. 41–51.
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A. et al. *Vypuklye bугry pucheniya mnogoletnemerzlykh torfyanykh massivov* [Convex Frost Mounds of Permafrost Peat Massifs]. Moscow, Moscow University Press, 2008, 571 p. (in Russian).
- Vlasov A.N., Khimenkov A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B. et al. Natural explosive processes in the permafrost zone. In: *Science and Technology Development*, 2017, vol. 96, No. 3, p. 41–56 (in Russian).
- Vyakhirev D.A., Shushunova A.F. *Rukovodstvo po gazovoy khromatografii* [Gas Chromatography Guide]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1975, 220 p. (in Russian).
- Gevorkyan S.G., Koreysha M.M. Explosions of frost mounds. In: *Proceedings of Glaciological Researches*, 1993, No. 77, p. 120–130 (in Russian).
- Epifanov V.A. Explosive craters-wells and the relevance of studying the role of subsoil degassing in the climatic events and landscape transformations of the Quaternary period. In: *Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary*, 2018, No. 76, p. 5–40 (in Russian).
- Karta geneticheskikh tipov i l'distosti verkhney 10-metrovoi chasty razreza mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoi plity [Map of Genetic Types and Ice Content of the Upper 10-meter Part of the Permafrost Section of the West Siberian plate]. Ed. by V.T. Trofimov, Yu.B. Badu. Moscow, Glavtjumen'geologiya; MGU; PNIIS, 1982, 9 sheets (in Russian).
- Karta moshchnosti i stroyeniya tolshch mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoi plity [Map of Thickness and Structure of Permafrost Strata of the West Siberian plate]. Ed. by V.T. Trofimov, V.V. Baulin. Moscow, Glavtjumen'geologiya; MGU; PNIIS, 1984, 9 sheets (in Russian).
- Kasym'skaya M.V. Seasonal and perennial frost mounds in the north-east of the Yamal Peninsula. *Research Publications*, 2014, No. 15 (19), p. 13–18 (in Russian).
- Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Leibman M.O., Zimin M.V., Khomutov A.V. Geomorphological conditions of the gas-emission crater and its dynamics in Central Yamal. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 2, p. 13–22.
- Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Khomutov A.V. et al. Assessment of the reliefforming effect of the Antipayuta gas-blowout crater formation using satellite stereo pairs. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space], 2017, vol. 14, No. 4, p. 67–75 (in Russian).
- Kornienko S.G., Kritsuk L.N., Yakubson K.I. et al. Study of the dynamics of lakes and the processes of the permafrost formation on the Yamal Peninsula on the basis of data of aerospace observations. *Aktualnye problemy nefi i gaza* [Actual Problems of Oil and Gas], 2014, No. 1 (9), p. 14–32 (in Russian).
- Kurchatova A.N., Rogov V.V. Formation of geochemical anomalies in hydrocarbon migration in the permafrost zone of Western Siberia. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2018, vol. 58, No. 2, p. 199–212 (in Russian).
- Leibman M.O., Kizyakov A.I. A new natural phenomenon in the permafrost zone. *Priroda* [Nature], 2016, No. 2, p. 15–24 (in Russian).
- Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., Streletskaya I.D. et al. Connection of gas emission craters to methane emissions in northern Western Siberia. *Aktualnye problemy nefi i gaza* [Actual Problems of Oil and Gas], 2018, vol. 4, No. 23, p. 1–4 (in Russian).
- Nezhdanov A.A., Novopashin V.F., Ogibenin V.V. et al. Mud volcanism in the north of Western Siberia. In: *Proceedings of TyumenNIIGiprogaz*. Tyumen, Flat, 2011, p. 74–79 (in Russian).
- Nesterov I.I., Podsosova L.L., Rudkevich M.Ya. et al. *Struchturnaya skhema i rayonirovaniya Zapadno-Sibirskoi plity po podoshve yursko-kainozoiskogo plitnogo kompleksa. Masshtab 1:500 000*. Moskva, Fondy Geologicheskogo instituta RAN [Structural scheme and zoning of the West-Siberian plate at the base of the Jurassic-Kainozoic plate complex. Scale 1:500,000]. Moscow, Funds of the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, 1984, 9 sheets (in Russian).
- Olenchenko V.V., Sinitsky A.I., Antonov E.Y., Eltsov I.N., Kushnarenko O.N., Plotnikov A.E., Potapov V.V., Epov M.I. Results of geophysical surveys of the area 'Yamal crater', a new geological structure. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 4, p. 84–95.
- Orehov P.T., Popov K.A., Slogoda E.A., Kurchatova A.N., Tikhonravova Ya.V., Opokina O.L., Simonova G.V., Melkov V.N.

- Frost mounds of Bely island in coastal marine settings of the Kara Sea. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 1, p. 41–51.
- Perlova E.V., Miklyaeva E.S., Tkacheva E.V. et al. Yamal crater as an example of a rapidly developing cryogenic process in the context of climate warming in the Arctic. *Vesti gasovoy nauki [News of Gas Science]*, 2017, No. 3 (31), p. 292–297 (in Russian).
- Ponomareva O.E., Gravis A.G., Berdnikov N.M. Current dynamics of frost mounds and flat-hummocky peatlands in the northern taiga of Western Siberia (on the example of Nadym station). *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2012, vol. XVI, No. 4, p. 21–30 (in Russian).
- Streletskaya I.D., Leibman M.O., Kizyakov A.I. et al. Underground ice and its role in the formation of the gas-blowout crater on the Yamal Peninsula. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5: Geografiya [Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography]*, 2017, vol. 1, No. 2, p. 91–99 (in Russian).
- Titovskiy A.L., Sinitskiy A.I., Pushkarev V.A. et al. Comprehensive studies of Yamal craters, new facts. *Aktualniye problemy nefti i gaza [Actual Problems of Oil and Gas]*, 2018, vol. 4, No. 23, p. 61–71 (in Russian).
- Trofimov V.T., Badu Yu.B., Dubikov G.I. *Kriogennoe stroenie i l'distost' mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoy plity [Cryogenic Structure and Ice Content of Permafrost Sediments of the West Siberian Plate]*. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1980, 246 p. (in Russian).
- Khilimonyuk V.Z., Ospennikov E.N., Buldovich S.N. et al. Geocriological conditions of the Yamal crater location. In: *Proceedings of the Fifth Conference Geocryologists (Moscow, June 14–17, 2016)*. Moscow, Universitetskaya Kniga, 2016, vol. 2, p. 245–255 (in Russian).
- Khimenkov A.N., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B. et al. Fluid-dynamic geosystems in cryolithozone. Part 2. Cryolithodynamic and Cryogasodynamic Geosystems. *Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic]*, 2018, No. 2, p. 48–70 (in Russian).
- Khimenkov A.N., Sergeev D.O., Stanilovskaya Yu.V. et al. Gas blowouts in cryolithozone as a new kind of geocryological hazards. *Georisk [Georisk]*, 2017a, No. 3, p. 58–65 (in Russian).
- Khimenkov A.N., Stanilovskaya Yu.V., Sergeev D.O. et al. Development blasting process in cryolithozone in connection with the formation of the Yamal crater. *Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic]*, 2017b, No. 4, p. 13–37 (in Russian).
- Khomutov A.V., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A. Gas-blowout craters in the process of their formation. *Kholod'Ok [Kholodok]*, 2017, vol. 1, No. 15, p. 5–13 (in Russian).
- Yakushev V.S. Natural gas concentration mechanisms in cryolithozone. *Aktualniye problemy nefti i gaza [Actual Problems of Oil and Gas]*, 2018, vol. 4, No. 23, p. 71–75 (in Russian).
- Buldovicz S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y. et al. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular in the Yamal Peninsula (Russia). *Scientific Reports. UK, Nature Publishing Group*, 2018, vol. 8, p. 13534, DOI: 10.1038/s41598-018-31858-9.
- Vorobyev S., Bychkov A., Khilimonyuk V. et al. Formation of the Yamal crater in Northern West Siberia: evidence from geochemistry. *Geosciences*, 2019, vol. 9, No. 12, p. 515, DOI: 10.3390/geosciences9120515.

*Поступила в редакцию 21 августа 2019 г.,  
после доработки – 23 января 2020 г.,  
принята к публикации 25 июля 2020 г.*