

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.435.536

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(34-42)

СДВИГОВЫЙ МЕХАНИЗМ РОСТА
МНОГОЛЕТНИХ ИНЪЕКЦИОННЫХ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ

В.П. Марахтанов

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

С позиций механики мерзлых грунтов предложено строгое физическое объяснение условий формирования и морфологии многолетних инъекционных бугров пучения (булгунняхов, пинго). В рамках гипотезы сдвигового механизма разработано математическое описание условий зарождения и роста инъекционных бугров. Предложены формулы расчета диаметра вершинной поверхности и крутизны склонов бугров в зависимости от состава и температуры слагающих их грунтов. Приведены фактические данные, подтверждающие гипотезу сдвигового механизма формирования инъекционных бугров пучения.

Инъекционные бугры пучения, сдвиговый механизм, булгунняхи, пинго

THE SHEAR MECHANISM FOR THE PINGO GROWTH

V.P. Marakhtanov

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; ecolog_n@mail.ru*

Conditions of formation and morphology of injection frost mounds (bulgunniakh, pingo) can find a strict physical explanation from the point of view of mechanics of frozen soils. In the frames of hypothesis of shear mechanism, the mathematical description of conditions of emergence and growth of pingo has been given. A formula for calculating the diameter of their upper surface and slope steepness depending on the composition and soil temperature of the ground has been suggested. The actual data in favor of the hypothesis of the shear mechanism of formation of injectable of pingo have been adduced.

Frost mound, shear mechanism, bulgunniakh, pingo

ВВЕДЕНИЕ

Многолетние инъекционные бугры пучения (булгунняхи, пинго) широко распространены на территории криолитозоны. В настоящее время в мире зафиксировано около 11 тыс. таких бугров, в том числе около 5 тыс. в пределах России [Васильчук и др., 2014]. Впервые обстоятельные и во многом верные соображения по поводу механизма их образования высказал В.И. Андреев [1936]. Он считал, что булгунняхи образуются на участках промерзающих таликов под пересыхающими озерами. Здесь рост гидростатического давления может вызвать изгибание вверх промерзающего слоя верхней части талика, что приводит к образованию бугра. Под воздействием гидростатического давления в возникший свод поступает вода, при замерзании которой формируется ледяное ядро бугра. Бугор растет за счет ежегодного нарастания ледяного ядра, под давлением которого промерзающий слой непрерывно приподнимается. Позднее В.Н. Сакс [1940] показал, что внутри булгунняха

ледяного ядра может и не быть. По прошествии более 80 лет после выхода работы В.И. Андреева ничего принципиально нового относительно механизма роста инъекционных бугров пучения типа булгунняхов или пинго высказано не было. Однако недавно появилась точка зрения, согласно которой одной из причин образования инъекционных бугров могут быть выбросы природного газа из земных недр, вызывающие деформацию (вплоть до разрушения) промерзающей сверху части подоцерных таликов [Богоявленский, Гарагаш, 2015]. Не отрицая подобную возможность, автор считает, что в подавляющем большинстве случаев образование инъекционных бугров имеет криогенную природу.

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ ПУЧЕНИЯ
В ЗАМКНУТЫХ ГРУНТОВЫХ СИСТЕМАХ

С точки зрения автора, криогенное пучение, приводящее к образованию инъекционных бугров,

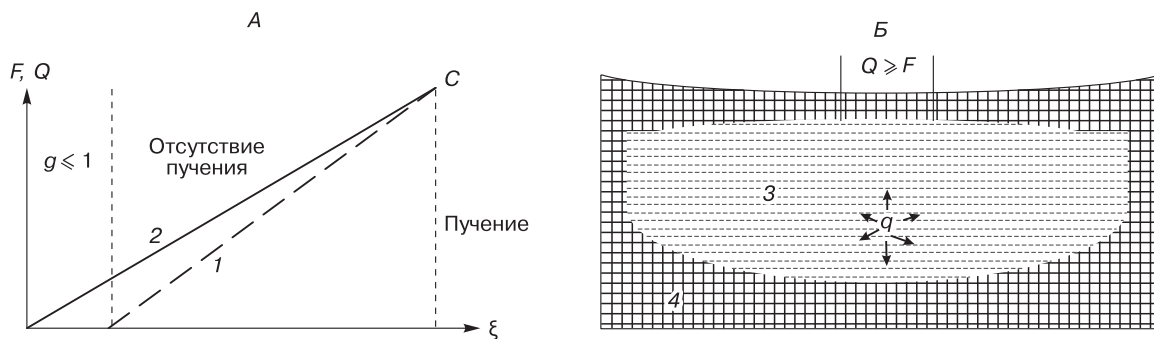


Рис. 1. Пространственно-временное соотношение между силами сопротивления талого грунта сжатию Q (1) и промерзающего слоя деформации F (2).

А – зависимость Q и F от увеличивающейся во времени глубины промерзания ξ для замкнутой системы; g – степень заполнения грунтовых пор водой; Б – схема замкнутого промерзающего талика в фиксированный момент времени, с избыточным давлением q , равномерно распределенным внутри талика. 3 – мерзлый грунт; 4 – талый грунт.

является результатом взаимодействия двух физических тел в составе промерзающей замкнутой системы “мерзлый–талый грунт”, подчиняющейся действию третьего закона Ньютона. Согласно закону, увеличение объема промерзающего талого грунта вызывает силовое противодействие со стороны окружающих талых пород. Противодействие промерзанию обусловлено ростом давления в талой толще вследствие невозможности удаления из замкнутой системы избытка воды (9 %), образующегося при фазовом переходе вода–лед. При этом промерзающий слой “отжимается” от нижележащей опоры, т. е. талого грунта: согласно третьему закону Ньютона, направления пучения и промерзания противоположны.

Условие развития пучения в инъекционных буграх содержится в работе В.И. Андреева [1936]: рост бугра происходит до тех пор, пока гидростатическое давление превышает сопротивление мерзлых слоев. Позднее этот взгляд нашел отражение в известном условии Д.Р. Маккея [Mackay, 1979], согласно которому пучение наблюдается лишь в том случае, когда сопротивление талого грунта сжатию (Q) превышает сопротивление поднятию мерзлой толщи (F):

$$Q > F. \quad (1)$$

В выражении (1) F складывается из веса мерзлой толщи (G) и силы сопротивления мерзлого грунта деформирующим усилиям (U):

$$F = G + U.$$

Условие (1) соответствует действию третьего закона Ньютона: сила, с которой мерзлый грунт отжимается от талого (т. е. сила пучения) равна силе реакции опоры Q , которая должна быть по крайней мере не меньше, чем направленная в противоположную сторону сила сопротивления пучению F .

Следует отметить, что условие развития пучения (1) справедливо только для инъекционных бугров замкнутых систем (пинго или булгунняхов) и не выполняется при формировании миграционных бугров пучения открытых систем (типа пальса), в которых нет физических условий для нарастания давления. Там противодействие талого грунта промерзанию реализуется через выжимание из него увеличивающегося в объеме мерзлого массива под действием архимедовой силы [Марахтанов, 1999, 2015, 2016].

Соотношение между Q и F в пространственно-временном плане представлено на рис. 1. Отжимание воды при промерзании талика сначала приводит к увеличению степени заполнения грунтовых пор водой при отсутствии избыточного давления (см. рис. 1, А). Затем это давление повышается, но его пока не хватает для деформации мерзлого слоя, в котором растут механические напряжения. Наконец наступает момент, соответствующий условию (1), начиная с которого мерзлая кровля деформируется – начинается пучение (точка С пересечения графиков на рис. 1, А).

На рис. 1, Б обозначена область в промерзающем слое, внутри которой выполняется условие (1), а границы области (вертикальные линии) соответствуют точке С, в которой $Q = F$ (см. рис. 1, А). Именно в этой области наблюдаются деформации мерзлого грунта, ведущие к образованию инъекционного бугра пучения, поэтому принципиальное значение имеет ответ на вопрос, по какому механизму происходят эти деформации. Ниже попытаемся на него ответить.

СДВИГ КАК АЛЬТЕРНАТИВА ИЗГИБУ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ИНЪЕКЦИОННЫХ БУГРОВ И ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Общепризнано представление о том, что деформация промерзающего слоя в верхней части

талика, ведущая к образованию бугров пучения типа булгунныхов (пинго), осуществляется через изгиб [Андреев, 1936; Сакс, 1940]. Однако, считая изгиб ведущим механизмом образования инъекционных бугров пучения, сложно объяснить такие особенности их морфологии, как преимущественно уплощенную (приплюснутую, по Андрееву [1936]), а не куполовидную вершинную поверхность. Более того, при изгибе происходит растяжение мерзлого грунта, которое в данной ситуации физически невозможно. При промерзании талика действует сила, направленная по нормали к подошве промерзающего слоя (в сторону, противоположную направлению промерзания), а не вдоль слоя (что могло бы вызвать его растяжение и изгиб). Можно предположить, что *образование инъекционных бугров пучения осуществляется не через изгиб (как это принято считать), а через сдвиг вверх участка промерзающего слоя в верхней части талика.*

Принимая сдвиг ведущим механизмом образования инъекционных бугров пучения, можно разработать математическое описание их возникновения и роста, позволяющее рассчитывать диаметр вершинной поверхности и крутизну откоса бугра в зависимости от состава и температуры грунтов.

Объяснение округлой формы инъекционных бугров

Запишем условие (1), соответствующее пограничному моменту, при котором начинается пучение ($Q = F$) в развернутом виде, предполагая сдвиг в качестве механизма деформации мерзлой кровли инъекционного бугра в процессе его формирования:

$$qS = \tau \xi L + \rho \xi S, \quad (2)$$

где q – удельное избыточное (по сравнению с атмосферным) давление в талом грунте внутри зам-

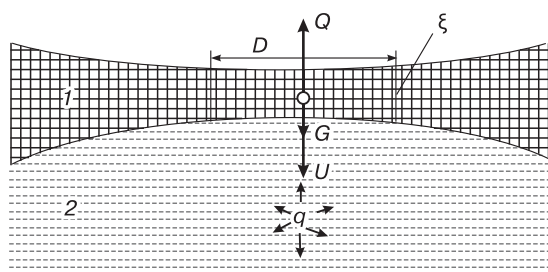


Рис. 2. Часть замкнутого промерзающего талика с блоком диаметром D в его промерзающем слое перед началом пучения.

1 – мерзлый грунт; 2 – талый грунт (или линза воды); ξ – мощность мерзлого грунта по периметру блока; D – диаметр площадки в вершине будущего бугра; q – удельное избыточное давление в замкнутом талике; Q – сила сопротивления талого грунта сжатию, равная по модулю силе пучения; G – вес мерзлого блока, подверженного пучению; U – сила сопротивления сдвигу по периметру блока.

кнутой грунтовой системы (промерзающем талике), кПа; S – площадь основания мерзлого блока, m^2 ; τ – удельное сопротивление сдвигу на контакте выпучивающегося мерзлого блока с остальной частью мерзлой толщи, кПа; ξ – толщина мерзлого слоя в месте сдвига, м; L – периметр мерзлого блока, подверженного выпучиванию, м; ρ – плотность мерзлого грунта, kg/m^3 .

Поделив обе части выражения (2) на S , получаем

$$q = \xi \left(\tau \frac{L}{S} + \rho \right). \quad (3)$$

Чем меньше при одинаковых ξ , τ и ρ правая часть выражения (3), тем легче (меньше q) достигается условие, при котором начинается пучение. Нетрудно видеть, что это соответствует минимальной величине отношения L/S , т. е. у круга. Именно этим объясняется *округлость* инъекционных бугров пучения – при сдвиге круговая форма энергетически наиболее выгодна, поскольку на единицу выпучиваемой площади S приходится минимальная сила (через минимум L), препятствующая пучению. Конечно, обычно нарушается идеальность круга вследствие возможной пространственной неоднородности остальных параметров, входящих в правую часть выражения (3).

Расчет диаметра вершинной поверхности бугра

Принимая круговую форму инъекционного бугра, можно вывести формулу для расчета диаметра D первичного блока мерзлого грунта в промерзающей сверху части замкнутого талика, смещение которого вверх по плоскости сдвига означает начало образования бугра (рис. 2). Поверхность мерзлого блока на рис. 2 является вершинной поверхностью будущего бугра.

Для расчета величины D в выражение (2) нужно подставить значения параметров, соответствующих кругу, в результате получаем

$$q\pi \frac{D^2}{4} = \pi D \xi \tau + \xi \pi \frac{D^2}{4} \rho. \quad (4)$$

После преобразований формулы (4) с соблюдением размерности входящих в нее параметров приходим к окончательной формуле расчета диаметра вершинной поверхности бугра (D , м):

$$D = \frac{4\tau}{q/\xi - 0.01\rho} \quad \text{при } q > 0.01\xi\rho. \quad (5)$$

Величина удельного сопротивления сдвигу τ в формуле (5) зависит от состава, влажности (льдистости) и температуры мерзлого грунта. Проанализируем воздействие этих факторов на диаметр вершины бугра. Необходимые исходные данные можно получить из [СНиП 2.02.04-88, 2005, Приложение 2, табл. 4, 8]. На основе представленных в нем значений τ по формуле (5) рассчитаны значения D в грунтах различного состава

Таблица 1. Удельное сопротивление сдвигу (τ , кПа) различных грунтов в зависимости от литологического состава и температуры, по: [СНиП 2.02.04-88, 2005]

Температура, °C	Песок	Глина	Оторфованные грунты				Торф
			песчаные	глинистые	песчаные	глинистые	
			0.03 < I ≤ 0.1		0.3 < I ≤ 0.5		
-0.3	80	50	30	20	8	3	2
-0.5	120	80	60	50	20	20	10
-1.0	170	120	100	70	40	30	20
-1.5	210	150	140	90	60	40	30
-2.0	240	170	160	110	80	60	40
-2.5	270	190	190	120	90	70	60
-3.0	300	210	230	140	100	90	80
-3.5	320	230	260	170	120	100	90
-4.0	340	250	270	200	140	110	100
-6.0	420	300	310	250	150	140	120
-8.0	480	340	330	270	180	150	140
-10.0	540	380	350	300	210	170	160

П р и м е ч а н и е. Степень оторфованности I равна отношению массы растительных остатков к массе сухого грунта.

при разной температуре (табл. 1, 2). Значения плотности мерзлых грунтов ρ , принятые в расчетах, даны в табл. 2. Достаточно произвольный выбор этих значений ρ объясняется тем, что изменение данного параметра в реальных диапазонах мало сказывается на величине D . Так, у глины при температуре -3°C уменьшение ρ от 1700 до 1200 кг/м³, в соответствии с формулой (5), приводит к изменению D от 10.1 до 9.8 м. Более существенное влияние оказывает температура грунта, определяющая величину τ .

Данные, приведенные в табл. 2, получены для фиксированных значений $q = 100$ кПа и $\xi = 1$ м. Для других сочетаний этих параметров, учитываемых через отношение q/ξ , в нижней строке табл. 2 приведены формулы расчета поправочного коэффициента K . Чтобы получить конкретное значение D , умножаем диаметр D в каждой ячейке на коэффициент K . Например, для глины при -3°C , $\xi = 3$ м, $q = 120$ кПа (см. табл. 1) и, соответственно, при $q/\xi = 40$ коэффициент K составит: $83/23 = 3.6$ и $D = 10.1 \cdot 3.6 = 36.4$ м.

Таблица 2. Диаметр (D , м) вершины инъекционного бугра в зависимости от литологического состава и температуры грунтов мерзлой кровли талика

Температура, °C	Песок	Глина	Оторфованные грунты				Торф
			песчаные	глинистые	песчаные	глинистые	
			0.03 < I ≤ 0.1		0.3 < I ≤ 0.5		
-0.3	3.9	2.4	1.4	0.9	0.4	0.2	0.1
-0.5	5.8	3.9	2.9	2.4	0.9	0.9	0.4
-1.0	8.2	5.8	4.8	3.3	1.9	1.4	0.9
-1.5	10.1	7.2	6.7	4.3	2.8	1.9	1.3
-2.0	11.6	8.2	7.6	5.2	3.7	2.8	1.8
-2.5	13.0	9.2	9.0	5.7	4.2	3.3	2.7
-3.0	14.5	10.1	11.0	6.7	4.7	4.2	3.6
-3.5	15.4	11.1	12.4	8.1	5.6	4.7	4.0
-4.0	16.4	12.0	12.9	9.5	6.5	5.1	4.4
-6.0	20.2	14.5	14.8	11.9	7.0	6.5	5.3
-8.0	23.1	16.4	15.7	12.9	8.4	7.0	6.2
-10.0	26.0	18.3	16.7	14.3	9.8	7.9	7.1
ρ, кг/м³	1700		1500		1300		1000
K	$\frac{83}{q/\xi - 17}$		$\frac{85}{q/\xi - 15}$		$\frac{87}{q/\xi - 13}$		$\frac{90}{q/\xi - 10}$

П р и м е ч а н и е. Табличные значения D при конкретных значениях q (кПа) и ξ (м) умножаются на величину K .

Анализ формулы (5) и данных табл. 1, 2 позволяет сделать следующие выводы об условиях зарождения инъекционных бугров пучения.

1. Образование инъекционных бугров характерно для днщ озерных котловин, где с поверхности обычно залегают торф или оторфованные отложения с наименьшей величиной удельного сопротивления сдвигу τ (см. табл. 1).

2. Очагами возникновения бугров являются участки с наиболее высокой температурой и наименьшей мощностью слоя, промерзающего в верхней части замкнутого талика (часто – на месте остаточного водоема с не оттаивающими летом донными отложениями или в местах повышенного снегонакопления, например, с кустарниками), на которых относительно снижена величина τ .

3. Во временном отношении для возникновения бугров более благоприятен период года с повышением температуры (снижением τ) и уменьшением мощности мерзлого слоя в верхней части талика – летне-осенний сезон (см., например, [Васильчук, Буданцева, 2010]).

Процесс роста булгуняхов (пинго)

Рост бугра осуществляется в форме последовательных циклов (рис. 3). В ходе каждого цикла происходит сдвиг и подъем мерзлого блока в виде диска, сопровождающийся внедрением к его подошве талой породы или воды, находящейся под давлением, с последующим ее промерзанием и формированием мерзлого (ледяного) ядра бугра. В процессе подъема мерзлого блока избыточное давление q снижается, приближаясь к атмосферному, пучение прекращается, а величина подъема соответствует пучению бугра h за данный цикл.

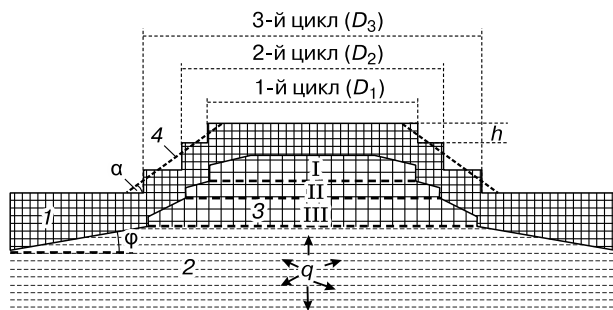


Рис. 3. Циклический рост инъекционного бугра.

1 – мерзлый грунт; 2 – талый грунт (вода) под избыточным давлением; 3 – мерзлое (ледяное) ядро бугра; 4 – контур откоса; I–III – положения нижней границы (штриховая линия) внедренных в бугор в ходе каждого цикла и впоследствии промерзших грунтов (воды). D_1, D_2, D_3 – диаметры вершины бугра при 1-м, 2-м и 3-м циклах пучения. h – величина пучения за один цикл; α – угол откоса; φ – уклон подошвы мерзлоты; q – удельное избыточное давление.

После завершения первого цикла второй (как и все последующие) должен происходить с расширением площади пучения S (соответственно, диаметра бугра D) по сравнению с предыдущим циклом (см. рис. 3). Это связано с тем, что условие (1) выполняется при все возрастающих значениях параметров его правой части (сумма которых равна F): прибавка веса (ΔG) за счет веса выпученного в ходе предыдущего цикла мерзлого грунта и увеличения сопротивления сдвигу (ΔU) мерзлого диска по контакту с остальной частью мерзлой толщи. Этот рост обусловлен увеличением толщины промерзающего слоя в направлении от центра бугра (см. рис. 3). Соответственно, величина Q в условии (1) возрастает на ΔQ . Так, можно записать

$$\Delta Q = \Delta F = \Delta G + \Delta U. \quad (6)$$

Динамика величин Q и F в промежутке времени от начала первого цикла пучения до окончания второго приведена на рис. 4. В ходе каждого цикла значения Q и F совпадают, а в промежутках между циклами $F > Q$. Естественно, аналогичная картина характерна для любых двух других последовательных циклов пучения.

Расчет угла откоса бугра

Исходя из равенства (6), можно вывести формулу для расчета угла откоса бугра.

1. Формуле (6) эквивалентна следующая:

$$q(S' - S) = h\rho S + \tau L' \Delta \xi, \quad (7)$$

где S, S' – площади основания мерзлого диска в предыдущем и новом циклах; h – величина пучения за предыдущий цикл (см. рис. 3); ρ – плотность мерзлого грунта (или льда), образованного внутри бугра в предыдущем цикле; L' – периметр мерзлого диска в новом цикле; $\Delta \xi$ – возрастание толщины мерзлого грунта в новом цикле в связи с уклоном φ подошвы мерзлого слоя в сторону от бугра (см. рис. 3).

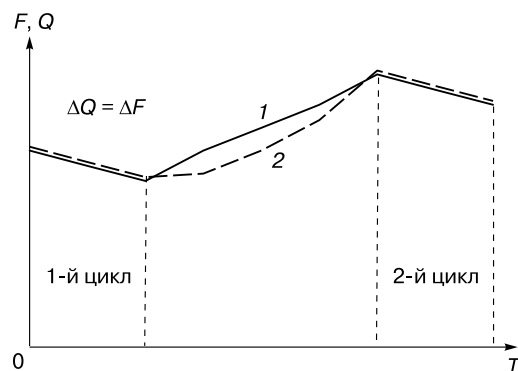


Рис. 4. Изменение во времени T значений сил сопротивления мерзлого грунта деформации F (1) и сил сопротивления талого грунта сжатию Q (2) для двух циклов пучения.

2. Принимая круговую форму площади основания бугра, выражение (7) для второго цикла пучения можно записать как

$$q\pi(r_2^2 - r_1^2) = h\pi r_1^2 + \tau 2\pi r_1 \Delta \xi, \quad (8)$$

где r_1, r_2 – радиусы основания мерзлого диска в первом и втором циклах.

3. Так как $(r_2^2 - r_1^2) = (r_2 - r_1)(r_2 + r_1)$, а значения радиусов в предыдущем и последующем циклах отличаются мало ($r_2 \approx r_1$), формулу (8) можно заменить приближенным равенством

$$q2r\Delta r \approx h\pi r^2 + 2\tau r \Delta \xi. \quad (9)$$

4. Поделив обе части формулы (9) на $2r\Delta r$ и учитывая, что $r_1 = D/2$, $h/\Delta r$ – тангенс угла откоса бугра α , $\Delta \xi/\Delta r$ – тангенс угла наклона подошвы мерзлой кровли талика φ (см. рис. 3), имеем

$$q \approx \frac{D}{4} 0.01 \rho \operatorname{tg} \alpha + \tau \operatorname{tg} \varphi. \quad (10)$$

5. Подставляя в формулу (10) вместо D его аналитическое выражение (5), получаем формулу для расчета угла откоса бугра

$$\alpha \approx \arctg \left[\left(\frac{q}{\tau} - \operatorname{tg} \varphi \right) \left(\frac{100q}{\xi \rho} - 1 \right) \right], \quad (11)$$

$$q \geq \max(\tau \operatorname{tg} \varphi; 0.01 \xi \rho).$$

Из формулы (11) вытекают следующие выводы об условиях роста инъекционных бугров пучения.

1. Величина угла откоса α в формуле (11) находится в прямой зависимости от удельного избыточного давления q в замкнутом талике, вызывающего пучение, и в обратной – от величины других параметров (τ, ξ, φ, ρ), препятствующих процессу. Поэтому увеличение α говорит об улучшении условий выпучивания, а уменьшение – об их ухудшении.

2. При прочих равных условиях наибольшее воздействие на α оказывает удельное сопротивление сдвигу τ , которое напрямую зависит от температуры промерзающего слоя, понижение которой может уменьшить угол откоса, вплоть до формирования специфической формы “пьедестала” (рис. 5).



Рис. 5. Булгуннях с “пьедесталом” [https://булгуннях.рф/фото].

Уклон откоса центрального бугра 27° , уклон склона “пьедестала” 13° .

3. Пространственное изменение вокруг бугра параметров, входящих в формулу (11), может привести к изменению профиля его склона в разных направлениях от вершинной поверхности, вызывая асимметрию формы бугра.

4. Рост бугра прекращается либо при невыполнении одного из двух условий двойного неравенства, определяющего минимальную величину q в формуле (11), либо при полном промерзании талика. Во втором случае возобновление пучения невозможно.

Возможные сочетания параметров, определяющих диаметр вершинной поверхности и уклон бугров

Естественно возникает вопрос, насколько расчеты по формулам (5) и (11) соответствуют наблюдаемым в природе значениям диаметра вершинной поверхности и угла откоса инъекционных бугров. Ответ можно получить только при выполнении соответствующих вычислений применительно к конкретным исследованным объектам. К сожалению, автору не удалось найти в литературе инъекционные бугры, для которых были бы приведены все параметры, необходимые для расчетов по предложенным формулам. Однако можно попытаться методом подбора по формулам (5) и (11) установить возможные сочетания пара-

Таблица 3. Расчетные и фактические значения параметров бугров

Бугор	Грунт мерзлой кровли талика	$q_{\text{ф}}$, кПа	$\rho_{\text{р}}$, кг/м ³	$\xi_{\text{р}}$, м	$\tau_{\text{р}}$, кПа	φ , град		D , м		α , град	
						расч.	факт.	расч.	факт.	расч.	факт.
Пинго (рис. 6)	Глина	105	1700	2.0	120	–	35	14	12	20	16
Булгуннях (рис. 7)	Суглинок	100	1700	2.8	120	35	–	24	24	8	9

Примечание. Обозначения величин см. в тексте.

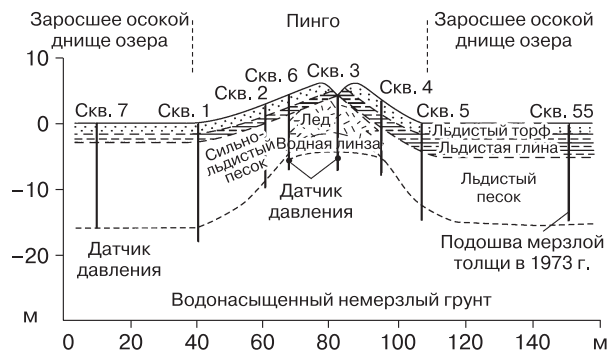


Рис. 6. Пинго Д.Р. Маккея.



Рис. 8. Булгуннях с признаками террасирования склона [https://булгуннях.рф фото].

метров, определяющих диаметр вершинной поверхности D и угол откоса α у конкретного бугра. Такие вычисления были выполнены для двух бугров – пинго Д.Р. Маккея (рис. 6) [Соломатин, 2013, с. 137] и булгуннях П.А. Соловьева (рис. 7) [Основы..., 1959, с. 292]. Результаты представлены в табл. 3.

В табл. 3 фактические данные по величине избыточного давления q_f взяты из работы [Соломатин, 2013, с. 137] (см. рис. 6), по высоте гидростатического напора (10 м) водоносного горизонта – из [Основы..., 1959, с. 292] (см. рис. 7). Расчетная величина сопротивления сдвигу τ_r для обоих бугров определялась по табл. 1 для глинистого грунта с температурой -1°C . Толщина мерзлого слоя ξ в начале пучения принималась примерно равной мощности мерзлого грунта над ледяным (см. рис. 6) и грунтово-ледяным (см. рис. 7) ядром на вершине бугра. Уклон подошвы мерзлого слоя талика ϕ для бугра П.А. Соловьева (см. рис. 7) принимался таким же, как и для бугра Д.Р. Маккея (средняя величина уклона на рис. 6). При таких исходных данных расчетные и фактические значения D и α близки между собой. Естественно, конкретные сочетания значений указанных параметров при возникновении и росте данных бугров могли быть другими, но, возможно, различия не были большими.

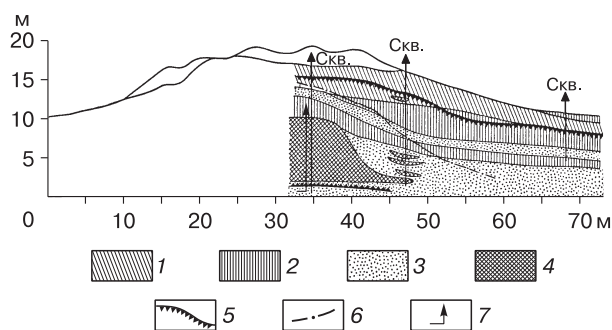


Рис. 7. Булгуннях П.А. Соловьева.

1 – супеси; 2 – суглинки; 3 – пески; 4 – лед; 5 – верхняя граница мерзлых пород; 6 – граница ядра с выделением линзочек чистого льда; 7 – напор водоносного горизонта.

ФАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ СПРАВЕДЛИВОСТЬ ГИПОТЕЗЫ СДВИГОВОГО МЕХАНИЗМА

Морфологическим признаком проявления цикличности в процессе пучения инъекционных бугров может служить террасированный облик их склонов, где высота уступа террасы примерно соответствует величине пучения за один цикл (см. рис. 3). Как правило, ступенчатость сглаживается вследствие перекрытия мерзлых блоков слоем сезонного оттаивания, а также более интенсивного оттаивания выступающих частей мерзлых блоков. Однако иногда можно заметить следы террасирования склона бугра, предположительно обусловленные цикличностью процесса пучения (рис. 8).

М.А. Великоцкий в 1969 г. выполнял экспедиционные исследования на территории Яно-Инди-гирской низменности. В долине руч. Тэнкичээн он обнаружил булгуннях, вскрытый в результате эрозионной деятельности ручья (рис. 9). На рис. 9, Б в увеличенном масштабе представлена часть разреза в зоне сдвига мерзлого грунта в ходе последнего цикла пучения, видимая величина которого составила около 40 см (см. рис. 9, А). Вертикальная протяженность плоскости сдвига (при ширине ~ 15 см) равна 1.2 м, из которых нижние ~ 0.7 м заполнены дробленным (в процессе сдвига) мерзлым алевроитом в окружении льда, а верхняя часть оттаяла (см. рис. 9, Б). Справа от плоскости сдвига деформации прилегающего участка грунта подчеркнуты изгибом слоистости. Ниже плоскости сдвига развилась морозобойная трещина, внедренная в алевроит и лед. Эта трещина, по-видимому, унаследовала плоскость сдвига уже после полного промерзания талика, поскольку лед, в который она внедрилась, вероятно, образовался при замерзании водяной линзы под бугром.

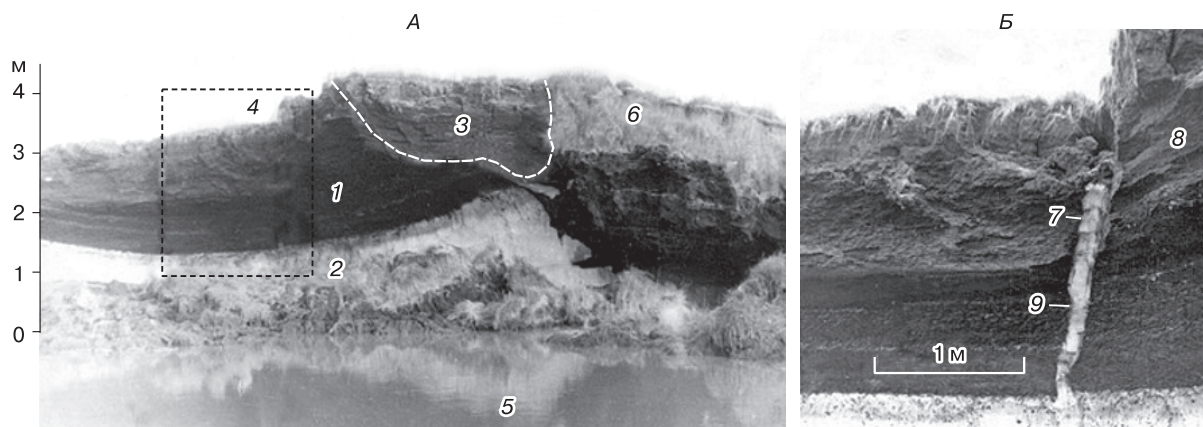


Рис. 9. Вскрытый булгуньях в долине ручья Тэнкичээн.

А – общий вид; Б – увеличенный фрагмент. 1 – мерзлый алеврит; 2 – лед; 3 – термоцирк, образовавшийся вследствие оттаивания и сноса центральной части бугра; 4 – мерзлый уступ блока последнего цикла пучения; 5 – поверхность озера к воды, примыкающего к подножию обнажения; 6 – покров из злаково-осоковой дернины, свисающий с бровки обнажения; 7 – плоскость сдвига блока последнего цикла, заполненная мерзлым дробленным алевритом и льдом; 8 – деформация слоев грунта; 9 – лед в морозобойной трещине. Фото М.А. Великоцкого, с дополнениями В.П. Марахтанова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках концепции сдвигового механизма находят объективное физическое обоснование (с соответствующим математическим описанием) условия возникновения и роста инъекционных бугров пучения типа булгуньяхов или пинго. Здесь проявляется взаимодействие двух прямо противоположных процессов – охлаждения с промерзанием и нагревания с оттаиванием. Первый увеличивает движущую силу пучения через возрастание давления в замкнутом талике по мере его зимнего промерзания; второй способствует дальнейшей реализации этой силы, поскольку по мере прогрева мерзлой толщи в верхней части замкнутого талика и уменьшения ее мощности при постепенном оттаивании летом снижается сопротивление сдвигу мерзлого грунта, облегчая тем самым процесс пучения.

Справедливость действия сдвигового механизма подтверждается фактическими данными по морфологии бугров и мерзлотно-фациальным условиям их распространения.

Дальнейшие исследования в рамках изложенной концепции сдвигового механизма можно вести по следующим основным направлениям:

- получение фактического материала по конкретным буграм, достаточного для выполнения объективных расчетов по предложенным формулам;
- установление основных факторов, определяющих особенности морфологии вершинной поверхности бугров;
- выяснение роли сдвигового механизма в формировании ледяного ядра бугров и питающей его водной линзы;

– использование данных по морфологии бугров в палеогеографическом аспекте.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы “Геоэкологический анализ и прогноз динамики криолитозоны Российской Арктики” (№ АААА-А16-116032810055-0).

Литература

- Андреев В.И.** Гидролакколиты (булгуньяхи) в Западно-Сибирских тундрах // Изв. Гос. геогр. о-ва, 1936, т. 68, вып. 2, с. 186–210.
- 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.
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А.** Радиоуглеродное определение возраста булгуньяха на месторождении Песцовое в северной части Западной Сибири // Инж. геология, 2010, № 4, с. 14–21.
- 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.
- Марахтанов В.П.** Механизм роста миграционных бугров пучения // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1999, № 3, с. 41–46.
- Марахтанов В.П.** Литостатический механизм образования форм криогенного пучения // Геоморфология, 2015, № 1, с. 22–35.
- Марахтанов В.П.** Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов под воздействием архимедовой силы // Междунар. журн. прикл. и фундамент. исслед., 2016, № 4, с. 748–759.
- Основы геокриологии (мерзлотоведение).** Ч. I. Общая гео-криология. М., АН СССР, 1959, 459 с.

Сакс В.Н. Некоторые данные о вечной мерзлоте в низовьях Енисея // Проблемы Арктики, 1940, № 1, с. 62–79.

СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Госстрой России. М., ГУП ЦПП, 2005, 52 с.

Соломатин В.И. Физика и география подземного оледенения. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2013, 346 с.

Mackay D.R. The growth of pingos Western Arctic Coast, Canada // Can. J. Earth Sciences, 1979, vol. 10, No. 6, p. 979–1004.

References

Andreev V.I. Hydrolaccolithes (bulgunnyahs) in the West Siberian tundra. Izvestiya Gosudarstvennogo Geograficheskogo obshchestva [News of the State Geographical Society], 1936, vol. 68, iss. 2, p. 186–210.

Bogoyavlensky V.I., Garagash I.A. Substantiation of the process of formation of gas release craters in the Arctic by mathematical modeling. Arktika: Ekologiya i Ekonomika [Arctic: Ecology and Economy], 2015, No. 3 (19), p. 12–17.

Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A. Radiocarbon dating of the pingo in the Pestovoye Gas field at the north of West Siberia. Inzhenernaya Geologiya [Engineering Geology], 2010, No. 4, p. 14–21.

Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C. et al. Isotope composition of pingo ice core in the Evoyakha river valley, north-west Siberia. Earth's Cryosphere, 2014, vol. XVIII, No. 4, p. 41–51.

Marakhtanov V.P. Growth mechanism of migration heaving mounds. Vestnik Moskovskogo un-ta. Ser. 5. Geografiya [Bulletin of the Moscow University. Ser. 5. Geography], 1999, No. 3, p. 41–46.

Marakhtanov V.P. Lithostatic mechanism of formation of forms of cryogenic heaving. Geomorfologiya [Geomorphology], 2015, No. 1, p. 22–35.

Marakhtanov V.P. Cryogenic heaving of fine soils under the influence of Archimedean force. Mezhdunarodnyi Zhurnal Prikladnykh i Fundamentalnykh Issledovaniy [Intern. J. Applied and Fundamental Research], 2016, No. 4, p. 748–759.

Fundamentals of Geocryology (permafrost). Part 1. General Geocryology. Moscow, USSR Academy of Sciences, 1959, 459 p. (in Russian).

Saks V.N. Some data on permafrost in the lower reaches of the Yenisei. Problemy Arktiki [Problems of the Arctic], 1940, No. 1, p. 62–79.

SNiP 2.02.04-88. Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlykh gruntakh [The bases and the building bases on permafrost soils]. Moscow, Center of design products in construction, 2005, 52 p. (in Russian).

Solomatin V.I. Fizika i geografiya podzemnogo oledeneniya [Physics and Geography of the Underground Glaciation]. Novosibirsk, Academic Publishing House "Geo", 2013, 346 p. (in Russian).

Mackay D.R. The growth of pingos Western Arctic Coast, Canada. Can. J. Earth Sciences, 1979, vol. 10, No. 6, p. 979–1004.

*Поступила в редакцию 18 января 2019 г.,
после доработки – 11 июля 2019 г.,
принята к публикации 10 октября 2019 г.*