

Дискуссии

УДК 551.435.5

© 2015 г. В.П. МАРАХТАНОВ

ЛИТОСТАТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ФОРМ
КРИОГЕННОГО ПУЧЕНИЯ*Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва; ecolog_n@mail.ru*

Введение

Криогенное пучение грунтов в северных районах Земли – один из ведущих рельефообразующих факторов, в результате действия которого иногда возникают бугры впечатляющих размеров [1]. Необходимое условие успешного исследования форм криогенного пучения – знание механизма проявления этого процесса и, в особенности, учет его движущих сил.

Ни один из криогенных процессов не был подвергнут столь всестороннему и тщательному исследованию, как пучение грунтов при их промерзании. Это обусловлено не только физическими особенностями пучения, представляющего собой наиболее типичный мерзлотный процесс, но и практической значимостью изучения данного явления для решения разнообразных задач строительства на мерзлых и промерзающих грунтах. В связи с этим, казалось бы, существующие воззрения на природу сил криогенного пучения незыблемы и не нуждаются в корректировке. Однако дело обстоит не совсем так. При пристальном рассмотрении возникают вопросы в отношении как современной концепции развития пучения, так и некоторых опытных данных, не могущих получить удовлетворительного объяснения в рамках существующих мнений. Об имеющихся здесь пробелах свидетельствуют и сами специалисты в этой области. Так, в [2] говорится о том, что силы выпучивания всего лишь *заменяются* (выделено автором – В.М.) реакциями связей, которые выступают эквивалентом силы пучения. Б.И. Далматов заявляет: “...не изучены в полной мере причины пучения грунтов, учитывая которые можно было бы составлять прогноз этого явления...” [3]. С момента этих публикаций прошло больше сорока лет, а положение дел по существу не изменилось.

1. Некоторые проблемы современной концепции развития пучения

Согласно общепринятым представлениям, пучение грунта происходит вследствие увеличения его объема при промерзании. При этом характерным признаком пучения, определяющим геоморфологический эффект проявления этого процесса, служит подъем поверхности промерзающего грунта [4–7 и др.]. Именно величина подъема

служит мерой интенсивности пучения. Например, через нее рассчитывается модуль пучения m_f [7]:

$$m_f = 100h_f/d_{0i}, \quad (1)$$

где h – величина поднятия поверхности, d_{0i} – мощность слоя талого грунта, вызывающего деформацию пучения (поднятие поверхности) величиной h_f .

Возникает вопрос: почему наблюдается подъем, если наращивание толщины промерзающего слоя (движение фронта промерзания грунта) происходит в противоположном направлении? Объяснение этому дается в [4]: “В естественных условиях расширение грунта возможно лишь вверх, так как расширению в стороны препятствует, вообще говоря, такое же стремление к расширению боковых участков грунта, а расширению вниз – развивающееся с давлением сопротивление нижележащих слоев, тогда как перемещению вверх мешает лишь вес вышележащих слоев” (с. 132). Таким образом, промерзающий слой как бы “отжимается” от нижележащей опоры, которой в природных условиях служит талый грунт. Подобный взгляд находит отражение в известном условии Маккея [8], согласно которому пучение наблюдается лишь в том случае, если сопротивление талого грунта сжатию Q превосходит сопротивление поднятию мерзлой толщи F :

$$Q > F. \quad (2)$$

В этом выражении величина F складывается из давления от веса мерзлой толщи G и силы сопротивления мерзлого грунта изгибу U : $F = G + U$.

Как следует из условия (2), для того чтобы развивалось пучение, талый слой, подстилающий промерзающий грунт, должен обладать достаточной “жесткостью”, превосходящей не только давление от веса мерзлого грунта G , но и его сопротивление деформирующим усилиям U (о влиянии податливости подстилающих талых слоев упоминает, например, Н.А. Цытович [9]). При этом отметим, что в условии Маккея отсутствует величина силы, вызывающей пучения. Природа этой силы, согласно традиционным представлениям [9], связана с давлением растущих ледяных кристаллов, которое можно обозначить как $P_{\text{льда}}$. Условие (2) учитывает лишь часть величины этого давления, равную Q . Это легко объяснимо, поскольку $P_{\text{льда}}$ направлено сверху вниз, а пучение направлено в противоположную сторону, и сила, с которой оно происходит, в соответствии с третьим законом Ньютона, равна именно силе реакции опоры Q . Другими словами, *сколь велико ни было бы давление льда, его силовой эффект не может превзойти силу сопротивления талого грунта сжатию*.

Подобный механизм пучения оказывается не универсальным, если рассмотреть его в применении к двум различным типам промерзающих грунтовых систем, распространенным в природе, – замкнутым и открытым. Характерным примером замкнутых систем могут служить инъекционные бугры пучения, а открытых – миграционные бугры пучения. Как известно, первые могут образовываться, например, в процессе промерзания подоцерных таликов, вторые – на промерзающих участках болот, сложенных тальми тонкодисперсными грунтами [10].

По характеру изменения соотношения между Q и F в процессе промерзания грунта существует принципиальная разница между этими типами систем. В замкнутых системах некуда отжиматься избытку воды, образующемуся при фазовом переходе “вода–лед”, что приводит к возрастанию давления в промерзающем талом грунте (Q), причем развивающихся при этом сил может вполне хватить для деформации пучения (поднятия) мерзлой кровли или даже ее разрыва с излиянием жидкой массы грунта на поверхность.

Сопротивление сжатию при промерзании обеспечивается не только в замкнутых природных системах, но также при исследовании пучения грунта в лабораторных условиях. В лаборатории промерзающий грунт помещается в сосуд с жесткими боковыми стенками и опирается на практически несжимаемый песок, из которого поступает вода к фронту промерзания. Поэтому расширение промерзающего грунта вследствие

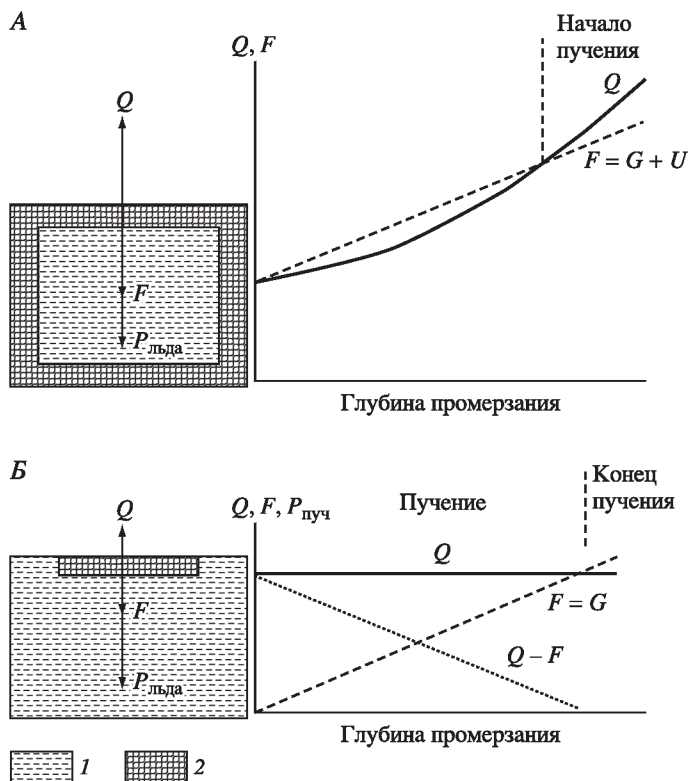


Рис. 1. Динамика величин Q и F в замкнутых (А) и открытых (Б) системах
Грунт: 1 – талый, 2 – мерзлый

Величина этой разности характеризует способность промерзающего грунта перемещаться вверх, создавая формы криогенного пучения. Как мы видим, в открытых системах по мере промерзания разность $Q - F$ уменьшается и может наступить момент (начиная с некоторой глубины промерзания грунта), когда пучение должно прекратиться ($Q - F = 0$).

Отсутствие нарастания давления в талом грунте, промерзающем в условиях открытой системы, подтверждается экспериментальными данными [5]. Измеренное давление в талой зоне не превышало 0.03 МПа, причем на участках, примыкающих к фронту промерзания, оно падало практически до 0. Анализируя полученные данные, В.О. Орлов приходит к выводу, что "...слой талого грунта ниже фронта промерзания *нельзя* (выделено автором. – В.М.) рассматривать как некоторую зону пластических деформаций, которая находится под равномерно распределенной нагрузкой, являющейся функцией мощности промерзающего слоя" [5, с. 124].

Можно привести значения предельной мощности мерзлого слоя, при превышении которой условие (2) в открытых системах должно перестать выполняться (табл. 1). Как мы видим, эта мощность обратно пропорциональна сжимаемости. В то же время известно, что наиболее способны к пучению тонкодисперсные грунты текучей консистенции, по своим физическим свойствам напоминающие жидкость [11]. Как же тогда, например, на севере Западной Сибири, на болотах, сложенных подобными грунтами, в растущих миграционных буграх пучения (в условиях открытой системы) мощность мерзлого ядра может достигать десятков метров [1]? Таким образом, общетеоретические соображения показывают, что в открытых грунтовых системах условие (2) развития криогенного пучения не «работает».

накопления в нем льда может реализоваться только вверх. Следовательно, в лаборатории по существу изучаются замкнутые системы.

Таким образом, в замкнутых системах условие (2) развития пучения выполняется. В открытых системах избыток воды свободно перераспределяется в талом грунте. Поэтому в открытых системах нет физических предпосылок для нарастания давления в талом грунте, подстилающем промерзающий слой. Напротив, по мере увеличения мощности мерзлого слоя, условия развития пучения должны ухудшаться.

Сказанное иллюстрирует рис. 1, отражающий принципиальную динамику величин Q и F в разных системах по мере их промерзания. На рис. 1б кроме Q и F показана динамика разности $Q - F$ для открытой системы.

Предельная мощность слоя мерзлого грунта (в метрах), при которой должно прекратиться пучение открытой системы

Сопротивление сжатию талого грунта, МПа	Плотность мерзлого грунта, г/см ³			
	1.2	1.4	1.6	1.8
0.2	16.7	14.3	12.5	11.1
0.1	8.3	7.1	6.3	5.6
0.08	6.7	5.7	5.0	4.4
0.06	5.0	4.3	3.8	3.3
0.04	3.3	2.9	2.5	2.2

Анализ этого условия позволяет прояснить некоторые особенности механизма образования криогенных форм, касающиеся возможности деформации изгиба их мерзлой кровли в процессе пучения. В замкнутых системах такие деформации не противоречат физическим условиям развития процесса и приводят к образованию инъекционных бугров пучения [12]. В открытых системах промерзающий слой не может изгибаться, так как сопротивление мерзлого грунта изгибу U значительно больше сопротивления сжатию подстилающего талого грунта Q . Отсутствие деформаций изгиба мерзлого грунта в миграционных буграх пучения (открытых системах) подтверждают и фактические данные. Зарисовки криогенного строения таких бугров в шурфах показывают преимущественно горизонтальное залегание ледяных прослоев [1, 13]. Аналогичная картина в ядрах исландских бугров отмечена Е. Шунке [14]. Многочисленные случаи, когда вершинная часть бугра представляет собой плоскую площадку [1], а отнюдь не свод, как того можно было бы ожидать при деформациях изгиба.

2. Физические предпосылки литостатической концепции пучения открытых систем

Как же происходит подъем поверхности форм криогенного пучения открытых грунтовых систем? Логично предположить, что промерзающий грунт выпирается из талого грунта вверх в виде цельного мерзлого массива. Подобный механизм упоминался в [4] для объяснения одинакового выпучивания столбов с различной засыпкой. Авторы считали, что мерзлый массив поднимался вверх целиком, захватывая находящиеся на нем предметы. В [5] на рис. 14 и 15 представлено перемещение вверх поверхности опытной площадки 4 в процессе морозного пучения суглинистого грунта. Первоначально выпучивался оголенный участок, затем к нему последовательно присоединялись участки, покрытые теплоизолирующим слоем опилок толщиной 0.2 м и 0.4 м. Каждая точка поверхности перемещалась вверх на почти одинаковую (в пределах точности нивелирования) высоту, что говорит о выпирании вверх цельного мерзлого массива.

Какая же сила заставляет мерзлый массив подниматься вверх, если отжимание его от подстилающего мерзлого грунта исключено (см. выше)? Попробуем найти ответ, анализируя изменение при промерзании такого физического свойства грунта, как плотность. Характерным физическим явлением, сопровождающим промерзание тонкодисперсных грунтов (супесей, суглинков, глин), способных к пучению, является их разуплотнение при переходе в мерзлое состояние. Существуют по крайней мере три возможные причины разуплотнения. Во-первых, удаление из порового пространства промерзшего грунта избытка воды, равного разности между увеличением объема поровой воды при переходе ее в лед и объемом части пор, незаполненной водой. Во-вторых, в мерзлом грунте могут образовываться микро- и макропустоты, уменьшающие его плотность [1, 4]. Третьей причиной (несравненно более весомой по сравнению с двумя предыдущими) является формирование миграционного льда, доля которого в

объеме мерзлой породы может составлять десятки процентов [10]. При этом такой же порядок имеет разница плотностей талого и мерзлого грунта.

Таким образом, при промерзании тонкодисперсного грунта внутри него образуется более легкое мерзлое тело. Можно предположить, что при этом возникает выталкивающая сила, стремящаяся вытеснить это мерзлое тело вверх. Такое предположение не кажется невероятным, если учесть, что в природе разность плотностей горных пород вызывает, например, явление диапиризма [15].

Сила, выталкивающая мерзлый грунт из талого, по сути, может быть архимедовой силой, проявление которой в водной и воздушной среде есть общепризнанный факт и, например, учитывается при проектировании судов и воздухоплавательных аппаратов [16]. Что же касается грунтов, то практический учет в них архимедовой силы автором статьи нигде встречен не был, за исключением нормативного документа, регламентирующего строительство трубопроводов [17]. Там, в примечании к п. 8.14 говорится о том, что “при проектировании трубопроводов на участках переходов, сложенных грунтами, которые могут перейти в жидко-пластическое состояние, при определении выталкивающей силы следует вместо плотности воды принимать плотность разжиженного грунта, определяемую по данным изысканий” (т. е. фактически учитывать в расчете архимедову силу в грунтах). Таким образом, возникновение архимедовой силы можно предположить при промерзании тонкодисперсных грунтов – по крайней мере, текучей консистенции – и может быть даже менее влажных.

Впервые идея о возникновении архимедовой силы при промерзании тонкодисперсных грунтов (литостатическая гипотеза) была высказана и теоретически обоснована автором при анализе многочисленных данных по отечественным и зарубежным миграционным буграм пучения, приведенным в диссертации В.П. Евсеева [13]. Литостатическая гипотеза позволила объяснить особенности географического распространения бугров, их эволюции, морфологии, геологического и криогенного строения [18]. Тем не менее тогда это находило лишь косвенное подтверждение и требовало обоснования экспериментальными данными. Соответствующий опыт был выполнен автором, его описание приводится ниже.

3. Основные положения литостатической концепции

Прежде всего следует изложить исходные теоретические положения литостатической концепции. Некоторые из них были использованы при разработке методики опыта и интерпретации его результатов.

1. Зимнее промерзание грунта характеризуется пространственно-временной неоднородностью, обусловленной неоднородностью природных факторов, определяющих условия промерзания (главным образом, снежного и почвенно-растительного покрова). Вследствие этого в начальный период промерзания образуются отдельные мерзлые массивы внутри талого грунта, промерзающие по типу открытой системы (без нарастания давления в подстилающей талой толще).

2. На эти массивы действует выталкивающая (архимедова) сила F_v :

$$F_v = \rho_t g V, \quad (3)$$

где ρ_t – плотность талого грунта, V – объем мерзлого массива, g – ускорение земного тяготения.

3. Если плотность мерзлого грунта ρ_m меньше плотности талого ρ_t , то выталкивающая сила может вызвать всплытие мерзлого массива из талого грунта под действием направленной вверх части выталкивающей силы, равной разности F_v и веса мерзлого массива G . Эту разность можно обозначить как движущую силу пучения F_{dv} :

$$F_{dv} = F_v - G = \rho_t g V - \rho_m g V = g V (\rho_t - \rho_m). \quad (4)$$

Мерзлые массивы, наиболее способные к всплыванию, образуются в тонкодисперсных грунтах (супесях, суглинках, глинах) с текучей (или близкой к ней) консистенцией.

4. Всплыванию мерзлого массива может препятствовать сопротивление сдвигу по его боковой поверхности F_c . Отсюда условием всплывания, т. е. начала пучения промерзающего грунта, является выполнение неравенства:

$$F_{\text{дв}} > F_c. \quad (5)$$

5. С момента начала всплывания объем мерзлого массива V разделяется на две части: вытолкнутую из талого грунта V_m и погруженную в талый грунт V_t : $V = V_m + V_t$.

6. В процессе всплывания система “мерзлый массив – талый грунт” стремится к достижению положения статического равновесия, соответствующего условию:

$$F_b = G + F_c, \quad (6)$$

где F_b – выталкивающая (архимедова) сила, действующая на часть мерзлого массива, находящуюся в талом грунте (V_t). Выражение (6) можно привести к следующему виду:

$$(\rho_t - \rho_m) g V_t = \rho_m g V_m + F_c. \quad (7)$$

Левая часть равенства (7) есть движущая сила, действующая на часть мерзлого массива, находящуюся в талом грунте, а произведение $\rho_m g V_m$ – вес части мерзлого массива, вытолкнутой из талого грунта.

В зависимости от конфигурации мерзлого массива можно определить высоту его вытолкнутой части (величину пучения) h_p , соответствующую условию статического равновесия. Для наглядности приведем рис. 2, на котором показан мерзлый массив в форме цилиндра в положении статического равновесия.

Если массив имеет форму цилиндра (в т.ч. и неправильного), то выражение (7) записывается в виде:

$$(\rho_t - \rho_m) g S (H - h_p) = \rho_m g S h_p + F_c, \quad (8)$$

где S – площадь основания массива, H – толщина массива (глубина промерзания). Отсюда:

$$h_p = H (1 - \rho_m / \rho_t) - F_c / S g \rho_t. \quad (9)$$

Параметр $F_c / S g \rho_t$ в формулах (9) и (10) равен возможному уменьшению высоты всплывания мерзлого массива (Δh_p) за счет воздействия силы сопротивления сдвигу по боковой (подземной части) мерзлого массива.

Величина F_c равна (рис. 2):

$$F_c = F_{\text{см}} + F_{\text{ст}} = [(F_{\text{ст. уд}} (H - h_p - \xi) + F_{\text{см. уд}} \xi] N, \quad (10)$$

где $F_{\text{ст}}$ и $F_{\text{см}}$ – сопротивления сдвигу мерзлого массива по окружающим талому и мерзлому грунту, $F_{\text{ст. уд}}$, $F_{\text{см. уд}}$ – удельные сопротивления сдвигу мерзлого массива по окружающим талому и мерзлому грунту, ξ – глубина промерзания грунта на контакте с массивом, N – периметр массива.

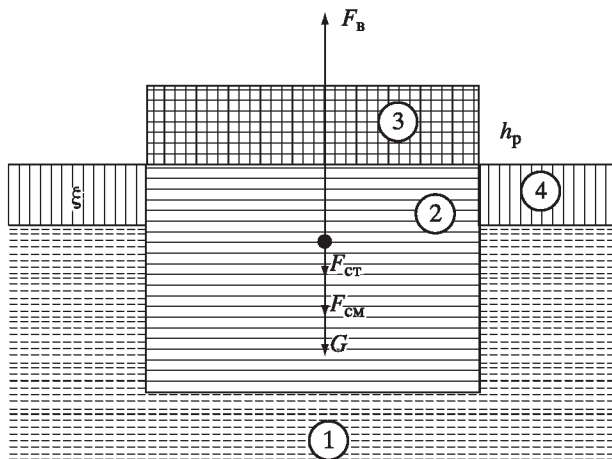


Рис. 2. Мерзлый массив в положении статического равновесия и действующие на него силы

1 – талый грунт; части мерзлого массива: 2 – подземная, 3 – надземная; 4 – мерзлый грунт вокруг массива; сопротивление сдвигу по границе: $F_{\text{см}}$ – с мерзлым слоем, окружающим массив, $F_{\text{ст}}$ – с талым грунтом; G – вес мерзлого массива; F_b – архимедова сила ($G + F_{\text{ст}} + F_{\text{см}}$); ξ – глубина промерзания грунта на контакте с массивом; h_p – величина пучения

Рассмотренные выше геометрические параметры мерзлого массива – H , S , h – можно использовать при расчете движущей силы пучения $F_{\text{дв}}$. Последняя возникает в том случае, если фактическая высота вытолкнутой части массива (величина пучения) h меньше высоты h_p , соответствующей условию статического равновесия (9). Это наблюдается всегда, пока идет промерзание грунта в силу инерции системы “мерзлый массив – талый грунт” (промерзание опережает подъем). При этом:

$$F_{\text{дв}} = (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{м}})(H - H_p) S, \quad (11)$$

где H и H_p – толщина массива (глубины промерзания), соответственно, при h и h_p . Используя формулу (9) при $F_c = 0$ и формулу (11), можно вывести основную формулу, в которой $F_{\text{дв}}$ рассчитывается через фактическую высоту надземной части массива h и глубину его промерзания H :

$$F_{\text{дв}} = g [(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{м}}) H - \rho_{\text{т}} h] S. \quad (12)$$

Обратим внимание на то, что если возникает препятствие движению вверх мерзлого массива (h перестает возрастать), а промерзание массива продолжается (H возрастает), то $F_{\text{дв}}$ увеличивается, причем это увеличение при неизменных других параметрах формулы (12) прямо пропорционально H . В дальнейшем это обстоятельство будет использовано при объяснении некоторых особенностей динамики роста бугров пучения (раздел 5.2).

Сила, с которой мерзлый массив поднимается вверх, т. е. собственно сила пучения $F_{\text{пуч}}$, равна разности $F_{\text{дв}}$ и силы сопротивления сдвигу по боковой поверхности массива F_c , рассчитываемой по формуле (10). Отсюда:

$$F_{\text{пуч}} = F_{\text{дв}} - F_c = g [(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{м}}) H - \rho_{\text{т}} h] S - [(F_{\text{ст. уд}} (H - h - \xi) + F_{\text{см. уд}} \xi) N]. \quad (13)$$

Значения параметров, входящих в формулу (13), определяют условия развития криогенного пучения в открытых грунтовых системах. Эти параметры зависят от литолого-влажностных свойств грунта ($\rho_{\text{т}}$, $\rho_{\text{м}}$, $F_{\text{ст. уд}}$, $F_{\text{см. уд}}$, H , ξ), насыщения его льдом ($\rho_{\text{м}}$) температурного режима промерзания ($\rho_{\text{м}}$, $F_{\text{см. уд}}$, H , ξ), мощности и плотности снежного покрова ($F_{\text{см. уд}}$, H , ξ), где ξ – глубина промерзания грунта. При этом необходимым условием проявления пучения служит выполнение неравенства $F_{\text{дв}} > F_c$ или $F_{\text{пуч}} > 0$.

4. Экспериментальная часть

Для доказательства справедливости литостатической гипотезы автором был выполнен опыт, в ходе которого измерялась сила, с которой промерзающий массив выпучивался из талого грунта, т. е. проверялась справедливость формулы (4). Рассмотрим этот опыт.

Основным условием проведения эксперимента было обеспечение возможности образования мерзлого массива, окруженного со всех сторон талым грунтом, промерзающим сверху. Поскольку ранее такие опыты никем не выполнялись, пришлось создать оригинальную установку, аналогов которой не было. Конструкция установки представлена на рис. 3А.

В процессе промерзания грунта, помещенного в контейнер (1), поддерживалась его температура в интервале от 0 до +1° С, что обеспечивалось частью установки, состоящей из ведра с водой (2), нагревательной ленты ЭНГЛ-1 общей длиной 3 м (5), намотанной на контейнер, температурного реле ТР-35М с гистерезисом 1° С (9) с датчиком температуры (12), помещенным в приповерхностную часть грунта вблизи стенки контейнера, кольца теплоизоляции (3) над поверхностью грунта вдоль внутренней стенки контейнера. Восприятие и передача усилия со стороны поверхности грунта при его промерзании осуществлялись с помощью коромысла (6), жестко закрепленного на подставке всей установки, с двумя упорами (7), один из которых опирался на кружок из фольги (4), помещенный на поверхность грунта, а другой – на платформу весов (8),

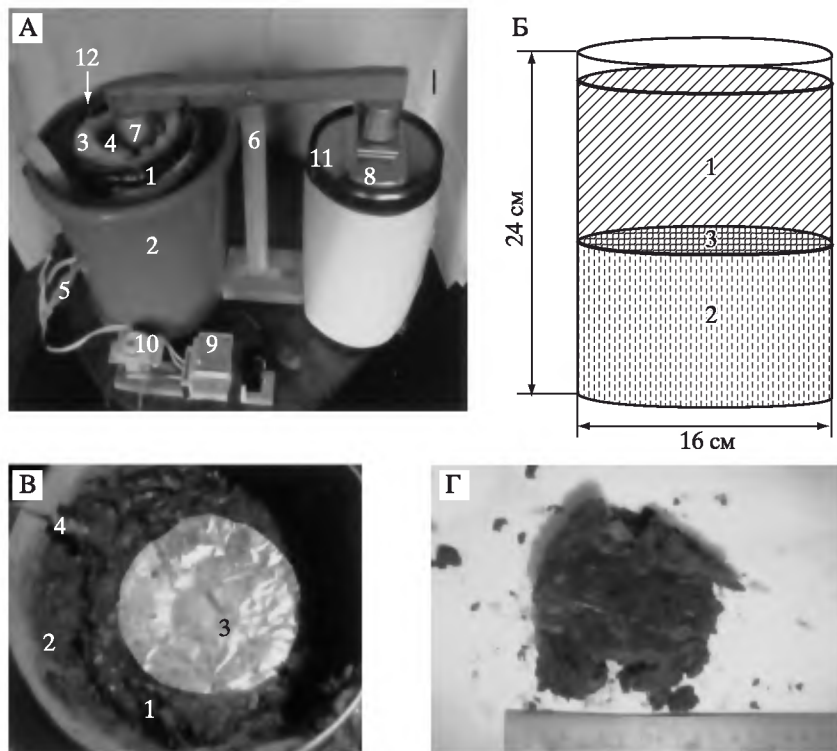


Рис. 3. Опыт по измерению силы пучения в условиях открытой системы

А – общий вид установки. 1 – контейнер с грунтами, 2 – ведро с водой, 3 – кольцо теплоизоляции, 4 – кружок из фольги, 5 – нагревательная лента ЭНГЛ-1, 6 – коромысло, 7 – упор, 8 – платформенные весы, 9 – температурное реле ТР-35М, 10 – предохранитель, 11 – контейнер-подставка для весов, 12 – датчик температуры. Б – контейнер с грунтами. 1 – суглинок пылеватый, 2 – песок кварцевый, тонкозернистый, 3 – сетка.

В – поверхность грунта в конце опыта. *Грунт*: 1 – мерзлый, 2 – талый; 3 – кружок из фольги; 4 – датчик температурного реле.

Г – извлеченный мерзлый грунт

расположенных на металлическом контейнере-подставке (11). Эти весы (предел измерения 500 г, цена деления 0.1 г) фиксировали силу пучения.

В качестве опытного грунта использовался подмосковный суглинок, характеристика которого приведена в табл. 2. Суглинок занимал верхнюю половину контейнера (рис. 3Б) и отделялся сетчатой перегородкой от тонкозернистого кварцевого песка, заполнявшего нижнюю половину контейнера. Сетка между песком и суглинком была помещена с целью исключения их перемешивания, которое выполнялось с суглинком перед началом опыта для достижения равномерной консистенции грунта. В нижней части контейнера была специально нарушена герметичность конструкционного шва, благодаря чему вода из ведра полностью насыщала кварцевый песок и из него поступала в суглинок. При подготовке опыта вода в ведро доливалась до тех пор, пока ее уровень не совпадал с дневной поверхностью суглинка.

Опыт выполнялся в открытом помещении при температуре наружного воздуха -16 – -19 °С. Перед началом опыта вся установка в течение двух суток выдерживалась на морозе, при установленной на температурном реле температуре 0 °С. Для предотвращения промерзания грунта сверху в это время поверхность контейнера накрывалась бумажным листом, чего оказалось достаточно. В воде в ведре постоянно шли фазовые переходы воды в лед и обратно, т.е. температура вокруг контейнера с грунтом колебалась около нулевого значения. Температура суглинка вблизи его поверхности

Характеристика грунта, использованного в опыте

Содержание фракций, %							Пластичность		
песок			пыль		глина		влажность пределов, %		число
0.5–0.25	0.25–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.002	<0.002	верхнего	нижнего	
3	10	32	39	5	5	6	35	21	14

около стенки контейнера, в соответствии с заданным на реле режимом, колебалась в интервале от 0 до +1 °С.

Выполнить эксперимент с соблюдением всех необходимых условий технически было очень сложно. Самое главное было добиться того, чтобы исключить смерзание образующегося мерзлого грунта со стенкой контейнера. Однако уже в самом начале опыта между мерзлым грунтом и стенкой то тут, то там возникала мерзлая “перемычка” (даже, несмотря на наличие кольца из теплоизоляции) до окончания образования приемлемого для исследования объема мерзлого грунта. После серии из семи неудачных попыток удалось добиться нужного результата.

Успешный опыт был выполнен 04 февраля 2012 г. Отсчет времени начался с момента начала промерзания грунта под кружком из фольги, что фиксировалось на ошупь. В ходе опыта возрастал объем мерзлого массива по мере его промерзания. Поскольку промерзающий массив не мог перемещаться вверх (препятствовала жесткость конструкции весов), то вместе с его объемом росла и сила пучения. Результаты измерения силы пучения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты опыта по измерению силы пучения в условиях открытой системы

Время	Температура воздуха, °С	Показания весов, г	Сила пучения, Н
15 час. 30 мин.	–15	0	0
17 час. 15 мин.	–16	28.9	0.295
18 час. 00 мин.	–16	36.4	0.371
19 час. 00 мин.	–17	58.1	0.593

Опыт был прекращен в 19 час. 00 мин. (табл. 3) вследствие опасения, что часть промерзающего грунта может примерзнуть в стенке контейнера и условия выполнения эксперимента нарушатся. Вид поверхности грунта в конце опыта приведен на рис. 3В. В конце опыта упор коромысла был снят с поверхности мерзлого грунта, которая после этого практически сразу испытала поднятие относительно поверхности талого грунта (пучение), составившее около 4 мм. Затем мерзлый грунт был извлечен из талого. На это были затрачены усилия, которые привели к отделению от мерзлого образца нескольких фрагментов по плоскостям ледяных прослоек с толщиной в десятые доли мм. Извлеченный мерзлый грунт показан на рис. 3Г.

Вес извлеченного мерзлого грунта составил 232.5 г, а объем 161 см³, что дает $\rho_m = 1.44$ г/см³. Результаты опробования грунта после опыта приведены в табл. 4.

По формуле (4) была рассчитана движущая сила пучения $F_{дв}$ в конце опыта (при $V = 161$ см³, $\rho_t = 1.83$ г/см³, $\rho_m = 1.44$ г/см³), которая оказалась равной 0.615Н. Это больше конечного показания весов, равного 0.593Н (табл. 3) всего лишь на 0.022Н, или на 4%. Вероятно, данное отличие связано с точностью определения экспериментальных параметров, а также с сопротивлением сдвигу боковой поверхности мерзлого грунта по контакту с талым грунтом. Таким образом, результат выполненного эксперимента

Результаты опробования суглинистого грунта

Бюкс						Влажность грунта		Плотность талого грунта $\rho_{\text{т}}$ г/см ³
номер	вес, г	объем, см ³	вес с грунтом, г			талого	мерзлого	
			талым	мерзлым	сухим			
113	15.0	63.4	131.1	—	95.7	0.33	—	1.83
348	15.1	—	—	67.8	45.3	—	0.75	—

подтверждает возможность выпучивания мерзлого массива из талого грунта под действием архимедовой силы (справедливость литостатического механизма образования форм криогенного пучения в условиях открытой системы).

5. Некоторые приложения литостатической концепции

На основе литостатической концепции можно объяснить ряд особенностей форм криогенного пучения, в частности, это касается условий их образования, морфологии, криогенного строения и эволюции, которые ранее лишь констатировались без строгого физического обоснования. Этому способствует анализ формул, описывающих литостатический механизм (раздел 3).

5.1. Морфология миграционных бугров пучения. Как известно, для бугров пучения характерна округлая форма в плане. Обратимся к формуле (10). Разделив ее правые и левые части на площадь основания массива S , получаем удельную (приходящуюся на единицу площади основания) силу сопротивления выпучиванию $F_{с. уд}$. Нетрудно видеть, что $F_{с. уд}$ уменьшается пропорционально уменьшению отношения N/S . Последнее минимально у круга, т.е. для форм криогенного пучения энергетически наиболее выгодна о к р у г л а я форма. Форма круга обычна для молодых, отдельно расположенных образований. Если рядом находятся несколько бугров, то они впоследствии, разрастаясь, могут сливаться друг с другом, в результате чего возникают более сложные формы (эллиптические, серповидные и т.д.), но первичная округлость всегда присутствует [1, 13 и др.].

Форма поверхности бугров пучения определяется размером первичного образования и динамикой выпучивания массива. По мере выпучивания мерзлого массива растет охлаждающее воздействие его надземной части на окружающий массив талый грунт, который, промерзая, прирастает к его подземной части и способствует ее расширению. Поэтому каждый последующий участок бугра, выходящий из-под земли, становится все шире и шире. При малой начальной площади первичной формы и равномерном выпучивании массива формируется бугор, близкий по форме к шаровому сегменту (что типично для большинства миграционных бугров [1, 13]), реже – к форме конуса [1]. Если же сразу начинается выпучиваться значительная площадь, возникает платообразный бугор.

Исходя из условия статического равновесия (6) при $F_c = 0$, автором была выведена приближенная формула для определения высоты миграционного бугра пучения h_6 , имеющего надземную форму, близкую к шаровому сегменту, а подземную – к цилиндру [18]:

$$h_6 \approx 2(H - h_T)(\rho_T - \rho_M)/(2\rho_T - \rho_M), \quad (14)$$

где h_T – мощность торфа на бугре пучения.

По этой формуле были рассчитаны высоты семи миграционных бугров пучения, фактические данные по которым содержатся в [13]. Результаты расчетов в сопоставлении с фактическими данными приведены в табл. 5. Близость расчетных и фактических

Расчетные и фактические высоты миграционных бугров пучения, приведенных в [13]

Номера выработок	Параметры бугров				Высота бугров, м	
	H , м	h_T , м	ρ_T , г/см ³	ρ_M , г/см ³	расчетная	фактическая
20-ПА	8	0	2.0	1.85	1.1	1.0
59-ЗА	9.5	0	2.0	1.81	1.6	1.5
6-СТ	9	1.4	2.01	1.77	1.6	1.7
9-ПА	10	2.2	1.94	1.65	2.0	2.0
17-ПА	8	0	2.0	1.61	2.6	2.5
50-ЗА	10	0.5	2.0	1.60	3.2	3.0
283	11	1.25	2.0	1.53	3.7	3.5

высот, очевидно, может служить дополнительным аргументом в пользу литостатической концепции.

Иногда на склонах бугра фиксируется подобие террас. Подобный феномен можно объяснить динамикой роста бугра, что будет рассмотрено ниже.

5.2. Динамика роста миграционных бугров пучения. В “жизни” миграционных бугров пучения открытых систем можно выделить несколько стадий, существование которых связано с динамикой соотношения величины движущей силы $F_{дв}$ и силы сопротивления выпучиванию массива F_c , определяемого формулой (13). В величину F_c наибольший вклад вносят параметры, характеризующие свойства слоя мерзлого грунта, который периодически (с наступлением зимы или в периоды направленных похолоданий) образуется вокруг мерзлого массива (рис. 2) – ξ и $F_{см. уд}$, входящие в формулы (10) и (13). Значения этих параметров имеют сезонный или же многолетний ход, что сказывается на динамике роста бугра, в которой могут существовать четыре стадии, показанные на рис. 4А. На стадии 1 $F_{дв}$ превосходит F_c , и бугор активно растет. Затем F_c может начать превосходить $F_{дв}$, и выпучивание мерзлого массива приостанавливается (стадия 2). Обычно это связано с тем, что слой мерзлого грунта вокруг бугра удерживает его от дальнейшего всплытия. Образно говоря, бугор попадает в “ледяной плен”. При этом, вследствие дальнейшего активного промерзания массива и отдаления его от положения статического равновесия, постоянно возрастает движущая сила $F_{дв}$, что отражает формула (12) при постоянной величине h (об этом уже было сказано выше). Наконец, наступает момент, когда $F_{дв}$ возрастает настолько, что позволяет преодолеть силу сопротивления сдвигу F_c по боковой поверхности массива, и он начинает активно выпучиваться, освобождаясь из “ледяного плена” (стадия 3). Этому может также способствовать снижение величины $F_{см. уд}$ сезонномерзлого слоя при повышении его температуры или его оттаивание в весеннее-летнее время (такой вариант показан на рис. 4А). Возможно, такой механизм лежит в основе известного факта активизации пучения в конце зимы и даже весной, когда, казалось бы, оно должно пойти на спад. В частности, об этом говорит В.О. Орлов [5, с. 157]. После стадии 3 вновь наступает стадия 1 и процесс повторяется до наступления стадии 4, когда подошва бугра достигает либо кровли многолетнемерзлых пород, либо грунтов, практически не способных к пучению (пески, скальные или грубообломочные грунты). После этого выпучивание мерзлого массива из талого (рост бугра пучения) прекращается.

Подобный механизм в его сезонном проявлении отражают фактические данные В.О. Орлова [5]. На опытной площадке № 5, заложенной в пределах заболоченного участка с тальми суглинистыми грунтами, зимой удалялся снег, а на поверхности был устроен навес для предохранения от нагрева за счет инсоляции. В результате сформировался мерзлый массив, который год от года испытывал пучение. Особенностью сезонной динамики пучения этого массива было прекращение выпучивания (стадия 2),

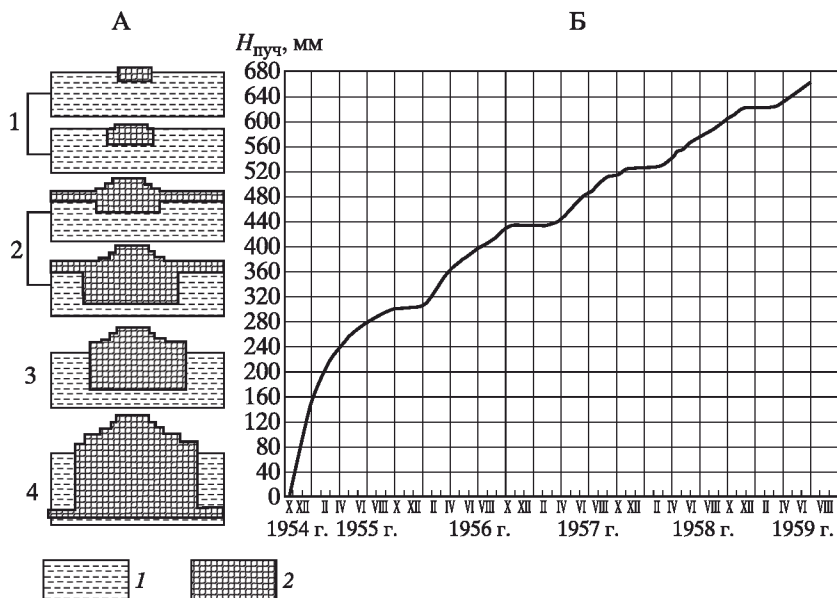


Рис. 4. Стадии роста миграционного бугра пучения (А) и динамика поверхности мерзлого массива (Б) опытной площадки 5 (по [5])

Грунт: 1 – талый, 2 – мерзлый

начинавшееся в октябре–ноябре (когда шло активное промерзание грунта площадки) и заканчивающееся зимой 1955–1956 гг. в конце декабря, а в другие зимы – в конце февраля. Затем начиналось активное пучение (стадия 3), которое наблюдалось и в летние месяцы, при минимальном промерзании массива (рис. 4Б).

Отмеченные особенности динамики форм криогенного пучения открытых систем соответствуют циклическому характеру процесса – “пучение – приостановка – последующее пучение”. При подъеме возрастает высота формы (наземная), а при остановке – ее площадь (подземная). При этом поверхность бугра может приобрести террасированный характер, причем при сезонной цикличности террасы могут быть практически не выражены, а при многолетней приостановке пучения с последующим быстрым всплытием – иметь внушительные размеры. Подобные террасированные бугры с высотой уступов до 1 м отмечены, например, в [1] на с. 128 и 466. Возможность террасирования склонов бугра наглядно отображает рис. 4А.

5.3. Географическое распространение и эволюция бугров. Подавляющее большинство миграционных бугров пучения приурочено к южным районам криолитозоны с широким распространением грунтов со среднегодовой температурой около 0°C [1, 13 и др.]. Такие температурные условия способствуют активному проявлению литостатического механизма [18]. Там же отмечаются бугры максимальной высоты, что обусловлено наибольшей мощностью таликов, лимитирующей возможности роста бугров (рис. 4А). На отдельных участках одни бугры могут расти, другие находиться в стабильном состоянии, а третьи деградировать [1]. Это легко объяснимо, если учесть, что факторы, влияющие на динамику роста бугров (раздел 5.2) могут изменяться на незначительных расстояниях, что может быть связано, например, с различиями в толщине снежного покрова, оказывающего решающее влияние на величину параметров ξ и $F_{\text{см. уд}}$. Поэтому суждения о направленности эволюции бугров какого-либо района исключительно в ту или иную сторону [1, 13 и др.] зачастую не имеют смысла.

Заключение

Литостатическая концепция является попыткой объяснить некоторые особенности криогенного пучения открытых грунтовых систем, которые в рамках традиционных представлений не имеют строгого физического обоснования. Конечно, претендовать на универсальность литостатический механизм не может и пока еще остается в известном смысле гипотезой. Тем не менее, в его пользу свидетельствует не только результат эксперимента автора статьи, но и другие фактические данные. Автор надеется, что дальнейшее привлечение литостатической концепции для объяснения различных явлений при образовании форм криогенного рельефа могло бы быть полезным как в научном, так и в практическом плане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. М.: Изд-во МГУ, 2008. 558 с.
2. Саркисян Р.М., Орлов В.О. Обзор принципов расчета морозного выпучивания фундаментов и предложения по их совершенствованию // Строительство на вечномерзлых грунтах. Красноярск–М.: ЦТИСИЗ, 1970. Т. V. Вып. 1. С. 44–54.
3. Далматов Б.И. Морозное пучение грунтов и его воздействие на сооружения // Строительство на вечномерзлых грунтах. Красноярск–М.: ЦТИСИЗ, 1970. Т. V. Вып. 1. С. 102–122.
4. Быков Н.И., Кантерев П.А. Вечная мерзлота и строительство на ней. М.: Трансжелдориздат, 1940. 372 с.
5. Орлов В.О. Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 185 с.
6. Сумгин М.И. Физико-механические процессы во влажных и мерзлых грунтах. М.: Транспечать, 1929. 278 с.
7. Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов. М.: Стройиздат, 1986. 72 с.
8. Mackay J.R. The Growth of Pingos Western Arctic Coast, Canada // Can. Journ. of Earth Sci. 1979. V. 10. № 6. P. 979–1004.
9. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высш. шк., 1973. 446 с.
10. Попов А.И. Мерзлотные явления в земной коре (криолитология). М.: Изд-во МГУ, 1967. 304 с.
11. Салтыков Н.И. Основания и фундаменты в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 206 с.
12. Основы геокриологии (мерзловедение). Ч. I. Общая геокриология. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 459 с.
13. Евсеев В.П. Миграционные бугры пучения северо-востока европейской части СССР и Западной Сибири // Пробл. криолитологии. М.: Изд-во МГУ, 1976. Вып. V. С. 95–159.
14. Shunke E. Palsen und Kriokarst in Zentral-Island // Nachrichten der Academic der Wissenschaften in Gottingen. 1973. S. 65–102.
15. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: Изд-во МГУ, 1995. 480 с.
16. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Ч. I. Механика. Теплота. Молекулярная физика. М.: Физматлит, 2000. 606 с.
17. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. М.: Госстройиздат, 2000. 91 с.
18. Марахтанов В.П. Механизм роста миграционных бугров пучения // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1999. № 3. С. 41–46.

Поступила в редакцию 12.02.2013

LITHOSTATIC MECHANISM OF THE CRYOGENIC HEAVE OF GROUNDS

V.P. MARAKHTANOV

S u m m a r y

The existing views on the physical conditions of cryogenic heave of grounds are discussed. It is shown that it is necessary to clearly distinguish between two types of ground systems: closed and open. For the closed systems the accepted models are physically correct. However, they are not suitable for the open systems. The positive land-forms of cryogenic heaving can rise by the Archimedean force due to the density difference between the thawed and frozen ground. Such a mechanism of swelling, considering the nature of the substrate in which it realizes, can be called lithostatic. The author worked out a theoretical framework including some mathematical assessments of the lithostatic mechanism. The appropriateness of the lithostatical concept is proved by the author's experiments, as well as by the actual data of other researchers. Lithostatic concept makes clear a number of peculiarities of cryogenic swellings, which previously had no strict physical explanation. Using the lithostatic concept for the explanation of various phenomena in the formation of the forms of cryogenic relief could be useful both in scientific, and in practical terms.