



НОВЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ МАКРОТЕКСТУРООБРАЗУЮЩЕЙ ЛЬДИСТОСТИ ЗА СЧЕТ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ

ВАСИЛЬЧУК Ю.К.

МГУ им. М.В.Ломоносова, геологический факультет, географический факультет

Ключевые слова:

повторно-жильные льды, полигональный микрорельеф, макротьдистость.

Key words:

repeated-wedge ice, polygonal microrelief, macro ice content.

Аннотация

Рассмотрены варианты расчета макротьдистости за счет повторно-жильных льдов. Показано, что она часто превышает 20% от объема многолетнемерзлых толщ в верхней части разреза. Предложен новый способ расчета объема макротьдистости единичного массива, ограниченного со всех сторон ледяными жилами, за счет повторно-жильных льдов путем вычисления разности между объемами прямоугольного параллелепипеда (т.е. всего единичного массива, включающего и лед, и грунт) и усеченной пирамиды (т.е. грунта внутри этого единичного массива).

Abstract

The article considers some calculation variants of the macro ice content by repeated-wedge ice. It shows that the macro ice content by repeated-wedge ice is often more than 20% of the permafrost soils in the upper part of the section. The paper proposes a new calculating method of the macro ice content of a single massif bounded on all sides by ice veins through repeated-wedge ice by calculating the difference between the volumes of the rectangular parallelepiped (i.e. of all the single massif including the ice and the soil) and the truncated pyramid (i.e. the soil within that single massif).

Один из наиболее опасных и сложных типов подземных льдов при освоении нефтяных и газовых месторождений — это повторно-жильные макроледяные залежи. Полигонально-жильные структуры широко распространены как на севере России, так и в северных районах Северной Америки и обычно хорошо диагностируются по характерному полигональному микрорельефу на поверхности. Они имеют весьма разнообразный рисунок в плане — от правильных квадратов до 5–6-угольных трапеций (рис. 1–5).

Главная опасность повторно-жильных льдов при освоении территорий их распространения обычно вызвана их неглубоким залеганием (чаще всего на глубине 0,5–0,8 м от поверхности) и нередко большим содержанием льда (рис. 6). Объем льда часто составляет 30–40%, а в экстремальных случаях — до 80–90% [2–4]. Из этого объема примерно половина обычно представлена шлировым льдом, а половина — практически чистым повторно-жильным льдом, имеющим форму клиньев. Эти клинья как правило располагаются по сетке, образуя в плане решетку. Такие участки в настоящее время все более интенсивно осваиваются: прямо в пределах распространения полигонально-жильных льдов строятся аэродромы, дороги, нефте- и газодобывающие комплексы и жилые поселки (рис. 7). Их освоение нередко приводит к активизации поверхностного термокарста и образованию провалов и воронок (рис. 8).

При бурении скважин этот вид льда опасен, а при эксплуатации добывающих скважин он чрезвычайно опасен, так как антропогенное нарушение растительного и почвенного покрова на поверхности неизбежно ведет к увеличению глубины летнего протаивания грунтов, а вслед за этим и к вытаиванию верхних частей (голов) ледяных жил, что сопровождается освобождением большого количества воды, образованием озер и провалов и вызывает прогрессирующий термокарст. Это в считанные дни может привести к нарушению оснований нефте- и газодобывающих установок, перекосу буровых ко-



Рис. 1. Полигонально-жильные структуры в дельте реки Лена. Фото из фондов Института полярных и морских исследований им. А. Вегенера

лонн, образованию конусов вытаивания вокруг добывающих скважин, искривлению профилей нефте- и газопроводов, нарушению водоводов и др.

Цель статьи — продемонстрировать опасность освоения территорий развития повторно-жильных льдов и предложить новый, более точный и сравнительно простой метод расчета объема льда в верхней (10—20 м) части многолетнемерзлых пород.

Предыдущий опыт расчета макрольдистости

Морфологические признаки полигонального рельефа являются поисковыми признаками повторно-жильного льда (за исключением участков, где льды находятся в стадии длительной консервации). Эти признаки облегчают исследования, позволяют дать не только качественную, но и количественную оценку макрольдистости мерзлой толщи.

Оценка макрольдистости возможна при анализе аэрофотоснимков и результатов наземного изучения льда. При наземных исследованиях следует получить данные о размерах ледяных жил по длине, ширине (по верху) и высоте (с учетом глубины залегания жил). По материалам аэрофотосъемки и наземных наблюдений можно получить сведения о густоте полигональной решетки и распространении повторно-жильного льда на интересующем участке территории. Эти исходные данные после несложных расчетов позволяют дать оценку *объемной* (J_{om}) и *площадной* (J_{pm}) макрольдистости [6, 7].

Объемная суммарная льдистость может быть вычислена для любого массива многолетнемерзлых пород. Она складывается из *объемной макрольдистости* (отношения объема крупных залежей подземного льда к объему всего многолетнемерзлого массива) и *объемной микрольдистости* (от-



Рис. 2. Полигонально-жильные структуры на северо-западе Канады. Фото Э. Пике



Рис. 3. Полигонально-жильные структуры на Аляске. Фото М. Друкенмиллера

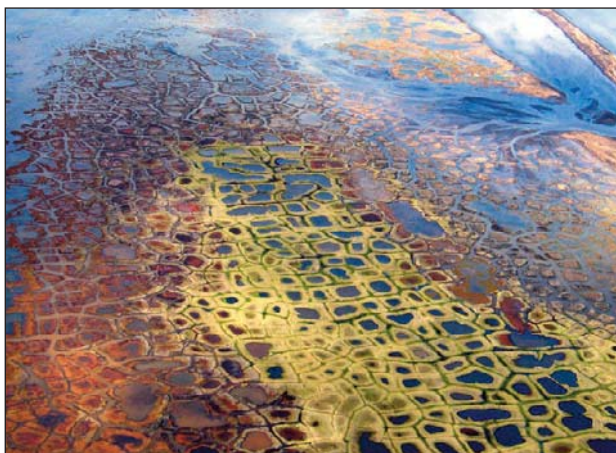


Рис. 4. Полигонально-жильные структуры в Национальном парке дикой природы на севере Аляски



Рис. 5. Полигонально-жильные структуры на севере Аляски в Национальном парке дикой природы

ношения текстурообразующего льда — сегрегационного и льда-цемента — к объему многолетне-мерзлых пород без учета крупных залежей). Объемная льдистость за счет повторно-жильного льда может колебаться в больших пределах. В некоторых районах (например, в долине р. Яны, на приморских низменностях севера Сибири, на Новосибирских островах) объемная макрольдистость за счет жильного льда достигает 50% до глубины 20 м, а площадная — 75% на уровне верхней поверхности жил.

Предлагая свой подход к изучению макрольдистости полигональных массивов, Б.И. Втюрин [6,

7] считает, что делать расчеты имеет смысл только для толщи мерзлых пород до глубины залегания нижних концов ледяных жил. В случае большой высоты ледяных жил (сингенетических) при расчетах учитывается мощность зоны годовых теплооборотов (15–20 м) или максимальная глубина расчетной чаши протаивания. Разница в расчетах будет состоять в том, что в первом случае форма жилы в поперечном сечении принимается за треугольник, а во втором — за трапецию.

Величина $L_{ом}$ представляет собой процентное отношение объема льда ($V_{л}$) к объему всей породы ($V_{пор}$) в заданных пределах:

$$L_{ом} = V_{л} / V_{пор} \times 100\% \quad (1)$$

Площадную макрольдистость можно вычислить для любой глубины залегания жил льда. В целях облегчения проведения общей инженерно-геологической оценки территории, по мнению Б.И. Втюрина [7], наиболее целесообразно подсчитать величину $L_{пм}$ на уровне верхних частей ледяных жил, которая характеризует процентное отношение площади, занимаемой льдом на интересующем нас уровне ($F_{л}$), к площади определенного участка ($F_{уч}$):

$$L_{пм} = F_{л} / F_{уч} \times 100\% \quad (2)$$

Для расчета $L_{ом}$ и $L_{пм}$ (при мелко- и среднемасштабном картировании) Б.И. Втюрин [6, 7] предлагает определять средние размеры жил и полигональной решетки и оконтуривать участки распространения ледяных жил. При крупномасштабном картировании необходим более точный учет размеров жил и образуемой ими полигональной решетки.

Значительно сложнее определение объемной макрольдистости бывает в том случае, когда ледяные жилы переживают стадию консервации и на поверхности грунта не выражены. Между тем такие жилы распространены более широко, чем жилы, находящиеся в стадии роста или разрушения. Например, большая часть мощных сингенетических жил аллювиальных равнин севера Сибири находится в стадии консервации со времен позднего и даже среднего плейстоцена. Наиболее эффективно они обнаруживаются геофизическими методами. Буровые работы при этом служат для контроля и уточнения мощности и характера распространения залежей льда [7].

Освоение районов распространения многолетне-мерзлых пород с повторно-жильными льдами потребовало разработки более точных методов подсчета объемной макрольдистости. Так, Ш.Ш. Гасановым [8, 9] была предложена методика, в соответствии с которой объемная макрольдистость определяется на основании исходных данных, получаемых путем непосредственных замеров ширины жил по верху и расстояний между узлами пересечения осей простираения жил (рис. 9).

Для расчета выделяется характерный элементарный жильно-полигональный блок (ЭЖБ), представляющий собой ядро полигона, ограниченный со всех сторон полушириной ледяных жил в виде вертикальных призм с треугольным сечением (см. рис. 9), если речь идет об эпигенетических жилах.



Рис. 6. Повторно-жильные льды на южном берегу о-ва Бол. Ляховский. Фото В.Е.Тумского

Отсюда объемная макрольдистость определяется как отношение объема льда к объему всего ЭЖБ по следующей формуле:

$$V_{\text{л}} = \frac{m(l - \frac{m_1}{2}) + m_1(l_1 - \frac{m}{2})}{2ll_1} \times 100\%, \quad (3)$$

где $V_{\text{л}}$ — объемная макрольдистость многолетнемерзлых пород, %; l — расстояние между узлами пересечения осей простирания жил по длинной стороне полигона, м; l_1 — расстояние между узлами пересечения осей простирания жил по короткой стороне полигона, м; m — ширина жил по длинной стороне полигона, м; m_1 — ширина жил по короткой стороне полигона, м.

В случаях равносторонней тетрагональной системы жильно-полигонального рельефа (то есть когда $l = l_1$ и $m = m_1$) расчетная формула приобретет более простой вид:

$$V_{\text{л}} = \frac{m(l - \frac{m}{2})}{l^2} \times 100\%. \quad (4)$$

Следовательно, для определения объемной макрольдистости многолетнемерзлых пород на всю глубину проникновения повторно-жильных льдов достаточно замерить расстояния между узлами пересечения осей простирания жил и ширину по верху последних. На площадях с ярко выраженным жильно-полигональным микрорельефом эти параметры могут быть получены с помощью минималь-

ного объема контрольной шурфовки до кровли жил, но во всех случаях более надежными будут данные, полученные после удаления сезонноталого слоя.

На основании проделанных расчетов была построена номограмма, позволяющая определить объемную макрольдистость многолетнемерзлых пород при различных значениях ширины жил по верху и расстояний между узлами пересечения осей их простирания в равносторонней тетрагональной системе полигонов. Промежуточные значения объемной макрольдистости могут быть получены путем интерполяции.

Для определения объемной макрольдистости площадей развития сингенетических повторно-жильных льдов Ш.Ш. Гасановым [9] была предложена следующая формула:

$$V_{\text{л}} = \frac{m(l - \frac{m_1}{2}) + m_1(l_1 - \frac{m}{2})}{ll_1} \times 100\%. \quad (5)$$

В случаях равносторонней тетрагональной системы полигонов (когда $l = l_1$ и $m = m_1$) расчетная формула приобретает более простой вид:

$$V_{\text{л}} = \frac{2m(l - \frac{m}{2})}{l^2} \times 100\%. \quad (6)$$

Согласно рассмотренным различиям в условиях залегания льдов глубина распределения макрольдистости в разрезах, содержащих сингенетические повторно-жильные льды, будет равномерной,

а на площадях развития эпигенетических жил — от нуля у подошвы до максимальных значений на уровне их кровли [8, 9].

Принцип выделения элементарного жильного блока был использован В.П. Марахтановым [10] при разработке методики расчета суммарной объемной льдистости пород с повторно-жильными льдами. Этим автором были разработаны расчетные формулы определения суммарной льдистости для разных форм полигонов (многоугольной, прямоугольной) и жил (клиновидной, трапециевидной, призмовидной). На основании полученных формул им были составлены таблицы, в которые входят параметры залегания повторно-жильных льдов и объемная микрольдистость вмещающей породы.

Н.П. Босиков и Д.Н. Толстикова (1987) [1] выполнили расчет количества повторно-жильных льдов на межлассных территориях Центральной Якутии на основании изучения размеров аласных котловин. Проведенные ими буровые работы на участке между оз. Мюрю, Тюнгюлю и р. Суола показали почти равномерное распространение повторно-жильных льдов, что подтверждается строением аласной котловины Мюрю, а также повсеместным развитием на межлассе полигонального рельефа, под которым сохранены крупные массы повторно-жильных льдов [1].

Конечная величина осадки мерзлых пород при оттаивании практически не зависит от того, оттаивал ли мерзлый грунт под нагрузкой P с одновременным уплотнением или же сначала оттаивал без

нагрузки, а после этого уплотнялся под нагрузкой P . Используя для малых давлений изменение пористости мерзлого грунта, а для больших давлений — теорию компрессионной зависимости талых грунтов, Н.П. Босиков и Д.Н. Толстикова [1] предложили приближенную формулу для расчета количества подземного льда, приходящегося на 1 м^2 площади поверхности земли:

$$h_e = h + \frac{\frac{\alpha}{2\gamma} + \frac{\alpha_k}{\gamma} - H(S + 2,6\alpha_k)}{(1 - S - 2,6\alpha_k)}, \quad (7)$$

где h_e — количество (м) монолитного подземного льда на 1 м^2 поверхности земли в современном межлассе, равное былой просадке мерзлых пород за счет вытаивания подземного льда, существовавшего раньше на месте современных аласных котловин; α и α_k — соответственно коэффициенты уплотнения и компрессии; γ (кг/м) — вес призмы горных пород с сечением 1 см^2 и высотой 1 м ; S — осадка (в долях единицы) при оттаивании мерзлых пород под давлением $P = 1 \text{ кг/см}^2$.

Величины α , α_k и S рассчитываются исходя из состава (пески, суглинки и т.д.), влажности грунтов и глубины аласных котловин (h).

Для расчета общего количества V (м^3) подземного льда на территории с площадью Q (м^2) на основании формулы (7) была предложена следующая формула:

$$V = Qh(1 - K_a), \quad (8)$$

где K_a — аласность местности (в долях единицы).

Рис. 7. Освоение участка широкого распространения полигонально-жильных льдов на мысе Симпсона на северном побережье Аляски. Фото С. Банерджи



Предложенная методика была применена для расчетов на Лено-Амгинском междуречье. Здесь были выбраны два ключевых участка. В геологическом разрезе первого участка мощность песка составила 60 м, супесчано-суглинистых грунтов — 30 м. Для второго участка соответствующие мощности были равны 53 и 43 м. Влажность песков была принята равной 15%, а супесчано-суглинистых грунтов — 35%. Последняя цифра примерно соответствует полной влагоемкости грунта в талом состоянии и количественно равна наиболее вероятной влажности супесчано-суглинистых грунтов Центральной Якутии. Аласность первого участка составила 0,17 при средней глубине аласов 10,2 м, второго — 0,13 при средней глубине аласов 14,6 м. Площадь каждого участка равнялась 116 км².

Применение формулы (8) показало, что объем подземного льда на единицу площади составил соответственно 2,6 и 5,0 м³. Результаты этих расчетов согласуются с данными буровых работ.

Канадские исследователи Н. Кутюр и В. Поллард [14] произвели расчет льдистости для многолетнемерзлых отложений полуострова Фошеим на острове Элсмир в Арктической Канаде. Это район сплошного распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых превышает 500 м. По данным [14], общая площадь распространения подземных льдов на этой территории составляет 1456,8 км², а общий объем мерзлых пород до глубины 6,5 м равен 8,6 км³ при средней льдистости отложений 48,6%.

Расчет льдистости производился до глубины 6,5 м. Исползованная расчетная мощность мерзлого грунта составляла 5,9 м без учета сезонно-талого слоя (0,6 м). Принимая, что жилы имеют в сечении треугольную форму, Н. Кутюр и В. Поллард [14] предложили следующую формулу для расчета объемной макрольдистости:

$$V_w = \frac{0,5wdL}{d_s A} \times 100\%, \quad (9)$$

где w — средняя ширина жилы (146 см); d — средняя вертикальная мощность жилы (323 см); L — общая длина полигональных канавок на участке исследования; d_s — мощность исследуемого массива (в данном случае 5,9 м); A — площадь исследуемого участка.

Н. Кутюр и В. Поллард [14] предлагают определить объемную макрольдистость на ключевом участке, а затем экстраполировать полученные данные на большую территорию, используя при этом крупно- и мелкомасштабные аэрофотоснимки.

Таким образом, макрольдистость за счет повторно-жильных льдов рассчитывается исходя из следующего набора параметров: длины сторон полигонов и ширины и высоты жил. Необходимо учитывать и форму жил (клиновидную, трапециевидную) для выбора правильного подхода к расчету льдистости.

Обобщение результатов по льдистости отложений на полуострове Фошеим острова Элсмир, выполненное Н. Кутюр и В. Поллардом [14], показало, что объемная льдистость за счет порового (тексту-



Рис. 8. Провал, образовавшийся при строительстве и эксплуатации автостоянки в результате протаивания подземных льдов близ Геофизического института Университета Аляски в Фэрбенксе. Фото В. Романовского

рообразующего) льда и тонких линз сегрегационного льда составляет примерно 90% от суммарной объемной льдистости, за счет пластового льда — 6,8%, а за счет повторно-жильного льда — 3,5%.

Избыточная льдистость пород с текстурообразующими и сегрегационными льдами незначительна, в то время как для участков развития повторно-жильных и пластовых льдов она достигает 2,4 и 16,2% соответственно. Так что эти участки могут оказывать решающее влияние на стабильность территории при ее освоении [14].

Проведенный анализ показывает, что при расчетах макрольдистости всегда использовались формулы, в которых рассчитывался объем повторно-жильного льда в пределах единичного полигона, и затем суммировались объемы всех полигонов. Этот же подход использовали и авторы [3–5, 11] при составлении мелкомасштабных карт льдистости севера Западной Сибири и низовий р. Колымы. При этом всегда возникала проблема учета льдистости в местах пересечения жил (если это не учесть, то льдистость этих фрагментов войдет в расчеты дважды). Для того чтобы упростить и уточнить способы расчетов, предлагается новый метод расчета макротекстурообразующей льдистости.

Новый метод расчета макротекстурообразующей льдистости за счет повторно-жильных льдов

Автором настоящей публикации предлагается новый подход к расчету объема макрольдистости единичного массива, ограниченного со всех сторон ледяными жилами, за счет повторно-жильных льдов. Этот подход основан на вычислении разности между объемами прямоугольного параллелепипеда (т.е. всего единичного массива, включаю-

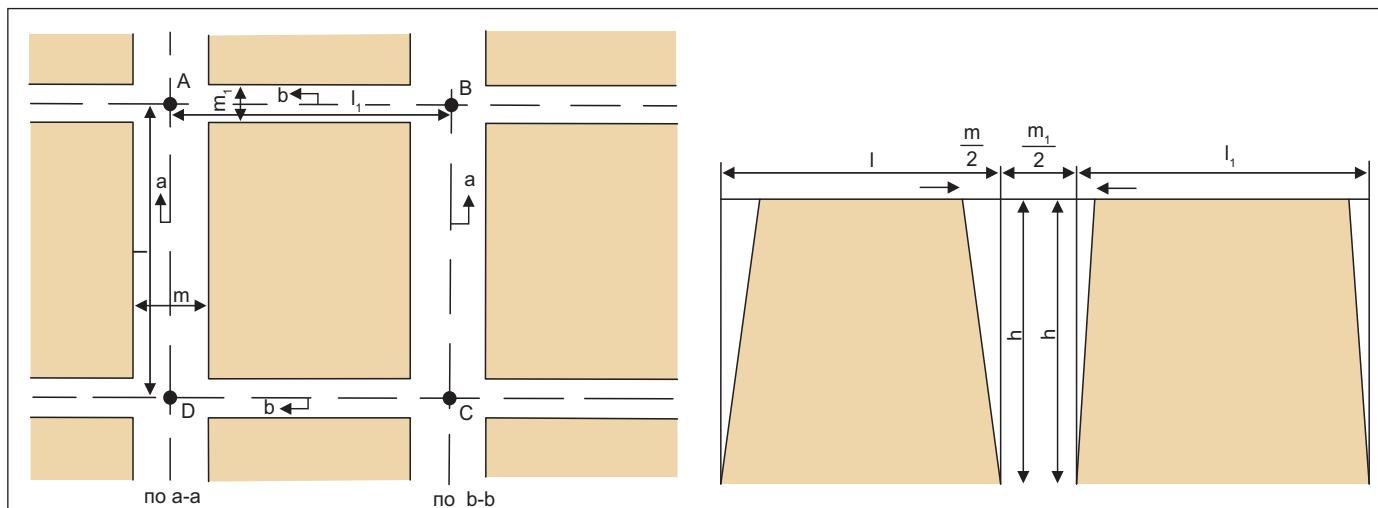


Рис. 9. Схема жильно-полигонального рельефа (по Ш.Ш. Гасанову, 1969): ABCD — элементарный жильно-полигональный блок (ЭЖБ); заштриховано — грунтовые ядра полигонов, ограниченные ледяными жилами

щего и лед, и грунт) и усеченной пирамиды (т.е. объема грунта внутри этого единичного массива).

В наиболее общем случае единичным объемом прямоугольного полигона является прямой параллелепипед, т.е. призма, основаниями которой служат параллелограммы. В случае четырехугольных полигонов это, как правило, прямоугольники. Объем прямоугольного параллелепипеда (V) вычисляется по формуле

$$V = HS, \quad (10)$$

где H — высота прямоугольного параллелепипеда; S — площадь основания прямоугольного параллелепипеда (вычисляемая как произведение его сторон).

Многогранник, вершинами которого служат вершины основания пирамиды и вершины ее сечения плоскостью, параллельной основанию, называется усеченной пирамидой [13, с. 271]. Основания усеченной пирамиды — гомотетичные многоугольники. Расстояние между основаниями (длина перпендикуляра, проведенного к плоскостям оснований, между этими плоскостями) называется высотой усеченной пирамиды. Пирамида называется правильной, если ее основанием является правильный многоугольник, а ортогональная проекция вершины пирамиды, совпадает с центром этого многоугольника. Длина всех боковых ребер правильной пирамиды одинакова. Все боковые грани правильной усеченной пирамиды — одинаковые равнобокие трапеции (рис. 10).

Объем усеченной пирамиды (V) вычисляется по формуле

$$V = \frac{1}{3}H(S_1 + \sqrt{S_1S_2} + S_2), \quad (11)$$

где H — высота усеченной пирамиды; S_1 и S_2 — площади оснований усеченной пирамиды.

Таким образом, для расчета макрольдистости по рассматриваемой методике достаточно знать ширину и высоту ледяных жил в пределах выделенного элементарного блока.

На значительных площадях криолитозоны России развиты массивы с мощными сингенетически-

ми ледяными жилами, имеющими в вертикальном поперечном сечении более или менее правильную клиновидную форму (см. рис. 6) с извилистыми боковыми контактами.

Следовательно, при расчетах объемной макрольдистости площадей развития сингенетических повторно-жильных льдов необходимо исходить из элементарного жильно-полигонального блока (ЭЖБ) в виде грунтового ядра полигона, ограниченного полушириной жил с прямоугольным сечением.

Выводы

Расчет и отображение макрольдистости за счет повторно-жильных льдов при освоении северных территорий — одна из наиболее актуальных задач совершенствования качества инженерно-геологических изысканий в криолитозоне.

Проведенные автором настоящей статьи исследования и анализ литературных источников показали следующее.

1. Повторно-жильные льды в верхней части разрезов криолитозоны достигают ширины 3–4 м, вертикальной мощности — часто до 10–15 м, а иногда (в многоярусных системах) — до 40–50 м.

2. Макрольдистость за счет повторно-жильных льдов часто превышает 20% от объема многолетнемерзлых толщ в верхней части разреза.

3. Предложен новый способ расчета объема макрольдистости единичного массива, ограниченного со всех сторон ледяными жилами, за счет повторно-жильных льдов путем вычисления разности между объемами прямоугольного параллелепипеда (т.е. всего единичного массива, включающего и лед, и грунт) и усеченной пирамиды (т.е. грунта внутри этого единичного массива). ☞

Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (по гранту 08-05-01068) и Федерального агентства по науке и инновациям (по госконтракту 02.740.11.0337).

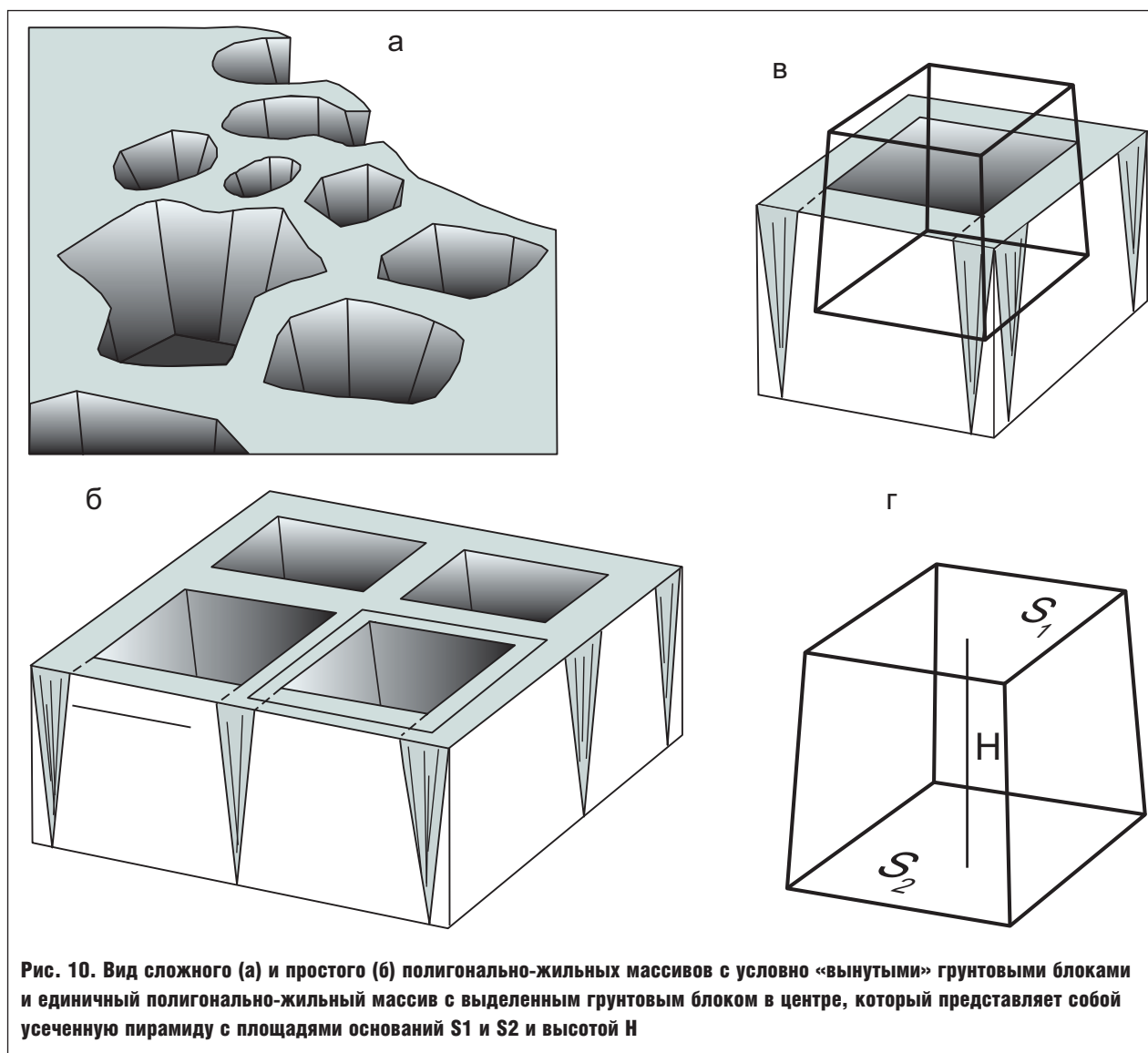


Рис. 10. Вид сложного (а) и простого (б) полигонально-жильных массивов с условно «вынутыми» грунтовыми блоками и единственный полигонально-жильный массив с выделенным грунтовым блоком в центре, который представляет собой усеченную пирамиду с площадями оснований S_1 и S_2 и высотой H

Список литературы

1. Босиков Н.П., Толстиков Д.Н. Расчет количества подземного льда в аласных ландшафтах / Гляциологические исследования в Сибири: сб. Иркутск, 1987. Вып. 2. С. 143–151.
2. Васильчук Ю.К. Повторно-жильные льды: гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность. М.: Изд-во МГУ, 2006. 404 с.
3. Васильчук Ю.К., Груздов А.В. Некоторые проблемы картографирования льдистости многолетнемерзлых грунтов // Инженерно-геологические исследования для строительства. М.: Наука, 1985. С. 78–82.
4. Васильчук Ю.К., Лейбман М.О., Бочкарев Н.Ю., Буракова Н.О., Изъюрова Н.Ф. Вопросы среднемасштабного картографирования льдистости и криогенетических типов мерзлых толщ в низовьях р. Колымы // Инженерно-геологическое картографирование. М.: Наука, 1989. С. 89–96.
5. Васильчук Ю.К., Трофимов В.Т., Баду Ю.Б. и др. Карта криогенетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых толщ Западно-Сибирской плиты. Масштаб 1:1 000 000. М.: ГУГК, 1985. На 9 листах.
6. Втюрин Б.И. Макрольдистость — важный показатель при инженерно-геологической оценке многолетнемерзлых пород: материалы к науч.-техн. конф. по инженерным изысканиям 20–23 апреля 1967 г. М.: ПНИИИС, 1967.
7. Втюрин Б.И. Рекомендации по методике изучения подземных льдов и криогенного строения многолетнемерзлых грунтов. М.: ПНИИИС, 1969. 50 с.
8. Гасанов Ш.Ш. Объемная льдистость мерзлых пород. Перигляциальные процессы // Труды СВКНИИ ДВО РАН. 1971. Вып. 38. С. 167–180.
9. Гасанов Ш.Ш. Расчет объемной макрольдистости многолетнемерзлых пород при разработке россыпных месторождений // Колыма. 1969. № 6. С. 41–42.
10. Марахтанов В.П. Определение суммарной объемной льдистости пород с полигонально-жильными льдами // Проблемы криолитологии. Вып. VII. М.: Изд-во МГУ, 1978. С. 120–131.
11. Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Васильчук Ю.К., Кашперюк П.И., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты. М.: Наука, 1987. 222 с.
12. Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Дубиков Г.И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. М.: Изд-во МГУ, 1980. 240 с.
13. Цыпкин А.Г., Пинский А.И. Справочное пособие по методам решения задач по математике для средней школы / под ред. В.И. Благодатских. М.: Наука, 1983. 416 с.
14. Couture N., Pollard W. An assessment of ground ice volume near Eureka Northwest Territories // Proceedings, Seventh International Permafrost Conference, Yellowknife, 23–27 June, 1998 (Eds.: A.G. Lewkowicz, M. Allard). – Yellowknife: Universit Laval, Centre d' études nordiques, Collection Nordicana, 1998. – № 57. – P. 195–200.