

ГЕОМЕТРИЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

В. Р. Алексеев

*Все, что превышает геометрию,
превосходит и нас.
Блез Паскаль*



*Владимир Романович Алексеев,
доктор географических наук,
профессор, главный научный
сотрудник Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова
СО РАН*

Жизнь возникает там, где начинается измерение. Паук плетет тончайшие сети, летучая мышь прекрасно ориентируется в темноте, птица летит на Север для гнездования, преодолевающая тысячи опасных километров, амеба делится на равные части... Как происходит это великое таинство, нам пока не известно, однако очевидно, что без измерения все живое превращается в «косную твердь», биологическая форма материи переходит в иное состояние. Впрочем, и неживая природа – от атомов и молекул до неведомых мегагалактик Вселенной – тоже подчинена загадочным законам построения вещества. Именно поэтому измерение лежит в основе основ всех наук. Говорят, геометрия – старшая сестра математики, ее раздел. Но, возможно, она и не сестра вовсе, а прародитель, поскольку никто еще не определил – что первично, яйцо или курица?

Геометрия (от др.-греч. $\gamma\eta$ – «Земля» и $\mu\epsilon\tau\rho\acute{\epsilon}\omega$ – «измеряю») как систематическая наука оформилась около 300 лет до н. э. благодаря трудам древнегреческого мыслителя Евклида (Евклидова геометрия). Тогда предметом ее изучения были простейшие фигуры на плоскости и в пространстве; вычислялись в основном их площади и объем. Ныне геометрия – это фундаментальная наука о взаимном расположении любых тел, соприкасающихся или прилегающих друг к другу. Задача геометрии – определить размеры (больше, меньше), расположение (внутри, между), а также предсказать возможные преобразования фигур в процессе саморазвития или взаимодействия. Основы классической геометрии используются в самых разных отраслях знаний, «приспосабливаясь» к задачам и объектам научных направлений. Многие «прикладные» формы геометрии превратились в самостоятельные научные дисциплины. Так,

возникли астрометрия, аэрофотометрия, гидрометрия, биометрия, гравиметрия, картометрия, сейсмометрия и ряд других.

Криогеометрия – актуальное направление в мерзлотоведении

В мерзлотоведении принципы и методы геометрии используются также широко, как и в других науках о Земле. Однако существующие подходы к определению параметров и форм массивов мерзлой земли, их составных частей и вмещаемых немерзлых горных пород (таликов) во многом еще не совершенны и не унифицированы, поэтому нуждаются в инвентаризации, системном анализе и обобщении. Важность синтетических оценок и разработок, направленных на становление и развитие криогеометрии (так по аналогии с другими научными дисциплинами мы предлагаем назвать это направление) определяется нарастающими проблемами хозяйственного освоения арктических и субарктических территорий и обустройством холодных регионов Земли в целом.

Основными объектами криогеометрии являются массивы многолетнемерзлых, сезоннопромерзающих и сезоннопротаивающих горных пород и почв, их составные части (минеральный и органогенный субстрат, лед, кристаллические соли, незамерзшая вода и иные включения, определяющие физические свойства грунтов), а также ограничивающая мерзлые толщи талая (немерзлая) среда. Геометрические характеристики указанных объектов – важнейшие показатели экологических, инженерно-геологических и физико-географических условий местности. Сегодня они используются в самых разных сферах деятельности человека. Их учет обеспечивает рациональное природопользование, снижает риск воздействия опасных и катастрофических явлений, повышает

комфортность жизни и устойчивость природно-технических систем. Это свидетельствует о востребованности и важнейшем значении результатов многолетних исследований геокриологов как в части общего (регионального), так и инженерного мерзлотоведения.

Основные функции криогеометрии – измерение и расчет параметров мерзлых горных пород, определение размеров и пространственного распределения их составных частей, построение цифровых, графических, картографических и иных обобщенных моделей геологических структур мерзлотного происхождения. Решение этих задач имеет общее познавательное и прикладное значение. Общее познавательное восприятие сведений о криогенных явлениях и объектах может обойтись без высокоточных измерений – для этого достаточно иметь набор приближенных (осредненных) данных, обзорных карт и схем, характеризующих морфологические особенности и строение криолитозоны. Решение прикладных задач требует более точной, конкретной информации, поскольку использование в инженерных расчетах приближенных характеристик может привести к нежелательным негативным последствиям.

Криосфера Земли представляет собой совокупность некоторых объемов (зон) атмосферы, гидросферы и литосферы, имеющих постоянную отрицательную или переменную (переходную в ту или другую сторону от 0° С) температуру. Характерной особенностью этой части планеты является присутствие в ее составе твердой фазы воды (льда) или отрицательно температурных водных растворов (криопэггов). Соотношение газовой, жидкой и твердой сред в криосфере зависит от

вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, от энергетических процессов в недрах нашей планеты и во внешних ее оболочках, от воздействия космических сил. Объемы криогенных зон Земли существенно меняются во времени и пространстве, при этом проявляется ярко выраженная их взаимосвязь и взаимообусловленность. Изменение термодинамического состояния одной части криосферы приводит к изменению другой и может вызвать трансформацию природных условий в пределах всего земного шара. Причинно-следственные связи между составными частями криогенных объектов проявляются на разных уровнях организации вещества, начиная с внешних и внутренних геосфер до кристаллов и молекул льда, содержащихся в какой-либо материальной субстанции. Это всеобщий закон природы. Познавание генетической сущности, свойств и особенностей развития любого объекта криосферы невозможно без определения его количественных показателей и точного положения в системе географических координат. Важно также найти возможные сопряжения и связи с другими элементами системы, составляющими единый структурно-динамический ряд.

Основными структурными элементами криосферы Земли являются многолетнемерзлые, сезоннопротаивающие и сезоннопромерзающие горные породы, промерзающие и отрицательно температурные водотоки и водоемы, снежный покров, снежники, наледи и ледники. В совокупности они образуют сложную систему морфогенетических комплексов (разрезов), которые объединяются в три криологические формации – субаэральную, субаквальную и субгляциальную (рис. 1).

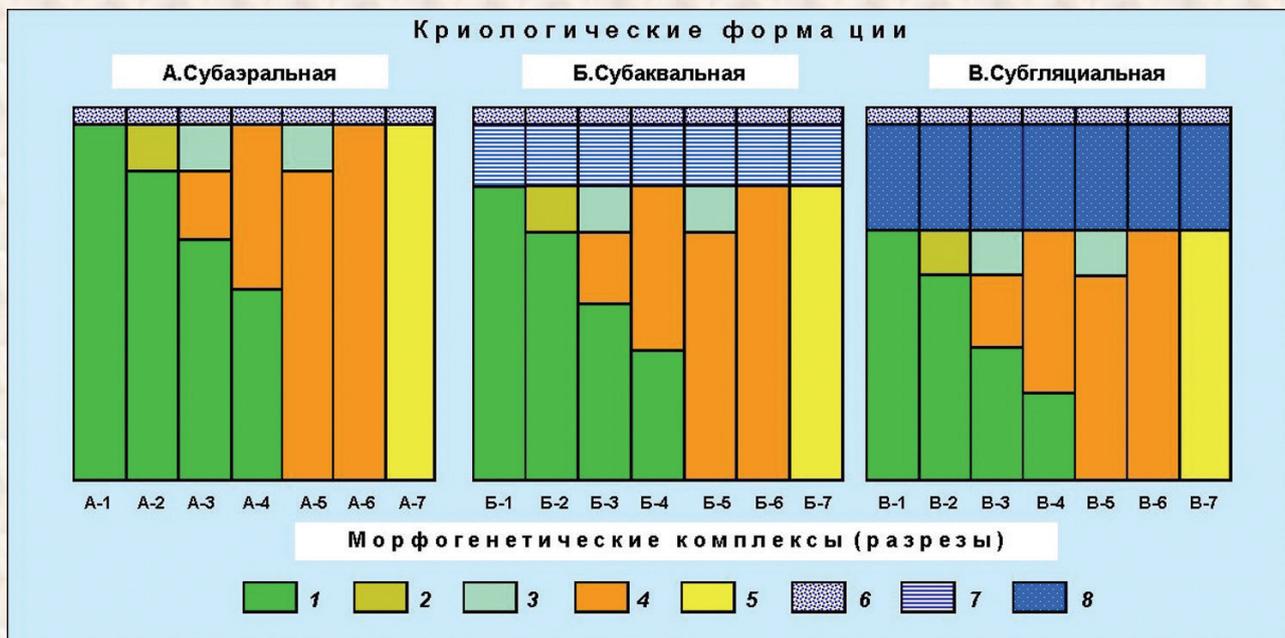


Рис. 1. Криологические формации и их типовые разрезы.

Объекты криосферы: 1 – многолетнемерзлые горные породы; 2 – сезоннопротаивающие (сезонноталые) горные породы и почвы; 3 – сезоннопромерзающие (сезонномерзлые) горные породы и почвы; 4 – талые горные породы (талики); 5 – не мерзлые горные породы и почвы; 6 – сезонный снежный покров; 7 – замерзшие, промерзающие и отрицательно температурные водоемы и водотоки; 8 – многолетние снежники, наледи и ледники

Под криологической формацией понимается некоторая общность материальных объектов отрицательно температурной природной среды, отражающая историческое развитие и современное состояние процессов взаимодействия атмосферы, гидросферы и литосферы в заданной точке географического пространства. Проще говоря, это определенное сочетание слоев снега, льда, мерзлых, промерзающих и талых горных пород, сформировавшееся к настоящему времени в результате эволюционного развития криолитозоны на какой-либо территории.

Предложенная формулировка понятия и построенная на ее основе классификационная схема позволяют упорядочить возможные варианты соотношения главных элементов криосферы Земли и сформулировать ключевую проблему, стоящую перед криогеометрией, как научным направлением. Схема, представленная на рис. 1, детализирована в отношении мерзлой зоны земной коры, но она может быть развернута также и в отношении других структурных элементов и, таким образом, послужить основанием для расширения понятия «криогеометрия» на все без исключения объекты холодного пространства, в том числе космического происхождения.

С учетом структуры криологических формаций и их морфогенетических элементов, фундаментальной задачей геометрии криолитозоны следует признать разработку единой унифицированной методики измерения криогенных объектов и создание на ее основе региональных, национальных и глобальных банков геокриологических данных, включающих обобщенные результаты непосредственных измерений, карты, опорные разрезы и другую практически ценную информацию. Особенно важно, на наш взгляд, получить кондиционные картографические модели криолитозоны как синтетические документы, отражающие термодинамическое состояние и вещественный состав верхней части земной коры в холодных регионах.

Необходимо заметить, что системное геокриологическое картографирование в России остановилось на уровне 80-х гг. минувшего столетия. Ушли в прошлое государственные мерзлотные съемки, не реализованы проекты составления Геокриологического атласа России и мира. Мерзлотоведы при картографическом обобщении дискретной информации до сих пор пользуются устаревшим методом скользящего кружка или интуитивно распространяют (интерполируют) имеющиеся данные на соседнюю территорию. Общая методика картографирования криолитозоны (не методика мерзлотной съемки, т.к. это разные категории познания) фактически не разработана, хотя современные компьютерные технологии позволяют создавать многослойные срезы и объемные фигуры геологической среды, получать стереоскопические эффекты и многое другое, т.е. представлять геометрические модели объектов в заданном масштабе пространства и времени. Но дело даже не в этом. Для достоверного картографического изображения криолитозоны требуется надежный набор фактических данных, т.е. некоторая совокупность натуральных

измерений в полевых условиях. Это обстоятельство и является отправным моментом при обсуждении фундаментальной криогеометрической проблемы, состоящей из нескольких частей: 1) методической основы; 2) геометрии криолитозоны в целом; 3) геометрии массивов вечной мерзлоты; 4) геометрии сезоннопротаивающих и сезоннопромерзающих грунтов; 5) геометрии подземных льдов; 6) геометрии криогенных ландшафтов.

В данной статье нет возможности рассмотреть все указанные направления. Остановимся лишь на двух из перечисленных аспектов криогеометрической проблемы: методической и ландшафтной.

Методы криогеометрии

Измерение параметров вечной и сезонной мерзлоты (длины, ширины, площади, объема) осуществляется прямыми и косвенными методами. Прямые методы основаны на непосредственном восприятии (визуализации) наблюдателем характерных свойств мерзлого грунта и подземного льда – цвета, твердости, фактуры, отражения звука, света и др. Чаще всего идентификационные признаки используются при составлении крупномасштабных карт глубины протаивания почв и горных пород, изучении строения мерзлых толщ в береговых обрывах, штольнях, шахтах, скважинах и шурфах. Измерения производятся мерными лентами, линейками, рейками или оптическими дальномерными приборами (нивелиром, теодолитом и пр.). При этом широко практикуется механическое опробование. При бурении скважин наличие мерзлых грунтов и льда определяют по скорости прохождения бурового снаряда, степени поглощения и температуре промывочной жидкости, появлению в стволе скважин напорных подземных вод, воздушных потоков и пр.

Косвенные методы делятся на две группы: ландшафтной индикации (наземной и дистанционной) и геофизические.

Методы ландшафтной индикации основаны на знании функциональной связи внешнего вида местности (растительного покрова, микро- и мезоформ земной поверхности, увлажнения и пр.) с наличием, глубиной залегания и энергетическим (температурным) потенциалом вечной и сезонной мерзлоты, а также с гидротермическими процессами, происходящими в слое годовых тепло- и влагооборотов. При большом количестве наблюдений на опорных индикационных площадках и профилях использование этого метода приносит очень хорошие результаты. Опытный полевик-исследователь может с достаточной для практики точностью определять не только конфигурацию мерзлых толщ в плане, но и распределение их мощности по мере изменения экспозиции горных склонов, высоты местности, обводненности и других характеристик ландшафта.

Геофизические методы предполагают использование приборов, с помощью которых измеряются физические характеристики геологической среды. При этом границы талых и мерзлых горных пород, высокольдистых горизонтов и залежей подземных льдов фиксируются аналитически на графиках распределения данных

замеров по вертикали (на разрезах) и горизонтали (на профилях). Методы эффективны в том случае, если в распоряжении оператора имеются результаты параметрических (лабораторных) измерений горных пород в мерзлом и талом состояниях. Исключение составляет лишь геотермический метод, с помощью которого фиксируется распределение температуры горного массива в буровых скважинах.

Сущность задачи по определению параметров массива мерзлых горных пород сводится к получению необходимой информации для построения плоских или объемных геометрических фигур (рис. 2), расчет которых осуществляется по хорошо известным формулам [1]. Если фигуры очень сложные, их можно разложить на ряд более простых или представить в виде равновеликих конфигураций, поддающихся простому расчету. Возможен вариант оценок, когда объем или площадь мерзлых пород определяется как разность соответствующих величин горного массива заданной формы и суммы аналогичных характеристик вмещающих или вмещаемых талых (немерзлых) горных пород. Приемлем и обратный способ расчета. Следовательно, решение геометрических задач переносится в область организации и осуществления кондиционной мерзлотной съемки, методика которой детально освещена в фундаментальных работах [2, 3].

Опыт многолетних геокриологических исследований показал, что достоверность информации о морфологических особенностях мерзлых пород резко возрастает в том случае, когда перечисленные методы применяются в комплексе, взаимно дополняя друг друга, при этом используются материалы новейшего аэрокосмического зондирования. Итогом таких работ обычно является мерзлотная (геокриологическая) карта, которая в зависимости от масштаба отражает истинные или генерализованные параметры мерзлых толщ, их строение, тепловое состояние, а также сопутствующие криогенные явления. Считается, что построенная в результате кондиционной мерзлотной съемки геокриологическая карта представляет собой вполне достоверную модель изучаемых криогенных объектов, т.е. отражает истинную картину мерзлотных условий. Однако фактически ни одна картографическая модель не является объективной. Это лишь некоторое приближение к истине и очевидный показатель существования перечисленных выше криогеометрических проблем.

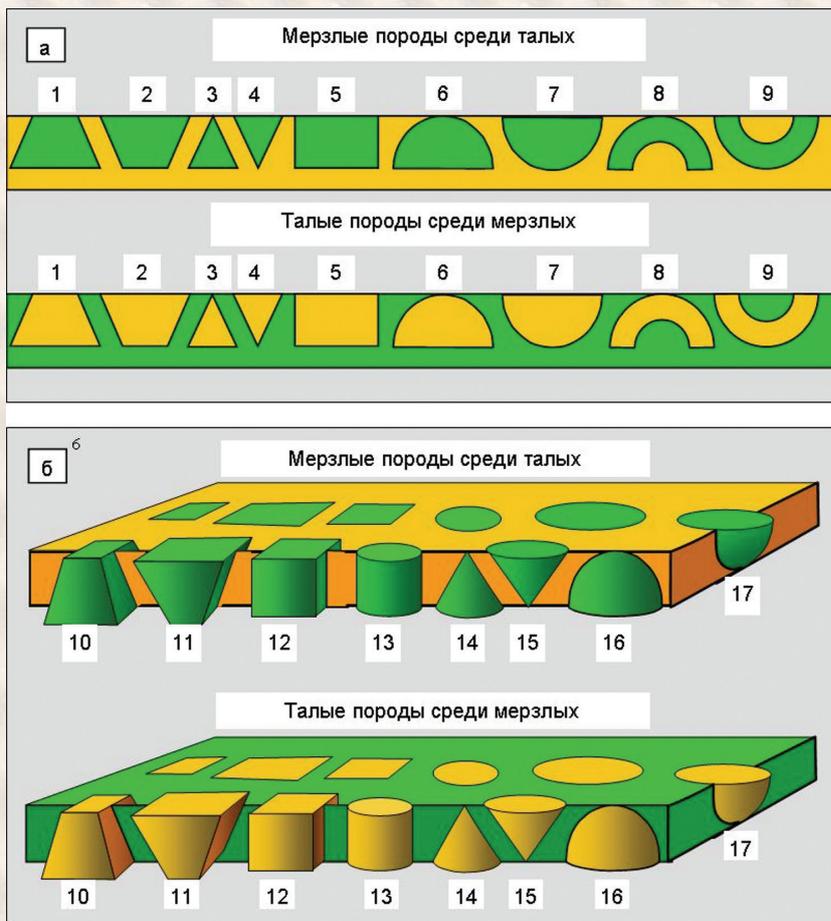


Рис. 2. Основные типы форм залегания мерзлых и талых горных пород.

а – плоские фигуры: 1, 2 – трапеция, прямая и обратная; 3, 4 – треугольник, прямой и обратный; 5 – прямоугольник; 6, 7 – полукруг, прямой и обратный; 8, 9 – полукольцо (плоский тор, проекция фигуры вращения «бублик»), прямое и обратное.

б – объемные фигуры: 10, 11 – пирамида усеченная, прямая и обратная; 12 – куб; 13 – цилиндр; 14, 15 – конус, прямой и обратный; 16, 17 – полусфера

Геометрия криогенных ландшафтов

Внешний вид замерзающей и оттаивающей земли – это открытая книга природы, прочесть которую можно легко и просто, если имеешь соответствующие знания и навыки интерпретации характерных признаков и свойств криогенных явлений. В этом увлекательном и полезном процессе познания особое значение приобретает умение наблюдателя видеть, преобразовывать и отражать многоликий портрет местности в графической форме, т.е. в виде рисунка на бумаге, кальке, холсте, экране монитора или другим фиксирующем носителе информации.

Наиболее полно характерные черты криогенных ландшафтов отражаются на аэрофото- и космических снимках. Как продукты дистанционного зондирования, выполненного приборами по заданию человека, они всегда объективны. Измерение непосредственно на снимках не всегда возможно и не очень удобно. Проще и надежнее исполнить рисунок объекта, создать его графический образ, при этом удалить ненужные детали

и «шумы», а также привести полученное изображение или мозаику к системе простейших геометрических фигур (рис. 2), которые можно оценивать и измерять с помощью известных математических операций. Так открывается «неожиданная» возможность упорядочить огромное разнообразие криогенных явлений, описать закономерности их распространения, сопряжения и трансформацию с помощью строгих математических правил. Имеются обстоятельные разработки в части математического моделирования морфологической структуры ландшафтов и методов расчета самых разнообразных характеристик выделенных контуров – их сложности, формы, расчлененности, ориентировки, взаиморасположения, соседства и пр. [4, 5]. Геометрическое изучение криогенных ландшафтов возможно в любом масштабе. В крупном масштабе прекрасно отражаются структура, размеры и стадии развития мерзлотно-геологических образований – пятен-медальонов, каменных сетей, курумов, туфуров, солифлюкционных террас и пр. Средний масштаб позволяет фиксировать границы и конфигурацию мерзлых и талых горных пород. На мелкомасштабных картах (1:1 000 000 и мельче) через рубежи природных зон (тундра, лесотундра, лесостепь, степь) идентифицируется распространение сплошной, прерывистой и островной вечной мерзлоты, а также мощность слоя сезонного промерзания и протаивания грунтов. В настоящее время можно через Google Earth или иную информационно-поисковую систему Интернета «скачать» снимок любой части планеты и использовать его в нужных целях, в том числе и для получения сведений о криогенных процессах и явлениях. Приведем несколько примеров.

На рис. 3 отражена система термокарстовых озер, сформировавшихся в дельте р. Лены. Анализ снимка позволяет составить гипотетический разрез полигональной тундры с массивами повторно-жильных льдов и субаквальных таликов, который дает вполне определенное

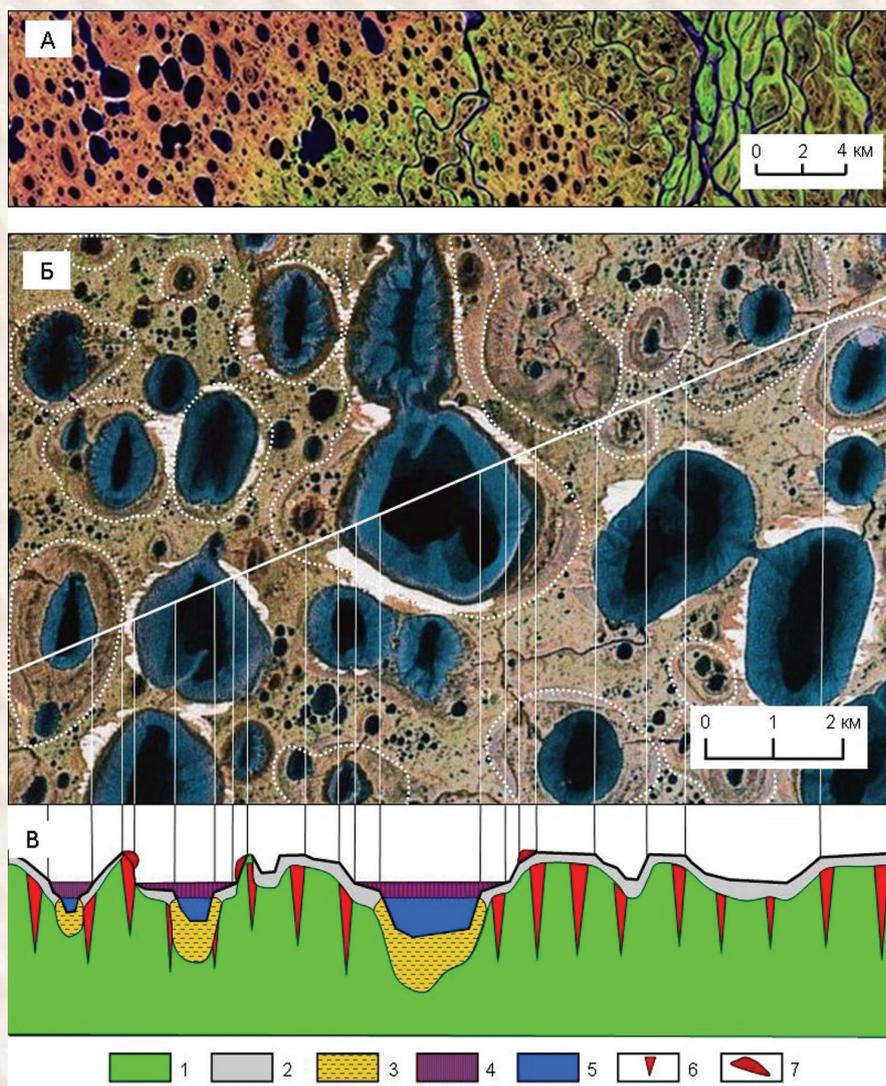


Рис. 3. Геометрическая интерпретация криогенного ландшафта дельты р. Лены. Космический снимок

(космоснимок с сайта Яндекс Фотки1303825287_nasa_earth-1015).
 А – фрагмент космического снимка в мелком масштабе. Озерно-аллювиальная равнина, осложненная ветвящимися протоками р. Лены. Общая площадь 45 тыс. км². Сложена многолетнемерзлыми высокольдистыми грунтами мощностью 250 – 300 м. Верхний горизонт толщиной 10 – 15 м пронизан клиновидно-жильными льдами. В пределах дельты расположено около 30 тыс. озер, большинство из которых имеет термокарстовое происхождение. Б – увеличенный фрагмент космического снимка. Система термокарстовых озер, сформировавшаяся при вытаивании подземных льдов (аласы выделены прерывистым белым контуром). В пределах выделенного фрагмента территории расположено 366 озер площадью менее 1 км² и 18 озер более 1 км². Мелкие озера полностью промерзают, под крупными озерами располагаются надмерзлотные водоносные талики. В – геокриологический разрез. Горные породы: 1 – многолетнемерзлые; 2 – сезоннопротаивающие; 3 – талые; 4 – промерзающая часть водоемов (озерный лед); 5 – непромерзающая толщина воды; 6 – повторно-жильный лед; 7 – снег

представление о мерзлотных условиях территории (см. подрисовочную подпись).

На рис. 4 показаны 12 типов местности различных районов азиатской части России. Качество снимков, их

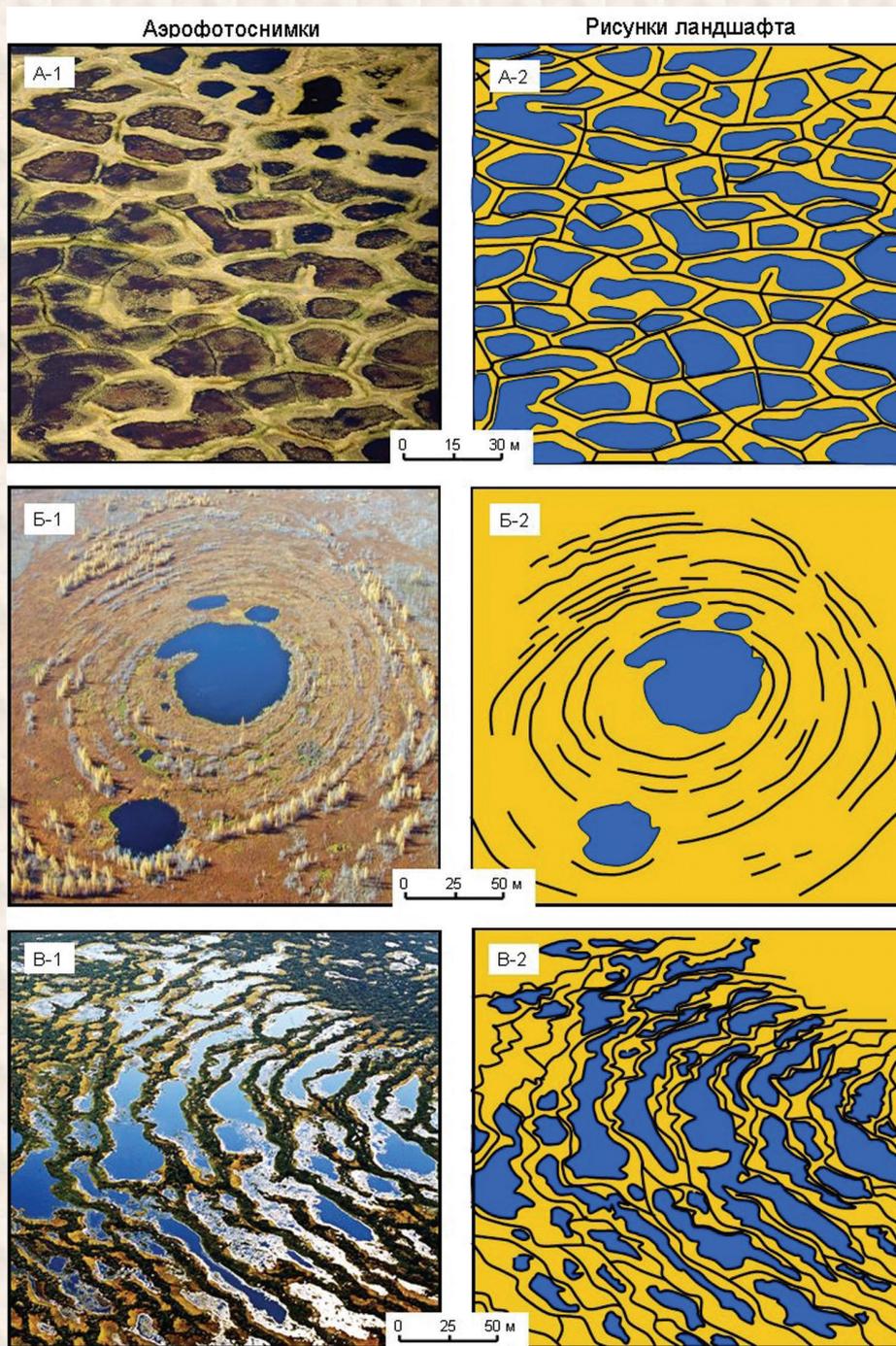


Рис. 4. Глубина сезонного протаивания и промерзания горных пород в зависимости от ландшафтных условий теплообмена в различных районах криолитозоны.
 Горные породы: 1 – многолетнемерзлые; 2 – талые и немерзлые; 3 – сезоннопротаивающие; 4 – сезоннопромерзающие.
 Мощность разреза – 2,5 м

разрешающая способность позволяют достаточно четко определить границы относительно однородных природных комплексов, в пределах которых устанавливается приближенное числовое значение глубин сезонного промерзания-протаивания и наличие многолетнемерзлых пород и таликов. Для этого достаточно знать некоторые

индикационные признаки ландшафтов, выявленные в процессе мерзлотных съемок и режимных наблюдений.

Возможно получение и более объемных данных. Вот, например, какую информацию можно получить при анализе аэрофотоснимков отдельных участков характерных регионов криолитозоны (рис. 5).



**Рис. 5. Внешний вид характерных природно-территориальных комплексов криолитозоны Чукотки (А), Колымской низменности (Б) и Западной Сибири (В).
Пояснения см. в тексте**

Графы А-1 и А-2 – Чукотка, область сплошной вечной мерзлоты мощностью до 500 м. Приморская озерно-болотная равнина, сложенная аллювиальными отложениями с мощными повторно-жильными льдами. Полигональный тип геометрической структуры ландшафта. Общая площадь 14 400 м² разбита на сеть четырех-, пяти- и шестиугольников диаметром от 8 до 35 м. Общее количество полигонов 81. Средняя площадь полигонов 177 м². Параметры ледяных жил, образующих полигоны: средняя ширина по верху – 3 м, мощность – 12 м, суммарная протяженность – 2 км, площадь горизонтальной проекции – 6 000 м² (42% площади территории), объем льда – 36 000 м³. Объем наиболее льдистой части многолетнемерзлых горных пород (до глубины 12 м) – 173 000 м³. Объем многолетнемерзлых пород без повторно-жильных льдов – 137 000 м³. Объем текстурообразующих льдов при 30% средней льдистости горных пород, вмещающих повторно-жильные льды, – 41 000 м³. Всего подземных льдов в толще многолетнемерзлых пород – 77 000 м³ (43,5% от объема расчетной части многолетнемерзлых пород). Объем минеральной массы многолетнемерзлых пород без подземных льдов – 100 000 м³. Количество озер, заполняющих межваликовые понижения полигонов, – 78. Максимальный диаметр озер (при слиянии полигонов) – 35 м, средний – 12 м. Толщина слоя воды в озере в межень – 0,6 м. Средняя площадь водоемов – 150 м², суммарная площадь озер – 12 000 м², суммарный объем воды – 7200 м³. Объем озерного льда в весенний период – 8000 м³.

С учетом характеристик водоемов объем сезонно-протаивающих грунтов (при средней глубине протаивания 0,8 м в межозерном пространстве и 0,2 м – под озерами) составляет 4500 м³. В нем при льдистости 40% ежегодно образуется 1800 м³ сезонного подземного льда. Таким образом, динамический запас подземного льда на изучаемой опорной площади достигает 78 800 м³, что эквивалентно 69 000 м³ воды. В случае деградации вечной мерзлоты до глубины 12 м объем грунтовой толщи сократится на 7700 м³. Если отток талой воды не произойдет, поверхность земли понизится на 1,9 м. При наличии естественных или искусственных дренажных систем возможно понижение уровня земной поверхности до 7,2 м. В любом случае термокарстовый процесс приведет к затоплению больших пространств, примыкающих к морским и пресноводным водоемам и речным системам.

Графы Б-1 и Б-2 – Колымская приморская низменность, сложенная мерзлыми озерно-аллювиальными отложениями мощностью 300 – 400 м (см. рис. 5). Концентрически полосчатый тип геометрической структуры ландшафта отличается ограниченностью характеристик. На сравнительно однородной поверхности лесотундры отражены три основных элемента природно-территориального комплекса – блюдцеобразные озерные котловины площадью 95, 100, 1000 и 2500 м² (голубые пятна на снимке), кустарничковые осоково-сфагновые болота (фон рисунка) и прерывистые параллельные гряды высотой 0,3 – 0,5 м, поросшие лиственничным

редколесьем с кустарниковым ярусом из ерниковой березки (выделены черными линиями). Гряды шириной от 3 до 10 м фиксируют береговую линию водоема площадью около 35 000 м², некогда занимавшего почти всю рассматриваемую территорию. Под озером располагался несквозной талик, который постепенно сокращался в объеме по мере изменения площади акватории, а также разделился на четыре неравные части. Просматриваются 10 стадий динамики озера. Датировка абсолютного возраста гряд методами дендроиндикации, лишенометрии, радиоуглеродного анализа и другими методами позволяет восстановить причины и временной интервал трансформации криогенного ландшафта и геокриологических условий территории в целом.

Графы В-1 и В-2 – Западно-Сибирская равнина, сложенная песчано-глинистыми аллювиальными отложениями (см. рис. 5). Область глубокого (1,5 – 2,5 м) сезонного промерзания горных пород и островной вечной мерзлоты. Васюганский озерно-болотный комплекс. Волнистый непараллельно-полосчатый тип геометрической структуры ландшафта. Территория площадью 0,04 км² состоит из чередующихся извилистых полос задернованной торфяной массы шириной от 3 до 15 м, покрытых осоково-моховым покровом с густым кустарниковым ярусом и одиночными, сильно угнетенными стволами сосны обыкновенной. Полосы-гряды высотой 0,3 – 0,5 м и разделяющие их вытянутые озера с площадью водного зеркала от 100 до 1500 м² промерзают на глубину 1,0 – 1,2 м. Возможно, они подстилаются многолетнемерзлым торфом. Длина гряд колеблется от 5 до 200 м. Местами, соединяясь друг с другом, они образуют полигональную сеть с диаметром ячеек 10 – 15 м. Большинство гряд находится в неустойчивом равновесии: в теплый период года протаявшая торфяная масса вместе с растительным покровом медленно сползает по уклону, при этом формируется характерный (гофрированный) рисунок ландшафта. Суммарная площадь гряд – 16 000 м², площадь озер – 19 000 м². Зимой гряды превращаются в льдо-торфяной сетчатый монолит общим объемом около 20 000 м³. В весенний период объем озерного льда составляет 23 000 м³. В это время года территория превращается в сплошной ледоём. Летом озерно-болотный комплекс практически непроходим.

Приведенные описания составлены по фотоснимкам, выбранным в Интернете случайно, без привязки к конкретным координатам местности. Конечно, они субъективны, так как основаны на личном опыте и знаниях автора общих закономерностей развития криогенных явлений, к тому же не заверены наземными наблюдениями. Тем не менее, полученные характеристики позволяют раскрыть многие важные черты морфологической структуры отдельных районов криолитозоны, а также определить пути для изучения их динамики во времени и пространстве. Более ценную и разностороннюю информацию можно получить в процессе комплексных исследований, когда параллельно с дешифрированием снимков проводятся режимные наблюдения за динамикой процессов, изучаются растительный и почвенный покровы, поверхностный и

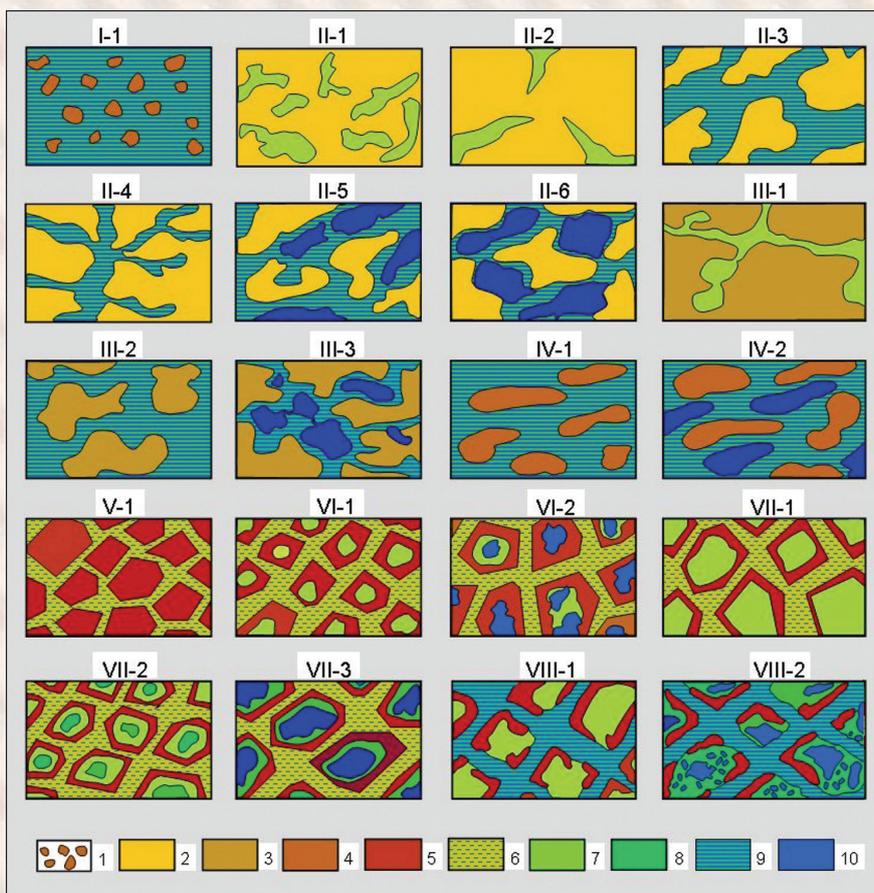


Рис. 6. Геометрическая структура криогенных болотных комплексов севера Западной Сибири.

Полуостров Ямал. По материалам Государственного гидрологического института [6].

Бугры: 1 – мелкие среди торфяной топи; 2 – плоские среди мочажин, топей и озерков; 3 – пологовыпуклые среди торфяных мочажин, топей и озерков; 4 – выпуклые караваяподобные среди торфяных топей и озерков; 5 – полигональные, обрамленные морозобойными канавами-трещинами, среди мочажин, топей и озерков; 6 – морозобойные канавы-трещины с повторно-жильными льдами; 7 – мочажины плоские, частично обсыхающие; 8 – мочажины вогнутые, не обсыхающие; 9 – топи; 10 – озера. I-1... VIII-2 – криогенные болотные комплексы (характеристика в тексте)

подземный сток, микро- и мезоклиматические условия и пр. В этом отношении весьма показательны результаты 30-летних исследований сотрудников Государственного гидрологического института в Западной Сибири, обобщенные в монументальной монографии под руководством С. М. Новикова [6]. Изученные ими болотные системы мы представили в виде совокупности цветных графов (рис. 6), которые наглядно раскрывают разнообразие и геометрическую структуру криогенных ландшафтов Великой сибирской равнины.

Как видим, криогеометрический подход к изучению вечной мерзлоты и криогенных ландшафтов дает очень хорошие результаты. Он может эффективно использоваться не только на сибирском Севере, но и в других холодных регионах земного шара.

Список литературы

1. Атанасян, Л. С. Геометрия : учебник для 10–11 классов / Л. С. Атанасян, В. Ф. Бутузов, С. Б. Кадомцев, Л. С. Киселева, Э. Г. Позняк. – 22-е изд-е. – М. : Просвещение, 2013. – 255 с.
2. Методика комплексной мерзлотно-гидрогеологической и инженерно-геологической съемки масштабов 1:200 000 и 1:500 000. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1970. – 354 с.
3. Методика мерзлотной съемки / [Под ред. В. А. Кудрявцева]. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 358 с.
4. Викторов, А. С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта / А. С. Викторов. – М. : Наука, 2006. – 252 с.
5. Викторов, А. С. Рисунок ландшафта / А. С. Викторов. – М. : Мысль, 1986. – 179 с.
6. Гидрология заболоченных территорий зон многолетней мерзлоты Западной Сибири / [Под ред. С. М. Новикова]. – СПб. : ВВМ, 2009. – 536 с.