



УДК 551.242:551.71

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПЕРКОЛЯЦИЯ – РЕСУРС НОВЫХ ИДЕЙ В ГЕОТЕКТОНИКЕ

П.М.Горяинов, Г.Ю.Иванюк

*Геологический институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты*

Организация тектонического пространства различной природы и масштаба, оцененная с помощью фрактальной размерности, характеризуется одними и теми же особенностями: оно структурировано по типу перколяционного кластера – связанной фрактальной структуры, возникшей в среде с протекающими сквозь нее энергопотоками. Тектоносферные ансамбли любых масштабов обладают тремя важнейшими фундаментальными свойствами: фрактальность среды, когерентное поведение подсистем, структурный гомеостазис ансамблей. Этими свойствами обладают только системы с дальним порядком. Предложенная модель энергетической перколяции требует принципиально нового подхода к построению тектонических концепций, которые обязаны рассматривать структуру литосферных блоков во всем масштабном диапазоне элементов дальнего порядка. Становится очевидным, что структурный каркас или узор тектоносферы есть результат ее самоорганизации в условиях непрекращающегося эндогенного энергопотока. Перколяционные кластеры тектоносферы – это ее адаптация к воздействию энергопотока, не пассивный отклик на воздействие эндогенных сил и факторов, а собственная – «неспецифическая» реакция вещества Земли на эндогенную подпитку, т.е. самоорганизация.

### Введение

Альтернативные тектонические доктрины – плит-тектоническая и плюм-тектоническая – различаются не только по геодинамическим механизмам реализации, но, по существу, и главным образом, по способу доставки эндогенной энергии к поверхности. В первом случае ее потоки формируют тектонический узор через глобальное конвективное перераспределение материала мантии и литосферы, т.е. более или менее опосредованно. Во втором – энергопоток, обобщенно связанный с понятием “плюм” (*plume* – струйка, султан, завиток), формирует тектонический узор непосредственно в зоне энергетической разгрузки.

Совокупность тектонических структур, по которым происходит разгрузка эндогенной энергии, была названа структурно-энергетической решеткой [1,2]; в ее организации зафиксированы как изменение во времени темпа приращения объема литосферы, так и процессы корово-мантийной дифференциации (в том числе – образование контрастных формаций, в частности, железорудных и сиалических). Стало очевидным, что эволюция структур энергетического дренажа в истории Земли и определяет эволюцию ее тектоносферы и дифференциацию ее структурно-вещественных комплексов.

В дальнейшем удалось показать, что зоны энергетического дренажа, фиксируемые амфиболитами и железистыми кварцитами среди кислых гнейсов и гранитоидов, по своей морфологии соответствуют строению теоретического перколяцион-

ного кластера. Они статистически самоподобны в широком диапазоне масштабов – от 500 км в плане и 20 км в глубину до нескольких сотен-десятков метров в плане и в глубину [3-5]. Их фрактальная размерность удивительно близка между собой, т.е. характер организации тектонического пространства разной природы и возраста идентичен. Но особенно важно, что она, кроме того, совпадает с размерностью модельных перколяционных кластеров.

Упомянутые выше тектонические доктрины при всей своей несхожести в объяснении тектонического структурирования (при латеральном перемещении глобальных структур по астеносфере или вертикально-латеральном перемещении масс, связанном с локализованным разуплотняющимся мантийным плюмом или мантийным источником энергопотока) все же сходны в одном. Образование структур и в той и другой – это следствие пассивного отклика вещества коры на эти мантийные возмущения. А в таких условиях – условиях ближнедействия возмущающих факторов – в структурах может наблюдаться лишь ближний порядок, определяемый конкретной областью приложения сил.

Однако, как установил М.А.Садовский [6], делимость горных пород обладает удивительной способностью образовывать иерархическую последовательность, приближенно описываемую геометрической прогрессией с показателем  $K$ , близким к постоянному значению. Делимость практически не зависит ни от физико-химических свойств породы, ни от способа ее образования, касается ли это при-

родного трещинообразования или дробления подземными взрывами. Это свойство М.А.Садовский связывал с автомодельностью процессов образования вещества литосферы, или с самоорганизацией. Установленная закономерность ставит под сомнение общепринятые версии пассивного структурообразования, и, наоборот, выдвигает на первый план элементы дальнего порядка в структурах тектоносферы. С последним понятием тесно связан эффект структурного гомеостазиса – явления, обычно рассматриваемого биологами и биофизиками, суть которого состоит в устойчивости или, точнее, устойчивой воспроизводимости характерных структурных форм и узоров, повторяющихся в разных условиях и с разным набором “участников”. Структурный гомеостазис (стационарность) – это не признак равновесного состояния, как иногда понимают, а наоборот – свидетельство крайне неравновесных условий, когда в потоке энергии (вещества) активная согласованная динамика микрочастиц обеспечивает устойчивость макроузора. Это и имел в виду М.А.Садовский, когда отмечал, что *динамическая неизменность* структуры горной породы обеспечивается “постоянством потока энергии, втекающей в открытую систему горной породы” [6, стр. 10].

Вышеизложенное заставляет поставить вопрос о том, как же в разных геологических условиях может выглядеть такая стационарная во времени система энергопроницаемости и какие геодинамические и металлогенические следствия из этого могут вытекать. Неожиданно для авторов примеры геологических перколяционных кластеров, которые мы решили рассмотреть для комментирования поставленного вопроса и иллюстрации основной идеи настоящей статьи (это - карстовые структуры, мерзлые грунты и соляные куполы, регматические тектонические сети и рудные штокверки, замкнутые пояса), стали претендовать на развернутое самостоятельное изложение темы. Появилось даже соображение данную статью подать после серии статей по затронутым в примерах объектам. Действительно, в свете затронутых идей звучание ряда привычных понятий, трактовка динамических процессов и практические следствия по каждому из указанных в примерах направлений становятся более содержательными. Но взвесив все за и против, мы сочли все же более правильным начать с данной статьи, с изложения общего принципа самоорганизации тектоносферных ансамблей. И лишь только после этого, как нам представилось, появляется смысл обращаться к частным сторонам проявления геологической кластеризации. Тем более по многим из них существует огромный материал, свои традиции в его подаче и весьма неоднозначная интерпретация. Возьмем хотя бы такую проблему как регматическая тектоническая сеть.

Поэтому, начав статью разделом о перколяции и теоретических перколяционных кластерах, мы продолжили ее разделами, которые призваны кратко иллюстрировать эти фундаментальные понятия геологическими примерами и дать наше представление

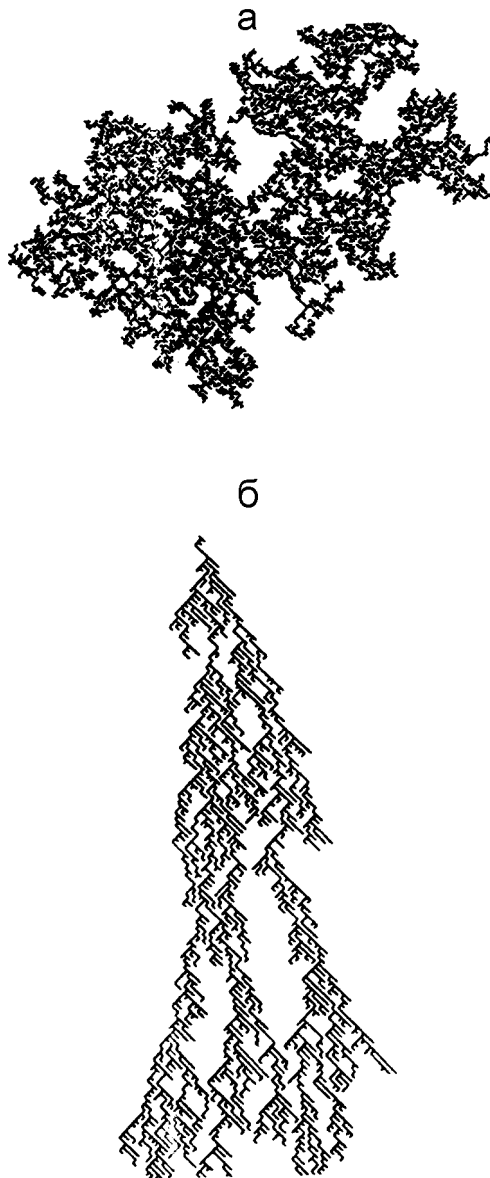
о характере тектонической самоорганизации и о своем отношении к существующей тектонической аксиоматике.

### Перколяция и перколяционные кластеры

Основы теории перколяции (percolation – протекание) были заложены Дж.М.Хамерсли и С.Р.Бродбентом [7] в связи с описанием процесса фильтрации жидкости или газа через пористую среду. Впоследствии оказалось, что их подход универсален и может быть использован для исследования явлений, протекающих в условиях различной связности среды. Например, для изучения связности сетки сопротивлений, распространения эпидемий, твердения полимеров, распространения и связности систем трещин и др. [8-10]. Современная теория перколяции, таким образом, является математической теорией о связности неоднородных систем, относящейся к области стохастической геометрии [11]. Процесс перколяции Т.Л.Челдизе [10] рекомендует рассматривать как яркий пример перехода количества (концентрации занятых связей) в качество: при критическом значении концентрации некоторых элементов (точек в пористой среде, занятых раствором, искр при пробое диэлектрика, микротрещин, зародышей кристаллов и т.п.) система обнаруживает новое свойство – связность, которым ранее не обладала.

Как правило задачи теории перколяции решают на решетках разной размерности и конфигурации (под решеткой понимают совокупность узлов среды, между которыми в принципе возможно протекание жидкости, электрического разряда и т.д.). Оказывается, что бесконечный кластер выше порога протекания (появления связности) имеет фрактальную структуру, причем его фрактальная размерность зависит только от топологической размерности решетки (2 или 3) и равна 1.89 для двумерных и 2.54 для трехмерных решеток [11]. Примеры компьютерных моделей изотропного и анизотропного 2-мерных перколяционных кластеров, почерпнутые из работы [12], приведены на рис.1. Универсальность теории объясняется тем, что она рассматривает взаимодействие (связность) крупных блоков частиц – кластеров, размеры которых гораздо больше атомных и молекулярных, а геометрические особенности вблизи критической области перехода от локальной к глобальной связности подобны – имеет место так называемый скейлинг.

Подобие геометрии кластеров разной природы приводит к подобию выражений, описывающих те физические свойства, для которых определяющим является характер связности кластеров и их многомасштабность [10]. Универсальность модели заключается и в том, что перколяционный кластер обязательно возникает при случайном расположении частиц (мономеров в реакциях полимеризации, микротрещин при разрушении твердого тела, искр при пробое диэлектрика и т.п.) с достаточно высокой концентрацией, хотя доля частиц непосред-



**Рис. 1. Изотропный и анизотропный перколяционные кластеры [12].**

венно вошедших в кластер и определяющих его фрактальную структуру, будет невелика [11]:

$$p_{\infty} \sim (p - p_c)^{\beta},$$

где  $p_{\infty}$  – доля узлов, принадлежащих кластеру;  $p$  – количество узлов в решетке, между которыми возможно протекание;  $p_c$  – порог протекания (критическое число неразорванных связей между узлами, при которых появляется возможность протекания от одного края решетки к другому),  $\beta$  – коэффициент, который зависит только от размерности решетки:  $\beta = 5/36$  для двумерных решеток и  $\beta = 0.4$  для трехмерных.

Впервые идея о самоподобии геофизической среды была озвучена М.А.Садовским [13-16]. В соответствии с этой идеей, он предлагал рассматривать литосферу как систему взаимодействующих неоднородностей, которые могут иметь различную

природу: это геологические блоки, неоднородности горной породы, плотностные, химические, тепловые и другие неоднородности, различные агрегатные состояния вещества и т.д. В процессе *непрерывной подпитки эндогенной энергией* система неоднородностей-отдельностей самоорганизуется в единую диссипативную структуру, имеющую самоподобный (иерархический) характер.

Этот процесс связан с непрерывной вибрацией литосферы в огромном диапазоне масштабов и частот: от тепловых колебаний молекул до микросейсм, землетрясений и подвижек континентальных плит. “Все это делает геофизическую среду похожей больше на систему перетекающих “жидких ступеней”, чем на укоренившуюся в нашем воображении “земную твердь” [15; стр.7]. Формирование структур в такой среде сопровождается обязательными неустойчивостями, случайностями, носящими характер катастроф. Общей чертой таких неустойчивостей является наличие самоподобных структур. Самоподобие имеет универсальный характер и находит аналогию с фазовыми переходами 2-го рода [17]. Известно, что системы в таких переходах вблизи критических точек приобретают самоподобную структуру, в ней увеличиваются флуктуации и, что особенно важно, безгранично увеличивается радиус корреляции системы (радиус согласованного поведения подсистем-неоднородностей). Новая структура более устойчива благодаря более эффективной диссипации подкачиваемой энергии через систему связности (перколяционную сеть).

Одно из первых и весьма удачных приложений идеи перколяции к объяснению тектонических процессов встречается опять же в работах М.А.Садовского, который убедительно показал, что перколяция напряжений в горных породах начинается еще до их разрушения. На первых стадиях движение блоков напоминает медленные переползания молекул жидкости с сохранением ближнего порядка. Затем совокупность блоков, несущих основную нагрузку, захватывает большее пространство; структура скрытой, а затем, после достижения некоторой критической величины плотности энергии, и открытой системы проницаемости приобретает дальний порядок. Совершенство (упорядоченность) этой связанной перколяционной системы определяет эффективность диссипации сквозь нее эндогенной энергии.

Понятно, что концентрация энергии в этой перколяционной системе может достигать значений, при которых возможны значительные изменения состава пород в условиях возникновения и дифференциации расплавов, растворов, твердофазных и термо-диффузионных процессов. Контрастный характер этих процессов позволяет фиксировать ископаемые перколяционные кластеры, тем более, что многие из них являются рудоносными. Обычным явлением для реальных геологических кластеров является приуроченность к ним наиболее высокотемпературных, высокоградиентных, контрастных

вещественных комплексов и, соответственно, наиболее дифференцированных физических полей, что, собственно говоря, и позволяет выявлять перколяционную решетку в процессе геологического (геофизического) картирования.

Таким образом, возникновение связанной структуры или возникновение тектонического перколяционного кластера с характерным для него контрастным вещественным выполнением, условно говоря, является адаптацией неструктурированного субстрата к высокоградиентному энергопоток. Структурированная система эффективнее взаимодействует с ним, не подвергаясь до определенного порога разрушению. Классическим примером подобной адаптации является структура термогравитационной неустойчивости (ячейки Бенара). Механизм упорядоченной конвекции Бенара в качестве иллюстрации перколяционной динамики обычно не используется. Но мы сочли возможным к этому прибегнуть, во-первых, потому, что ячейки Бенара в последнее время становятся известными и даже популярными и в среде геологов, во-вторых, они довольно точно передают характер физических процессов, сопровождающих перколяцию энергии через конвективные механизмы. Последние и предопределяют возникновение упорядоченности в жидкой среде.

### Структурирование жидких сред в условиях термогравитационной (конвективной) неустойчивости. Эффект Бенара

Классический эффект Бенара открыт им в 1900 году [18]. В плоском сосуде с вязкой жидкостью (ртутью, минеральным маслом) создается температурный градиент (нагретая снизу жидкость всплывает, холодная сверху опускается). Из-за наличия силы тяжести и выталкивающей архимедовой силы такая система оказывается неустойчивой, поскольку “легкий” горячий и “тяжелый” холодный слои конкурируют за пространство. Однако, вследствие вязкости, при малых градиентах движение не возникает: тепло передается в верхний слой исключительно за счет теплопроводности. Только когда достигается первое, а затем и второе критическое значение градиента, возникает конвекция: сначала неупорядоченная, затем упорядоченная. Образуется конвективный поток, “конкуренция” которого с гравитацией и отбор наиболее устойчивых мод приводит к образованию характерного узора из шестиугольных ячеек (*t*-гексагон), или наоборот (*g*-гексагон): рис.2. Гидродинамическая система с такой структурой много более эффективно диссипирует подведенную энергию через возникшую систему проводимости (по границам ячеек), чем она это делала до сих пор посредством теплопередачи или неупорядоченной конвекции. Иными словами, интенсивность протекания (перколяции) подведенной энергии, в данном случае, тепловой, существенно возрастает. Такая

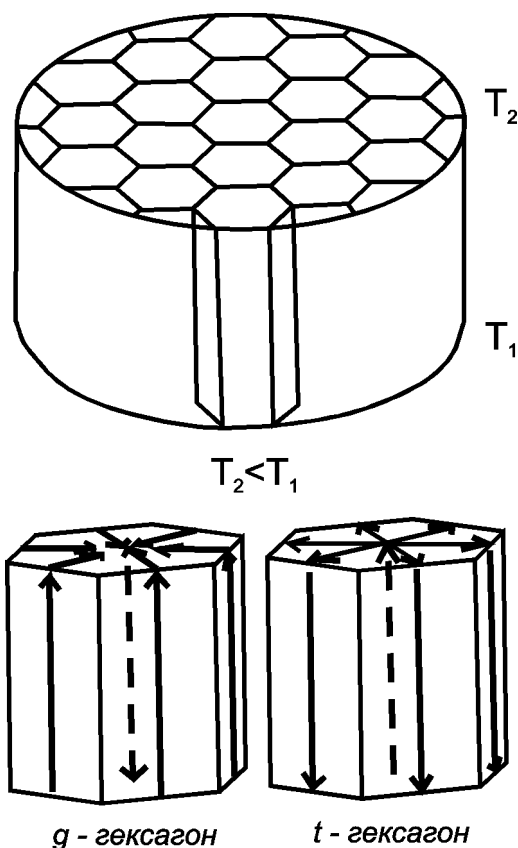
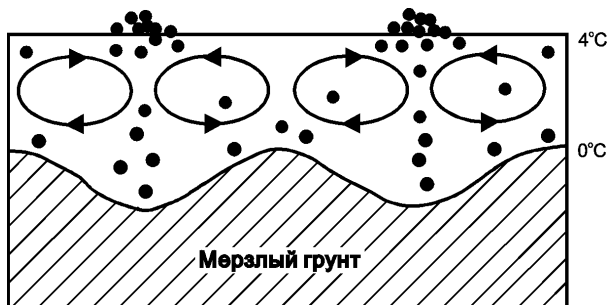
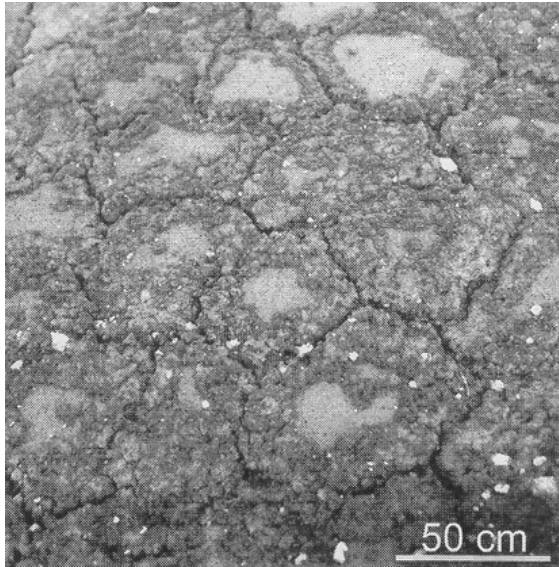


Рис. 2. Конвективные ячейки в эксперименте Бенара.

связная структура играет в сущности ту же роль, что и типичный перколяционный кластер.

Полигональная делимость мерзлых грунтов и такыров (рис.3) являет собой чуть ли не единственный пример самоструктурирования по конвективному механизму, по сути ничем не отличающемся от такового классических ячеек Бенара. Многочисленные примеры подобного рода структур детально разобраны в работах [19,20]. Их появление обусловлено быстрым оттаиванием почв или испарением из них воды, инициирующими упорядоченную конвекцию последней в приповерхностных слоях почвы. Как в таком случае понимать шестиугольную (полигональную) отдельность, наблюдаемую в самом широком геологическом диапазоне: от глинистых известняков карстовых полей до характерной отдельности в интрузивных породах и специфического полигонального узора континентальных структур? Безусловно, в образовании подобных геологических узоров схема полнообъемной упорядоченной конвекции вещества неприменима, как бы привлекательна она ни была, например, для разработки моделей плитной тектоники [21,22]. Это должно быть понятно, как понятно и то, что образованию такыров не предшествует конвекция ила, как и возникновению столбчатой отдельности в краевых частях магматических тел (покровов или чаще субвулканических тел) не предшествует конвекция расплава в объеме, занимаемом наблюдаемой отдельностью. Не трудно понять, что и вещество литосферы во всем



**Рис. 3.** Полигональная делимость мерзлых грунтов (г. Ньоркпахк, Хибинские тундры) и схема ее образования по В.Б.Крантцу [20].

его объеме (а это необходимое условие для возникновения структур Бенара) не могло конвектировать и тем самым создавать полигональный узор субконтинентальных масштабов.

Здесь были бы полезны весьма содержательные иллюстрации нелинейных явлений, сопровождающих эндогенную термогравитационную неустойчивость, которые привел О.В.Петров [23]. Он показал, что как для природных образований, так и для структур, полученных в эксперименте, устанавливается конформность топографической поверхности с внутренней, глубинной структурой территории и их обращенный характер связей. По мнению О.В.Петрова, валлообразные и линзово-ячеистые структуры как продукты термогравитационной неустойчивости Земли покрывают всю ее поверхность, начиная с самых ранних этапов ее развития. И в модели термогравитационных волн О.В.Петрова границы между ячейками предстают как зоны связанной перколяции, разгрузки глубинной волновой энергии. Это подтверждает корректность использования нами модели Бенара для иллюстрации перколяции, в том числе эндогенной, и полностью согласуется с нашим пониманием роли энергетической решетки Земли в ее последовательном структурировании [1,2,5].

Идея О.В.Петрова заставляет обратить внимание на известную динамическую модель гравитационной неустойчивости (без приставки «термо-»), которая получила известность как фингеринг («вязкие пальцы») [24]. Неустойчивость возникает вследствие того, что легкий слой ищет возможность всплыть сквозь более плотный слой. Фактически структурирование заключается в возникновении связанной (!) системы всплывающих струй, что в определенной степени напоминает перколяцию. Вот как объясняют возникновение довольно характерного узора с регулярным шагом («волной») при моделировании солянокупольной тектоники К.Талбот и М.Джексон [25]. Согласно теории Рэля-Тейлора подъем соли начинается на едва заметных выпуклостях границы раздела между двумя жидкостями разной плотности и вязкости. Эти выпуклости растут с различными скоростями, но выживают лишь те, которые растут наиболее быстро: они отбирают соль у медленно растущих выпуклостей, в результате чего последние подавляются. Осуществляется отбор. Растущие выпуклости конкурируют за пространство и за массу соли. В процессе компромисса возникает структура с равномерным распределением соляных подушек-куполов. Расстояние между подушками («длина волны») – это характерный параметр системы. Он зависит от соотношения мощностей и вязкостей слоев. Данный механизм от бенаровского отличается отсутствием конвективной составляющей, но в обеих система стремится к структуре, обеспечивающей ей эффективное протекание энергопотока (вещества).

Возвращаясь к вышеприведенным примерам с участием механизма Бенара, подчеркнем еще раз, что мы сталкиваемся только со случаями, когда структурируется конвектирующий энергопоток разнородной природы, включая эмиссионную и тепловую составляющие, с флюидным носителем или без него, но вещество субстрата в конвекцию не вовлекается. В отличие от классических конвективных бенаров, восходящие струи структурированного эндогенного энергопотока сконцентрированы «в узоре кластера», т.е. по периферии ячеек, и редко в их центре. Форма таких «бенаров» может быть как шестиугольная (когда ярко определено доминирующее направление – тензор выравнивания термоградиента, – как правило, фиксирующее плоскостной, двумерный, фронт), так и пятиугольная (когда структурирование осуществляется в объеме): рис.4. На эту особенность «бенаров» одному из авторов указал член-корр. АН СССР проф. М.В.Волкенштейн еще в 1988 г.

Пример бенаровского узора позволяет понять природу структур связности в условиях термогравитационной неустойчивости и упорядоченной конвекции либо самого вещества в расплавленном (жидком) состоянии, либо флюидизированного энергопотока, возникающего при значительных градиентах температуры, давления и концентраций в релаксирующем (остывающем) массиве горных пород. И

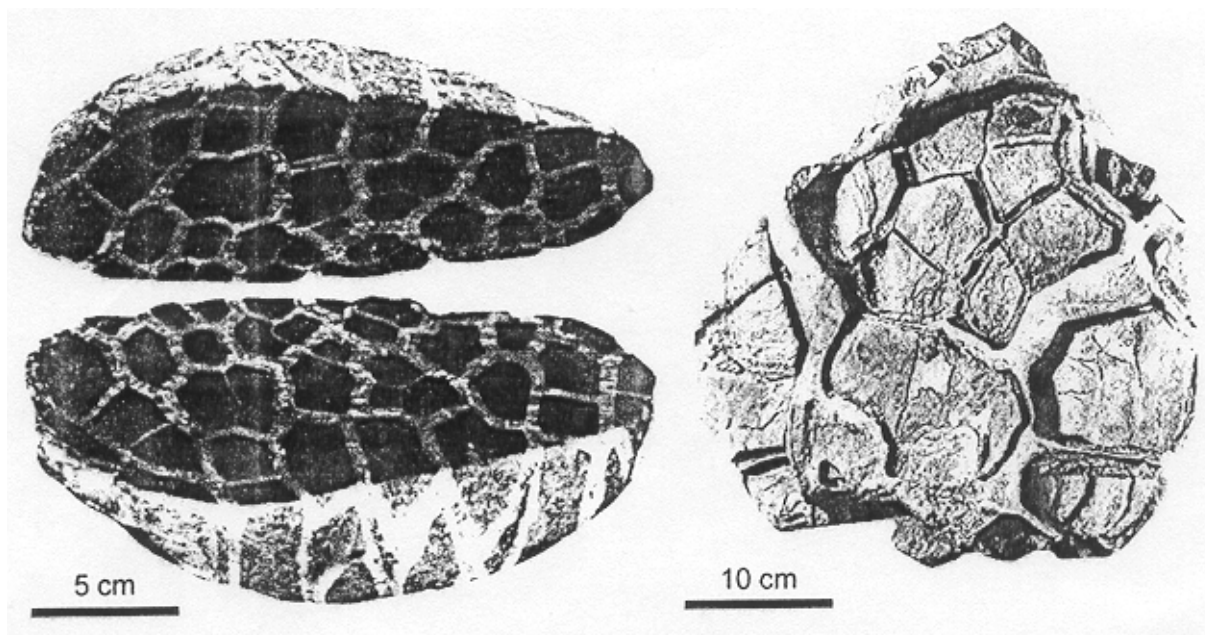


Рис. 4. Полигональная делимость глинистых известняков (Новый Афон, Сев. Кавказ).

хотя подавляющая часть перколяционных кластеров имеет иную, не конвективную природу, формируя связность по типу протекания сквозь тело со случайной пористостью, геодинамическое предназначение геологических «бенаров» как можно наиболее эффективно диссипировать эндогенную энергию, по сути, ничем не отличается от такового перколяционных структур литосферы.

#### Геологические перколяционные структуры

Рассмотрим несколько наиболее характерных примеров организации поверхностей тектонической делимости литосферы, отвечающей строению перколяционных кластеров. При подборе примеров мы руководствовались следующими соображениями. Во-первых, геологические объекты должны характеризовать максимально широкий геодинамический диапазон, что должно подразумевать здесь различную природу и энергонасыщенность перколирующего энергопотока. Во-вторых, в поле зрения должны оказаться объекты разнообразной генетической природы, в структурировании которых принимали участие энергопотоки с различными вкладами эмиссионной, тепловой, акустической и возможно иных составляющих. В-третьих, обозримый масштаб явлений должен включать максимально возможный диапазон, начиная от локальных и региональных и кончая планетарными уровнями. Все это ориентировано на то, чтобы проследить, что происходит со структурой тектонического пространства при переходе из одного в другой тип тектоносферных ансамблей. И главное: отвечает ли структурируемое пространство в разных условиях структурной организации теоретического перколяционного кластера и насколько.

Именно этот принцип рассмотрения разнохарактерных и разномасштабных примеров и позволил

увидеть в каждом довольно неожиданные и важные черты, о чем мы упомянули во введении.

Начнем с низкотемпературных структурно-вещественных ассоциаций.

**Карст.** Общераспространенной является точка зрения о том, что для образования карста необходимо совмещение как минимум трех условий: наличие карбонатных пород, агрессивной (насыщенной атмосферной углекислотой) воды и достаточно большого базиса эрозии. Но ведь и мощные известняковые толщи при огромном перепаде уровней воды (например, на Тянь-Шане) могут быть практически не затронуты карстом [26]. Понятно, что она никак не объясняет, например, и достаточно широкое распространение так называемого силикатного карста в не известковых породах (песчаниках и даже кварцитах, а также в некоторых гранитных пегматитах с их крупными полостями-занорышами). Области же современного карстообразования располагаются в районах с повышенной неотектонической активностью – устойчивой тенденцией к воздыманию со скоростями, способствующими накоплению в породах избыточных (нерелаксированных) напряжений. В процессе катастрофически быстрой релаксации последних непременно возникает система неоднородностей – перколяционная трещинная структура. В этих условиях вода становится агрессивной, но не в связи с обогащением атмосферной углекислотой: разрушение химических связей приводит к возникновению локальных избыточных эмиссионных потоков, которые повышают диссоциированность воды ( $H_2O + \bar{e} = H^{+1} + OH^{-1}$ ) подобно тому, как это наблюдается на форшоковой стадии землетрясений [27,28]. Именно с этим эффектом может быть связано появление целого ряда месторождений в палеокарсте.

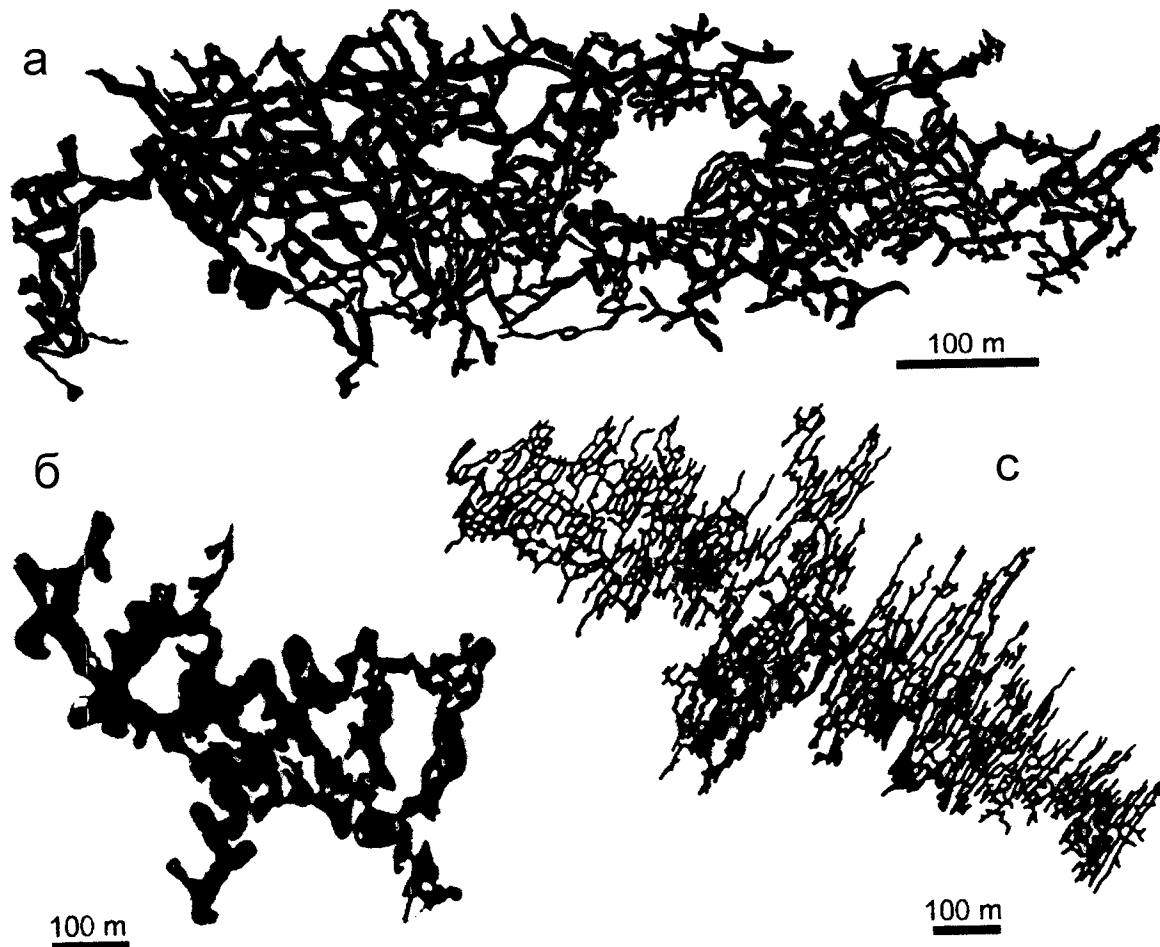


Рис. 5. Карстовые пещеры: (а) – Вертеба; (б) – Кунгурская Ледяная, (с) – Кристалльная [30].

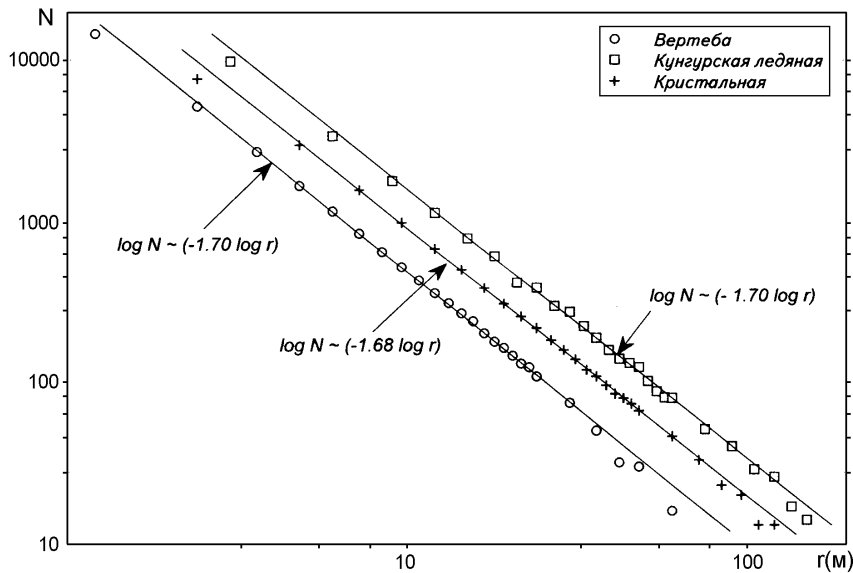


Рис. 6. Количество квадратных ячеек размера  $r \times r$ , потребовавшихся для полного покрытия карстовых структур на рис. 5, как функция  $r$ .

Картирование карстовых структур обнаруживает в них изумительное сходство с теоретическими перколяционными кластерами (рис.5). Более того, эти структуры характеризуются аналогичными статистическими особенностями (например, в них всегда присутствуют целики всех возможных размеров) и, независимо от географического положения и геологической обстановки, имеют близкие 2D фрак-

тальные размерности порядка 1.7 (рис.6). Полную 3D размерность данных структур можно приблизительно оценить по эмпирическому правилу Б.Мандельброта [29]: если множество  $\phi$  является произведением двух независимых фрактальных множеств  $\phi_1$  и  $\phi_2$ , то фрактальная размерность  $\phi$  равна сумме фрактальных размерностей множеств  $\phi_1$  и  $\phi_2$ . Соответственно, в нашем случае должно выполняться соотношение:

$${}^2D + 0.5({}^2D) \leq {}^3D \leq {}^2D + 1$$

т.е. 3D размерность карстовых структур лежит в пределах от 2.55 (в случае изотропного строения) до 2.7 (в случае строения, напоминающего «рудные столбы»). В первом, наиболее вероятном случае, мы



Рис. 7. Штокверк кварцевых жил в алевритах Верхоянья (по Б.Мельникову).

получаем размерность, идеально соответствующую таковой теоретического 3D-мерного перколяционного кластера. Таким образом, карстовое поле не может рассматриваться как пассивный отклик карбонатного субстрата на внешнее воздействие водных потоков. Это продукт самоорганизации динамической системы, или, как говорят, ее «собственная реакция», сопровождаемая неограниченной корреляцией и самоподобием ее компонентов.

**Рудные штокверки.** Между мотивом «рудных столбов», упомянутых в предыдущем разделе, и мотивом штокверков морфологических различий практически нет. Штокверк (рис. 7) – наиболее распространенный способ структурной организации рудных тел. Для их объяснения чаще всего привлекается идея наложенной деструкции на этапе регионального (планетарного-?) растяжения. Однако свести образование таких структур к схеме примитивного растяжения блоков не удастся: при первом же появлении трещин растяжения (отрыва, скола) дальнейшее образование системы разрывов должно немедленно прекратиться. Как было показано [26,31] мотив растяжения может быть реализован лишь в модели тектоно-кессонного эффекта, который единственный в состоянии обеспечить полнообъемное разуплотнение независимо от масштаба и от наличия растягивающих сил, сомнительный факт присутствия которых делает механизм примитивного растяжения скорее условным, чем реальным. Оно реализуется в блоках и массивах, испытывающих

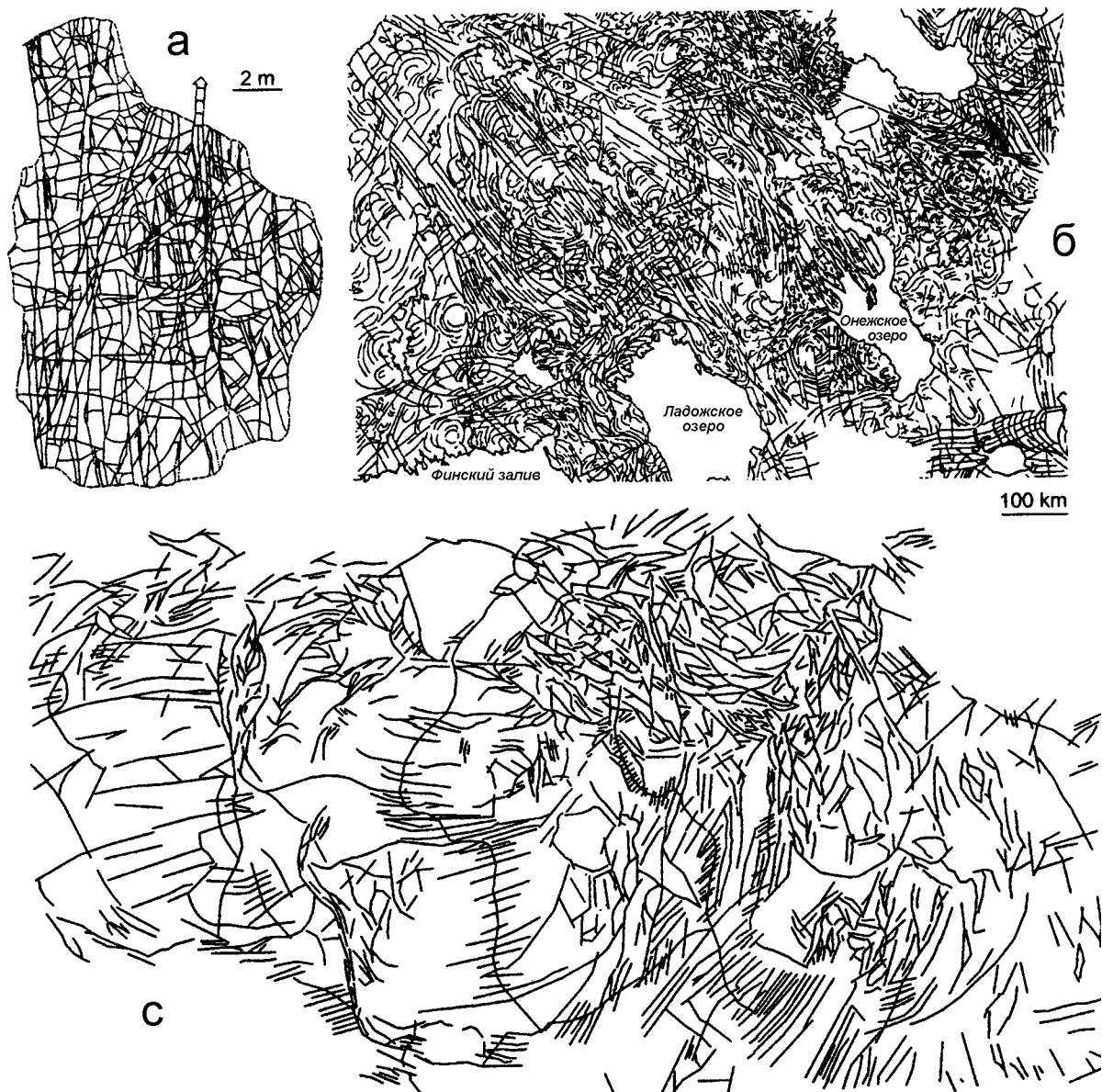
нерелаксируемую разгрузку от избыточных напряжений, сопровождающую воздымание массива или межблоковые подвижки. Таким образом штокверк – это характерная сеть самопроизвольной разгрузки, а не пассивный отклик на внешние механические воздействия. Важно отметить, что в организации штокверков четко выделяются два мотива: самоподобный способ организации блоковой делимости и «скоростной» характер разгрузки, о чем свидетельствует эксплозивно-подобный характер блоков-обломков (в мелкоразмерной части самоподобной блочной иерархии или объемных брекчий нескольких поколений [31]). Истечение избыточного энергопотока по системе делимости штокверка приводит к тому, что она становится контролирующей для минеральных ассоциаций - продуктов высокотемпературных реакций или легко мобилизуемых продуктов дифференциации, вызванной нестабильностью. Породные массивы могут нести, как только что указано, признаки нескольких поколений объемной разгрузки, выражающиеся в пространственном совмещении нескольких штокверковых сетей. Крайне важно подчеркнуть, что последние, несмотря на разновозрастность контролируемых ими вещественных ассоциаций, сохраняют единый мотив заполнения пространства. Как отмечалось выше, эти структурно-вещественные и организационные особенности штокверков свойственны и перколяционным кластерам, что легко подтверждается анализом конкретных рудных штокверков.

В проблеме рудных штокверковых сетей как производных перколяции появляется новый и крайне важный аспект. Он связан с необходимостью считать таким важным свойством сети, как фрактальность и самоподобие, характеризующие признаки дальнего порядка, а также коррелированность компонентов состава и узора, неограниченную масштабами или привязкой к тому или иному участку в пределах штокверковой сети. Эти важные свойства – продукт собственной реакции субстрата на вызванную воздействием энергопотока извне, а никак не пассивный отклик. В изучении и последующей трактовке штокверков доминирует геометрический анализ направлений трещин, связанных с последовательным наложением одной на другую. Применительно к фрактальным штокверкам это было бы равносильно тому, как если пытаться выявить системы линий на узоре голландского кружева 16 века для его исчерпывающего описания: системы линий при этом, безусловно, выявятся, но пропадет прелесть законченного шедевра – т.е. целого.

Затронутая тема имеет продолжение в следующем разделе.

**Регматическая разломная сеть.** Появление планетарной разломной сети большинство исследователей связывает с напряжениями либо ротационной природы, либо с локальным перераспределением напряжений при тектонических движениях. Обычно эту сеть привязывают к двум, как это делал





**Рис. 8.** Разномасштабные разломные (линеаментные) структуры: (а) – Yucca Mountain, Nevada [42]; (б) – Карелия [37,38]; (с) – вся Земля.

автор термина «регматическая сеть» Р.Зондер [32] или четырем (реже – к шести и более) сериям систематических направлений относительно меридианов и параллелей [33], образующим, согласно популярному мнению, в некоем ротационном поле системы диагональных и ортогональных направлений [34,35].

На большинстве специальных карт линеаментная сеть предстает как нечто регулярное, как система орто- или косоугольно ориентированных весьма протяженных линий [34,36], для которых предусмотрена не всегда очевидная роль тектонических нарушений, разломов глубинного типа. Однако, реальная разломная сеть далека от подобного совершенства [37-41] – обычно это разнопорядковая система делимости с хаотической или слабо выраженной анизотропной организацией (рис.8). Наша оценка фрактальной размерности разномасштабных

регматических сетей подтверждает их самоподобие и близость к перколяционным кластерам (рис.9).

Повторим, что это заключение вполне согласуется с выводом о самоподобной иерархии блоковой делимости Земли, который сделан М.А.Садовским [6]. Он связывает такую тектоническую делимость литосферы с проявлением неограниченной когерентности (иначе – дальнего порядка) в структурной организации тектоносферы. Последняя в таком случае обусловлена «необходимостью» эффективно диссипировать эндогенную энергию. На это, в частности, указывают фрактальный характер гипо- и эпицентров землетрясений и сопоставимые с ним фрактальные размерности тектонической делимости [41-45]. Активная тектоническая разгрузка по сети линеаментов установлена для разномасштабных структур: планетарной сети в целом, субконтинентальной сети в Северном Китае, региональной сети в районе Ашхабада [46].

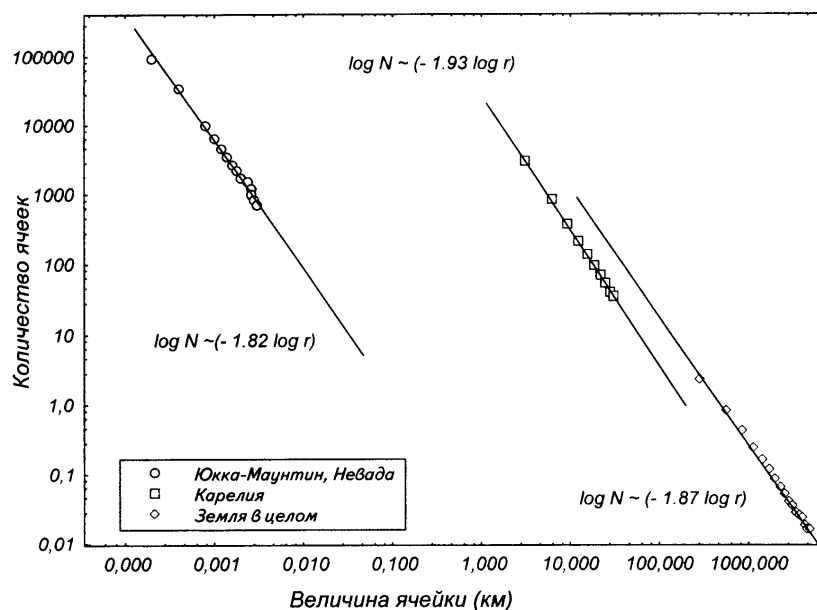


Рис. 9. Количество квадратных ячеек размера  $r \times r$ , потребовавшихся для полного покрытия линементных сетей на рис. 8, как функция  $r$ .

Тем не менее, в большинстве работ по данной проблеме по умолчанию принимается версия о том, что регматическая сеть – это продукт *пассивной* (или *вынужденной*) реакции литосферы на воздействие внешних (изменение ротационных параметров и т.п.) или эндогенных сил и процессов, порой нескольких – разновозрастных и разноориентированных [45]. Хотя при наличии уже существующей довольно плотной сети трещин возникновение новой глобальной системы вряд ли реализуемо – при релаксации, скорее всего, будет использована уже существующая сеть. Таким образом, сомнения, вызванные расхожим мнением о некорректности использования оценок параметров порядка с помощью фрактальной размерности для разновозрастных разломных сетей, следует развеять. Так, было установлено, что фрактальная размерность сейсмической структуры литосферы (современная перколяционная сеть), тектонических перколяционных кластеров Хибинского массива (палеозойская сеть) и структурного узора архейских ансамблей одинакова [3,4,48]. Т.е., как и было отмечено выше, энергопоток перколируют через единожды возникшую сеть. Последняя может эволюционировать не по пути зарождения все более новых систем трещин, а скорее по пути залечивания старых, при сохранении основных параметров ее порядка.

**Тектонические перколяционные кластеры Хибинского массива.** Геодинамический смысл перколяционного процесса может быть успешно проиллюстрирован на примере Хибин – крупнейшего массива нефелиновых сиенитов центрального типа. В тектоническом плане массив представляет собой ярко выраженную иерархическую структуру, образованную вложенными друг в друга разномасштабными блоками. Массив довольно активно воздымается относительно окружающих территорий со скоростью до 1.0-1.5 мм в год [24,49], поставляя к поверхности не успевающие релаксировать блоки. Процессы разгрузки избыточных напряжений про-

исходили в массиве всегда: начиная от этапов формирования дифференцированной породной иерархии и кончая процессами современного минералообразования, в частности – возникновением штокверковой сети растворимых карбонатов натрия в наиболее монолитных блоках горной породы. По своей геометрии зоны содовой минерализации более всего соответствуют перколяционным кластерам, развитие которых осуществляется в рамках конической зоны, совпадающей с границей апатито-нефелиновых пород с уртитам и нефелиновыми сиенитами. Полная фрактальная размерность содовых кластеров лежит в пределах 2.4-2.5 и по сути совпадает с размерностью теоретического 3D-перколяционного кластера [50].

Характерной особенностью поля напряжений Хибинского массива является 3-5 кратное превышение горизонтальной составляющей (30-80 МПа) над вертикальной (9-12 МПа) [51]. Поэтому, в качестве модели трещинообразования можно использовать одноосевое (по вертикальной оси) «растяжение»<sup>1</sup> твердой среды. Фрактальные и топологические свойства образующихся в этом случае трещин детально рассмотрены в работе [9], где посредством численного моделирования были получены двумерные фрактальные кластеры, фрактальная размерность которых лежит в пределах от 1.51 до 1.67.

Уместно еще раз напомнить, что образование самоподобных иерархических структур в среде, в которую постоянно подкачивается энергия, способствует ее наиболее эффективной диссипации [16,52,53], и именно поэтому геометрические фрактальные структуры часто представляют собой продукты нелинейных хаотических процессов в диссипативных системах. Это позволило нам предположить, что первопричиной возникновения рассматриваемых фрактальных перколяционных зон является тектоническая самоорганизация горных пород в приповерхностных частях «всплывающего» Хибинского массива. Необходимо также указать на довольно четкую пространственную ассоциацию зон развития содовых минералов с продуктивной толщей [29,54]. Иначе говоря, имеет место повторяемость процессов тектонической самоорганизации с их затуханием по мере становления массива, причем

<sup>1</sup>кавычки призваны означать некую общепринятую, но достаточно условную схему (см. выше); речь скорее всего должна идти о предпочтительном направлении объемного разуплотнения.

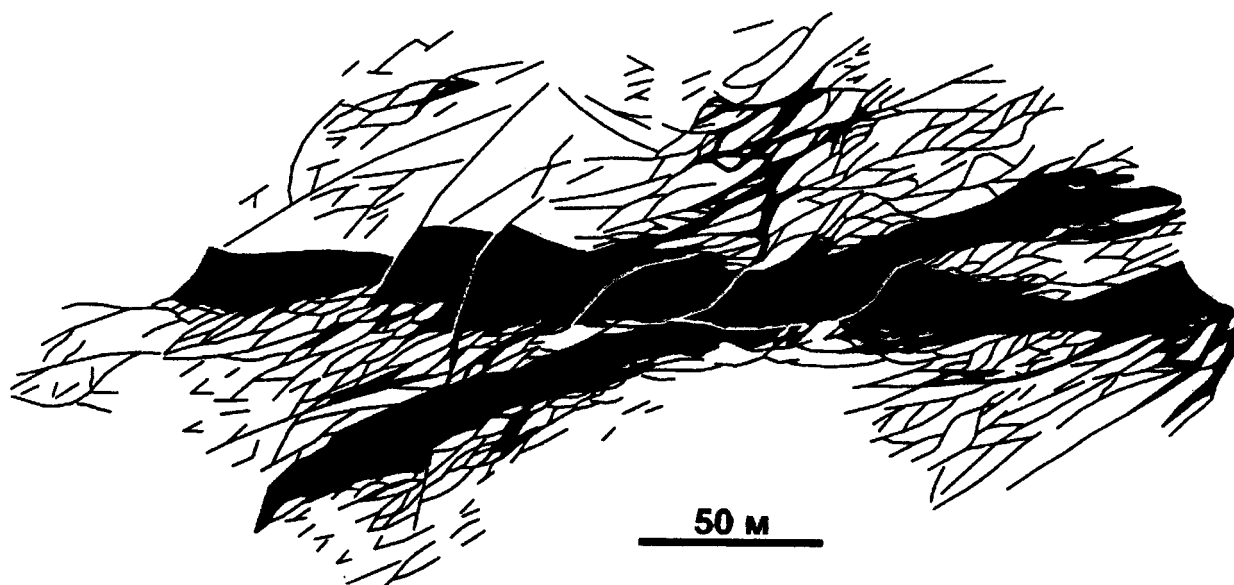


Рис. 10. Амфиболито-лептитовый ансамбль Снежницкой зоны, восточное побережье Кольского полуострова (черное – амфиболиты).

и древние, и современная перколяционные сети пространственно совмещены. Речь может идти о своеобразной структурно-вещественной популяции: родственные, но разновозрастные ансамбли рождаются и умирают, сменяясь более молодыми, формируя, как и положено, устойчивые пространственные ареалы. Не остается сомнений в том, что мотив самого позднего перколяционного кластера отражен и в структуре самых ранних членов упомянутой популяции – апатитовых месторождениях. Это может существенно изменить представление как о генезисе и геодинамике апатиторудного процесса, так и геометрии рудных тел.

**Докембрийские гранито-зеленокаменные области.** Одним из наиболее ярких примеров фрактальных линзовых структур является Снежницкая метабазитовая зона на Кольском полуострове [3,55]. Крупное линзовидное тело роговообманковых плагиоамфиболитов залегает среди кислых гнейсов-лептитов. Амфиболиты вместе с вмещающими кислыми породами района объединяются с конца 30-х годов в осадочно-метаморфический комплекс Поной-Качковка-Снежница. При этом сами амфиболиты ряд геологов считают вулканитами. В одних схемах кислые породы – субстрат, а основные слагают грабены в них, в других – наоборот, это секущие микроклиновые граниты. На самом деле ни одного случая секущего залегания этих “гранитов” не установлено. Да и сами “микроклиновые граниты” оказались довольно странными породами, в которых до 90%  $\text{SiO}_2$  (кагуситы -?). В них слабо выражена гнейсовидность, а зернистость в среднем не превышает 0,2-0,3 мм, что отвечает классическим лептитам или даже геллефлинту. И грабенов, конечно же, также нет: согласно залегающие лептиты и амфиболиты формируют перемежающиеся полого залегающие пакеты.

Более информативным в данном примере оказался не разрез комплекса, а его план, который был

отснят на полуинструментальной основе (рис.10). Оказалось, что амфиболиты (45-52%  $\text{SiO}_2$ ) образуют вовсе не грабены, а довольно крупные линзовидные тела-вкладыши до 300-400 м мощностью в лептитах (или наоборот, лептитов в амфиболитах). В районе отсутствуют типичные гранитизационные явления: мигматиты, пегматиты. Небольшие согласные тела лептитов-геллефлинта, визуально весьма сходные с кремнистыми, даже яшмоидными породами и обычно за них принимаемые, переполняют разрез сланцеватых амфиболитов. И, наоборот, в лептитах обычны маломощные меланократовые прокладки биотитово-роговообманковых сланцев, которые показывают, что сами лептитовые вкладыши, в свою очередь, состоят из множества линз. Они составляют узор из сочетания караваеподобных, чечевицеобразных тел размером 1,0-2,2 x 3,0-5,0 м.

В сечении *ab* четко предстает уже знакомый профиль линз. У всех линз в этом сечении проявлена каплеобразная форма: утолщенная часть обращена вверх по восстанию сравнительно пологой структуры ( $20-40^\circ$ ), как бы в направлении транспорта.

Таким образом, в рассмотренном ансамбле из контрастно сочетающихся амфиболитов и лептитов отмечаются:

субординация линзовых пакетов одной группы пород в другой, причем ни та, ни другая группа не является секущей;

характерная каплеобразная форма линз (аэро- или гидродинамический профиль крыла), что могло быть характерно для потоков;

признаки того, что своеобразное структурирование недифференцированных базитовых серий связано с зарождением первичного (для данной зоны) сиалического вещества.

Этот структурно-вещественный комплекс фрактален, причем 2D-размерность амфиболитовой «сети» –  $1.73 \pm 0.02$  – опять определяет 3D-

размерность, близкую таковой трехмерного перколяционного кластера [3,48].

Рассмотренный пример перколяционного кластера показывает, что ансамбль зародился и самоорганизовался в потоке (линзы с профилем крыла), что все «участники» ансамбля – метабазиты и гранитоидные породы (лептиниты) образуют равноправную, внутренне согласованную ассоциацию. Данный пример дает понять кроме того, что коровый процесс – это и не гранитизация базитовой, и не базификация гранитной коры. Сущность процесса – дифференциация вещества в мощном эндогенном перколяционном потоке.

Точно так же организована линзовая иерархия в комплексе так называемых кольских гнейсов, где узор определяется сочетанием ядер из кислых гнейсов и более контрастного обрамления из пород полосчатой железорудной формации [2-5]. Но точно такой же тип структурного узора характерен и для других контрастных ультраметаморфических комплексов, например, для блока Йиллгарн [55], да, по-видимому, для всех древних комплексов, содержащих полосчатые железорудные формации [3].

В рассмотренных выше типах перколяционных структур выход энергопотока осуществляется по контрастным швам. Ось перколяционного шва фиксируется самым дифференцированным разрезом, в последнем случае – железистыми кварцитами, породами, бескислородная часть которых почти на 100% состоит из двух элементов. Причем в перколяционном потоке оказались «отобранными» элементы, атомные массы которых относятся как 2:1 (56:28). Поэтому в них может происходить не только высокотемпературная дифференциация вещества, объясняющая, почему именно в них сосредоточена наиболее контрастная часть дифференцируемого вещества, а не контрастная, обычно более «кислая», занимает ядра ячеистой иерархии. Физическая природа энергопотока может быть таковой, что в нем благодаря вкладу мощного эмиссионного фактора дифференциация вещества заходит значительно глубже: в ней могут участвовать ядерно-резонансные процессы [3].

О динамике таких процессов свидетельствуют разрезы полосчатых железорудных формаций [56]. Для них характерны эффекты завихрения, свойственные приповерхностным частям листрических зон, сопровождаемые волнообразными изгибами, своеобразной «вибрацией». Структура здесь существенно усложняется; железистые кварциты диспергируются и «выплескиваются» из основного линзовидного тела. Сечение рудной линзы в ее верхней части напоминает профиль штормовой волны с характерным запрокинутым, порой сорванным, как бы надвинутым, пенным гребнем. «Надвиги» же, таким образом, оказываются частью, необходимым дополнением всего ансамбля, а не каким бы то ни было независимым (наложенным) элементом, который мог быть связан с более поздней деструкцией.

Подобный «выброс» массы с характерной «надвиговой» морфологией вблизи поверхности может быть уподоблен появлению опережающего волнового гребня, сопровождающего солитоны (уединенные волны, вызванные мощными ударными возмущениями волновой среды и незатухающие вследствие нелинейности среды). Общий структурный узор ансамбля на поверхности (диспергированные, вихреобразные структуры, напоминающие гребни волн) это отчетливо подтверждает. И если в зоне зарождения волна незаметна, то вблизи поверхности, в зоне разгрузки (в зоне нелинейного возрастания ее скорости), появляется опережающий гребень и происходит выброс, фиксирующий фронт уединенной волны. В рассматриваемом случае мы могли встретиться со своеобразным «тектоническим цунами», сопровождающим субвертикальную зону тектонической перколяции, где скорость сейсмических волн резко возрастают за счет того, что волна проходит в активной среде – горных породах с огромным запасом энергии [15]. Кстати, подобный эффект зафиксирован нами в образцах уртитов, извлеченных из напряженных участков Хибинского массива [50].

Не оставляет сомнений, что структура литосферы в целом также вполне отвечает строению перколяционного кластера, как это и было предсказано М.А.Садовским с коллегами в упоминавшихся работах. В качестве еще одного примера приведем хорошо известный сейсмический профиль группы BABEL через Ботнический залив от Аландских островов до Веннеса [57]. Он является весьма примечательным в плане подобия выявленных сейсмических неоднородностей строению реальных горнопородных комплексов, поскольку отчетливо демонстрирует не только линзовый мотив структуры, но и иерархию линз низшего порядка по отношению к тактовому высшему. Фрактальная размерность этой структуры равна 1.47; вкратце простирая ее строение скорее всего существенно не изменится, и размерность трехмерной фрактальной среды также будет близка к 2.5 [4,48].

Таким образом, не только морфология, но и степень заполнения пространства практически идентична для современных и древнейших перколяционных зон, для поверхностных геологических и глубинных «сейсмических» комплексов, что говорит о когерентности процессов самоорганизации литосферы на удивительно широком интервале времени (до 2,8 млрд. лет) и масштабов (от минерального зерна до литосферы в целом). По существу можно вести речь о конкретном геологическом наполнении понятия «дальний порядок» для тектонических ансамблей литосферы. Соответственно, необходимо обратить более пристальное внимание на взаимную когерентность большинства компонентов структурных ансамблей, как на одно из главных свойств сложных систем. Прежде всего это важно при построении различных кинематических схем,

так как в этом случае встает вопрос о корректности любых масштабных координатных тектонических и геодинамических реконструкций, основанных на идее накопления деформаций со временем. Тектоническая самоорганизация перколяционного литосферного процесса такой сценарий не приемлет.

#### **Замкнутые рудные пояса и рифтовые зоны.**

Если рассматривать современную рифтовую систему Земли как остов перколяционной структуры литосферы, то становится очевидным, что ее более древними, прежде всего архейскими, аналогами являются гранито-зеленокаменные, в том числе гранито-железородно-зеленокаменные пояса (см. выше), а затем и так называемые замкнутые рудные пояса. Очевидно, что самоструктурирование архейской литосферы, как впрочем, ее более молодых производных – это ее своеобразная адаптация к довольно резко возросшей нестабильности, к увеличению плотности эндогенного энергопотока. Современная океаническая рифтовая система, внутриконтинентальные рифты и авлакогены, замкнутые рудных пояса платформ, сеть зеленокаменных поясов на древних платформах и щитах, планетарная регматическая разломная сеть – вот возможный иерархический ряд структур постоянно эволюционирующей во времени перколяционной системы Земли, распределяющей эндогенный энергопоток и определяющей его плотность в разных частях названного ряда.

#### **Перколяционная модель тектоносферы – альтернатива координатных реконструкций?**

В итоге приведенные выше сведения о перколяции эндогенной энергии свидетельствуют, что контрапунктом геологической эволюции тектоносферы является *устойчивость (гомеостазис) ее структурного макроузора при непрерывно активной динамике на микроуровне*. Это и составляет главный физический (геодинамический) смысл геологической самоорганизации – постоянного усложнения, упорядочения, дифференциации в структурах тектоносферы. Такое понимание, однако, не освобождает нас от необходимости отвечать на вопросы о причинах тектонических движений, а значит, и о принципах реконструкций и тектонического анализа в целом. Не освобождает, в частности, от решения проблемы складчатости, которую традиционно считают пассивным откликом осадочной латерали на внешнее сжатие или сдвиг, допускающие относительное перемещение как минимум пары жестких блоков, не согласованное (!) с движениями остальных блоков и не требующее соблюдения правила масштабного самоподобия. Что, понятно, не соответствует морфологическим признакам самоструктурирования и дальнего порядка (см. выше) и, казалось бы, по-прежнему дает простор всевозможным структурно-координатным реконструкциям, в осно-

ву которых заложена идея значительных блоковых перемещений.

Но в другом сценарии складки – это собственная реакция системы в ответ на *неспецифическое* воздействие внешних сил. Только в этом случае в системе формируется дальний порядок, т.е. такая структурная организация, которая напрямую не зависит ни от места приложения сил, ни даже от их ориентировки (!), и в которой формируется совместное, кооперативное поведение подсистем (вплоть до молекул), ответственное за возникновение макроупорядоченности. Собственно говоря, складки в таком механизме – это овеществленные автоволны с характерными для них разномасштабными модами и отсутствием признаков хаотизации вещества при образовании узора [3,58].

В последнее время решение проблемы глобальных источников тектонической динамики, как уже упоминалось, пытаются связать с упорядоченной мантийной конвекцией [22]. Но если признать наличие последней, то следом надо было бы немедленно признавать, что возникновение тектоносферных ансамблей осуществлялось благодаря активной динамике и согласованному режиму на более детальном (“микро-”) уровне. В таком режиме какая-либо возможность совершить несогласованное “автономное плавание” по астеносфере у планетарных блоков (континентов) должна отсутствовать совершенно: нельзя изъять отдельную ячейку из структуры Бенара, так как в условиях когерентной динамики она мгновенно перестроится с сохранением прежнего стиля (это проявление уже упоминавшегося гомеостазиса – эволюционного консерватизма!). Кроме того, следует четко понимать, что любые координатные реконструкции в условиях проявления когерентной динамики некорректны – независимые (автономные) изменения координат у структур и их элементов маловероятны, а скорее вообще невозможны. В условиях когерентной динамики в нелинейной динамической среде любые построения типа автономных движений блоков относительно друг друга лишаются физического (геодинамического) смысла.

Становится очевидным, что общепринятая схема развития подвижных зон, от ранних этапов (растяжения и заполнения) до завершающих (сжатия, складчатости, финального магматизма и метаморфизма), структурной организации тектоносферы не отвечает. В условиях активной (закритической), нелинейной динамики самоорганизующаяся система выбирает такой эволюционный сценарий, который обеспечивает ее гомеостазис (стационарность). Для системы в этом состоянии невероятно вернуться назад и выбрать для себя какое либо иное будущее. Она не может вначале испытать стадию активного растяжения и затем столь же активного сжатия. Очевидно, что совмещение этих прямо противоположных тенденций и процессов должно было бы осуществляться только в одном сценарии, естест-

венным фоном которого на всем протяжении было растяжение (как следствие непрекращающейся эндогенной разгрузки). В этом контексте трехкратный (а по некоторым версиям, – и четырехкратный) распад и воссоединение Гондваны, порой с фантастически точным совпадением начала и конца цикла, выглядел бы как сюрреалистические эпизоды.

В работе [56] показаны три стадии цикла Вильсона развития перколяционной зоны (типа рифта, “геосинклинали”). На стадии (I) перколяционный энергопоток вызывает обновление океанического ложа, формируется рифт с бассейнами (впадинами). На стадии (II) последние заполняются осадками, вулканами, энергопоток распределяется не столь равномерно, и “находит” выходы, нередко сопровождаемые магматами. Наконец, на стадии (III) рифтовая долина (впадина) “зарастает” – заполняется вулканогенно-осадочными и магматическими формациями. На заключительной стадии цикла Вильсона перколяционный поток уже не имеет свободного выхода, форма которого часто становится точечной (“горячие точки”). Прорыв энергопотока сопровождается тектоническим тремором, вызывает ударные возмущения, приводящие к волновым и автоволновым явлениям, в том числе и типа уединенных волн (солитонов), тектонических цунами – выбросов на пририфтовые борты рамы. С этими же процессами, осуществлявшимися в условиях концентрации перколирующего энергопотока, связаны и высокотемпературные метаморфические реакции. Эффект сжатия создавался на фоне продолжавшегося расширения (!), которое на заключительной стадии уже не могло компенсировать лавинного поступление материала с наиболее напряженных окраинных частей континента. Скорость заполнения перколяционного шва к заключительным фазам нелинейно возрастала относительно скорости его расширения.

Складчатость, метаморфизм и финальный магматизм окончательно “сваривал” перколяционный шов. Ячейка отмирала и зарождалась новая: всякий раз более крупная, чем ячейка предыдущего этапа [1]. В старой же могли формироваться (или нет) вторичные впадины (“орогены”) или пароксимальные зоны активизации (вовсе не автономной – таковые фактически крайне редки или вовсе отсутствуют в природе).

### Заключение

Остается подчеркнуть, что модель энергетической перколяции, проявленная в микро- и макроорганизации тектоносферных ансамблей, может придать новый импульс дальнейшим геодинамическим построениям, учитывающим три характернейших особенности тектоносферы: фрактальность среды, когерентное поведение подсистем, структурный гомеостазис ансамблей. Ни одно из современных тектонических направлений этих фундаментальных свойств не учитывает и таким материалом не владеет. Совершенно очевидно, что и в неомоби-

листских, и в фиксистских моделях эти свойства тектоносферных ансамблей не найдут своего применения, так как на их фоне идея пассивного структурирования не может найти корректного физического осмысления. Справедливости ради должны признать, что на модель планетарной перколяции можно попытаться «привить» идею эндогенного плюма, но тогда из обоснования первой следует исключить любые варианты с трактовками пассивного отклика вещества коры на воздействие мантийного плюма. Но это, на самом деле, означало бы кардинальный пересмотр концепции. Вопрос только в том, содержится ли в ней такой ресурс, такая возможность.

Перколяционная модель тектоносферы открывает принципиально новые возможности и для металлогенических построений, и для конкретного геологического прогноза.

*Благодарности.* Авторы выражают признательность А.В.Базай и В.Н.Яковенчуку, чье участие в разработке и обсуждении материалов дало нам возможность использовать ряд принципиально новых фактов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Горяинов П.М. О структурно-энергетической эволюции континентальной коры и некоторых металлогенических следствиях // ДАН СССР. -1986. -Т. 287, № 6. -С.1446-1451.
2. Goryainov P.M. Precambrian iron ore formations of the Baltic Shield and their role in structural-substantial arrangement of the continental crust // Ancient Banded iron formations (regional presentation). Theophrastus publication, S.A. Athens. -1990. -P.251-279.
3. Иванюк Г.Ю. Горяинов П.М., Егоров Д.Г. Введение в нелинейную геологию // Апатиты, 1996. -185 с.
4. Goryainov P.M., Ivanyuk G.Yu., Sharov N.V. Fractal analysis of seismic and geological data // Tectonophysics. -1997. -Vol. 269. -P.247-257.
5. Goryainov P.M., Ivanyuk G.Yu. On genesis of banded iron-formation of the Kola peninsula. Synergetic aspects // Theophrastus' contributions to advanced studies in geology. Vol. II. Theophrastus Publications A.E. Athens. -1998. -P.249-267.
6. Садовский М.А. Автомоделность геодинамических процессов // Вестн. АН СССР. -1986. -№ 8. -С.3-11.
7. Broadbent S.R., Hammerslay J.M. Percolation processes. 1. Crystals and mazes. Proc. Cambridge Philos. Soc. -1957. -Vol. 53. -P.629-641.
8. Де Жен П. Идеи скейлинга в физике полимеров. -М., 1982. -324с.
9. Caldarelli G., Castellano C., Vespignani A. Fractal and topological properties of directed fractures // Physical Review E. -1994. -Vol. 49, № 6. -P.2673-2679
10. Челидзе Т.Л. Методы теории протекания в механике геоматериалов. -М., 1987. -136 с.
11. Зосимов В.В., Лямшев Л.М. Фракталы в волновых процессах // Успехи физических наук. -1995. -Т.165, №4. -С.361-401.
12. Frey E., Täuber U.C., Schwabl F. Crossover from isotropic to directed percolation // Physical Review E. -1994. -Vol.49, №6. -P.5058-5063.

13. Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // ДАН СССР. -1979. -Т.247, № 4. -С.829-832.
14. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. -М., 1987. -101 с.
15. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Случайность и неустойчивость в геофизических процессах // Изв. АН СССР. Физика Земли. -1989. -№ 2. -С. 3-12.
16. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. -М., 1991. -96 с.
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч.1. -М., 1976. -584 с.
18. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах -М., 1979. -279 с.
19. Hallet V. Spatial self-organization in geomorphology: from periodic bedforms and patterned ground to scale-invariant topography // Earth-Science Reviews. -1990. -Vol.29. -P.117-130.
20. Krantz W.B. Self-organization manifest as patterned ground in recurrently frozen soil // Earth-Science Reviews. -1990. -Vol.29. -P.117-130.
21. Кравченко С.М. Мантийная конвекция с изменяющимся размером конвективных ячеек – вероятная динамическая основа тектоники плит // Синергетика геологических систем. -Иркутск, 1992. -С.73-74.
22. Кравченко С.М., Хаин В.Е. Модель расширяющихся мантийных конвективных ячеек // Науки о Земле на пороге XXI века. -М., 1997. -С. 95.
23. Петров О.В. Нелинейные явления термогравитационной неустойчивости и внутренние гравитационные волны Земли // Докл. РАН. -1992. -Т. 326, № 3. -С.506-509.
24. Wei Ch. and Ortoleva P. Reaction front fingering in carbonate-cemented sandstones // Earth-Science Reviews. -1990. -№29. -P.183-198.
25. Талбот К., Джексон М. Соляная тектоника // В мире науки. -1987. -№10. -С.40-50.
26. Горяинов П.М. О геодинамически необычных обстановках осадочного породо- и рудообразования в связи с проявлением тектоно-кессонного эффекта // Литология и полезные ископаемые. -1983. -№ 5. -С.47-60.
27. Тыминский В.Г. Геохимические предвестники землетрясений // Природа. -1979. -№2. -С.46-47
28. Ибрагимова Т.Л. Некоторые особенности проявления гидрогеохимических предвестников землетрясений // Узбекский геол. журнал. -1987. -№ 2. -С.18-21
29. Mandelbrot B. The fractal geometry of nature // San Franc., W.H.Freeman. -1983. -461p
30. Дублянский В.Н., Илюхин В.В. Крупнейшие карстовые пещеры и шахты СССР. -М., 1982. -137 с.
31. Горяинов П.М., Давиденко И.В. Тектоно-кессонный эффект в массивах горных пород и рудных месторождений - важнейшие явления геодинамики // ДАН СССР. -1979. -Т.247, № 5. -С.1212-1215
32. Sonder R. Mechanic der Erde. -Stuttgart, 1956.
33. Шульц С.С. Планетарная трещиноватость (основные положения) // Планетарная трещиноватость. -Л., 1973. -С.3-37
34. Тяпкин К.Ф. Проблемы изучения разломно-блоковой тектоники докембрия с позиции новой ротационной гипотезы формирования структур в земной коре // Геологический журн. -1977. -Т.37, вып.6. -С.3-17.
35. Тяпкин К.Ф. Формирование геосинклиналей с позиций новой ротационной гипотезы структурообразования // Геологический журн. -1980. -Т.40, вып.6. -С.1-9.
36. Баржицкий В.В. Космогеологическая карта Балтийского щита (Мурманская обл. и Север Карельской АССР) // Киев, 1988. -86 с.
37. Шерemet О.Г., Моралев В.М. Использование кластерного анализа при цифровой обработке линейных сетей, выявляемых по космическим снимкам // Исследование Земли из космоса. -1993. -№ 3. -С.71-83.
38. Васильев Л.Н., Качалин А.Б., Моралев В.М., Терехов Е.Н. Фрактальные перколяционные кластеры в сети линейных элементов, выявленных по космическим снимкам, и тектоническое районирование восточной части Балтийского щита // Исследование Земли из космоса. -1994. -№ 5. -С.39-50.
39. Васильев Л.Н., Качалин А.Б., Моралев В.М., Терехов Е.Н., Тюфлин А.С. Мультифрактальность плотности линейных элементов (на примере Кольского полуострова) // Исследование Земли из космоса. -1996. -№ 2. -С.25-32
40. Зыков Д.С. Трещиноватость и этапы становления экстрезии “Экспедиция” (вулкан Безымянный, Средняя Камчатка) // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. -1988. -№6. -С.47-55.
41. Nanjo K., Nagahama H., Satomura M. Rates of aftershock decay and the fractal structure of active fault system // Tectonophysics. -1998. -Vol.287. -P.173-186.
42. Turcotte D.L. Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge University Press. -1992. -220 p.
43. Robertson M.C., Sammis C.G. Fractal analysis of three-dimensional spatial distributions of earthquakes with a percolation interpretation // J. Geophys. Res. -1995. -Vol. 100, №B1. -P. 609-620.
44. Шерман С.И., Гладков А.С. Фракталы в исследовании деструктивных зон литосферы и сейсмичности // Структурные парагенезы и их ансамбли. Матер. совещ. -М., 1997. -С.197-199.
45. Nagahama H. Fracturing in the solid Earth // Sci. Reps. Tohoku Univ., 2<sup>nd</sup> ser (Geol). -1997. -Vol.61. -P.103-126.
46. Полетаев А.И. Линейная делимость земной коры // Общая и регион. Геология и геология морей и океанов; геол.картирование. -М., 1994. -44 с.
47. Буртман В.С. Стационарная сеть разломов и мобилизм // Геотектоника. -1978. -№ 3. -С. 26-37.
48. Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю., Шаров Н.В. Фрактально-геометрические мотивы в организации сейсмогеологических разрезов земной коры (на примере Балтийского щита) // Изв. РАН. Физика Земли. -1997. -№ 7. -С. 69-80
49. Кузьмин И.А., Кременецкая Е.О., Тряпицын В.М. и др. Землетрясения в Хибинах в ноябре-декабре 1993 года. -Апатиты, 1994. -9 с.
50. Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю., Яковенчук В.Н. Тектонические перколяционные зоны в Хибинском массиве // Изв. РАН. Физика Земли. -1998. -№ 10. -С.822-827.
51. Сырников Н.М., Тряпицын В.М. О механизме техногенного землетрясения в Хибинах // Докл. АН СССР. -1990. -Т. 314, № 4. -С. 830-833.
52. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. -М., 1990. -336 с.
53. Мандельброт Б. Фракталы и турбулентность; аттракторы и разброс // Странные аттракторы. -М., 1981. -С.47-57.
54. Хомяков А.П. Минералогия ультраапатитовых щелочных пород. -М., 1990. -200с.
55. Горяинов П.М., Балабонин Н.Л. Структурно-вещественные парагенезисы железных руд докембрия Кольского полуострова. -Л., 1988. -144 с.

56. Горяинов П.М. Линзы и линзовые ансамбли архейских тектонических систем // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. Геология. -2000. -Вып. (5)10. -С.21-37.
57. The BABEL Project. First status Report. Edited by R.Meissner, D.Snyder, N.Balling, E.Starosta. Comission of the European Communities. -Brussel, 1992. -155 p.
58. Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю., Егоров Д.Г. К построению синергетической модели железистых кварцитов докембрия (на материалах по железорудным формациям Кольского полуострова) // Геология и геофизика. -Т.38. -С.1490-1496.