ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2016, № 5, с. 21–37

ТЕОРИЯ И СОЦИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ГЕОГРАФИИ

УДК 639.3

ТЕРМОСТАТИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ГЕОГРАФИИ

© 2016 г. Ю.Г. Пузаченко

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова, Москва, Россия
e-mail: jpuzak@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2015 г.

Рассмотрены общие представления неэкстенсивной статистической механики как теоретической основы для исследования динамических, самоорганизующихся систем. Ретроспективный анализ показывает, что в ходе эколого-географических исследований были установлены эмпирические законы, являющиеся ее прямыми следствиями. Общность теории и ее эмпирическое подтверждение позволяет рассматривать неэкстенсивную термостатику как важную теоретическую основу фундаментальных эколого-географических исследований, открывающую новые возможности для физической интерпретации изучаемых процессов.

Ключевые слова: неэкстенсивная статистическая механика, термодинамика, ранговое распределение, энтропия, свободная энергия, эксергия, информация, экология, география, науки о земле, ландшафтный покров.

Введение. Исследователь, строящий стратегический план, который определяет его действия на ближайшие 25 и более лет, неизбежно анализирует историю развития научного знания и порождаемые этим развитием неопределенности. Их взаимосвязанный обозримый перечень определяет область его будущих действий. Область деятельности в будущем определяется настоящим и прошлым, но во времени она прогрессивно расширяется, включая в себя новые явления, отношения и знания. История науки показывает, что сколь бы не абстрактна была сфера, в которой работает исследователь, в конечном итоге он вносит вклад в решение общечеловеческой задачи: повышения независимости человечества от обратимых и необратимых изменений среды.

Мировая наука в целом есть огромный статистический ансамбль множества ученых, деятельность которых определяется самыми различными социально-экономическими и гносеологическими мотивациями. Гносеологические мотивации, любознательность и интерес к предмету, определяющие удовлетворение от понимания непонятного, иначе говоря, от устранения неопределенности, поддерживаемая комфортностью от взаимодействия с объектом исследования, является основой научной деятельности, в то время как социально-экономические мотивации можно рассматривать как необходимые условия ее поддержания, ограничения и стимулирования. Исследователь, занимающийся “своим делом” при всех подстерегающих его неудачах и локальных проблемах, ощущает общую удовлетворенность своей жизнью. Гносеологическая мотивация сама по себе определяет неизбежную траекторию движения статистического ансамбля в область расширения знания и неизбежного его использования для жизнеобеспечения человечества.

Процесс научного познания можно рассматривать в терминах статистической механики открытых систем. Однако очевидно, что в нем можно выделить некоторые относительно устойчивые траектории (аттракторы), нарушающие идеальную случайность стохастических моделей. Вместе с тем, нельзя утверждать существование полной преемственности научных знаний. Многие открытия были забыты на десятки лет и фактически переоткрыты заново, или остались вообще забыты. Достаточно часто движение научной мысли шло по ложным путям. Именно поэтому исследователь стремится максимально точно позиционировать себя в системе существующего научного знания, стремясь обосновать выбор наиболее надежного и приоритетного направления своей активности.

Наши американские коллеги в начале XXI в. провели активную работу по определению направлений и условий развития науки на ближайшее будущее [54]. Выделенные ими приоритетные направления – это в основном безусловно важные предметные области, но они практически не затрагивают теоретические основания научного знания. Однако в рамках программы географических и пространственных наук Национального научного фонда США (The Geography and Spatial Sciences (GSS) Program of the U.S. National Science Foundation (NSF)) особое внимание уделяется фундаментальным инновационным исследованиям, открытиям, использованиям новых технологий, а также междисциплинарным исследованиям [50]. Хотя любая теория, сколь бы современна она не была, не может исчерпывающе охватывать реальность, однако опора на нее делает взаимодействие с природой более содержательным, позволяя ставить исследования таким образом, чтобы они верифицировали существующие теоретические представления и позволяли выделить то, что не укладывается в рамки теории и потому наиболее интересно. При этом, конечно, желательно, чтобы теория, положенная в основу исследования, успешно обобщала существующие эмпирические законы.

Целью предлагаемой статьи является доказательство перспективности фундаментальных исследований, опирающихся на теорию современной термостатики в ее тесной связи с теорией динамических систем, рассмотренной ранее [18] в рамках геодинамического ландшафтоведения – естественного направления физической географии, изучающей механизмы пространственно-временной динамики и организации ландшафта и его компонентов.

Общие эмпирические основания формулировки фундаментальной проблемы. Палеоданные достоверно демонстрируют гиперболический рост числа семейств животных в геологическом масштабе времени. Нет никаких оснований считать, что этот синтез биологического разнообразия закончен или замедляется [16, 14]. Рост этого разнообразия осуществляется в том числе с увеличением размерности пространства (числа степеней свободы), из которого живое извлекает энергию, вещество и информацию. Можно полагать, что в ходе эволюции живое постоянно делает открытия, получая новые, ранее не известные источники своего гиперболического роста. Вместе с тем А.И. Зотин и А.А. Зотин [7] показали внешне парадоксальное отношение между возрастом таксона и основным обменом. Чем моложе таксон, тем больше основной обмен, то есть диссипация энергии на единицу веса. В результате получаем, что представители более эволюционно совершенных или сложно организованных таксонов менее энергетически эффективны, чем более примитивные. Этот внешний парадокс полностью устраняется, если иметь в виду, что особи первых при подобной массе тела имеют большую продолжительность индивидуальной жизни, чем особи вторых.

Формально это соотношение является прямым следствием закона длительности жизни популяции, полученного Ю.М. Свирежевым и Д.О. Логофетом [20]. Из этого закона следует, что чем более эффективно, используя различные механизмы регулирования, организм снижает дисперсию среды, тем больше длительность его жизни. В сущности, это есть еще одно отображение закона необходимого разнообразия У.Р. Эшби: “разнообразие можно подавить только разнообразием” [26]. Чтобы принципиально снизить варьирование системы объекта управления, регулятор должен иметь большую энтропию, чем энтропия среды и минимальный шум в канале связи от среды к регулятору. Эти условия подразумевают, что регулятор не только быстро и адекватно реагирует на изменения среды, но, обладая памятью, способен с некоторой ошибкой предсказывать ее варьирование. Конечно никакой регулятор не может существовать без затрат энергии и, следовательно, более сложные системы будут расходовать на некоторую единицу своей массы больше энергии, чем более простые. Можно полагать, что критерием качества регулятора будут затраты энергии на единицу сложности. Чем они меньше, тем более эффективна система.

Есть все основания полагать, что эволюция человечества идет по тому же пути. Каждый родившийся во второй половине XX в. может видеть, как на его глазах росло техническое разнообразие в самых различных его аспектах, минимизирующее зависимость человека не только от флюктуации среды, но и от времени и пространства. Ретроспективный взгляд даже на последние 300–400 лет развития человечества, безусловно, демонстрирует факт гиперболического роста этого разнообразия.

Как эволюция живого вещества, так и эволюция человечества при общем гиперболическом тренде развития преодолевает периодические, часто весьма разрушительные кризисы и волновые колебания (циклы Кондратьева). Общим важным эффектом такой эволюции является уменьшение собственного времени или периода этих колебаний. Однако эти общие феноменологические закономерности эволюции сложных биологических систем, с одной стороны, требуют их научного осознания и соответствующих моделей, а с другой – определяют по существу конечную и вечную цель научной деятельности: постоянное опережающее развитие мощности “регулятора”, защищающего как каждую личность, так и все человечество от флюктуаций среды. При этом очевидно, что сами по себе с ростом размерности пространства, порождаемым открытиями, эти флюктуации неизбежно растут. Таким образом, наш поиск приоритетных направлений фундаментальной науки на текущий интервал времени определяется необходимостью в рамках экологии и географии разобраться в динамике и эволюции сложных самоорганизующихся систем [41] и разработать теоретические основания и конкретные технологии для постоянного увеличения мощности регулятора, снижающего нашу зависимость от действия внешних и внутренних переменных.

Развитие идей термостатики в экологии и географии. Феноменология в науке обычно существенно опережает теорию. Для самых различных реальных систем еще в начале прошлого века был обнаружен феномен, получивший название рангового распределения. Ранговые распределения устанавливают существование математически выраженного закона, связывающего ранг состояния с его частотой $n_i = f(i)$, n_i – частота, $i = 1, 2, 3,\ldots k$ – ранг состояния и $n_1 > n_2 > n_3 >\ldots > n_k$, k – число состояний. Первая эмпирически проверенная модель рангового распределения, получившая статус закона, была сформулирована в 1929 г. лингвистом К. Ципфом (Zipf law)

$$n_i = ai^{-b},$$

выведенным с использованием сформулированного ранее закона Лотка [27, 52]. Физической основой этого закона, по Ципфу, является принцип “наименьшего количества усилия”, или наибольшей эффективности, возникающий из противоречивого отношения двух действий “объединения” и “разнообразия”. Первое определяет стремление языка к лаконичности (экономичности), второе – к минимуму потерь при передачи информации.

Мандельброт [46], беря за основу модель Ципфа и опираясь на теорию информации, вывел усовершенствованную форму закона:

$n_i = a(d + i)^{-b}$, также оптимизирующую соотношение между “стоимостью” и “избыточностью” передачи и приема информации.

Он показал его прямую связь с термодинамикой и связал $1/b$ с классической температурой. Алексеев [1], исходя из предположения, что многие редкие слова перемещаются в средние ярусы частотного словаря, что приводит к нелинейной форме распределения, предложил модификацию закона Ципфа (Zipf-Alekseev Law) и показал, что происходит изменение характера зависимости ранг – частота так, что $n_i = n_1 i^{-(a+b\ln i)}$. Закон Ципфа в различных модификациях хорошо описывает упорядоченность состояний самых различных явлений в экологии, генетике, социологии, экономике, Интернете и – более того – в самых разнообразных явлениях природы [27].

Продемонстрируем его соответствие реальности на нескольких примерах. При этом будем рассматривать вероятность состояния i $p(i) = \frac{n_i}{N}$, где $N = \sum_{i=1}^{k} n_i$. Качество соответствия реального рангового распределения теоретическому будем оценивать на основе информации Кульбака $I = \sum_{i=1}^{k} p(i) \ln \frac{p(i)}{p(i)^m}$ где $p(i)^m$ – вероятность состояния i в ранговой идеальной равновесной модели. У модели рангового распределения наиболее адекватной реальности $I > 0$ и минимально. Если $I = 0$ то система равновесна, а если $I < 0$, то модель полностью неадекватна реальности и должна быть отклонена. Следует отметить, что любое модельное ранговое распределение воспроизводит гипотетическое равновесное состояние системы, то есть такое состояние, при котором $dp(i)/dt \approx 0$ и изменения системы во времени происходят со скоростями много меньшими скорости релаксации. Реальные системы практически никогда не бывают абсолютно равновесными. Они могут быть неравновесными, но стационарными и тогда описываются соответствующими нелинейными ранговыми распределениями, и неравновесными, несоответствующими никакому ранговому распределению ($I > 1$). Фактически распределение Алесеева-Ципфа описывает стационарное состояние системы относительно равновесного распределения Ципфа. Мера информации Кульбака оценивает дистанцию реального распределения от модели.

Продемонстрируем оценку параметров ранговых распределений тяжелых металлов для северной части Тихого океана, озер и рек [42]. Будем искать параметры ранговых распределений с помощью метода нелинейного оценивания (Statisnica 8) для логарифмической формы рангового распределения.

Как следует из табл. 1, распределение тяжелых металлов наилучшим образом описывается ранговым распределением Ципфа-Мандельброта (рис. 1). Однако его нельзя признать равновесным. В воде океана существенно больше, чем предсказывается распределением, бора и меньше стронция. Распределение населения по городам, по данным Всемирного банка, наилучшим образом соответствует распределению Алексеева-Ципфа (рис. 2), но оно, безусловно, неравновесное за счет

Таблица 1. Качество ранговых распределений в отображении вероятности обнаружения тяжелых металлов в северной части Тихого океана и жителей в городах для всего мира

Тип распределения	Тяжелые металлы в воде северной части Тихого океана		Жители в городах с населением больше 6000 человек	
	R^2	Информация Кульбака	R^2	Информация Кульбака
Ципф	94.588	0.490	97.675	–0.392
Ципф-Мандельброт	99.344	0.146	98.798	0.201
Алексеев-Ципф	99.314	0.203	99.402	0.108

Таблица 2. Типовые ранговые распределения (по Левичу [9])

Тип распределения	Форма зависимости ранга i от ресурсов (x_i)	Ранговое распределение	Соотношение число видов – число особей
Мотомуры	$i \sim x_i$	$\frac{n_i}{N} = cZ^{i-1}$	$S = k + z\ln S$
Ципфа	$i \sim \ln(x_i)$	$\frac{n_i}{N} = ci^{-\beta}$	$S = kA^{\frac{1}{\beta}}$
МакАртура	$i \sim \ln\ln(x_i)$	$\frac{n_i}{N} = \frac{1}{S}(\ln S - \ln i + \frac{1}{i})$	$S = \sqrt{N}$

большого веса городов с населением более 6 млн человек.

Если строго следовать за последовательностью событий, то в экологии сообществ растений ранговые распределения начали исследовать несколько раньше, чем в лингвистике. Глизон [35] констатирует, что в 1901 г. Жакар применил методику учета встречаемости видов в альпийском луговом сообществе и развил идею индекса частоты и коэффициента сообщества. Ра́үнкиер в 1909 г. использовал этот метод на более обширном материале и выявил правило, получившее в мировой литературе его имя (Raunkiaer law). Суть закона сводится к тому, что индекс частоты образует группировку чисел согласно логарифмической прогрессии, в которой первая группа содержит больше видов, чем вторая, вторая больше, чем третья и т.д. [37]. Глизон показал, что частота встречаемости видов по квадратам связана с числом особей и фактически обосновал то, что в настоящее время называется ранговым распределением. Он в полной мере понимал общность полученных отношений: “Это (отношение) применимо также к большому числу других явлений вне мира растений – таких, как, например, доход людей, отражаемый подоходным налогом. Вид полой кривой зависит полностью от объединения людей в группы согласно арифметической прогрессии” [37, с. 407].

Интенсивные исследования рассматриваемой проблемы, если не считать статьи Мотомура в 1932 г. на японском языке, датируются второй половиной XX в. и открываются тщательным исследованием Фишера с соавторами [34]. К настоящему времени по этой теме проведены сотни исследований, и в данном случае их содержание полезно рассматривать, опираясь на основные обзорные работы. Наиболее полный и тщательный обзор принадлежит Токеши [55]. В русскоязычной литературе наиболее полный обзор и теоретическое обоснование выполнены А.П. Левичем [9–13, 3]. В большинстве случаев рассматривается два подхода к синтезу ранговых распределений: на основании представлений об экологических нишах, отражающих отношение видов к ресурсам и условиям среды, и статистический, в котором для реальных распределений ищется некоторая, наиболее соответствующая модель без обращения к возможным механизмам, порождающим это распределение. В обоих случаях отношения в системе мыслятся как равновесные. В ходе развития темы авторы последовательно сталкивались с реальными распределениями видов по рангам, не укладывающимися в известные модели, вводили новую модель, более соответствующую наблюдаемым отношениям. В результате к настоящему времени число моделей с их различными модификациями весьма значительно (по крайней мере, более 11). Такое большое число моделей можно связать с существенным влиянием на распределение качества

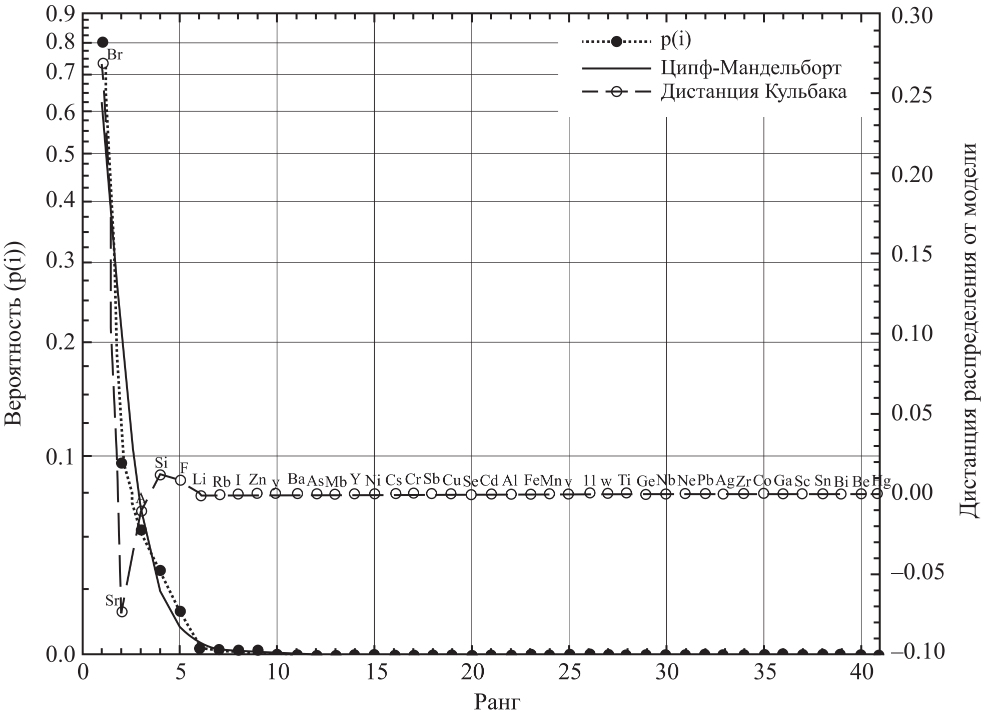

Рис. 1. Ранговое распределение тяжелых металлов в северной части Тихого океана.

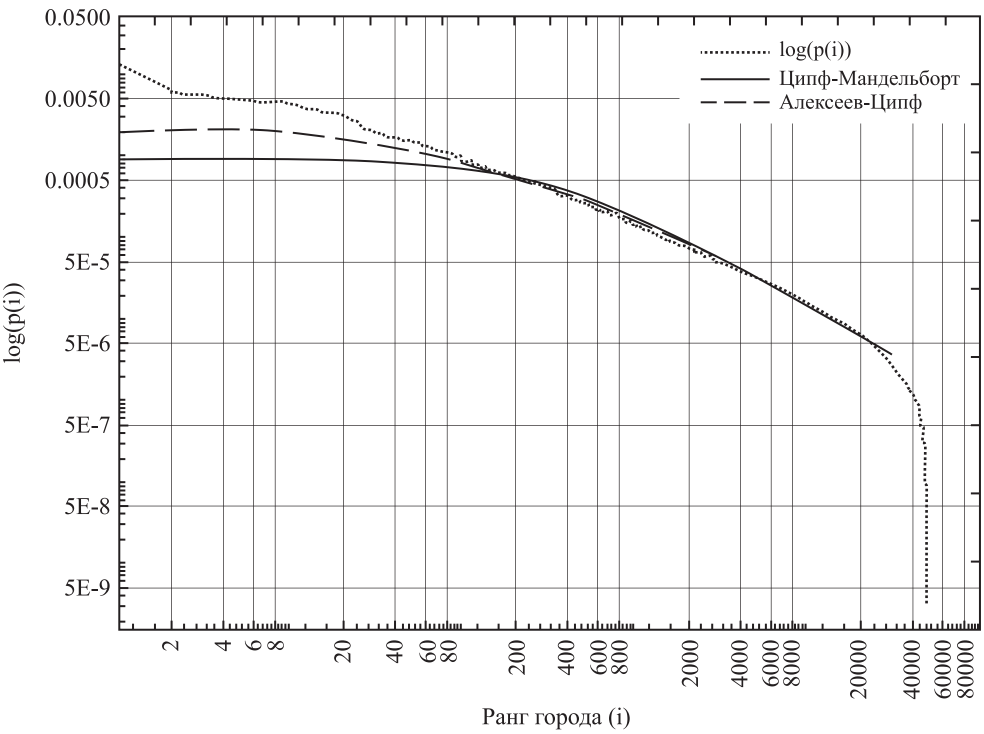

Рис. 2. Распределение населения по городам мира (47980 городов) по данным Мирового банка. Ранговые распределения рассчитаны для городов с населением больше 6000 человек.

и объема ресурсов и условий и различным характером зависимости от них обилия видов.

В конечном итоге, в разных моделях допускается, что виды в той или иной степени случайно захватывают некоторую часть пространства ресурсов, а оставшаяся неиспользованная ими часть в той же или случайной пропорции захватывается вторым видом и т.д. В ходе конкурентных взаимодействий соотношение видов придет к некоторому равновесному отношению со средой. В нейтральной гипотезе Хаббелла [38] особи разных видов рассматриваются как экологически эквивалентные, и распределение их обилия определяется соотношениями рождаемости, смертности и иммиграции. Эта концепция опирается в своей основе на модель островной биогеографии Вильямса-Мак Артура. Такое разнообразие моделей, естественно, не устраивает экологов. Мак Гилл [49] справедливо показывает, что в конечном итоге все модели реализуются при подобных допущениях: (1) особи одного вида склонны образовывать континуальные территориальные группы; (2) глобальное или региональное обилие изменяется согласно распределению пологой кривой; (3) особи разных видов в своем размещении не зависят друг от друга. Последние допущения – необходимое условие для равновесной системы.

Параллельно с развитием теории ранговых распределений развивались исследования зависимостей типа: число видов – площадь. Еще в 1921 г. в [28] эмпирически показана связь числа видов S с площадью (А), как

$$S = kA^z.$$

Глизон [36] получил зависимость:

$$S = k + z\ln A.$$

А.П. Левич [9] показал, что отношение числа видов к объему выборки (N) непосредственно выводится из ранговых распределений. Для этого достаточно принять частоту наиболее редкого вида s за единицу, логарифморовать левую и правые части рангового распределения и после простых преобразований получить зависимость числа видов S от объема выборки N. Так как объем выборки связан с площадью как $N = \rho A$, где ρ – плотность особей всех видов на единицу площади, то заменив N на ρA, получаем искомые зависимости, различные для разных ранговых распределений. При интерпретации возникновения различных ранговых распределений он предположил, что каждое из них отвечает определенному типу связи видов с лимитирующими ресурсами. В табл. 2 приведены наиболее часто встречающиеся типы ранговых распределений, соответствующие им соотношения между числом видов (S) и объемами выборки (N).

К важнейшим эмпирическим обобщениям, тесно связанным с рассматриваемой проблемой, относятся законы аллометрических отношений $y \sim x^b$ ($b < 1$): закон ощущения Вебера, производственная функция Коба-Дугласа, отношение между основным обменом и массой тела, аллометрические зависимости от массы коэффициента размножения, площади индивидуального участка у млекопитающих, аллометрические соотношения различных фракций от диаметра дерева, параметров речной сети и т.п. Закон пропускной способности канала связи Шеннона [53] также отражает аллометрические отношения при передачи информации от передатчика к приемнику. Объясняя теоретически выведенную аллометрическую зависимость, Шеннон отмечает, что аллометрия является неизбежным следствием невозможности без разрывов осуществить проецирование пространства размерностью n на пространство меньшей размерности. Для географа этот факт очевиден, так как нельзя спроецировать эллипсоид вращения, описывающий объем Земли, на плоский лист карты без искажений расстояний и углов или без разрывов. Минимальное искажение, пропорциональное масштабу, достигается при проецировании на иерархически соподчиненную систему трапеций, опирающихся на одну дугу. Очевидно, что разрывы между трапециями неизбежны. Таким образом, система карт в такой проекции автоматически фрактальна. Если мы рассматриваем любую систему, в которой взаимодействия реализуются в некотором объеме, то их проекция на площадь или на линию неизбежно разрывна (фрактальна) и подчиняется аллометрическому отношению. Общность аллометрического соотношения объемов, поверхностей и линий очевидна. В.И. Вернадский [17] отмечал, что биосферу можно представить как пространство Эвклида, заполненное объектами с геометрией пространства Римана с положительной кривизной и что именно между ними происходят энергетические обмены. Таким образом, аллометрические отношения, по-видимому, являются наиболее общими для широкого класса систем, что, в частности, подтверждается наибольшей общностью рангового распределения Ципфа.

Теоретические основания термостатики. Рассмотренные эмпирические законы последовательно получают теоретическое обобщение в рамках статистической механики и термодинамики. Реализуемость в природе различных вариантов ранговых распределений показывает, что отношения между элементами могут реализоваться в пространствах с различными метриками, то есть с несколько различными физическими основаниями. Первое теоретическое обоснование ранговых распределений принадлежит Гиббсу в рамках развитой им статистической механики. Мы представляем объект любой природы как макроскопическую систему, состоящую из множества элементов, которые определяются импульсом и координатами, или массой и скоростью и, соответственно, действием или энергией (ε_i). Возможна и другая трактовка. Мы мысленно разбиваем пространство (фазовое пространство), занятое системой, на равные ячейки. В каждой i-ячейке могут находится n_i

с различными уровнями энергии [21]. Нас интересует, какова вероятность обнаружить в системе элемент с уровнем энергии ε_i ($i = 1, 2, 3,\ldots n$) или со средним для ячейки $\langle E_i \rangle$. Предполагается, что наши элементы находятся в движении и сталкиваются друг с другом, перераспределяясь по ячейкам, и передают друг другу импулцьс и энергию. Обратим внимание на то, что это очень общая модель, в рамках которой при некотором воображении интерпретируема система любой природы. Поиск распределения энергии E между N тождественными системами по Шредингеру [22] является основной проблемой термостатики. Гиббс принял, что система (вообще говоря, идеальный газ) находится в равновесии, то есть ее производные вероятностей и энергии (или импульсов) равны нулю. Тогда вероятность ($p(\varepsilon_i)$) частицы и микроскопической системы с энергией (ε_i) есть

$$p(\varepsilon_i) = \frac{F - \varepsilon_i}{T},$$

где F – свободная энергия, T – температура.

Энтропия системы $S = -k\sum_{i=1}^{i=n} p(\varepsilon_i)\ln(p(\varepsilon_i))$ есть неопределенность выбора, разнообразие возможных превращений, мера статистической разупорядоченности в ее микросостояниях, информация системы. Обычно ее называют энтропией Больцмана-Гиббса – Шеннона (BGS). Джейнс [39] сформулировал принцип максимума энтропии: “наименее предубежденный или наименее ошибочный способ оценки вероятностей состояний тот, который максимизирует энтропию S при условии, определяемым имеющейся информацией”. Этот принцип, обычно обозначаемой аббревиатурой MaxEnt, получил широкое применение при решении самых различных задач с ограниченной информацией. В общем допускается, что система равновесна и производная вероятностей $p(\varepsilon_i)$, внутренней энергии $E = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i (p(\varepsilon_i))$ энтропии $S = -\sum p(\varepsilon_i)\ln(p(\varepsilon_i))$ равны нулю. Далее, используя метод множителей Лагранжа, ищем экстремальную функцию, которая в нашем случае есть $p(\varepsilon_i) = e^{-\lambda_0 - \beta\varepsilon_i}$ статистическая сумма $Z = \sum_{i=1}^{n} e^{-\beta\varepsilon_i}$, температура есть $T = 1/b$, свободная энергия $F = -l_0 T = -T\ln Z$ и $F = E - TS$.

Свободная энергия тождественна работе, которую может выполнить замкнутая система при адиабатических преобразованиях при температуре T и $dS \le 0$ (второе начало термодинамики). В рассматриваем случае энергия-действие есть линейная функция от массы и скорости частиц. Соотношение между энергией и энтропией можно определить по Тсаллису [57, с. 12] “Энергия имеет дело с возможностями системы; энтропия – с вероятностями этих возможностей”.

Рассмотренная система (BGS) подразумевает линейные взаимодействия на микроскопическом уровне:

$$\frac{dy}{dx} = a,\ \ y = a + x \text{ и обратное } x = a - y.$$

Однако в природе, очевидно, можно допустить и другие типы элементарных взаимодействий. Распространенными, как показывает практика, будет экспоненциальное $\frac{dy}{dx} = y$, $y = e^x$ и обратное $y = \ln x$ взаимодействия.

Эти две функции Тсаллис [57] предложил обобщить степенной функцией, отражающей, как было показано выше, широко распространенный тип аллометрических отношений

$$\frac{dy}{dx} = y^q,\quad y = [1 + (1-q)x]^{\frac{1}{(1-q)}} \equiv e_q^x,\quad e_{q=1}^x = e^x$$

и обратное:

$$y = \frac{x^{1-q} - 1}{1-q} \equiv \ln_q x,\ \ln_1 x = \ln x \text{ при } x > 0.$$

Обратим внимание, что закон пропускной способности канала связи Шеннона [53], который он считал общим для систем любой физической природы, есть в степенной форме

$$y = e^C = (1 + \frac{x}{w\beta})^w,$$

и при $w = \frac{1}{1-q}$ есть точно q-экспонента (e_q^x) при $q < 1$.

При $q \to 1$ действие приближается к линейной форме, а при $q \to 0$ – к экспоненциальной.

Наиболее полной формой рангового распределения для наиболее общей формы действия на микроскопическом уровне будет:

$$p_i = \frac{[1 - (1-q)\beta_q(\varepsilon_i - U)]^{\frac{1}{(1-q)}}}{Z_q}$$

U – внутренняя энергия, темпера рангового распределения Гиббса $\beta = \beta_q \sum_{i=1}^{n} p_i^q$ статистическая сумма $Z_q = \sum_i^n e_q^{-\beta_q(\varepsilon_i - E)}$.

q-энтропия есть $S_q = \dfrac{1-\sum_{i=1}^{n} p_i^q}{q-1}$ и $S_q^{\max} = \ln_q n$ – максимум энтропии при $p_i = \dfrac{1}{n}$ Для $q < 0$ необходимо исключить случаи с отрицательной вероятностью. При $q > 0$ q-энтропия, как и энтропия BGS, тем больше, чем меньше разность логарифмов вероятностей соседних энергетических уровней (соседних классов) в ранговом распределении, а при $q < 0$ – наоборот. В результате максимум энтропии, отвечающей условию равновесия, достигается при полном доминировании одного энергетического уровня. В динамической системе $q = 1–1/\rho$, где $\rho > 0$ – коэффициент корреляции. Таким образом, модель отражает в том числе и наличие в системе устойчивых положительных корреляций. С другой стороны, функция распределения описывает масштабно-инвариантные системы с фрактальным строением фазового пространства, причем “деформация” вероятности (параметр q) связан с фрактальной размерностью D соотношением $q = 1 – D$ [51].

При $q = 1$ q-энтропия становится энтропией Гиббса-Шеннона, а при $q = 0$ – энтропией Реньи. Обратим внимание на то, что при простейших преобразованиях q-распределение приобретает форму широко представленного в природе распределения Ципфа-Мандельброта, а при некотором ее упрощении – распределения Ципфа.

Таким образом, параметры термодинамической системы – энтропия (S_q), свободная энергия (F_q), внутренняя энергия (U_q), температура (T) – зависят от формы микроскопических взаимодействий между элементами статистического ансамбля и

$$F_q = U_q – T\, S_{q.}$$

Множественность этих отношений отражается, в частности, выявленными в природе разными формами ранговых распределений, каждое из которых содержит информацию о возможной форме действий. Скорее всего, широкая реализуемость модели Тсаллиса и связанных с ней ранговых распределений определяется широким распространением в природе формы связи, положенной в ее основу.

Для модели Тсаллиса справедливы фундаментальные законы и отношения классической термодинамики, например, H-теорема (макроскопическая необратимость времени) или второй принцип термодинамики

$$q\frac{dS_q}{dt} \geq 0\,.$$

Но в пределе, если для $q > 0$ энтропия растет, но, при $q < 0$ – снижается.

Любая система находится в среде, которую можно назвать термостатом. Система может обмениваться энергией в форме потоков тепла, вещества и информации со средой равновесно (адиаботически), то есть со скоростью намного меньшей, чем скорость взаимодействий на микроскопическом уровне. Термостат можно интерпретировать как вторую систему. Таким образом, рассматриваем две системы A и B, находящиеся в равновесии и потому независимые друг от друга. Тогда совместная энтропия объединенной неэкстенсивной системы будет $S_q(A, B) = S_q(A) + S_q(B) – (1 – q)S_q(B)$.

Если $q = 1$, то система соответствует известному утверждению BGS модели, что совместная энтропия двух независимых систем равна сумме их энтропий. В модели Тсаллиса энтропии независимых систем неаддитивны. Если $q > 1$, систему называют субаддитивной, а $q < 1$ – супераддитивной. Соответственно, подразумевается, что между системами всегда есть взаимодействие [29].

Пусть системе A соответствует распределение с вероятностями p_i ($i = 1, 2, 3,\ldots n$), а системе B – распределениями g_i. Информационное расстояние *Kullback–Leibler* для BGS первой системы от второй есть $I(A/B) = \sum_{i=1}^{k} p_i \ln(\frac{p_i}{g_i})$ и второй от первой $I(B/A) = \sum_{i=1}^{k} g_i \ln(\frac{g_i}{p_i})$.

$J(A, B) = I(A/B) + I(B/A)$ есть расхождение. Если $J(A, B) \approx 0$ (статистическая значимость может быть определена по соответствующим статистическим критериям), то две системы равновесны. Информация в каждой системе может быть оценена по справочному равновероятностному распределению с максимальной энтропией $S_{\max} = -k(\frac{1}{k}\ln\frac{1}{k}) = \ln k$ и $I(A/(1/k)) = S_{\max}–S(A)$. Ферстером [23] была введена мера организации $R = 1 – S(A)/S_{\max}$. Очевидно, что чем больше информация, тем больше организация. Обе меры подразумевают, что чем они больше, тем больше в системе порядок и более выражена структура. Если $I(A/B) > 0$ и $S(B) > S(A)$, то это означает, что система B ближе к равновесию, чем система A и в результате адиабатического обмена информация из B будет передаваться к A с увеличением энтропии A и некоторым уменьшением в B. Однако в силу второго начала термодинамики в конечной стадии эволюции совместная энтропия при $J(A, B) = 0$ должна быть больше суммы исходных $S(A) + S(B)$.

Для неэкстенсивной энтропии информация Кульбака $I_q(A/B) = \sum_{i=1}^{k} p_i \frac{[p_i / p_g]^{q-1} - 1}{q-1}$ при $q = 1$, тождественно информации в термостатике BGC.

Информация в системе Тсаллиса, так же, как и энтропия, неаддитивны, но общая схема взаимодействия систем остается той же.

Эволюция термодинамических систем. Термостатический подход открывает возможности на основе анализа измеряемых переменных реальных природных систем найти адекватную термостатистическую модель, исследовать ее динамику и эволюцию и при определенных условиях осуществлять прогноз и управление. В соответствии со вторым началом термодинамики, из любого исходного состояния любая система, предоставленная самой себе, будет эволюционировать в сторону равновесия с максимумом энтропии. Производя определенную работу со средой в адиабатическом режиме, она будет расходовать свободную энергию и увеличивать энтропию. Если к системе подводится энергия, тепло, вещество, информация, то на микроскопическом уровне движения элементов будут взаимоупорядочиваться, система переходит в неравновесное состояние и энтропия ее уменьшается. В системе действуют диссипативные силы, и она преобразует часть поступающего потока в связанную энергию TS (тепловой поток и энтропия, или бросовая энергия). Свободная энергия связывается с работой, которую может произвести система в равновесном процессе. Очевидно, что система в состоянии, далеком от равновесия, способна произвести больше работы, чем в равновесном (сравните работу, которую может выполнить равновесный речной поток и поток, перегороженный плотиной). Таким образом, эксергия, как полезная работа, есть функция расстояния системы от текущего равновесия. При этом система может быть в стационарном равновесном состоянии, в котором производные, как и в равновесном состоянии, близки нулю, но энтропия стационарной системы всегда меньше равновесной.

Эксергия в BGS есть $Ex = E_{out} - T(S - I)$ [40], где E_{out} – приходящая от среды энергия-действие, T – температура, S – энтропия, I – информация. По аналогии можно ввести эксергию для системы Тсаллиса, однако в литературе этот вариант, кажется, не рассматривался. Как следует из уравнения, при прочих равных условиях полезная работа тем выше, чем больше информации и, соответственно, порядка привнесено в систему.

Кратко рассмотренная выше общая теория служит основой для изучения процессов самораспада и самоорганизации неэкстенсивных систем. В неравновесной термодинамике критерий эволюции записывается для макроскопической энтропии в виде $d^2S/dt^2 < 0$, а равенство $d^2S/dt^2 = 0$ соответствует неравновесному стационарному состоянию, причем условие убыли производства макроскопической энтропии справедливо только для линейного по термодинамическим силам приближения (принцип минимума производства энтропии Пригожина). Г. Хакен [25] показал, что в окрестностях точки неустойчивости, то есть в области, далекой от равновесия, информация и эффективность самоорганизуюшейся системы экспоненциально возрастает как функция поступления энергии на входе, а вдали от области неустойчивости, то есть вблизи равновесия, напротив, уменьшается (I-теорема). Ю. Л. Климантович [8] доказал, что если процесс самоорганизации представляется как фазовый переход (или последовательность фазовых переходов) в более упорядоченное, отвечающее более низкой симметрии состояние, то производство энтропии в новом – менее симметричном состоянии, возникшем в результате очередного фазового перехода, меньше производства энтропии старого состояния, которое мысленно продолжено в неустойчивую область (S-теорема, принцип минимума производства энтропии в процессах самоорганизации).

Наряду с принципом минимума производства энтропии в стационарном состоянии, далеком от равновесия, широко используется противоположный ему принцип максимума производства энтропии [44, 45]. Совместимость их объясняется тем, что первый применим к линейным системам, а второй – к любым системам, далеким от равновесия. Подробный анализ этого принципа дан Л. М. Мартюшевым, В. Д. Селезневым [15]. Отметим, что этот принцип принимается далеко не всеми [31, 33]. Л. Мартышев [47] констатирует, что этот принцип часто соответствует реальности, но строго не доказуем. Отметим, что противоречия снимаются, если принять, что принцип минимума производства энтропии и S-теорема справедливы для информационной энтропии, а принцип максимума производства энтропии – для классической энтропии Клаузиуса или, иначе, первая гипотеза справедлива для уровня структурной организации, а вторая – для молекулярного уровня.

Таблица 3. Термостатистические параметры систем размещения городского населения

Наименование	Индекс	Формула	Австралия	Великобритания	Япония
Численность населения	нет индекса	нет формулы	17 670 519	39 000 984	101 571 845
Число городов	n	нет формулы	164	525	754
	R^2%	модель	97.787	99.710	99.961
Параметр экспоненты	q	модель	1.334	2.724	2.624
Темпера	b_q	модель	0.416	1.676	9.905
q-Температура	T_q	$1/b_q$	2.402	0.596	0.101
q-внутренняя энергия	U_q	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i \frac{p_i^q}{\sum_{i=1}^{n} p_i^q}$	4.139	1.171	1.034
q-энтропия	S_q	$\frac{1-\sum_{i=1}^{n} p_i^q}{q-1}$	1.668	0.322	0.587
q-максимальная энтропия	$S_{\max} = \ln_q n$	$y=\frac{n^{1-q}-1}{1-q}$	2.439	0.580	0.615
q-информация Кульбака	I_q	$\sum p_i \frac{[p_i / p_g]^{q-1}-1}{q-1}$	0.214	0.0726	0.0439
Связанная энергия	$T_q(S_q - I_q)$		3.492	0.241	0.105
q-свободная энергия (Эксергия)	$F_q(Ex_q)$	$U_q - T_q(S_q - I_q)$	0.762	0.930	0.979

В конечном счете снять эти противоречия должны исследования эволюции реальных систем. В рамках неэкстенсивной термостатики самораспад системы происходит в результате спонтанных переходов между состояниями, и в итоге достигается полное равновесие с окружением. Самоорганизующиеся системы характеризуются вынужденными переходами между стационарными состояниями. Переходы совершаются при действии внешних сил (управляющих параметров) и при достижении критических значений управляющих параметров в системах возникают различные структуры [4]. Из неравенств $I_q Z_q = \left(I_q - I_q^{ecv}\right) Z_q = -\left[S_q - S_q^{ecv}\right] > 0$ при $q > 0$ и $I_q Z_q < 0$ при $q > 0$ (I_q^{ecv}, S_q^{ecv} – информация и энтропия в стационарном состоянии) следует, что при $q > 0$ при увеличении управляющих параметров получаем увеличение положительной меры информации (I-теорема Хакена) и уменьшение энтропии $S_q(p) < S_q(\tilde{p}_0)$ (S-теорема Климантовича). Таким образом, при самоорганизации системы увеличивается статистическая упорядоченность и уменьшается разупорядоченность в микросостояниях неэкстенсивной системы.

При $q < 0$ имеем уменьшение отрицательной меры информации (негинформации) и увеличение энтропии; уменьшается статистическая упорядоченность и увеличивается разупорядоченность в микросостояниях системы. Такой процесс приводит к деградации системы до установления другого стационарного состояния. Эти эффекты определяются положительными (отрицательными) корреляциями между микросостояниями, определяющими, в частности, “память” системы. Положительные корреляции или положительные обратные связи порождают структуры, способные к аккумуляции энергии и увеличению потенциальной энергии системы. Отрицательные корреляции, напротив, разрушают эти связи. Таким образом, получаем вполне измеримые на основе ранговых распределений критерии для оценок текущего состояния макросистемы и возможных направлений их эволюции. В целом же аналитический аппарат термостатики неэкстенсивных систем [4–6, 29, 57–59] открывает широкие возможности исследования реальных географических и экологических систем с глубокой физической интерпретацией их организации и функционирования.

ISSN 0373-2444

Номер 5 Сентябрь–Октябрь 2016

Рис. 3. Ранговые распределения городского населения трех стран. Ранговые распределения рассчитаны по данным Мирового банка для городов с населением более 6000 человек.

Простейшие примеры анализа. В качестве примера сравним термостатистические параметры для статистики Тсаллиса для населения городов с числом жителей больше 6000 человек трех островных государств Австралии, Великобритании и Японии по данным Мирового банка. Ранг города определяется числом жителей. Будем оценивать параметры рангового распределения, используя методы нелинейной оценки (Statistica 8). Программа предлагает несколько методов. Критерием выбора лучшей модели равновесного распределения будет коэффициент детерминации и минимум информации Кульбака. Параметры оцениваются для полной формы рангового распределения Тсаллиса. В табл. 3 и рис. 3 приведены результаты анализа.

Обратим внимание на тот факт, что классические переменные термодинамики сохраняют свой физический смысл для систем любой природы. Если в классическом случае температура есть функция расширения газа или кинетической энергии частиц и отражает распределение частиц по энергетическим уровням, то та же интерпретация применима к любой системе. Так, для системы распределения жителей по городам температура теоретически отражает объем занимаемого фазового пространства, интенсивность взаимодействия городов через обмен населением. Внутренняя энергия – это энергия хаотического (теплового) движения частиц системы и является функцией температуры, теплоемкости и массы. Связанная энергия – часть внутренней энергии, которая не может быть превращена в работу и может рассматриваться как энергия, диссипирующая в среду. Свободная энергия и для неравновесных условий эксергия есть полезная работа, которую может произвести система. Очевидно, что городская система осуществляет многогранную работу в жизнеобеспечении населения и государства в целом. Однако идентификация ее физического смысла требует ее сравнения с функциональными переменными – такими, как ВВП, продолжительность жизни, уровень образования и т.п.

Очевидно, что три сравниваемые островные государства разделяются на две качественно различные группы, которые можно связать с разными фазовыми состояниями эволюции. Значение параметра q показывает, что Австралия близка к линейной модели термодинамики BGS, а Великобритания и Япония – к нелинейной модели Тсаллиса с хорошо выраженными внутренними

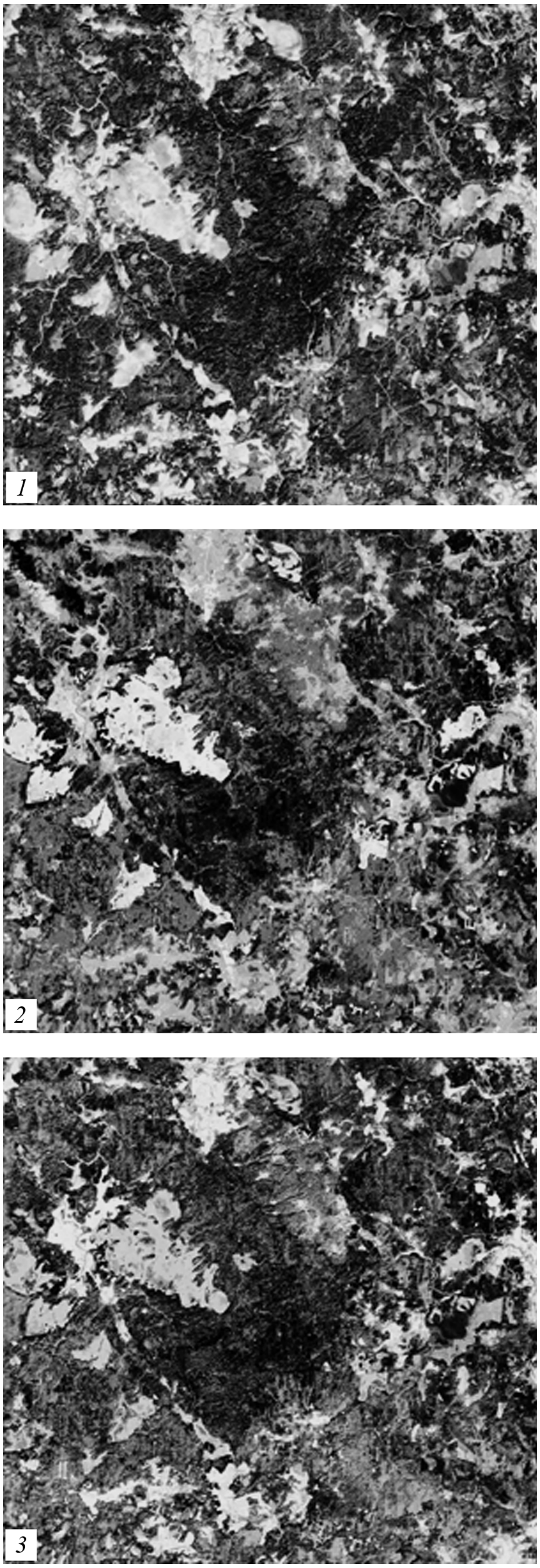

Рис. 4. Мозаика ландшафтного покрова на основе классификации с метрикой Эвклида: *1* – февраль, *2* – июнь, *3* – сентябрь.

положительными корреляциями. Эти различия хорошо видны на рис. 3. Очень большое значение информации Кульбака для Австралии указывает на то, что система далека от стационарного состояния и находится, по-видимому, в активном развитии. Вместе с тем высокая температура и энтропия определяют очень большие потери энергии и, несмотря на то, что внутренняя энергия высока, полезная работа в ней – наименьшая для трех сравниваемых систем.

Совершенно иные соотношения в двух других системах. Большое значение q указывает на сильные положительные корреляции, стягивающие всю систему к центральному месту – самому крупному городу. Температура в системе, внутренняя энергия и энтропия – низкие, и соотношение этих переменных приводит к низкой связанной энергии и, соответственно, к относительно большой полезной работе. Сравнение термостатистических параметров Великобритании и Японии показывает, что Япония ближе к стационарному состоянию с максимумом полезной работы. Более существенно отклонение от стационарности в Великобритании, хорошо видное на рис. 3, приводит к более высокой температуре, относительно низкой энтропии и высокой информации. Можно полагать, что система расселения в Японии эволюционно более совершенна. Очевидно, что приведенный пример имеет частный характер, однако термостатистическая интерпретируемость эмпирически рассчитываемых переменных существенно обогащает анализ ранговых распределений. Столь же очевидно, что такого рода анализ на глобальном уровне и особенно для последовательных временных срезов дал бы весьма полезную информацию для понимания динамики систем расселения с учетом различных условий среды и состояния социально-экономической системы.

Рассмотренный пример охватывает анализ любых систем, состояния которых описываются количественно. Это может быть высота для рельефа, длина или площадь речных бассейнов в гидрологии, содержание химических веществ и их соединений в различных средах, число особей, биомасса или продуктивность видов в сообществе и т.п. Другим типом являются ранговые распределения, в основе которых лежит частота встречаемости классов состояния системы. Такого рода система порождается различными типологическими классификациями. К ним, в частности, относится частота встречаемости представителей какого-либо вида на территории без учета его обилия, и вообще типологических единиц любых компонентов.

Таблица 4. Термостатистические параметры систем состояний ландшафтного покрова, получаемых на основе дихотомической классификации

Наименование	Индекс	Формула	февраль	июнь	сентябрь
Число классов	n	нет формулы	32	32	32
Коэффициент детерминации	$R^2\%$	модель	97.074	97.497	94.167
Параметр экспоненты	q	модель	1.1351	1.1868	1.028
Температура	b_q	модель	0.192	0.119	0.0794
q-Температура	T_q	$1/b_q$	5.201	8.392	12.594
q-внутренняя энергия	U_q	$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i \frac{p_i^q}{\sum_{i=1}^{n} p_i^q}$	6.492	8.282	8.381
q-энтропия	S_q	$\frac{1-\sum_{i=1}^{n} p_i^q}{q-1}$	2.331	2.341	2.860
q-максимальная энтропия	$S_{\max} = \ln_q n$	$y = \frac{n^{1-q}-1}{1-q}$	2.767	2.551	3.303
q-информация Кульбака	I_q	$\sum p_i \frac{[p_i / p_g]^{q-1}-1}{q-1}$	0.0895	0.014	0.034
Связанная энергия	$T_q(S_q - I_q)$	нет формулы	11.658	12.554	35.590

В качестве примера рассмотрим распределение типов состояния ландшафтного покрова, полученных классификацией мультиспектральной дистанционной информации, например, спутника Landsat. В рассматриваемом примере сравниваются мозаики состояний ландшафтного покрова для трех сроков измерений (7 февраля 2011 г., 21 июня 2002 г. и 25 сентября 2009 г.) для района Центрально-Лесного заповедника. В приводимом примере использована дихотомическая итерационная классификация с дистанцией Евклида для пятого уровня с 32 классами состояния [19]. Отметим, что отражение солнечной радиации, измеряемое со спутника, весьма чувствительно к сезону года, и классификации по разным срокам существенно отличаются друг от друга (рис. 4).

В рассматриваемой системе параметр q близок к единице (табл. 4). Соответственно, отношения между элементами системы близки к линейным. Однако если аппроксимировать ранговые распределения распределением Гиббса, то качество аппроксимации хуже, чем для распределения Тсаллиса. Изменение q во времени показывает, что отношения между элементами системы практически линейны в сентябре. Зимой и летом существуют положительные корреляции. Анализ изображений показывает, что они возникают за счет граничных контуров, выделяемых на континууме лес–болота. В сентябре такие граничные контуры очень редки. Зимой в системе минимальна температура и энтропия, а в сентябре они максимальны. При определении системы через классы нельзя рассчитать свободную энергию, так как ранговые единицы распределения не имеют прямой связи с какими-либо количественными переменными (например, запасами биомассы). Можно оценить возможную полезную работу системы лишь из соотношения оцененной внутренней и связанной энергии. Из такого сравнения следует, что полезная работа максимальна в июне, несколько меньше в феврале и минимальна в сентябре. В данном случае под полезной работой, по-видимому, следует подразумевать вклад структуры ландшафтного покрова в конвекцию воздушной массы. Можно полагать, что он тем выше, чем больше территориальная контрастность в поглощении солнечной радиации и ниже температура системы. Из рис. 4 следует, что вероятность первого класса в феврале максимальна, несколько ниже в июне и минимальна в сентябре. Соответственно, можно полагать,

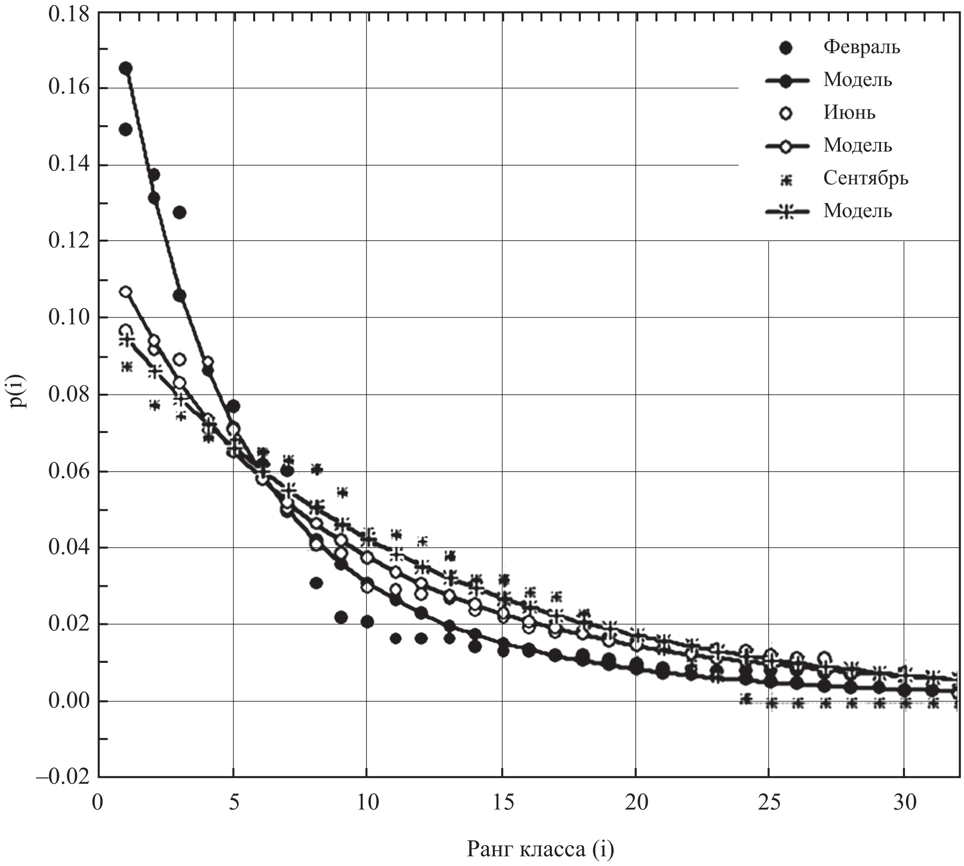

Рис. 5. Ранговые распределения классов состояния ландшафтного покрова, полученных на основе классификации с метрикой Эвклида.

что свободная энергия максимальна в феврале и минимальна в сентябре. Большая вероятность первого класса в феврале определяется тем, что в старых лиственных лесах зимой открывается второй еловый ярус, максимально поглощающий солнечную радиацию. Этот эффект хорошо виден на рис. 5. В результате максимальная контрастность поглощения солнечной радиации приводит к максимальной территориальной контрастности накопления тепла, что и должно максимизировать конвекцию. Вне зависимости от трактовки смысла термодинамических переменных в результате анализа получаем объективное отображение их динамики через классификацию изображения. Очевидно, что здесь продемонстрирован новый подход в использовании дистанционной информации для анализа динамики функционирования ландшафтного покрова.

Заключение. Хотя между эмпирическими законами экологии и географии и развитием теории статистической механики и не существует прямой связи, однако их общность не вызывает никакого сомнения. Современная статистическая механика раскрывает природу эмпирических закономерностей и существенно углубляет их трактовку. К настоящему времени на ее основе выполнено более 1000 исследований динамики реальных объектов самой разной природы, включая биологию, геофизику и экономику [59].

Предлагаемая статья дает лишь самые первые представления о возможной глубине анализа с использованием теории и методов статистической механики. Широкое применение неэкстенсивной статистической механики в исследованиях в самых различных областях знаний, прямая ее связь с теорией динамических систем и фракталами создает потенциальную основу для ее приложения к географии. Если успешное приложение в географии и экологии теории фракталов [2, 32] лишь показывает факт фрактальности рассматриваемых явлений, то статистическая механика во взаимодействии с теорией динамических систем [18] дают ключ к пониманию механизмов, порождающих экологические и географические процессы. Термодинамика и термостатика в рамках модели Больцмана-Гиббса-Шеннона имеет большую историю приложения в экологии и географии

[40], позволивших сформулировать конструктивные гипотезы и удовлетворительно интерпретировать важнейшие системные отношения. Неэкстенсивная статистическая механика должна дать более глубокие основания для понимания механизмов самоорганизации, невоспроизводимых в рамках линейных моделей. Однако ни в коем случае нельзя абсолютизировать существующий уровень развития базовой теории. Современная теория статистической механики практически не рассматривает проблемы иерархической организации, влияния структуры верхнего уровня на функционирование подчиненного и наоборот. Теория формально применима для любого иерархического уровня организации, но вместе с тем, какой бы мы уровень не рассматривали, всегда существует и влияет на поведение системы самый нижний уровень, связанный с переносом тепла и энергии в их классическом понимании. Вместе с тем для каждого уровня существуют аналоги этих классических переменных, единицы которых неопределенны. Можно полагать, что структура и информация верхнего уровня определяют эффективность использования энергии на нижнем уровне, и увеличение свободной энергии и эксергии в системе на нижнем уровне есть результат организации структуры на уровне более высоком. Эта проблема более детально рассматривается в рамках синергетики [24]. В достаточно общем случае корреляции, порождающие структуры, возникают на нижнем уровне, а возникшие на втором уровне структуры поддерживают корреляции. Этот аутокаталитический процесс приводит к возникновению стационарных состояний, далеких от термодинамического равновесия и на нижнем уровне. Есть все основания полагать, что неэкстенсивная статистическая механика как теоретическая основа постановки исследований в природе расширит наше понимание механизмов, определяющих поведение сложных систем и позволит “понять непонятое”. Можно утверждать, что это одно из важнейших фундаментальных направлений в географии, результаты которого будут иметь общенаучное значение. Однако оно ставит, прежде всего перед молодыми географами, не простую задачу самообразования в дисциплинах, не получающих пока отражения в прослушанных ими академических курсах. При современном темпе развития науки открытость исследователя к новым знаниям является необходимым условием его научного творчества.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке РНФ, грант 14-27-00065.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев П.М.* О нелинейных формулировках закона Ципфа // Вопросы кибернетики. 1978. Вып. 41. С. 53–65.
2. *Гелашвили Б., Иудин Д.И., Розенберг Г.С., Якимов В.Н., Солнцев Л.А.* Фракталы и мультифракталы в биоэкологии. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. 370 с.
3. *Голицын Г.А., Левич А.П.* Вариационные принципы в научном знании // Философские науки. 2004. № 1. С. 105–136.
4. *Зарипов Р.Г.* Самоорганизация и необратимость в неэкстенсивных системах. Казань: Изд-во “Фэн”, 2002. 251 с.
5. *Зарипов Р.Г.* Новые меры и методы теории информации. Казань: Изд-во Казанского гос. техн. ун-та, 2005. 364 с.
6. *Зарипов Р.Г.* Принципы неэкстенсивной статистической механики и геометрия мер беспорядка и порядка. Казань: Изд-во Казанского гос. техн. ун-та, 2010. 404 с.
7. *Зотин А.И., Зотин А.А.* Направление, скорость и механизмы прогрессивной эволюции. М.: Наука, 1999. 432 с.
8. *Климонтович Ю.Л.* Уменьшение энтропии в процессах самоорганизации. S-Теорема // Письма в ЖТФ. 1983. № 7. С. 1412.
9. *Левич А.П.* Экстремальный принцип в теории сообществ // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 1. Л.: Гидрометеоиздат. 1978. С. 164–182.
10. *Левич А.П.* Информация как структура систем // Семиотика и информатика. ВИНИТИ. Вып. 10. 1978. С. 116–132.
11. *Левич А.П.* Структура экологических сообществ. Изд. МГУ, 1980. 182 с.
12. *Левич А.П.* Описание, происхождение и применение ранговых распределений в экологии сообществ // Общая и прикладная ценология. 2007. № 5. С. 14–19.
13. *Левич А.П.* Искусство и метод в моделировании систем: вариационные методы в экологии сообществ, структурные и экстремальные принципы, категории и функторы. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. 728 с.
14. *Марков А.В., Коротаев А.В.* Гиперболический рост в живой природе и обществе. М.: ЛИБРОКОМ/ URSS, 2009. 200 с.
15. *Мартюшев Л.М., Селезнев В.Д.* Принцип максимальности производсива энтропии в физике и смежных областях. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 83 с.
16. *Пузаченко Ю.Г.* Глобальное биологическое разнообразие и его пространственно-временная измен-

чивость // В кн.: Современные глобальные изменения природной среды. Т. 2. М.: Научный мир, 2006. С. 306–377.

17. *Пузаченко Ю.Г.* Термодинамическая основа учения о биосфере–ноосфере В.И. Вернадского // Изв. РАН. Серия геогр. 2013. № 4. С. 5–20.

18. *Пузаченко Ю.Г.* Организация ландшафта // Вопросы географии. Сб. 138. Горизонты ландшафтоведения. М.: Издательский дом "Кодекс", 2014. С. 35–64.

19. *Пузаченко Ю.Г., Гагаева З.Ш., Алещенко Г.М.* Построение мелкомасштабной карты ландшафтного покрова по трехканальному изображению Landsat 7 открытого доступа // Изв. РАН. Сер. Геогр. 2004. № 4. С. 97–109.

20. *Свирежев Ю.М., Логофет Д.О.* Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.

21. *Трайбус М.* Термостатика и термодинамика. М.: Энергия, 1970. 504 с.

22. *Шредингер Е.* Статистическая термодинамика. Ижевск: Изд. дом Удмурдский университет, 1999. 96 с.

23. *Фёрстер Г.* О самоорганизующихся системах и их окружении // Самоорганизующиеся системы: пер. с англ. М.: "Мир", 1964. С. 113–139.

24. *Хакен Г.* Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: "Мир", 1985. 419 с.

25. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: "Мир", 1991. 234 с.

26. *Эшби У.Р.* Введение в кибернетику. М.: Иностранная литература, 1959. 432 с.

27. *Altmann G.* Zipfian linguistics // Glottometrics. 2002. No. 3. P. 21–26.

28. *Arrhenius O*. Species and area // J. Ecol. 1921. No. 9. P. 95–99.

29. *Beck Ch.* Recent developments in superstatistics // Brazilian Journal of Physics. 2009. Vol. 39. No. 2A. August. P. 357–363.

30. *Beck Ch*. Generalised information and entropy measures in physics // Contemporary Physics. 2009. Vol. 50. No. 4. July–August. P. 495–510.

31. *Bruers Stijn.* A discussion on maximum entropy production and information theory. 2007. 12 pp. http://arxiv.org/pdf/0705.3226.pdf

32. *Dauphine A*. Fractal geography. ISTE Ltd and John Wiley & Sons. 2012. 225 p.

33. *Di Vita A.* Maximum or minimum entropy production? How to select a necessary criterion of stability for a dissipative fluid or plasma // PHYSICAL REVIEW E81. 2010. DOI: 10.1103/PhysRevE.81.041137. P. 1–13.

34. *Fisher R.A., Corbet A.S., and Williams C.B*. The relation between the number of species and the number of individuals in a random sample from an animal population // J. Anim. Ecol. 1943. No. 12. P. 42–58.

35. *Gleason H.A*. Some Applications of the Quadrat Method // Bulletin of the Torrey Botanical Club. 1920. Vol. 47. No. 1 (Jan.). P. 21–33.

36. *Gleason H.A*. Species and area // Ecology. 1925. No. 6. P. 66–74.

37. *Gleason H.A*. The Significance of Raunkiaer's Law of Frequency // Ecology. 1929. Vol. 10. No. 4 (Oct.). P. 406–408.

38. *Hubbell S.P*. The unified neutral theory of biodiversity and biogeography. Press Princeton and Oxford. 2001. 390 p.

39. *Jaynes E.T*. Macroscopic prediction // Complex Systems–Operational Approaches in Neurobiology, Physics, and Computers, H. Haken, Ed.; Springer: Verlag, Berlin, 1985. P. 254–269.

40. *Jorgensen S.E. and Svirezhev Y.M.* Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Elsevier, 2004. 380 p.

41. *Jørgensen S.E., Bastianoni S., Müller F., Patten B.C., Fath B.D., João C.M., Søren N.N., Tiezzi E., and Ulanowicz R.E.* A New Ecology. Systems Perspective. Elsevier Science, 2007. 288 p.

42. *Kabata-Pendias A. and Arun B. Mukherjee.* Trace Elements from Soil to Human // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007. P. 561.

43. *Kingsley G.* Zipf: life, ideas, his law and informetrics // Glottometrics. 2002. No. 3. P. 18–22.

44. *Kleidon A. and Lorenz R.* Entropy Production by Earth System Processes // Non-equilibrium thermodynamics and the production of entropy in life, Earth, and beyond. Heidelberg, Germany: Springer. 2004. P. 4–20.

45. *Kleidon A.* Non-equilibrium thermodynamics, maximum entropy production and Earth-system evolution // Phil. Trans. R. Soc. 2010. Vol. 368. P. 181–196. doi:10.1098/rsta.2009.0188

46. *Mandelbrot B*. Information theory and psycholinguistics: A theory of word frequencies / In P.F. Lazarsfield & N.W. Henry. Readings in Mathematical Social Sciences. Cambridge: MIT Press. 1966. P. 350–368.

47. *Martyushev L.M*. The maximum entropy production principle: two basic questions // Phil. Trans. R. Soc. 2010. Vol. 365. P. 1333–1334. doi:10.1098/rstb.2009.0295

48. *May R.M*. Ecology of Species and Communities / M. Cody and J.M. Diamond, Eds. Harvard Univ. Press, Cambridge, MA, 1975. P. 81–120.

49. *McGill B.J.* Towards a unification of unified theories of biodiversity // Ecology Letters. 2010. No. 13. P. 627–642.

50. NSF Geography and Spatial Sciences Program Strategic Plan, 2011–2015, May 2011. 10 p.

51. *Picoli S. Jr., Mendes R. S., Malacarne L. C., and R.P.B.* Santos q-distributions in complex systems: a brief review // Brazilian Journal of Physics. Vol. 39. No. 2A. August. 200 p.

52. *Rousseau R.* George Kingsley Zipf: life, ideas, his law and informetrics // Glottometrics. 2002. No. 3. P. 18–23.

53. *Shannon C. E.* Communication in the Presence of Noise // Proceedings Institute of Radio Engineers. 1949. Vol. 37. P. 10–21.

54. *Stoltman J. P.* 21st century geography: a reference handbook // SAGE Publications. 2011. 883 p.

55. *Tokeshi M.* Species Abundance Patterns and Community Structure // ADVANCES IN Ecological research. Academic Press Limited. 1993. Vol. 24. P. 111–187.

56. *Tsallis C.* What should a statistical mechanics satisfy to reflect nature? // Based on a lecture delivered at the Los Alamos National Laboratory Workshop on "Anomalous Distributions, Nonlinear Dynamics, and Nonextensivity" held in Santa Fe, New Mexico, USA in 6–9 November 2002. Physica D193. 2004. DOI: 10.1016/j.physd.2004.01.006. P. 3–34.

57. *Tsallis C.* Introduction to Nonextensive Statistical *Mechanics*, Springer Science+Business Media, LLC. 2009. DOI 10.1007/978-0-387-85359-8 3. 382 p.

58. *Tsallis C.* Some open points in nonextensive statistical mechanics // International Journal of Bifurcation and Chaos c World Scientific Publishing Company. 2011. P. 1–36.

59. *Tsallis C.* The Nonadditive Entropy Sq and Its Applications in Physics and Elsewhere: Some Remarks // Entropy. 2011. Vol. 13. P. 1765–1804. doi:10.3390/e13101765

Thermostatical Foundations of Geography

J. G. Puzachenko

A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Moscow, Russia
e-mail: jpuzak@mail.ru

General review of non-extensive statistical mechanics as a theoretical framework for the study of dynamic, self-organizing systems is presented. Retrospective analysis shows that in the course of ecological and geographical research empirical laws were established, which are direct consequences of aforementioned theory. The generality of the theory and its empirical verification allows us to consider non-extensive thermostatics as an important theoretical basis for the fundamental ecological and geographical research, which opens new opportunities for the physical interpretation of the processes under study.

Keywords: non-extensive statistical mechanics, thermodynamics, rank distribution, entropy, free energy, exergy, information, ecology, geography, earth sciences, landscape cover.

doi:10.15356/0373-2444-2016-5-21-37