

# БИОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ В БИОСФЕРЕ: СИСТЕМОЛОГИЧЕСКИЙ И СЕМАНТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Ю.Г. Пузаченко

Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова, эл. почта: puzak@orc.ru

Статья поступила в редакцию 08.04.09; принята к печати 17.08.09

Показано, что биологическое разнообразие естественно определять как переменную живого вещества, трактуемого как термодинамическая открытая неравновесная в общем случае нестационарная система. По смыслу оно тождественно энтропии, интерпретируемой как мера информации. Целевая функция живого вещества естественно определена как увеличение длительности существования его элементов (организмов и популяций) на основе, в первую очередь, минимизации конкуренции (внутреннего трения) и повышения эффективности механизмов защиты от флуктуаций среды (регулирование). Экстремальный принцип термостатики позволяет вывести фундаментальные ранговые распределения, отображающие равновесные, стационарные и неравновесные состояния систем. Их параметры отражают возможное направление эволюции и текущее эволюционное состояние. Дополнение термодинамической модели формализмами теории информации позволяет более реалистично описать эволюционные пути повышения устойчивости живого вещества в области далекой от равновесия. Показано, что гипергеометрический рост разнообразия живого вещества может быть объяснен, при допущении существования памяти, ее взаимодействием с разнообразием среды и синтезом «новой информации» (открытие новых ранее не существовавших структурных форм). В результате этого в процессе эволюции живое существо способно увеличивать размерность пространства и, как следствие, поток используемой энергии и информации. Эволюция идет по пути минимизации затрат энергии на единицу структурной сложности при неизбежном увеличении ее диссипации на единицу массы. Кратко рассмотрена автоцикличность эволюционного процесса как следствия гиперспециализации элементов в условиях близких к локальному равновесию. Как нерешенные выделяются проблемы геометрии пространства-времени живого вещества, термодинамики сильно нелинейных систем и механизмов обмена информацией между живым веществом и средой. В целом констатируется приближение научного знания к формулировке общей теории живого вещества как частного проявления материального мира.

**Ключевые слова:** *живое вещество, биологическое разнообразие, биосфера, энтропия, информация.*

## Biodiversity in the biosphere: a systemic and semantic analysis

Yu. G. Puzachenko

A.N.Severtsov Institute of Ecology and Evolution

E-mail: puzak@orc.ru

It is shown that biodiversity may be defined in a natural way as a parameter of the living matter, which may be regarded as a thermodynamically open and, in the general case, nonstationary system. The meaning of biodiversity is the same as that of entropy interpreted as a measure of information. The pivotal function of the living matter is naturally defined as the prolongation of the existence of its elements (organisms and populations) based, first of all, on the minimization of intraspecies competition (internal friction) and on the enhancement of the efficiency of the mechanisms of protection from environmental fluctuations (regulation). The extremum principle of thermostatics allows derivation of fundamental rank distributions reflecting equilibrium, stationary, and nonequilibrium conditions of the systems. The parameters thereof reflect possible evolutionary trends and the current evolutionary condition. The supplementation of the thermodynamic model with information theory formalisms provides for a more realistic description of the evolutionary ways to increase the robustness of the living matter under conditions far away from equilibrium. It is shown that the hypergeometric growth of biodiversity may be explained upon the assumption that there exists a sort of memory, which interacts with the environmental diversity to produce novel information (emergence of novel structural forms, which did not exist before). As a result, the living matter is able to increase the dimensionality of its space in the course of evolution and, therefore, the flow of usable energy and information. Evolution follows the way of minimization of energy per unit of structural complexity, which is inevitably associated with increased energy dissipation per unit mass. Some attention is given to the autocyclicity of the evolutionary process as a result of the hyperspecialization of elements under conditions close to local equilibrium. The still unsolved issues are outlined, including the problems of the spatiotemporal geometry of the living matter, thermodynamics of highly nonlinear systems, and the mechanisms of informational exchange between the living matter and its environment. On the whole, science seems to approach the formulation of a general theory of living matter as a particular case of the material world.

**Keywords:** *living matter, biodiversity, biosphere, entropy, information*

## Исходные положения

Будем исходить из того, что слово или термин есть кодовое обозначение некоторого явления природы, и это явление есть его смысл. Само же явление есть то, что дано нам и воспроизводимо в наблюдении [13]. Слово неоднозначно связано с явлением, может включать в себя разные явления; или же, напротив, разные слова соотносимы с одним явлением. Неоднозначность еще более увеличивается при сопоставлении слов, обозначающих сходные явления, или при подборе слов для одного явления из разных языковых систем. Эта хорошо известная неопределенность не создает особых проблем в обыденной жизни, когда смысл слов уточняется в контексте. Но в практической целенаправленной деятельности большая начальная неопределенность в понимании смысла слова неизбежно снижает возможность достижения желаемого результата. С другой стороны, любой термин и его смысл претерпевают длительную эволюцию, неотделимую от развития всей системы знаний. Анализ смысла любого термина и, в том числе, такого как «биологическое разнообразие» оправдан в том случае, если существующие представления опасно неопределены. Эта неопределенность представляется весьма значительной. В соответствии с официальным определением в Конвенции по биологическому разнообразию, «*Biological diversity*” means the variability among living organisms from all sources including, inter alia, terrestrial, marine and other aquatic ecosystems and the ecological complexes of which they are part; this includes diversity within species, between species and of ecosystems». Официальный русский перевод, соответственно: «*Биологическое разнообразие*» означает вариабельность живых организмов из всех источников, включая, среди прочего, наземные, морские и иные водные экосистемы и экологические комплексы, частью которых они являются; это понятие включает в себя разнообразие в рамках вида, между видами и разнообразие экосистем». Если в определении нарушены законы логики, то оно по условию бессмысленно. В соответствии с требованием формальной логики, определение вводится через родовое и видовое понятия. При этом родовое понятие включает определяемое, а видовое конкретизирует. В приведенном выше определении родовым является variability, а видовым все понятия, связывающие его с проявлением жизни в любой ее форме. Очевидно, что это определение не корректно. В идеале оно должно определить diversity как видовое понятие относительно родового variability, а уже затем выделить на следующем уровне собственно биологическую его часть. Является ли термин variability родовым по отношению к diversity – не очевидно. Из определения следует, что под определяемым термином подразумевается абсолютно общее свойство материи: разнообразие или изменчивость, относящиеся ко всему живому. Но поскольку живое, как и все другое, наблюдаемо только через разнообразие и изменчивость, то объем понятия по такому определению тождественен понятию «жизнь». В силу всеобъемлемости биологического разнообразия, связанные с ним действия не имеют собственного предмета, отличного от предмета биологии, и вышеприведенное определение ничего не определяет и не может содействовать эффективному развитию знаний и управляющих действий по этому направлению. Существуют более корректные определения, в которых разнообразие определяется через способ измерения: число классов и число элементов в них. Но в таком варианте остается неясным физический смысл предмета.

Вместе с тем, само по себе биологическое разнообразие интуитивно хорошо воспринимается как явление. Это восприятие, очевидно, определяется моделью происхождения видов путем естественного отбора, разработанной Чарльзом Дарвином [9, 44]. При обсуждении предмета он широко использовал набор связанных понятий «variability», «varieties», «variety», «diversity». Рассматривая английский текст [44], можно полагать, что ряд varieties < variety < species в его понимании есть уровни изменчивости. «From these remarks it will be seen that I look at the term species as one arbitrarily given, for the sake of convenience, to a set of individuals closely resembling each other, and that it does not essentially differ from the term variety, which is given to less distinct and more fluctuating forms. The term variety, again, in comparison with mere individual differences, is also applied arbitrarily, for convenience' sake». «Из этих комментариев следует, что я смотрю на термин вид как произвольно данный, ради удобства показа ряда индивидуумов, близко подобных друг другу, и что он несущественно отличается от термина разновидность (variety), который соответствует менее определенным и более флуктуирующим формам. Термин разновидность (variety), в свою очередь, так же применен произвольно, ради удобства в сравнении с простыми индивидуальными различиями» [9, с. 42]. Отметим, что стандартно «variety» переводится на русский как «разнообразие», и именно так этот термин переведен в известной книге У.Р. Эшби «Введение в кибернетику» (ср. [39] и [40]). Как «разновидность» это слово переведено в издании шестой редакции книги Ч. Дарвина [9]. «Variability» (изменчивость) – одно из основных понятий теории, Дарвин связывает в основном с изменчивостью особи. Термин «diversity» им специально не определен, но используется в связи с понятием форма и структура. Судя по всему, под ними понимается некоторый кластер сопряжено меняющихся признаков, и разнообразие (diversity) есть число (в тексте обычно очень большое) таких форм и структур. Используя весьма большие понятия и три аксиомы: вариации, увеличение числа индивидуумов при конечной емкости среды, случайный процесс выживания наиболее приспособленного, Ч. Дарвин сконструировал как эмпирическое обобщение модель происхождения видов «ORIGIN OF SPECIES». По Дарвину то, что в настоящее время подразумевают под биологическим разнообразием, есть множество (совокупность) «species», «variety», «varieties» с их «variability» признаков и «diversity» форм. В этом определении родовым понятием является «множество», а видовыми – его варианты. Обсуждения истинности модели эволюции Ч. Дарвина лишены всякого смысла. То, что она истина, блестяще доказывается, в частности, эффективностью имитирующего его генетического алгоритма; но то, что, будучи истинной, она не полна, прямо следует из теоремы неполноты Геделя. Для нашего предмета принципиально важным является тот факт, что модель Дарвина, в полной мере опирающаяся на закон больших чисел, послужила основой для теоретической термодинамики, и Больцман называл 19 век веком Дарвина. Вот как Ю.Л. Климонтович [12] комментирует эту оценку: «Больцман на первое место поставил теорию биологической эволюции. В чем же дело? Во времена Больцмана не существовало каких-либо математических моделей биологической эволюции. Больцман, однако, был уверен, что развитая им теория временной эволюции газа будет обобщена и на открытые системы. Теория эволюции Дарвина была первым шагом в

теории эволюции открытых систем. Больцман был одним из немногих, кто понял важность этого «первого шага». Это и определило его оценку теории Дарвина как величайшего открытия XIX века». Таким образом, теория временной эволюции газов Больцмана, по сути, есть перенос эволюции Ч. Дарвина на замкнутые системы.

Дальнейшим естественным развитием общей теории было определение «живого вещества», данное В.И. Вернадским [4, с.52]: «Я буду называть живым веществом совокупность организмов, участвующих в геохимических процессах. Организмы, составляющие совокупность, будут являться элементами живого вещества. Мы будем при этом обращать внимание не на все свойства живого вещества, а только на те, которые связаны с его массой (весом), химическим составом и энергией. В таком употреблении живое вещество является новым понятием в науке». Далее он вводит понятие однородного живого вещества, которому ставит в соответствие вид, расу или популяцию, рассматривает некоторые аспекты его иерархической организации, глобальную работу по преобразованию вещества и энергии. Таким образом, он определяет живое вещество и утверждает, что его поведение во многом будет определяться фундаментальными законами термодинамики. В.И.Вернадского интересовала, в первую очередь, биогеохимическая работа живого вещества и его работа по созиданию биосферы. Термодинамический подход в трактовке живого вещества ясно проявляется в следующем ключевом положении: в параграфе 81 «Очерка биосфера в космосе» он пишет [6]:

«Выяснение существования земных оболочек шло эмпирическим путем в течение долго времени. Некоторые из них, например, атмосфера, установлены столетия назад, и их существование вошло в обиход текущей жизни. Но лишь в конце XIX – начале XX столетия были уловлены основания их выделения, и до сих пор понимание их значения в строении земной коры не вошло в общее научное сознание. Их выделение тесно связано с химией земной коры, и их существование является следствием того, что все химические процессы земной коры подчиняются одним и тем же механическим законам равновесия. Законы равновесий в общей математической форме были выявлены Дж. Гиббсом (1884-1887), который свел их к соотношениям, которые могут существовать между характеризующими химические или физические процессы независимыми переменными, каковыми являются температура, давление, физическое состояние и химический состав тел, принимающих участие в процессе. Все установленные чисто эмпирическим путем земные оболочки (геосферы) могут быть характеризованы некоторыми переменными, которые входят в равновесия, изучавшиеся Гиббсом. Таким образом, можно различить термодинамические оболочки, определяемые величинами температуры и давления, фазовые оболочки, характеризующиеся физическим состоянием (твердым, жидким и т.п.) тел, входящих в их состав, и, наконец, химические оболочки, отличающиеся своим химическим составом.

Основные физические и химические свойства нашей планеты меняются закономерно в зависимости от их удаления от центра. В концентрических отрезках они идентичны, что может быть установлено исследованием. Возможно выделить большие концентрические области и дробные внутри них, называемые земными оболочками или геосферами. Можно предполагать, что в глубоких областях Земли имеются достаточно устойчивые равновесные системы: ядро и мантия, а над ними – земная кора. В

стороне осталась только оболочка, выделенная Э.Зюссом – биосфера. Несомненно, все ее реакции подчиняются законам равновесий, но и заключают новый признак, новую независимую переменную, не принятую во внимание Дж. Гиббсом (живые организмы). Вводя в физико-химические процессы земной коры световую солнечную энергию, живые организмы, однако, по существу резко отличаются от остальных независимых переменных биосферы. Подобно им, живые организмы меняют ход ее равновесий, но, в отличие от них, представляют особые автономные образования, как бы особые вторичные системы динамических равновесий, в первичном термодинамическом поле биосферы. Автономность живых организмов является выражением того факта, что термодинамическое поле, им свойственное, обладает совершенно иными параметрами, чем те, которые наблюдаются в биосфере. В связи с этим организмы – многие очень резко – удерживают температуру в среде с другой температурой, имеют свое внутреннее давление. Они обособлены в биосфере, и ее термодинамическое поле имеет для них значение только в том смысле, что оно определяет область существования этих автономных систем, но не внутреннее их поле».

Далее констатируются, что живые организмы являются основными источниками свободной энергии в биосфере. Итак, В.И. Вернадский [5] фактически определил живое вещество как совокупность организмов, способных создавать и поддерживать, используя лучистую солнечную энергию и вещество, внутреннюю среду в области, далекой от равновесия по отношению к внешней среде. Организмы по В.И. Вернадскому образуют однородности, которые могут трактоваться как виды. Таким образом, живое вещество как совокупность различных однородностей разнородно (разнообразно). В.И. Вернадский оперировал, наряду с видами, также расами, популяциями, «сгущениями» живого вещества биоценозами, ландшафтами (геохорами), но элементом живого вещества в след за Дарвином считал организм как способный поддерживать свою индивидуальность [7]. Р. Докинс (R. Dawkins) в своей концепции эгоистического гена [43] заменил организм геном, что принципиально не изменяет общих логических основ эволюционной модели и определения живого вещества. В.И. Вернадский не видел ограничений для термодинамического подхода в экологии и социологии, что к настоящему времени нашло полную реализацию [11, 45]. Если принять представление о живом веществе как статистическом ансамбле множеств форм реализации жизни, которое, в отличие от других форм вещества, способно поддерживать внутреннее равновесие в неравновесной по отношению к ним среде, то, по аналогии с другими ансамблями косных элементов, оно может трактоваться как термодинамическая система с соответствующими термодинамическими переменными и функциями. В соответствии с общими представлениями, экстенсивные переменные это – общее число элементов  $N$  и масса  $M$ , объем  $V$ , энергия  $U$ , энтропия  $S$ , теплоемкость  $C$ , а интенсивные переменные – это температура  $T$ , давление  $P$  и химический потенциал  $\mu$ . Если исходить из свойств живого вещества, физически интерпретируемыми будут масса или общее число индивидуумов, энергия как любая форма действия и объем как емкость системы. Обратим внимание на тот факт, что для переменной, которую теперь называют энергией, долгое время применяли термин «живая сила», введенный И. Ньютоном. Но поскольку «живую силу» можно было спутать

с обычной силой, последнюю приходилось для ясности называть «мертвой силой», что было неудобно. Термин «энергия» был введен в 1807 Т. Юнгом (1773–1829). Если принять, что теплота есть кинетическая часть внутренней энергии вещества, определяемая интенсивным хаотическим движением молекул и атомов, из которых состоит вещество, то ее можно ассоциировать с конкурентными хаотическими взаимодействиями между особями, и теплоемкость, соответственно, есть способность аккумулировать кинетическую внутреннюю энергию. По смыслу, ее можно интерпретировать как емкость среды, определяемую, в частности, коэффициентом самоингибирования в логистическом уравнении. Энтропия (от греч. τροπή — поворот, превращение) есть понятие, введенное в термодинамике для определения меры необратимого рассеяния энергии. В статистической физике энтропия есть мера вероятности осуществления какого-либо макроскопического состояния; в теории информации — это мера неопределенности какого-либо опыта (испытания), который может иметь разные исходы, и, в общем случае, — это мера возможных преобразований или сложности. Указанные трактовки содержательно связаны друг с другом и взаимно выводимы. В соответствии с этим, биологическое разнообразие, разнородность по Вернадскому, можно ассоциировать с энтропией как с мерой неопределенности, количества информации, содержащейся в живом веществе, и его сложности.

Если принять эту логическую систему вывода, то можно сказать, что

**«Биологическое разнообразие — это свойство (переменная) живого вещества на любом уровне его организации, отражающее неопределенность выбора, возможность преобразования, количество информации или сложности».** Это определение точно описывает смысл изменчивости в определении, данном в Конвенции, но, в отличие от него, однозначно определяет предмет и ставит его в соответствие с другими практически важными свойствами живого вещества, такими, например, как энергия — способность произвести определенную работу и, в частности, создать интересующую нас продукцию. Здесь не остается места интуиции в понимании разнообразия, а общенаучные представления о явлении как о статистическом ансамбле открывают путь к анализу и описанию функций живого вещества, эффективности их реализации и полезности для человека.

Предлагаемое определение, распространяющее на живое вещество представления термодинамики, автоматически включает в себя и другие представления о биологическом разнообразии. Так, например, понятие экологического разнообразия (ecological diversity), связываемое с двумя компонентами — видовым богатством и разнообразием (variety) как числом объектов разного сорта в расчете на единицу пространства или общий объем выборки и как относительное обилие индивидуумов каждого сорта [48, 50, 52] — очевидно соотносится с определенными формами живого вещества. Точно так же соотносится с ним и удобная общая трактовка [49, с.17]: «биологическое разнообразие — терминологический зонтик для обозначения разнообразия природы, включающего в себя все виды животных, растений и микроорганизмов, экосистем и протекающих в них экологических процессов. При этом можно выделить три различных уровня: генетическое разнообразие, видовое разнообразие и разнообразие экосистем. Генетическое разнообразие есть сумма генетической информации, содержащейся в генах всех особей растений,

животных и микроорганизмов, обитающих на Земле. Видовое разнообразие обозначает количество видов. К разнообразию экосистем относится количество разных местообитаний, биотических сообществ и экологических процессов...». Эти и подобные представления [3, 33, 51] полностью соответствуют общей трактовке разнообразия по У. Р. Эшби [39], который вводит его через множество возможностей или различных классов объектов и вероятности принадлежности элемента к соответствующему классу. Он прямо связывает представление о разнообразии с теорией информации, а Р. Маргалев [19] определяет разнообразие как меру информации.

Трактовка биологического разнообразия как термодинамической переменной живого вещества делает целесообразным распространение на него основных положений термодинамики. При этом существуют все возможности верифицировать следствия термодинамической модели реальным поведением живого вещества. Так, фундаментальным отличием живого вещества от косного является реализация им функции максимизации устойчивости элементов и их композиций во времени и пространстве. Эта функция автоматически вытекает из необходимости удерживать свое стационарное состояние в условиях, далеких от равновесия. Ю.М. Свирежев и Д.О. Логофет [29], исследуя классическую логистическую модель, дополненную случайными процессами, вывели фундаментальную зависимость длительности жизни популяции ( $\tau$ -длительность) от ее параметров:

$$\tau \cong \exp\left(\frac{rK^2}{3\varepsilon^2}\right), \quad (1)$$

где  $r$  — коэффициент размножения,  $K$  — емкость среды,  $\tau$  — среднеквадратическое варьирование среды.

Таким образом, популяция может продлить время своего существования (максимизировать устойчивость) без существенного увеличения потребления энергии, если будет увеличивать емкость среды или свою пропускную способность в результате снижения потерь на конкуренцию (повышение социальности) или развивать регуляторы, подавляющие варьирование среды ( $\varepsilon$ ), то есть повышать сложность своей организации. Реализуясь на уровне популяции эти функции, автоматически распространяет максимизацию устойчивости на все уровни организации живого вещества.

### Биологическое разнообразие в рамках моделей термостатики и теории информации

В отличие от В.И. Вернадского, не будем, определяя живое вещество как систему, однозначно связывать понятие элемента с организмом или, в отличие от Р. Докинса, с геном. Организм как элемент рассматривается на популяционном и таксономическом уровне организации, ген как элемент — на генетическом уровне, сообщество как пространственно-временная единица — на экосистемном (биогеоценотическом), а геохора (геосистема) — на ландшафтном уровне организации. Конечно, на разных уровнях могут проявляться различные свойства живого вещества, но способ определения системы является общим, и все результаты анализа ее поведения на разных уровнях организации сопоставимы. При таком подходе для идеальных равновесных отношений можно вывести законы, справедливые для любых статистических ансамблей. Их вывод осуществляется на основе экстремального прин-

ципа [32, 56] и, при более общем подходе, предложенном А.П. Левичем [8, 14-18], для равновесного состояния системы. В соответствии с определением допускаем, что система состоит из  $N$  элементов в пространстве свойств, физических сил, ресурсов, условий  $L^k$ , где  $k$  – размерность пространства. Каждый элемент определен значениями  $q^k$  каждого из  $k$ -свойств. Подмножество элементов с тождественным набором значений свойств (с тождественными состояниями) образуют  $i$ -класс с  $n_i$  элементами. Элементы в системе могут образовывать различные комбинации, некоторые из которых могут быть устойчивыми во времени. Общее число возможных соединений элементов из  $N$  будет равно

$$I(N) = \frac{N!}{n_1! n_2! \dots n_m!} \quad (2)$$

$I(N)$  можно рассматривать как оценку информации, содержащейся во множестве из  $N$  элементов или разнообразии. Очевидно, это огромная величина. Представленная в логарифмической форме, она становится вполне обозримой. После довольно простых преобразований получаем

$$S(N) = -N \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i$$

где  $p_i = n_i/N$  представляет собой вероятность появления элементов  $i$ -класса в ансамбле, и

$$S = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i \quad (3)$$

есть математическое ожидание логарифма возможного разнообразия состояний на один элемент или энтропия Больцмана-Гиббса-Шеннона. Очевидно, что эта термодинамическая переменная может быть оценена с помощью любой меры, отражающей масштаб варьирования. Так, наиболее общей оценкой является энтропия Ренье:

$$S_g = \frac{1}{g-1} \log_2 \sum_{i=1}^m p_i^g \quad (4)$$

где  $g$  – порядок момента для вероятности  $p_i$ . При  $g = 1$  энтропия Ренье есть энтропия Больцмана [38, 53]. (Примечание: Основание логарифма определяет единицу разнообразия-информации: основание два – бит, натуральное основание – нат, десятичное – хартли; и он влияет на содержание. В связи с этим далее будем в записи уравнений будем использовать натуральное основание  $\ln$ .)

Введем условие, определяющее соотношение между элементами, принадлежащими к конкретным классам с пространством свойств  $\sum_{i=1}^m q_i^k n_i \leq L^k, k=1,2,\dots,m$ .

Здесь  $q_i^k$  определяет значение (состояние) свойства  $k$  для элементов класса  $i$ . Трактовка этого состояния определяется физической сутью рассматриваемой системы. Например, в частном случае это может быть размер особи, некоторое количество ресурса  $k$ , используемого элементами класса  $i$  и т.п. Естественно, что сумма произведений значений состояний на соответствующее число элементов, отражающее используемый ресурс (пространство) меньше или равна мощности соответствующего свойства ( $L^k$ ). Между значением  $q_i^k$  и числом элементов  $n_i$  класса  $i$  может существовать линейная, логарифмическая и дважды логарифмическая связь или иная нелинейная форма зависимости. Иными словами, действие сил и условий на элементы и, соответственно, отношения между ними самими может реализоваться в линейном Эвклидовом и нелинейном пространстве. В целом, система будет определяться следующими условиями:

рифмическая связь или иная нелинейная форма зависимости. Иными словами, действие сил и условий на элементы и, соответственно, отношения между ними самими может реализоваться в линейном Эвклидовом и нелинейном пространстве. В целом, система будет определяться следующими условиями:

$$\begin{cases} S(N) = -N \sum_{i=1}^m p_i \ln p_i \rightarrow \max \\ \sum_{i=1}^m n_i = N \\ \sum_{i=1}^m q_i^k p_i \leq L^k \\ n_i \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Для условий равновесия, при которых производные по  $n^i$  и  $q^i$  приравниваются нулю, при использовании преобразования Лагранжа получают экстремальное распределение элементов по классам в пространстве свойств, отвечающее условию равновесия:

$$n_i = N \exp\left(-\sum_{k=1}^m \lambda^k q_i^k\right) \quad (7)$$

где величина  $N$  и множители Лагранжа  $\lambda^k$  являются функциями свойств.

Обозначим статистическую сумму всех  $n_i$  как

$$Z = \sum_{i=1}^m \exp\left(-\sum_{j=1}^m \lambda^j q_i^j\right) = N \quad (8)$$

Тогда  $p_i = 1/Z \exp\left(-\sum_{k=1}^m \lambda^k q_i^k\right)$  представляет собой

вероятность  $p_i$  попадания элементов в класс  $i$  и является экстремальным ранговым распределением, отвечающим условию равновесия и имеющим максимум энтропии при условиях, заданных системой уравнений.

Среднее состояние макросистемы (средняя энергия) определяется как

$$\langle q \rangle = \sum_{i=1}^m p_i q_i \quad (9)$$

Энтропия системы

$$S = -(\lambda_0 - \ln N) + \sum \lambda_k L_k \quad (10)$$

есть функция объема пространства свойств ( $L_k$ ), множителей Лагранжа ( $\lambda_0, \lambda_k$ ) и логарифма и числа элементов [14].

Экстремальное распределение отображает равновесное состояние макросистемы, при котором различие между числами элементов в соседних классах минимально возможное, и распределение можно рассматривать как практически непрерывное.

По А.П. Левичу [14] экстремальный принцип отображает:

- структуры системы, максимальные по силе, или ее состояния, наиболее удаленные от своего бесструктурного аналога;
- наименьшее количество допустимых структурой системы преобразований (т.е. наибольшая устойчивость) при максимальной экспансии системы (росте общего числа элементов);
- наибольшее разнообразие системы, наибольшую энтропию (ее сложность, степень самоорганизации или содержание информации в ней);

- наименьшее использование любого из свойств среды (наибольшую эффективность).

Все эти свойства макросистемы отвечают условиям равновесия или стационарности.

Очевидно, что энтропия или разнообразие системы есть функция размерности пространства  $L$  и числа элементов в системе. Применительно к живому веществу, определенному через такие элементы как организмы, единицы биомассы, или единицы аккумулированной энергии, она соответствует числу элементов, наибольшему в условиях наибольшей биологической продуктивности, то есть при оптимальном соотношении тепла и влаги. В полном соответствии с этим получаем, что биологическое разнообразие максимально в экваториальных тропиках и минимально в арктических и тропических пустынях (см. например [41]). Размерность пространства живого вещества не очевидна и требует специальных оценок. Наряду с этими базовыми внешними факторами, разнообразие определяется коэффициентами ранговых распределений, отвечающих экстремальному принципу.

Для одномерного случая имеем:

экстремальное ранговое распределение  $p_i = \exp(\mu - \lambda i)$  представляет собой ранговое распределение Гиббса в термостатике (или Мотуры в экологии) при условии линейной зависимости состояния системы от ресурса ( $i \approx q_i^k$ );

$p_i = \exp(\mu - \lambda \ln(i)) = v i^{-\lambda}$  представляет собой ранговое распределение Ципфа при нелинейной зависимости от ресурса ( $\ln(i) \approx q_i^k$ );

$p_i = \exp(\mu - \lambda \ln(a+i)) = v(a+i)^{-\lambda}$  представляет собой распределение Ципфа-Мандерблота, где  $a$  – число «пустых» состояний с неиспользуемым ресурсом ( $\ln(a+i) \approx q_i^k$ );

$p_i = \exp(\mu - \lambda \ln \ln(i)) = v \ln i^{-\lambda}$  представляет собой распределение Мак-Артура («разломанной палки») при дважды логарифмической зависимости от ресурса ( $\ln \ln(i) \approx q_i^k$ ).

Во всех случаях  $\mu$  тождественно свободной энергии,  $\lambda$  – темпера (температура в ее традиционном понимании  $1/\lambda$ ).

То, что реальные распределения элементов по классам всего, что наблюдаемо, всегда ранговые, общеизвестно [57]. А.П. Левич [14] показал, как из ранговых распределений можно простым путем вывести фундаментальную зависимость между числом видов (в общем случае, числом классов) и объемом выборки  $n$ , тождественно, числом видов и площадью. Для этого достаточно обозначить через  $k$  класс самого высокого ранга со всего одним элементом ( $n_k = 1$ ). Так как  $n_k = N \exp(\mu - \lambda k) = 1$ , то  $k = a + (1/\lambda) \ln N$ , а для распределения Ципфа  $k = (vN)^{1/\lambda}$ . Очевидно, что  $k$  представляет собой число видов. Обратим внимание на то, что число особей на единицу площади отражает пропускную способность системы, и число видов автоматически становится ее функцией. С другой стороны, можно записать  $N = n \cdot A$ , где  $n$  обозначает число особей (элементов) на единицу площади, и  $A$  обозначает площадь. Таким образом, получаем зависимость числа видов от площади, полученную сначала эмпирически в островной биогеографии, а затем подтвержденную и для всех континентов. На практике могут наблюдаться любые ранговые распределения и сопряженные с ними зависимости между числом видов и площадью, но чаще встречаются распределения Ципфа.

Экстремальный принцип описывает распределения элементов по классам в равновесной системе с локальным максимумом энтропии. При естественном допущении зависимости устойчивости элементов от ранга легко получить стационарные неравновесные ранговые распределения вида  $p_i = \exp(-|_1 i \pm |_2 i^2 \pm |_3 i^3 \pm \dots)$ .

Энтропия у таких распределений меньше, чем у экстремальных, но производство энтропии во времени в соответствии с теоремой Пригожина минимально. Система может быть нестационарной. Энтропия Кульбака ( $SK$ ) рассматривается как информация, отражающая масштаб

нестационарности  $SK = \sum_{i=1}^{i=k} p_i \log \frac{p_i}{p_i^{em}}$ ,  $SK \geq 0$ , где  $p_i$

представляет собой вероятность  $i$ -го класса реального распределения,  $p_i^{em}$  – вероятность  $i$ -го класса стационарного или равновесного распределения. В общем случае, чем больше нестационарность (энтропия Кульбака), тем больше свободная энергия (эксергия) и способность системы совершить работу [30].

Так или иначе, все фундаментальные зависимости, связывающие число видов с площадью, которые могут быть получены эмпирически, выводятся из термодинамических представлений. Специальная теория биологического разнообразия на основе гипотезы равновесия и независимости элементов разных классов, предложенная Хаббелем (S.P. Hubbell) [47] есть частный случай термодинамической модели и не имеет самостоятельного значения. Отметим также, что любые методы многомерного анализа могут быть сведены к многомерной термодинамической модели с попыткой непосредственно идентифицировать число действующих сил и положение элементов системы относительно них.

Особой проблемой живого вещества является реализуемость линейных и нелинейных экстремальных моделей. Проблема структуры реального физического планетарного пространства и его соотношения с идеальными геометрическими моделями была поставлена в полном объеме еще В.И. Вернадским [7]. Он показывал, что пространство планеты анизотропно непрерывно, что живому веществу с его левизной скорее соответствует Риманово пространство, а пространство биосферы есть Эвклидово, но с вложенным в него множеством Римановых подпространств: «Биосфера представляет земную оболочку, в которой в состояниях пространства евклидовой трехмерной геометрии естественных тел включены дисперсным образом и в дисперсной форме бесчисленные мелкие римановские пространства живого вещества. Связь между ними поддерживается только непрерывным биогенным током атомов» [5, с. 274].

К настоящему времени можно считать доказанным, что пространство биосферы подчиняется фрактальной геометрии, то есть, оно анизотропно непрерывно. Ранговые распределения по условию фрактальны. Мультифрактальное пространство в пределе сводится к фундаментальному уравнению баланса энергии [38, 53]. Фрактальное пространство соответствует идеально равновесному состоянию. Реальное пространство живого вещества по условию не может быть равновесно, и его динамика реализуется в состояниях некоторого пространства, дополняющего фрактальное. Так как пространство может рассматриваться только совместно со временем, то проблема пространства-времени живого вещества, поставленная В.И. Вернадским, несмотря на плодотворную работу Российского междисциплинарного семинара по темпорологии, руководимого А.П. Левичем, остается открытой.

Еще одну форму выражения тех же отношений разнообразия (энтропии) системы и ее среды находим в фундаментальном законе скорости передачи информации по каналу связи, который сформулирован К. Шенноном [37]. Скорость передачи информации или разнообразия (про-

пускная способность, емкость канала) определяется как

$$C = w \ln(1 + P/N),$$

где  $w$  – полоса частот.

Полоса частот выводится из теоремы отсчета Вудворда–Котельникова, доказывающей, что любая непрерывная функция воспроизводима, если на каждое ее колебание приходится не менее двух измерений-отсчетов.

Соответственно, полоса частот  $w = 1/T$ , где  $T$  = период колебаний,  $T$  = время и/или пространство. Полоса частот  $w$  в общем случае включает в себя все частоты от нуля до  $w = 0,5$ , т.е., частоты Найквиста. Таким образом, если  $P$  есть длина алфавита для дискретного случая передачи информации, то  $w$  представляет собой длину слова, принимаемого системой за единицу времени. В общем случае,  $P$  есть мощность (дисперсия) потока сигналов, поступающих от передатчика информации (среда),  $N$  – мощность теплового шума в канале связи (диссипация энергии, тепловой поток). Если рассматривать любые системы как воспринимающие среду, то разнообразие «С» есть прямая функция мощности действия среды.

Естественно утверждать, что в конечном итоге существует только то, что наблюдаемо, то есть динамически устойчиво, хотя бы на очень небольшом интервале пространства–времени. Если полагать, что система, воспринимающая сигнал, есть некоторый статистический ансамбль, состоящий из множества элементов, то ее устойчивость есть функция выживания этих элементов и того, насколько адекватно реагирует система как целое на ансамбль сигналов, поступающих из среды. Ошибки в декодировании сигнала могут приводить к гибели отдельных элементов, к разрушению взаимодействий между ними и к неадекватному поведению всей системы. Ошибки могут накапливаться. Ошибка одного элемента может влечь за собой ошибки других, что в конечном итоге будет приводить к разрушению всей системы [22, 24].

Ошибка есть функция полосы частот  $N = N_0 w$ , где  $N_0$  – шум на единицу полосы частот. Попросту говоря, чем больше полоса частот, тем больше шум.

$$\text{Соответственно, } C = w \ln(1 + P/wN_0). \quad (11)$$

В отличие от термостатики, здесь отображается поведение системы и на микроскопическом уровне (шум на единицу полосы частот), и на макроскопическом – передача сигнала в целом. Этот закон показывает, что одним из способов повышения устойчивости на уровне элементов является уменьшение полосы частот, то есть снижение шума. Однако это автоматически приводит к уменьшению скорости передачи информации, что уменьшает разнообразие системы и также может приводить к потере устойчивости. Следовательно, можно полагать, что при заданной мощности среды существует некоторая оптимальная полоса частот, при которой разнообразие, генерируемое системой, достаточно для обеспечения ее устойчивости.

Максимизируя устойчивость в заданных условиях среды, объект, принадлежащий к живому веществу, должен искать оптимальную полосу частот или уровень специализации, при котором он обеспечивает самовоспроизводство на максимально большом интервале времени. При этом он должен минимизировать ошибки, то есть специализироваться, но до уровня, достаточного для поддержания пропускной способности ( $C_{\text{сум}}$ ).

Если принять некоторую допустимую минимальную пропускную способность как константу, то можно записать

$$C_{\text{сум}} = w_i \ln(w_i + P/N_0) - w_i \ln w_i, \quad (12)$$

и тогда между полосой частот (уровнем специализации

$w_i$  для канала  $i$ ) и мощностью среды будет существовать нелинейное соответствие.

Это соотношение хорошо описывает эмпирически известные закономерности, в частности, в распространении видов с различными уровнями специализации:

1. Если мощность среды мала, то могут существовать только виды с широкой полосой частот (низкой специализацией);

2. Виды с узкой полосой частот (специализированные) могут существовать только при относительно большой мощности среды (тропики);

3. Специализация есть экспоненциальная функция среды. В области очень большой мощности среды приращение ее мощности определяет очень малые изменения специализации.

Из этого соотношения автоматически получаем, что число однородных классов с одинаковой полосой частот при условии их малого пересечения (в частности, число видов) есть функция логарифма мощности среды. Осуществив преобразования получаем:

$$k - \ln(k) = (W/C_{\text{сум}})(\ln P - \ln W) \quad (13)$$

где  $W = kw$ , причем  $W$  представляет общую полосу частот всей системы,  $w_i$  – полосу частот канала ( $i$ ),  $k$  – число однородных совокупностей (видов). Так как  $\ln(k) \ll k$  при больших мощностях сигналов, то получаем фактически ту же зависимость, что и термостатике: чем больше мощности среды, тем больше число классов (видов).

Двойственный характер влияния специализации на пропускную способность позволяет рассматривать ее как функцию специализации на уровне элементов, перерабатывающих информацию (1) и на уровне всей системы (2).

$$\begin{aligned} 1. (C/w_i) - \ln P &= -\ln w_i \\ 2. w_i \exp(C/w_i/P) &= w_i \ln w_i \end{aligned}$$

При этом пропускная способность без учета шума есть просто  $w_i \ln P$ . Опустив вывод, данный в [24], получаем, что общая пропускная способность системы:  $C = W(\ln P - \ln W N_0 + H_w N_0)$ , где  $H_w = -\sum (w_i/W) \ln (w_i/W)$ , есть энтропия канала связи.

Таким образом, при достаточно большой мощности сигнала  $P \gg 1$  и не пересекающихся полосах частот пропускная способность системы увеличивается пропорционально разнообразию. Этот результат не соответствует следствиям термодинамической модели, в которой с ростом энтропии свободная энергия и, соответственно, работоспособность системы падают. Это несоответствие определяется тем, что мера разнообразия в данном случае отражает соотношения полос частот пересекающихся частных каналов. Но, если каналы не пересекаются, то система организована, и полученная мера  $H_w$  есть информация, циркулирующая между каналами. Таким образом, в информационной модели принимающие информацию подсистемы не столько создают друг для друга помехи, сколько дополняют друг друга. По мере увеличения конкуренции между частными каналами информация будет уменьшаться и, в пределе, приближаться к нулю, и полученное соотношение не будет противоречить балансу энтропии и свободной энергии в равновесной термодинамике. Таким образом, если существует «порядок-информация», снижающая вклад отрицательных взаимодействий между подсистемами, то увеличение разнообразия классов увеличивает пропускную способность канала связи (емкость среды). Следовательно, опуская вывод, можно записать, что энтропия системы

с учетом конкуренции между частными каналами определяется как

$$S(R) = S + H_w, \quad (14)$$

где  $S$  есть собственно энтропия состояний системы, а  $H_w$  есть информация. При этом

$$H_w = \sum S_i - (-\sum(p_{1,2,\dots,k}) \ln(p_{1,2,\dots,k})) \quad (15)$$

где  $S_i = -p_i \ln p_i$  есть энтропия каждого канала с долей элементов  $p_i$ . Информация минимальна, когда состояния каналов независимы друг от друга, и максимальна, когда состояние каждого канала однозначно определяется состояниями других. В рассматриваемой модели предельное число специализированных каналов есть, по условию, функция среды, а их возникновение и информация в системе рассматривается как функция саморазвития, определяемая требованием увеличения длительности каждого элемента системы.

Второй путь максимизации длительности связан с подавлением дисперсии среды действием пассивного или активного регулятора Эшби. Действие регулятора подчиняются закону необходимого разнообразия. Предполагается, что регулятор располагает множеством ответов, подавляющих негативное действие среды. Для работы такого регулятора необходимо, чтобы саморазвитие системы было в какой-то степени когерентно относительно множества состояний среды  $S(E)$  и чтобы для большинства ее состояний в пространстве времени находился бы адекватный частный канал. Следовательно,  $H_w \leq S(E) - H(E/w_i)$ , где  $H(E/w_i) = -\sum p(e_j/w_i) \ln p(e_j/w_i)$  представляет собой шум в дискретном канале связи от среды к системе, и  $p(e_j/w_i)$  есть условная вероятность состояния среды  $j$  по каналу  $w_i$ . Если для каждого состояния среды найдется свой канал, то регулирование будет абсолютным, и длительность системы будет максимальной. В соответствии с Эшби, такая система должна быть способной к самообучению и подстройке к изменяющемуся разнообразию среды. Гомеостаз является классической моделью такой системы.

Таким образом очевидно, что пропускная способность канала связи, как и термодинамическая модель свободной энергии, содержит в себе две основных составляющих: «внешнюю энергию-действие» и «информацию-энтропию». Разница состоит лишь в том, что информационная модель допускает самоорганизацию и снижение энтропии на этой основе, а в термодинамической модели эта составляющая системной организации не рассматривается.

В рамках рассмотренной информационной модели между частными каналами возможны только конкурентные взаимодействия. Однако в принципе не запрещен и положительный знак взаимодействия. Знак отношений влияет на величину информации в системе через увеличение продолжительности жизни и, соответственно, числа элементов при заданных условиях среды.

### Иерархическая организация биологического разнообразия

Многообразие и природа иерархии – традиционная тема географии и экологии. В 1998 г этой теме был посвящено специальное рабочее совещание Научного комитета по проблем среды [54]. Несмотря на все разнообразие механизмов, порождающих пространственно-временную иерархию от таксономии до ландшафтного покрова и социума, ее природу можно свести к работе нелинейного осциллятора, в котором частота колебания  $w$  зависит от амплитуды или мощности ( $D$ ). Избыток энергии, генерирующий колебания на частоте  $w_i$ , сбрасывается на часто-

ту  $w_i+k$  при  $w_i+k > w_i$  ( $k=1,2,3\dots m$ ). При этом в общем случае  $\ln D_i / \ln w_i \approx h$  является параметром фрактального множества (показателем Херста) [38]. При равновесии иерархия масштабов пропорциональна  $h$  ( $h$  может быть любым числом в интервале  $0 < h < 1$  при топологической размерности 1). Однако идеального равновесия никогда не существует, и в реальной системе некоторые гармоника предпочтительней, что соответствует образу стационарной неравновесной системы.

Ю.Г. Пузаченко и А.Ю. Пузаченко [25, 26] показали, что в таксономической иерархии генератор фрактальности может быть функцией от иерархического уровня, что отражает стационарность неравновесной таксономической системы. А.М. Хазен [34] развил оригинальную и перспективную «информационно-термодинамическую модель», отображая энтропию-информацию в комплексной плоскости. Эта модель расширяет аналитические возможности представления непрерывной и дискретной информации. Такое отображение определяется необратимостью энтропии и, в первую очередь, фазовых иерархических переходов соответствующих комплексной переменной. Комплексной переменной соответствует энтропия-информация ( $H_w$ ), связанная с ранговым распределением классов ( $K_k H$ ), а действительной оси соответствует семантическая информация  $S = K_k \ln Z$  ( ) представляет собой статистическую сумму ранговых распределений или свободную энергию, прямо зависящую от мощности среды  $\ln(P)$ ,  $K_k$  есть постоянная, тождественная по смыслу полосе частот. В терминах лингвистики,  $K_k$  есть длина слова ( $k=1$ ). Иерархия есть переход от слова к фразе ( $k=2$ ), от фразы к абзацу ( $k=3$ ) и т.д. При этом иерархическая информация есть  $J = \chi \ln K$ . Следует отметить, что модель Хазена представляет самостоятельный интерес, и ее полный анализ выходит за рамки данной статьи. Вытекающие из нее следствия не противоречат излагаемым положениям. В отношении иерархии из модели Хазена следует, что семантическое разнообразие  $S$  (действительная переменная) на высших уровнях иерархической организации при больших  $J$  меньше, чем на нижних. Это соотношение для географа интуитивно очевидно: как проста общая зональность суши и как сложно устройство природы на уровне фации-ландшафта! Так как  $K_k$  есть размерность пространства, то, соответственно, иерархическая организация может быть связана с ее изменением.

### Изменение биологического разнообразия во времени

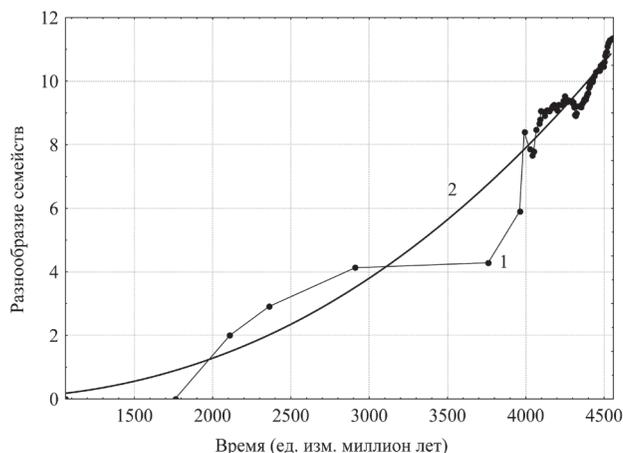
Биологическое разнообразие и информация Кульбака являются параметрами, отражающими, наряду с прочим, возможное направление динамики системы. Для каждой системы динамика может рассматриваться в разных масштабах времени. Наиболее полную классификацию ее возможных вариантов на уровне биогеоценоза и биогеоценотического покрова дал В.Н. Сукачев [31]. Основаниями для этой классификации были приняты: 1) отнесение к равновесным процессам с естественной обратимостью или к неравновесным и, по этому условию, необратимым процессам; 2) отнесение к процессам саморазвития (автогенным или эндогенным) или процессам, происходящим под воздействием внешних сил (аллохтонным, экзогенным); 3) масштабы во времени и пространстве. Эту схему можно распространить на все формы живого вещества. Живое вещество в любом случае мыслится как организованное в систему с некоторыми отношениями между элементами, принадлежащими к разным классам. Отноше-

ния могут быть положительными, отрицательными и нейтральными. Соответственно, имеем динамическую систему, в достаточно общем случае являющуюся нелинейным осциллятором. В стационарном равновесном состоянии, получая энергию извне, она может реализовать квазирегулярные колебания, которые, в соответствии с требованием максимизации выживания частей и всей системы, будут в ходе эволюции снижать самоингибирование. Поэтому колебания будут стремиться к фрактальному равновесному режиму с локальными максимумами разнообразия, маркирующими иерархические уровни. В соответствии с моделью пропускной способности канала связи, элементы и части системы должны специализироваться, что также повышает разнообразие и увеличивает емкость.

Эффект минимизации взаимозависимости частей и увеличения разнообразия в ходе эволюции сложной биологической системы был предсказан М. Цетлиным [36]. Красноярские биофизики [1, 2] теоретически обосновали и экспериментально подтвердили принцип разделения видов ресурсов в гомогенной среде в условиях равновесия: число практически независимо сосуществующих видов равно числу ресурсов, и каждый вид предпочтительно использует собственный ресурс. Этот механизм специализации справедлив и для условий среды, определяющих эффективность использования материальных ресурсов. Его реализация приводит, в частности, к континуальности растительного покрова и живого вещества в целом [28]. Таким образом, при всех условиях в коротком масштабе экологического времени живое вещество, переведенное действием внешней или внутренней силы в неравновесное нестационарное состояние в соответствии со вторым началом термодинамики, переходит в стационарное неравновесное и затем в равновесное состояние. В стационарной среде оно будет переходить на новые уровни равновесия, увеличивая температуру и разнообразие, в том числе и в результате увеличения числа классов. Флуктуация внешних и внутренних сил может переводить систему в нестационарное состояние, порождая новый цикл движения к стационарности и равновесности. Анализируя ранговые распределения, на основе многомерного отображения можно оценить положение системы относительно области равновесия и возможный вектор ее эволюции. Можно полагать, что, в отличие от косного вещества, живое вещество имеет возможность, активно снижая коэффициент самоингибирования (внутреннее трение) за счет специализации и самоорганизации, в процессе эволюции минимизировать снижение производства свободной энергии (увеличивать статистическую сумму) и поддерживать производство энтропии за счет образования новых специализированных классов и увеличение температуры за счет выравнивания рангового распределения. Такое поведение, противоречащее второму началу термодинамики, вытекает из специализации и снижения конкуренции, не существующих в косном веществе, но оно нуждается в теоретическом и эмпирическом подтверждении. В конечном итоге, такая система оказывается перегретой и теряющей устойчивую к малым возмущениям. Возникновение когерентного поведения специализированных и частично гиперспециализированных частных каналов приводит к большой чувствительности к малым возмущениям всей системы и к высокой вероятности ее перехода в хаотическое термодинамически равновесное состояние и к гибели отдельных гиперспециализированных подсистем. В частных случаях система может длительно удерживаться в стационарном неравновесном состоянии сильными случайно

отобранными или возникшими контурами положительной обратной связи или, напротив, вести себя, почти как косное вещество, демонстрируя практическую неизменность во времени в области глобального равновесия.

Палеонтологическая летопись позволяет исследовать динамику разнообразия в геологическом масштабе времени.



**Рис. 1.** Рост логарифма числа семейств в таксономическом разнообразии живого вещества. 1 — логарифм числа таксонов, 2 — модель.

На рис. 1 показана общеизвестная [35, 20, 25] гиперболическая кривая роста числа семейств (по материалам проекта Fossil2 [42]) в живом веществе во времени. Этот факт полностью противоречит второму началу термодинамики. Но это противоречие снимается, если рассматривать живое вещество как термодинамическую информационную систему. Такая система в силу требования максимизации длительности автоматически должна обладать памятью. Ее пропускная способность должна определяться совместным разнообразием памяти и разнообразием среды. Если принять поток энергии постоянным, то при принятых условиях разнообразие (мощность) памяти  $\ln(1+T/N)$ , где  $T$  есть время от начала эволюции,  $N$  — шум. Пропускная способность определяется как  $C_T = wT \ln(1+T/N)$ . Так как система может адаптироваться к мощности сигнала, то  $w = (a+b \ln T)$  и  $C_T \approx (a+b \ln T) \cdot T \ln(1+T/N)$ . Возможна и иная трактовка:

1) в каждый момент времени скорость синтеза разнообразия определяется как  $C_i = w \ln(1+P/N)$ .

2) разнообразие, полученное за некоторый интервал времени через взаимодействия классов и элементов, синтезируется и накапливается по экспоненциальной схеме  $C_T = a2^T C_i$  или по мультипликативной  $aC_T = C_i T^b$ . Константа  $a$  отражает произведение скорости производства разнообразия за миллион лет с учетом стирания информации из памяти. Константа также может быть функцией времени.

Модель с адаптацией описывает рост разнообразия семейств как:

$$C_T = (-3,83 + 0,43 \log_2 T) T \log_2(1 + T/3739215) \text{ при } R^2 = 94,5\%$$

Модель без адаптации, соответственно, описывает его как:

$$C_T = 3,21058 T \log_2(1 + T/9021580) \text{ при } R^2 = 93,0\%$$

Экспоненциальная модель:

$$C_T = 0,51(1,968^{T/1000}) \text{ при } R^2 = 94,01$$

Экспоненциальная модель с адаптацией:

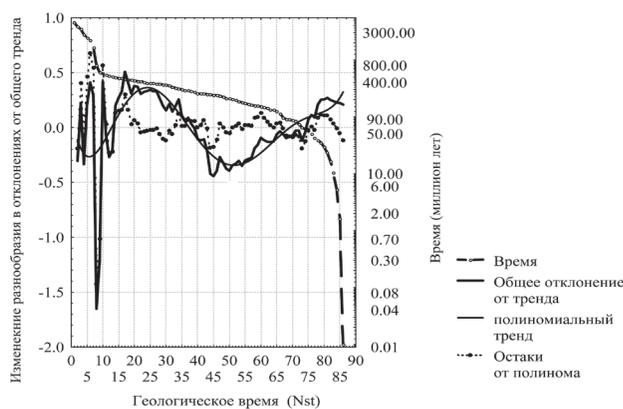
$$C_T = (-0,1497286 + 0,755 \log_2(T/1000)) 1,549^{T/1000} \text{ при } R^2 = 94,7$$

Гипергеометрическая модель:

$$C_T = 0,22(T/1000)^{2,57} \text{ при } R^2=94,59$$

Гипергеометрическая модель с адаптацией:  
 $CT = (0,22+0,0000052\log_2 T/1000)(T/1000)^{2,57} \text{ при } R^2=94,6$

Параметры моделей определены при аппроксимации по единице времени в 1 млн. лет. При небольших различиях моделей наилучшее качество имеет гиперболическая модель. Однако можно считать, что все варианты подобны, и общим для них является отображение влияния на синтез разнообразия и накопление его в памяти системы. Можно также полагать, что, наряду с вкладом в синтез разнообразия расширяющейся памяти, существует и вклад за счет увеличения размерности пространства. В разных моделях масштаб изменения размерности различен: в модели, допускающей действие памяти как мощности сигнала, увеличение размерности за время эволюции максимально – в 2,8 раза, в экспоненциальной модели с адаптацией – в 1,5 раза. В гипергеометрической модели увеличение размерности практически отсутствует. Можно полагать, что увеличение размерности пространства связывается с открытиями и запоминаниями новых возможностей устойчивости, расширяющих синтез нового разнообразия. Иначе говоря, в процессе эволюции синтезируется новая информация (эволюционные открытия), позволяющая использовать ранее неизвестные подопласти пространства. Все модели определяют неизбежность длительного латентного состояния, продолжавшегося около 1 миллиарда лет, с последующим прогрессивным синтезом разнообразия. Можно полагать, что в латентный период происходит стохастический поиск удачных устойчивых комбинаций элементов, на основе запоминания которых возникает основание для ускорения синтеза новых форм. В принципе, такая схема должна действовать для любой эволюционирующей открытой биологической системы. Если рассматривать геологическую шкалу как отображение собственного времени эволюционного процесса на уровне семейств для всех таксонов ( $N_{st}$ ), то длительность собственного времени в ньютоновской временной шкале есть  $\log_2 DT = 10,15(1+N_{st})^{0,5}$  при  $R^2 = 68\%$ . В соответствии с моделью длительность текущего геологического времени составляет 1,1 млн. лет.

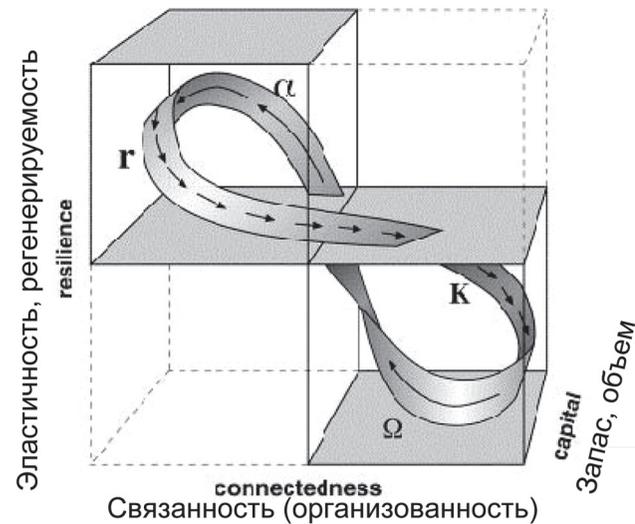


**Рис. 2.** Отклонения от модели «разнообразие семейств – время эволюции»

Отклонения от модели «разнообразие-время» в шкале  $N_{st}$  (рис. 2) имеет строго выраженные периодические составляющие: примерно около 42, 21 и 4,6 геологических единиц времени. Автоколебания описывает смену интенсивного синтеза разнообразия локальными катастрофами. Наиболее крупная катастрофа соответствует пермскому

периоду, а максимальный синтез кембрийскому времени и Маастрихт-Кампанскому времени позднего мела. Описанные правила изменения разнообразия как функции времени справедливы и для каждого отряда, но скорость приращения разнообразия на уровне семейств тем выше, чем моложе отряд. Динамика разнообразия в геологической шкале времени может быть ассоциирована с нелинейным осциллятором, генерирующим автоколебания. В рамках рассмотренной выше информационной модели можно связать катастрофы, сопровождающиеся относительным падением разнообразия, с перегревом системы в результате чрезмерной специализации и, соответственно, потери устойчивости.

К. Холлинг [43], тщательно исследовав множество примеров динамики биологических систем, предложил качественную модель таких автоциклических преобразований, назвав ее адаптивными циклами (рис. 3). Адаптивный цикл, по мысли автора, чередует длительные периоды накопления и преобразования ресурсов и более короткие периоды, в которых создаются возможности появления новшеств (открытий).



**Рис. 3.** Представление цикла в координатах связанность (организованность), эластичность (регенерируемость), запас (объем). Эластичность уменьшается при переходе системы в K-фазу цикла, где система становится более ломкой, и максимальна при переходе от фазы α к фазе γ. Переходы от фазы K к фазе W и от фазы W к фазе α происходят очень быстро. В этой обратной петле накопленный запас реорганизуется для инициирования нового цикла.

Выделяются четыре различные стадии:  
*growth or exploitation* (рост или эксплуатация) - (γ),  
*conservation* (сохранение) - (K),  
*collapse or release* (коллапс или высвобождение) (omega -Ω),  
*reorganization* (реорганизация) (alpha -α).

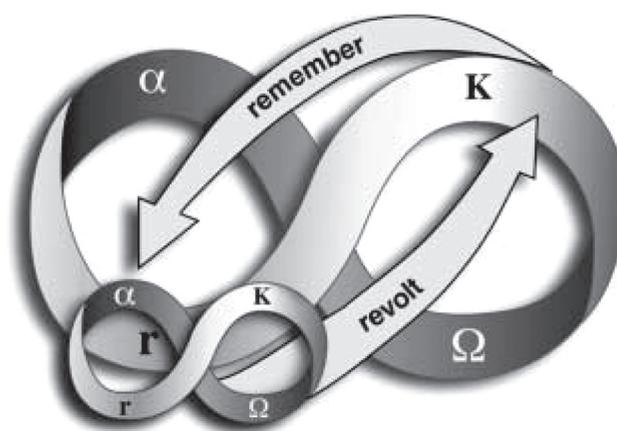
Адаптивный цикл отражает два главных перехода. Первый медленный от γ до K отражает возрастающую фазу роста и накопления, соответствующую модели эволюции канала связи и общей логистической модели. Второго от Ω до α представляет собой фазу быстрой перестройки, приводящей к «омоложению» системы. Динамика в первом периоде предсказуема. Последствия второй фазы непредсказуемы и очень неопределенны. Первая фаза максимизирует производство и накопление; вторая максимизирует открытия, изобретения и изменения. Холлинг отмечает, что

он не располагает строгой моделью, но опыт показывает, что любая сложная система, если она адаптивна, должна реализовать эти две фазы. По его выражению, две как бы различные цели не могут быть максимизированы одновременно. Успех в достижении одной непременно готовит почву для противоположной. В течение адаптивного цикла биологическое время течет неровно. Прогресс от фазы эксплуатации ( $r$ ) к фазе консервации ( $K$ ) происходит медленно, в то время как движение от  $K$  до  $\Omega$  происходит очень быстро, и системы быстро переходят через фазу перестройки  $\alpha$  в новую фазу прогнозируемого стационарного развития.

В рамках информационной термодинамической модели катастрофа есть результат перегрева системы и потери устойчивости в результате гиперспециализации. Она идентифицируется резким падением свободной энергии, ростом энтропии, разрушением взаимосвязей и структуры в целом. Переход к стадии  $\alpha$  идет на основе отбора из резко увеличившегося разнообразия классов элементов, открывших новые возможности в использовании ресурсов и условий среды, создавших основу для генерации высокой пропускной способности. В рамках этого периода происходит создание основы для конкурентного роста в новой стадии  $r$  с постепенным ростом организации и уменьшением энтропии, но на новом более высоком структурно-энергетическом уровне. Вполне понятно, что система не обязана перейти в стадию инноваций и может навсегда остаться в стадии  $\Omega$ , очень близкой к термодинамическому равновесию с низкой пропускной способностью, или вообще исчезнуть (вырожденное равновесие). Система разномасштабных иерархически связанных циклов определена как панархия (Panarchy). В общем случае, она может рассматриваться как аналог автоколебания нелинейной системы. В рассматриваемом примере эволюции живого вещества, индицируемого изменением таксономического разнообразия на уровне семейств, панархия включает три основных вложенных циклов. Катастрофы сменялись ростом, и биосфера в целом успешно переживала кризисы, создавая новые более устойчивые формы жизни и синтезируя в целом гипергеометрический рост биологического разнообразия.

Тщательные многолетние исследования основного обмена организмов, обобщенные А. И. Зотиним и А. А. Зотиним [10], позволяют утверждать, что стандартный основной обмен ( $\alpha$ , мВт) организмов представителей таксонов высокого ранга есть экспоненциальная функция от времени их происхождения ( $T$ , миллионы лет):  $\alpha = 0,378 \exp(0,0073T)$ . Таким образом, тепловой поток в состоянии покоя тем больше, чем с более эволюционно молодым организмом мы имеем дело. Иными словами, эволюция идет по пути снижения коэффициента полезного действия и увеличения диссипации энергии живым веществом. Неизбежность такого, с точки зрения равновесной термодинамики иррационального, поведения прямо определяется целевой функцией повышения устойчивости организмов в процессе эволюции.

Устойчивость, обеспечиваемая регулированием организмом своей среды неизбежно требует дополнительных затрат энергии на поддержание работы регулятора и, соответственно, большей общей диссипации энергии. Эта стратегия эффективна, если энергетические потери относительно незначительны в сравнении с приращением длительности жизни или устойчивости. В соответствии с информационной моделью, организмы взаимодействуют со средой в открытом пространстве через два каче-



**Рис. 4.** Схематическое представление двух уровней в Panarchy. На каждом уровне реализуется собственный цикл адаптивной динамики. Однако в ключевые моменты преобразования обычно слабые взаимодействия между уровнями существенно усиливаются. Когда уровень в panarchy входит в фазу  $\Omega$  и система катастрофически разрушается, то она может влиять на следующий больший и более медленный уровень, вызывая его кризис в фазе  $K$ . Этот эффект показывает стрелка «revolt - революция» - условие, когда быстрые и мелкомасштабные события разрушают медленные и большие. Стрелка «remember-запоминание», отражает второй немасштабный тип взаимодействия, когда катастрофа, возникающая на нижнем уровне, разрешается на основе свойств структуры верхнего или на основе «памяти» о существовавших состояниях и отношениях в более крупном масштабе.

ственно различных потоков информации: энергетического и структурного. Так как рост структурной сложности во времени подчиняется гипергеометрической зависимости, а затраты энергии на обмен - экспоненциальной, то получаем, что в ходе макроэволюции на каждую единицу структурной сложности ( $I$  - бит информации) затрачивается меньше энергии диссипации ( $E$ ) ( $dI/dE < 0$ ). Это соотношение было выведено ранее [23] на основании допущения возможного пути оптимизации соотношения энергии и информации. При этом на микрокопическом уровне и в локальных масштабах времени в ходе реализации адаптивных циклов Холлинга живое вещество в большей степени стремится, повышать устойчивость за счет роста коэффициента размножения ( $r$ ) и организации на основе специализации ( $K$ ) (увеличение потока свободной энергии). Структурная сложность, увеличивающая объем используемого пространства и оплачиваемая диссипацией энергии, формируется на стадии реорганизации, а основы ее закладываются на стадии катастрофы, которая в соответствии со вторым началом термодинамики имеет наибольшую энтропию. В конечном итоге макроэволюция идет по пути увеличения структурной сложности и повышения устойчивости живого вещества. Обратим внимание на то, что живое вещество в форме организмов и подобных организмам мутуалистических образований эффективно устойчиво за счет контуров положительной обратной связи и сложной структурной организации, но потребляет на единицу веса больше энергии, чем живое вещество, организованное в форме сообщества, минимизирующего конкуренцию на основе специализации. Легко понять, что если

бы сообщество в ранге, например, биогеоценоза суши было бы по структурной сложности подобно организму, то оно потребовало бы для поддержания структуры на единицу площади в единицу времени огромное количество солнечной энергии. Такого количества энергии, по-видимому, не существует в природе. Именно поэтому сообщества достигают структурной сложности организма при относительно небольших размерах и чаще всего в океанической среде.

### Обсуждение

Итак, с системных позиций биологическое разнообразие есть интенсивный параметр живого вещества. Живое вещество как система определяется через элементы в пространстве действующих сил для различных уровней его организации. Биологическое разнообразие отражает количество и структуру информации, содержащейся в живом веществе, определяет его способность совершать полезную работу, стационарность, скорость и направление эволюции. Измерения биологического разнообразия дают основания для суждений о текущем состоянии и возможной динамике систем, образуемых живым веществом.

Краткое обобщение существующих фактов и представлений показывает, что живое вещество может во многом описываться моделями традиционной термодинамики в стиле И. Пригожина. Однако ее аппарат все-таки недостаточен. Введение аппарата теории информации важно уже потому, что он трактует энтропию как информацию, на которую не распространяются законы сохранения и которая может увеличиваться и накапливаться в результате взаимодействия внутри живого вещества и через взаимодействия его со средой. Тот уровень функционирования, на котором реализуется этот процесс, обладает принципиальной существенной непредсказуемостью будущего и существенно неполным воспроизведением прошлого. Непредсказуемость будущего есть результат появления принципиально новой информации, новых ранее неизвестных структур и отношений, невозпроизводимость прошлого есть результат необратимой утери части информации. Таким образом, живое вещество реализуется в полном смысле слова в открытом пространстве с растущей и/или пульсирующей размерностью.

Теория информации вместе с адаптивным циклом Холлинга и представлением о панархии позволяет уже на существующем, очень ограниченном, уровне знаний лучше понимать сущность катастрофы и реструктуризации и количественно оценивать уровень перегретости системы как предвестника катастрофы. Исследования живого вещества с этих количественных позиций даст новый эмпирический материал, позволяющий выделить наиболее вероятные траектории его пространственно-временной динамики. Современная наука часто склонна к сильным научным спекуляциям на основе существующих знаний [55] и в существенно меньшей степени обращена к канализированному кропотливому накоплению и систематизации фактов и их разносторонней верификации. Но и научные спекуляции – это необходимый прием науки. Из такой спекуляции в частности следует, что для обеспечения гипергеометрического роста биологического разнообразия живого вещества необходимо наличие механизмов взаимодействия его информации и информации среды, передача информации из среды к живому веществу не только в форме энергии-движения, но и в форме определенных структур и наоборот. Как невозможно

объяснить существующее разнообразие и его динамику только случайным процессом естественного отбора, так невозможно объяснить его и любой формой автогенеза. В первом приближении рассматриваемое информационное взаимодействие может быть сведено к эффекту Болдуина. Однако с этим эффектом могут быть связаны очень робкие преобразования, не выходящие за рамки специализации в информационной модели. Путь от этого типа передачи информации до синтеза новой при ароморфозе без дополнительных условий непреодолим. Синтез новой информации требует сильных, резонансных взаимодействий разнообразия живого вещества и его памяти с разнообразием среды.

Концепция биологического разнообразия, представленная в настоящем сообщении, есть компиляция часто независимо возникавших в историческом развитии взглядов и представлений. Осуществляя эту работу, исключаясь из текста множество частных исследований, и всегда существует ощущение, что возможно упущено чье-то сильное обобщение. Эта проблема необъятности информации не стояла перед В.И. Вернадским и, тем более, перед Ч. Дарвином. Ч. Дарвин как очень требовательный натуралист долго не решался предать гласности свои результаты и заметно трансформировал их в серии изданиях. Идеи В.И. Вернадского остались в своей наиболее содержательной, общенаучной части непонятыми и по сей день. Ставшее модным цитирование его трудов только вульгаризирует его идеи, сводя их к очевидным отношениям. Ч. Дарвин попал в резонанс со временем, а В.И. Вернадский опередил его почти на сто лет. Конечно, и русский язык качественно сузил его аудиторию. Анализируя ход человеческой мысли, отраженной в научной литературе, даже в видимой ее части, наблюдаешь, как среда, предшествующие знания и факты частично канализирует мышление исследователей, ничего не знающих друг о друге. Появление подобных моделей, выведенных из разных оснований и в несколько различных языках – весьма обычное явление. Став в позу стороннего наблюдателя, видишь процесс как реку с размерностью больше трех, в результате чего кажется, что отдельные притоки текут в противоположенную по отношению к остальным сторону, а другие вытекают из основного русла и теряются в песке. Результаты отдельных исследователей и исследовательских групп вызывают значительный резонанс и образуют в этой реке отдельные общие мощные потоки. Другие при тех же, а иногда и больших основаниях, остаются почти неизвестными и незаметными.

Нет сомнения, что предмет статьи – это важнейшая проблемная область современной науки. Есть ощущение близости вполне приемлемого ее решения. Но нет ощущения присутствия личности и социальной среды, способных аккумулировать в себе множество частных потоков реки по имени Знание. Наблюдаемый процесс формирования знания сам по себе подчиняется механизмам его формирования. С этих позиций, современное научное знание находится на стадии адаптивного цикла Холлинга. Требуется качественный скачок, перебрасывающий многомерную реку на более высокий энергетический уровень в новую г-стадию. В ближайшей истории человечества первый скачок можно связать с именем Ньютона, второй – с именем Дарвина, третий – с именами небольшой группы отцов-основателей кибернетики: Винер, Шеннон, фон Нейман, Ферстер, Бир. В настоящее время человечество ждет следующего естественного лидера.

## Заключение

Живое вещество по В.И. Вернадскому определяется как термодинамическая система, а биологическое разнообразие как его интенсивный параметр, аналог энтропии. Показано, что живое вещество как и любая термодинамическая система определяется своими параметрами, и эти параметры измеримы на основе ранговых распределений. Фундаментальным свойством живого вещества, отличающего его от косного, является целевая функция максимизации длительности жизни его основного элемента – организма. Максимизация устойчивости без существенных затрат энергии может осуществляться на основе специализации и регулирования воздействия среды. При использовании ранговых распределений можно оценить степень удаленности системы от равновесия и степень ее стационарности. Закон пропускной способности непрерывного и дискретного канала связи теории информации при небольшой модификации с учетом целевой функции максимизации устойчивости элементов приводит к описанию естественной эволюции системы в направлении увеличения числа разнотипных каналов и общей пропускной способности. Показывается, что эта стратегия действительно реализуется в природе. Термодинамическая модель становится более реалистичной, если рассматривать два типа потока информации: количественной, обеспечивающий кинетику системы, и дискретной, создающей возможность синтеза регулирующих структур. Показано, что реальная динамика биологического разнообразия в экологическом масштабе времени интерпретируема в терминах динамических систем, которые могут рассматриваться как термодинамические, в разной степени удаленные от области равновесия. В гео-

логическом масштабе времени реальный гипергеометрический рост биологического разнообразия может быть объяснен только при допущении структурных преобразований разнообразия памяти живого вещества и разнообразия среды в открытом многомерном пространстве. Этому гипергеометрическому росту соответствует экспоненциальный рост основного обмена. Очевидно, что затраты энергии на основной обмен есть плата за повышение устойчивости и сложность регулятора. Отсюда следует, что эволюция идет по пути минимизации затрат энергии на бит информации, а прирост информации есть необходимое условие максимизации устойчивости. Рассмотрена качественная модель адаптивного цикла и панархии Холлинга и показана ее прямая связь с информационно-термодинамической моделью. Анализируемое накопление таксономического разнообразия живого вещества на уровне семейств, демонстрирует реализуемость трех вложенных адаптивных циклов с различной периодичностью, отвечающих модели панархии. Обращено внимание на желательность прямого исследования термодинамических параметров различных форм живого вещества. Такие исследования позволили бы выявить наиболее вероятные его состояния и наиболее вероятные траектории динамики, что могло бы способствовать более полной верификации теории и ее развитию. Также обращено внимание на тот факт, что гипергеометрический рост биологического разнообразия в геологическом масштабе времени не может реализоваться без информационных взаимодействий живого вещества и среды. В целом констатируется приближение научного знания к формулировке общей теории живого вещества как частного проявления материального мира.

## Литература

1. Абросов Н.С., Боголюбов А.А. Экологические и генетические закономерности сосуществования и коэволюции видов. – Новосибирск: Наука. 1988. – 327 с.
2. Абросов Н.С., Ковров Б.Г., Черепанов О.А. Экологические механизмы сосуществования и видовой регуляции. – Новосибирск: Наука, 1982. – 301 с.
3. Бигон М., Харпер Дж., Таунсенд К. Экология, Т. 2. – М.: Мир, 1989. – 474 с.
4. Вернадский В.И. Живое вещество. – М.: Наука, 1976.
5. Вернадский В.И. Пространство и время в неживой и живой природе // В кн.: Философские книги натуралиста. – М.: Наука, 1988.
6. Вернадский В.И. Биосфера ноосфера. – М.: Наука, 1989. – 261 с.
7. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы земли и ее окружение. – М.: Наука, 2001.
8. Голицын Г.А., А. П. Левич. Принцип максимума информации и вариационные принципы в научном знании // В кн.: Информация, время, творчество. – М., 2007. – С. 42-44.
9. Дарвин Ч. Происхождение видов путем естественного отбора. Перевод с шестого издания. – СПб., Наука, 1991. С. 539.
10. Зотин А.И., Зотин А.А. Направление, скорость и механизмы прогрессивной эволюции. Термодинамические основы. – М.: Наука, 1999. – 317 с.
11. Ильин В.Н. Термодинамика и социология. Физические основы социальных процессов и явлений. – М.: Изд-во УРСС, 2005. – 304 с.
12. Климонтович Ю.А. 2002. Введение в физику открытых систем Москва. Янус-К. URL: [http://www.kirsoft.com.ru/freedom/KSNews\\_414.htm](http://www.kirsoft.com.ru/freedom/KSNews_414.htm)
13. Кондаков Н.И. Логический словарь. – М.: Наука, 1973.
14. Левич А.П. Экстремальный принцип в теории систем и видовой структура сообществ // В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – С. 164-183.
15. Левич А.П. Структура экологических сообществ. – М.: Изд-во МГУ, 1980. – 181с.
16. Левич А.П. Теория множеств, язык теории категорий и их применение в теоретической биологии. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 190с.
17. Левич А.П., Соловьев А.В. Категорно-функторное моделирование естественных систем // В кн.: Анализ систем на пороге XXI века. – М.: Интеллект, 1997. – С. 66-78.
18. Левич А.П., Алексеев В.Л. Энтропийный экстремальный принцип в экологии сообществ: результаты и обсуждение // Биофизика. – 1997. – Т.42. Вып.2. – С.534-541.
19. Маргалеф Р. Облик биосферы. – М.: Наука, 1992. – С. 1-211.
20. Марков А. В., А. В. Кортаев. Динамика раз-

- нообразия фанерозойских морских животных соответствует модели гиперболического роста // Журнал общей биологии. – 2007. – № 1. – С.3–18.
21. Пригожин И., Стенгерс, И. Время, хаос, квант. – М.: Изд-во УРСС, 2003. – 239 с.
22. Пузаченко Ю.Г. Соотношение между структурой и продуктивностью в биогеоценотических системах // В кн.: Биологические системы в земледелии и лесоводстве. М., 1974.
23. Пузаченко Ю.Г. Принципы информационного анализа // В кн.: Статистические методы исследования гео-систем. – Владивосток, 1976. – С. 38–46.
24. Пузаченко Ю.Г. Биологическое разнообразие, устойчивость и функционирование // В кн.: Проблемы устойчивости биологических систем. – М. ИЭМЭЖ АН СССР, 1982. С. 5–32.
25. Пузаченко Ю.Г. Глобальное биологическое разнообразие и его пространственно-временная изменчивость // В кн.: Современные глобальные изменения природной среды. Т.2. – М.: Научный мир, 2006. – С. 306–377.
26. Пузаченко Ю.Г., Пузаченко А.Ю. Таксономическое разнообразие млекопитающих и птиц // В кн.: Стратегия изучения биоразнообразия наземных животных. – Москва, 1995. – С.32– 44.
27. Пузаченко Ю.Г., Пузаченко А.Ю. Семантические аспекты биоразнообразия // Ж. общ. биол. – 1996. – Т. 57, № 1. – С. 5–43.
28. Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Структура растительности лесной зоны СССР. Системный анализ. – М.: Наука, 1981. – 276 с.
29. Свирежев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. – М.: Наука, 1978. – 350 с.
30. Стратонович Р.Л. Нелинейная неравновесная термодинамика. – М.: Наука, 1985. – 473 с.
31. Сукачев В.Н., Дылис Н.В. (ред.). Основы лесной биогеоценологии. – М.: Наука, 1964. – 574 с.
32. Трайбус М. Термостатика и термодинамика. – М.: Энергия, 1970. – 499 с.
33. Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. – М.: Прогресс, 1980. – 326 с.
34. Хазен А.М. Разум природы и разум человека. М., 2000. – 606 с.
35. Хайтун С.Д. Фундаментальная сущность эволюции // Вопросы философии. – 2001. – № 2. – С. 182–196.
36. Цетлин М. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. – М.: Наука, 1969. – 316 с.
37. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. – М.: ИЛ, 1963.
38. Шрёдер М. Фракталы, хаос, степенные законы. – Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотичная динамика», 2001. – 528 с.
39. Эшби У. Р. Введение в кибернетику. Перевод с английского. Изд. 3. – М.: УРСС, 2006. – 239 с.
40. Ashby W. R. Introduction to Cybernetics. – Chapman & Hall, 1956.
41. Barthlott W., Biedinger N., Braun G., et al. Terminological and methodological aspects of the mapping and analysis of the global biodiversity // Acta Bot. Fennica. – 1999. – Vol. 162. – P. 103–110.
42. Benton, M. J. (editor). The Fossil Record 2. – London: Chapman & Hall, 1993. – 845 pp.
43. Dawkins R. The Selfish Gene: Second Edition. – Oxford University Press, 1989. – 236 pp.
44. Darwin Ch. The Origin of Species by Means of Natural Selection. London, 1872. URL: <http://darwin-online.org.uk/content/frameset?itemID=F391&viewtype=text&pageseq=1>
45. Chartrand H. and Hillman H. H. Ideological Evolution the Competitiveness of Nations in a Global Knowledge-Based Economy, Intellectual Property in the Global Village. – Compiler Press, 2006. – URL: <http://members.shaw.ca/competitivenessofnations/>
46. Holling C.S. Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Washington DC: Island Press, 2002.
47. Hubbell S. P. The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography. – Princeton University Press, 2001. – 375 pp.
48. Magurran A.E. Ecological Diversity and its measurement. Princeton University Press, 1988. – 179 pp.
49. McNeely J.A., Miller K.R., Reid W.V. et al. Conserving the World's Biological Diversity. Washington DC, 1990. – P. 1–191.
50. Odum E.P. Ecology and Our Endangered Life-Support Systems. – Sunderland, (Massachusetts): Sinauer Associates Inc. Publishers, 1989. – 283 pp.
51. Peet R. K. The measurement of species diversity // Annu. Rev. Ecol. Syst. – 1974. – Vol.5. – P. 285–308.
52. Pielou E.C. Ecological Diversity. – London, Sydney, Toronto: Wiley-Interscience Publication, 1975. – 165 pp.
53. Schroeder M. Fractals, Chaos, Power Laws. – W.H. Freeman and Company, 1991.
54. SCOPE, 35. URL: <http://www.icsu-scope.org/downloadpubs/scope35/index.html>
55. Smart J. Evo Devo Universe Citation. A Framework for Speculations on Cosmic Culture // In: Cosmos and Culture, Steven J. Dick (ed.), NASA Press, 2008.
56. Traibus M., Thermostatics and Thermodynamics. – London, 1967.
57. Winiwarter P. and Cempel C. . Life Symptoms: the Behavior of Open Systems with Limited Energy Dissipation Capacity and Evolution // Systems Research. – 1992. – Vol. 9(4). – P. 9–34.