

УДК 115+519.87

ФЕНОМЕН АСИММЕТРИИ ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. А. Острейковский, Т. Ю. Денисова, Е. Н. Шевченко

Сургутский государственный университет

Ostreyskovsky_va@surgu.ru, denisovasever86@bk.ru, elenan_27@mail.ru

В статье рассмотрены подходы к анализу и оценка асимметрии внутреннего времени, в частности, с использованием возможностей современного функционального анализа.

Ключевые слова: внутреннее время, модусы времени, прошлое, настоящее, будущее, оператор времени.

ASYMMETRY PHENOMENON OF INTERNAL TIME IN PREDICTING THE STATE OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS

V. A. Ostreikovsky, T. Yu. Denisova, E. N. Shevchenko

Surgut State University

Ostreyskovsky_va@surgu.ru, denisovasever86@bk.ru, elenan_27@mail.ru

The article describes the analysis and estimation of asymmetry of internal time and in particular with the use of possibilities of modern functional analysis.

Keywords: internal time, mode of time, Past, Present, Future, time operator.

Введение. Проблема времени представляется одной из самых сложных и парадоксальных с древнейших времен, причем сложности касаются не только ее разрешения, но и самой постановки проблемы. Рассогласованность представлений о времени принято объяснять принципиальным различием между подходами к ее рассмотрению: метафизическим, объединяющим натурфилософские, мифологические, художественные попытки понять сущность и природу времени; и научным (инструментальным), включающем математическое и естественнонаучное знание о свойствах и проявлении времени, его использовании и измерении. В настоящий момент проблема времени не только сохраняет свою остроту в науке (особенно в технике, медицине, экологии в связи с появлением сложных высокоопасных комплексов во многих сферах деятельности человека [1–2]), но и тяготеет к разрешению в различного рода синтетических моделях, объединяющих научное и философское знание [3, с. 162].

Историко-философский экскурс в проблему времени. На протяжении двадцати пяти столетий феномен времени остается в фокусе внимания философской и научной мысли, демонстрируя свою глубину и многоаспектность в многочисленных трактатах, акцентирующих внимание на отдельных ракурсах проблемы. Рассмотрим наиболее значимые.

Мифологические модели времени. Уже в античной мифологии представлено огромное тематическое разнообразие проблематики времени. В частности, время античного мифа отличается следующими особенностями:

- миф отрицает наличие абсолютного времени, включенного в единую систему координат; для различных субъектов, процессов и событий время может течь по-разному;
- время течет нелинейно и его описание не подчиняется формальной логике;
- настоящее детерминируется не только прошлым, но и будущим, т. е. отношения между частями времени сложны и разнообразны;
- время неоднородно, его скорость неравномерна, оно обладает более чем одной размерностью [4, с. 62].

Как можно видеть, уже в мифологических интуициях времени содержатся зародыши будущих научных концепций XX и XXI веков.

Концепции времени античной и средневековой философии. Наиболее содержательные концепции времени в эпоху античности были созданы выдающимися мыслителями эпохи классики Платоном и Аристотелем. Их позиции существенно отличаются, обладая одной важной общей чертой: основополагающим вопросом, вокруг которого строятся их рассуждения, является принципиальный онтологический вопрос о реальности времени. С точки зрения этих мыслителей, время является неотъемлемой характеристикой и условием существования вещей.

По Платону, время создано вместе с Космосом и может быть уничтожено вместе с ним (или погибнуть вместе с ним). С точки зрения Аристотеля, время никем не было создано, как и Космос, но оно есть то, что не только измеряет динамику мира, но и обуславливает ее. Время, по Аристотелю, связано с движением, но не тождественно ему, т. е. время не есть движение как таковое, но есть число движения. Удивительно, что это важное различие было впоследствии забыто, и идею отождествления времени и движения нередко можно обнаружить в контексте научных дискуссий.

Значительное место в своих рассуждениях Аристотель уделяет проблеме частей (или модусов) времени. Представляя соотношение частей времени как известный парадокс (прошлое и будущее не существуют или уже, или еще, а настоящее не обладает длительностью, и тем самым тоже не существует), мыслитель предлагает и его разрешение. По Аристотелю, прошлое и будущее сохраняются в виде следов изменений или возможностей изменений и обладают длительностью в опыте восприятия. Настоящее (момент «теперь»), хотя и не обладает длительностью (и значит, физической реальностью), но, тем не менее, оно реально в качестве точки отсчета для прошлого и будущего, и, соответственно, в качестве условия существования этих модусов.

Интерес к проблеме времени сохраняется и в эллинистическую эпоху, однако существенно трансформируется направленность этого интереса, он приобретает более «человеческое» измерение. В частности, римских стоиков в проблеме времени более всего привлекает его способность представлять собой смысловой ресурс. Хотя человек и не управляет временем, но он измеряет его, в том числе соизмеряет и оценивает его отрезки, распоряжается им как ресурсом. Эллинистическая мысль исходит из того, что миру в целом свойственна периодичность, и все «концы и начала» времени относительны. Само же время движется линейно, и одной из важнейших его характеристик является необратимость. Вопрос о реальности времени в целом и отдельных его модусов в частности находит глубокое разрешение в концепции Аврелия Августина, утверждавшего, что среди модусов времени подлинной реальностью обладает настоящее, которое при всей его быстротечности обладает все же длительностью, т. е. настоящее – не точка, а интервал. Значимость достижений Августина такова, что ни один физик XX века не подступает к проблеме времени, не отдав должного мысли средневекового мыслителя.

Темпоральные модели в европейской философии Нового времени. Новое время было ознаменовано рождением науки и принципиально новой космологической модели, резко противостоящей аристотелевской концепции мироустройства. Эпоха Нового времени – пора рождения и становления европейской науки и, прежде всего, естествознания и математики, обогатила историю концепций времени чрезвычайно важными идеями, касающимися его онтологической сущности, в частности, объективности и отношению к процессам, проходящим во времени. В связи с этим традиционно сопоставляют (и необоснованно противопоставляют) субстанциальную и реляционную модели времени и пространства.

Согласно субстанциальной модели, время есть независимая сущность, которая является условием существования вещей, но не их состоянием или атрибутом (Б. Спиноза, И. Ньютон). Кроме того, по Ньютону, размышляя о сущности времени, необходимо разли-

чать его математическое и обыденное истолкования или, иначе говоря, различать абсолютное и относительное время.

В реляционной модели Г. В. Лейбница никакого абсолютного времени не существует, есть лишь собственные длительности конкретных вещей, их «внутренние времена», недоступные наблюдателю в опыте. Чтобы соотносить между собой «внутренние времена», исследователю приходится пользоваться в качестве общей системы отсчета равномерным движением небесных тел.

Чрезвычайно содержательную концепцию времени предложил Р. Декарт. Он, по сути, устранил время как абсолютную внешнюю точку отсчета изменений объекта, поместив его внутрь самого объекта, сделав время «внутренним» и тем самым невидимым – или несуществующим для наблюдателя. Внутреннее время объекта не может быть увидено наблюдателем, зафиксировано в его опыте, и это вполне отвечало картезианскому идеалу совершенной умопостигаемости мира, необходимости его рационального осмысления, а не опытного исследования. Однако Декарт оставляет наблюдателю возможность реконструировать и «сохранить» время объекта через его эмпирические проявления. Так, наблюдая движение, мы фиксируем внимание в каждый момент времени на определенных точках положения движущегося объекта. Но чтобы увидеть процесс целиком, «сохранить» его во времени, мы прибегаем к его графическому изображению на координатной плоскости, где одна из осей – время. Хотя Декарт не использовал термин «функция», но именно он вводит понятие о функции, благодаря которому в XVII веке происходит осознание, что цель науки – постижение не «вечных и неизменных истин», а законов движения и изменения, установления закономерностей связей элементов движущегося (меняющегося во времени) объекта.

В немецкой классической философии вопрос об онтологической природе времени рассматривается в контексте таких проблем, как связь времени со становлением и движением; его объективность/субъективность (ноуменальность/феноменальность); сущность момента времени (или точки «теперь»); соотношение времени и вечности. С точки зрения И. Канта, время не существует объективно, само по себе, вне вещей и вне нашего сознания. Как и пространство, оно относится к априорным (внеопытным) формам чувственности, которые не существуют вне субъекта и являются всего лишь субъективными схемами восприятия реальности. Всеобщность и универсальность времени не может быть доказана в силу ограниченности познавательных возможностей человека как конечного существа. По этой же причине не имеет смысла говорить о вечности.

В онтологии Г. В. Ф. Гегеля время отождествляется со становлением и движением, а потому оно не универсально и не всеобще, поскольку имеет отношение только к конечному, преходящему бытию вещей. Целое же существует вне времени. Хотя время реально, но это реальность особого рода: оно не является самостоятельной субстанцией, а есть способ существования временных вещей, а также человеческий способ восприятия и познания мира.

Время непрерывно, но, благодаря субъективному восприятию, делится на модусы (прошлое, настоящее, будущее), а также на интервалы, соответствующие длительности бытия. Границами интервалов являются точки «теперь». Любые деления непрерывного потока времени на части условны, субъективны. Объективно существует лишь вечное настоящее, объединяющие все эти части. То есть настоящее не лежит «посередине», служа осью симметрии – оно интегрирует в себе все времена, лежащие по обе стороны, и тем самым обретает подлинную реальность, поскольку по-настоящему реальна лишь вечность как Целое.

Природа времени в философии и естествознании XX–XXI вв. В фокусе внимания размышлений о природе и свойствах времени, получивших развитие в XX веке, постоянно находились идеи «внутреннего времени» объекта – будь то вещь или живой организм, а также проблема происхождения, порождения времени. Многие наиболее значимые философские концепции природы времени получили убедительное естественнонаучное обоснование. Среди самых перспективных в отношении дальнейшей разработки, и при этом самых диску-

тируемых, следует назвать концепции А. Бергсона и В. И. Вернадского. В основе их концепций лежат следующие идеи.

Время есть длительность, т. е. нерасчленимая целостность, предполагающая единство всех событий и состояний объектов, взаимодетерминацию всех модусов времени – прошедшего прошлого, наличного настоящего и возможного (но не предопределенного жестко) будущего. Ничто не существует вне времени, и тем самым время есть всеобщий атрибут – и вещей, и организмов, и бытия в целом (А. Бергсон).

Время неразрывно связано с жизнью, и не только потому, что все организмы существуют во времени, но главным образом потому, что время порождается самой жизнью – рождением и смертью организмов, и сменой поколений, – и измеряется ее процессами, имеющими устойчивую длительность (в частности, размножением). Жизнь, таким образом, не просто связана со временем, она есть причина времени. Поскольку каждый организм обладает «внутренним временем», измерение времени представляет собой соотнесение каждый раз специфичного «внутреннего времени» с конвенционально принятой системой отсчета (В. И. Вернадский).

Чрезвычайно содержательные концепции времени были созданы в XX веке экзистенциальной философией и феноменологической онтологией. Среди всего тематического разнообразия философского осмысления проблемы времени наибольший интерес представляют для нас идеи относительно размерности времени, соотношения его модусов времени и его направленности у М. Хайдеггера, Ж.-П. Сартра и Э. Левинаса.

По мысли М. Хайдеггера, время не одномерно, как принято считать, и должно рассматриваться в единстве с пространством, а также в единстве своих измерений – прошлого, настоящего и будущего. Модусы (части) времени не равноправны – прошлое и будущее оцениваются исходя из настоящего, причем они *не* симметричны относительно этой границы между ними. Настоящее обладает протяженностью, образуя единство с прошлым и будущим, как бы «прорастая» в них.

Э. Левинас вообще считает, что подлинной реальностью обладает лишь настоящее, представляющее собой мгновение. И хотя мгновение не длится, и из мгновений не складывается течение времени, все же оно выполняет важнейшую онтологическую роль – роль начала, вступления в бытие.

Ж.-П. Сартр развивает в своей работе «Бытие и время» мысль о том, что не существует жесткой детерминации между модусами времени: будущее не предопределено однозначно прошлым, а прошлое, в свою очередь, может быть переосмыслено в будущем, настоящее же строится исходя из предпосылок прошлого и проектов будущего.

Математические модели асимметрии внутреннего времени. Известно, что энтропия задает стрелу времени. Следовательно, нам необходима новая функция распределения, которая нарушала бы симметрию времени.

С этой целью использован переход к операторному языку. Учитывая, что необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе стохастичности, в [5] проведена тонкая классификация систем на «*внутренние случайные*», допускающие отображение на цепь Маркова, и «*внутренние необратимые*», приводящие к внутреннему различию между прошлым и будущим. С этой целью можно сопоставить системе новый тип времени – оператор времени T , который тесно связан с оператором энтропии M . Так как T – оператор, то он имеет собственные значения, каждое из которых имеет возможный возраст системы. А любое заданное начальное распределение ρ обычно может быть разложено на сумму членов, *различных по возрасту и типу эволюции*. Таким образом, возможно непротиворечивым образом включить необратимость в динамическое описание систем [6–9].

Опуская промежуточные выкладки и доказательства, приведенные в [5, с. 162–163, 220–225] можно получить следующее соотношение между унитарным оператором $U = e^{-iLt}$ и оператором T :

$$U_t^T T U_t = T + t \cdot I, \quad (1)$$

где L – линейный, а I – единичный операторы.

Соотношение (1) особенно удобно для описания дискретных отображений, например, таких, как преобразование пекаря, в которых t изменяется с единичным шагом.

Физический смысл оператора времени T – это *нелокальный* оператор, порождающий новое описание классической динамики, справедливое для сильно неустойчивых систем.

В качестве примера рассмотрено преобразование пекаря [5] (рис.1):

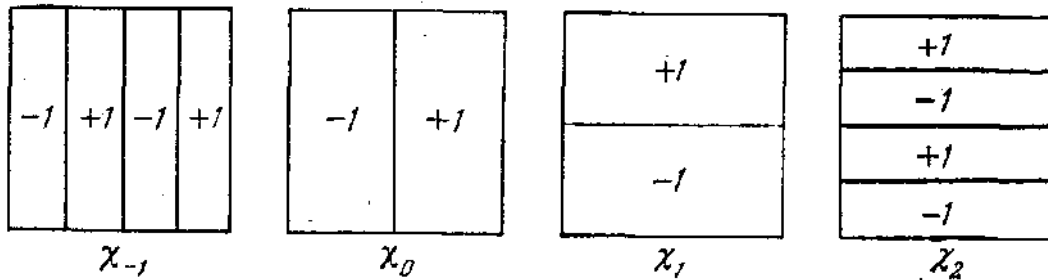


Рис. 1. Собственные функции оператора внутреннего времени для преобразования пекаря

Далее, в соответствии с [5], приведем необходимые аналитические зависимости для количественного анализа внутреннего времени.

«Полную систему ортогональных собственных функций оператора T можно построить следующим образом. Пусть χ_0 – функция, принимающая значение -1 на левой половине квадрата и значение $+1$ на правой половине квадрата, и пусть по определению

$$\chi_n = U^n \chi_0. \quad (2)$$

Взяв за исходную функцию χ_0 , мы после n -кратного преобразования пекаря (n – целое положительное или отрицательное число) получаем функцию χ_n . Некоторые из функций χ_n представлены на рис. 1.

Как и следовало ожидать, исходя из определения (2), χ_n – собственная функция оператора T , соответствующая «возрасту» n :

$$T\chi_n = n\chi_n. \quad (3)$$

В [5, с. 220–225] приведено доказательство этого утверждения.

Полная система собственных функций оператора T получается, если взять все возможные конечные произведения функций χ_n . Каждое такое произведение соответствует собственному значению m оператора T , где m – наибольший из индексов n функций χ_n , входящих в произведение...

Собственные функции $\varphi_{n,i}$ вместе с постоянной функцией I образуют полную систему ортогональных функций.

Каждая функция распределения ρ допускает разложение по собственным функциям $\{1, \varphi_{n,i}\}$:

$$\rho = 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \varphi_n. \quad (4)$$

Обозначим через $\bar{\rho}$ избыток ρ по сравнению с равномерным равновесным распределением:

$$\bar{\rho} = \rho - 1 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \varphi_n. \quad (5)$$

Предположим, что функция распределения имеет нулевой возраст и соответствует χ_0 :

$$\rho = 1 + \chi_0. \quad (6)$$

В этом случае система находится в правой половине фазового пространства (см. рис. 1), но мы не располагаем никакой другой информацией относительно локализации системы. Наоборот, если известна точная локализация системы, то функция распределения имеет вид δ -функции и

$$\begin{aligned}\rho &= \delta_{\omega_0}(x, y) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0) = \\ &= 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \varphi_n(x_0, y_0) \varphi_n(x, y).\end{aligned}\quad (7)$$

Все возрасты входят в (7) с равными весами. Итак, существует своего рода *дополнительность* между описанием на языке точек в фазовом пространстве и «разбиений», соответствующих различным внутренним возрастам. Следовательно, внутренний возраст дает нам новое *нелокальное* описание системы.

Если оператор внутреннего времени существует, то каждому состоянию ρ мы можем приписать средний возраст $\langle T \rangle_\rho$ по формуле

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\langle \bar{\rho}, T \bar{\rho} \rangle}{\langle \bar{\rho}, \bar{\rho} \rangle}.\quad (8)$$

Используя выражение (5) и ортонормированность функций φ_n , преобразуем правую часть (8) к виду

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\sum n c_n^2}{\sum c_n^2} = \langle n \rangle.\quad (9)$$

Из соотношения (1), как нетрудно проверить, следует, что

$$\langle T \rangle_{\rho_t} = \langle T \rangle_{\rho_0} + t_1,\quad (10)$$

т. е. средний возраст состояния ρ «идет в ногу» с внутренним временем или временем t , отсчитываемым по обычным часам.

Вместе с тем внутреннее время существенно отличается от внешнего времени, отсчитываемого по наручным часам. Оно скорее соответствует возрасту человека. Возраст не определяется какой-нибудь частью тела, изолированной от остального организма, а соответствует средней, глобальной оценке, относящейся ко всем частям тела [5, с. 200–202]». При чем это относится не только к биологическим системам, а и ко всем остальным окружающим нас сложным динамическим системам.

Моделирование внутреннего времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее». Будем исходить из кардинального вопроса: как изменяется время в триаде «прошлое – настоящее – будущее». Один из вариантов ответа на этот чрезвычайно актуальный для науки вопрос изложен в книге И. Р. Пригожина «От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках» [5, с. 203–205]. Действительно, имея понятие внутреннего времени, можно «построить оператор, нарушающий симметрию преобразования Λ , который позволяет осуществить переход от унитарной группы U_t к полугруппе W_t , ведущей к равновесному состоянию при $t \rightarrow \infty$. С этой целью необходимо ввести убывающую функцию $\Lambda(T)$ внутреннего времени. Как известно (см. (3)),

$$T\varphi_n = n\varphi_n.\quad (11)$$

Следовательно,

$$\Lambda(T)\varphi_n = \lambda_n\varphi_n.\quad (12)$$

Поскольку $\Lambda(T)$ – убывающая функция внутреннего времени T , должны выполняться неравенства (13) [5, с. 203]».

$$0 \leq \lambda_{n+1} \leq \lambda_n.\quad (13)$$

Используя функцию Ляпунова и распределение вероятностей $\bar{\rho}$, а также (13), можно получить следующее

$$0 \leq \lambda_n \leq 1; \quad \lambda_n \rightarrow 1 \text{ при } n \rightarrow -\infty,$$

$$\lambda_n \rightarrow 0 \text{ при } n \rightarrow +\infty$$

и

$$\frac{\lambda_{n+1}}{\lambda_n} \rightarrow 0 \text{ при } n \rightarrow \infty. \quad (14)$$

Учитывая, что Λ действительно переводит динамическую группу U_t в сжимающую полугруппу. Операторы U_t сохраняют меру, так как (при $t = m$)

$$U_m \varphi_n = \varphi_{n+m}. \quad (15)$$

Иначе ведут себя операторы W_t [5, с. 195]:

$$W_m \varphi_n = \Lambda U_m \Lambda^{-1} \varphi_n = \Lambda U_m \frac{\varphi_n}{\lambda_n} = \Lambda \frac{\varphi_{n+m}}{\lambda_n} = \frac{\lambda_{n+m}}{\lambda_n} \varphi_{n+m}. \quad (16)$$

Из неравенств (13) следует, что площадь, соответствующая функции φ_n , со временем сжимается. Неравенствам (13) и (16) могут удовлетворить значения λ_n , которые можно выбрать или задать в более общем виде, например $\lambda_n = \exp[-\varphi(n)]$, где $\varphi(n)$ – любая выпуклая функция от n .

$$\lambda_n = \frac{1}{1+a^n} = \frac{1}{1+e^{n/\tau_c}}, \quad a > 1, \ln a = 1/\tau_c. \quad (17)$$

Рассмотрим физический смысл образов $\bar{\rho}$ -состояний ($\bar{\rho} = \Lambda \rho$). И ρ , и $\bar{\rho}$ при заданном значении временного параметра t в общем случае содержат вклады, приходящие из прошлого и будущего, и интерпретируемые в смысле *внутреннего времени* T . Но если в ρ прошлое и будущее входят симметрично, то в $\bar{\rho}$ симметрия между прошлым и будущим нарушается: вклад будущих состояний «подавлен». В настоящее вносят вклад прошлое и лишь «ближайшее» будущее. Этим рассматриваемый случай отличается от детерминистических систем, в которых из настоящего следует как прошлое, так и будущее. Рассмотрим λ_n как функцию от n (рис. 2).

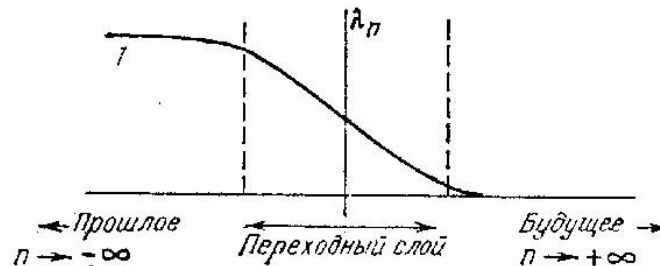


Рис. 2. Переход от прошлого ($n \rightarrow -\infty$) к будущему ($n \rightarrow +\infty$)

Из представления (17) следует, что ширина переходного слоя между прошлым и будущим по порядку величины сравнима с характерным временем τ_c . Резкий переход от прошлого к будущему возникает только в том случае, если $\tau_c \rightarrow 0$ (рис. 3).

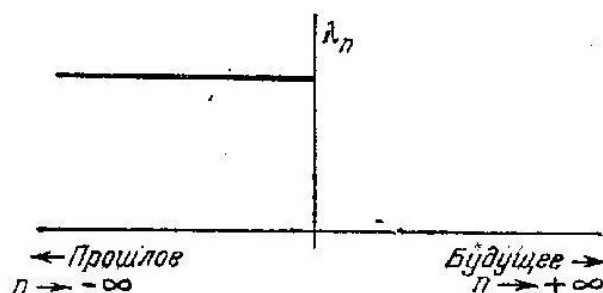


Рис. 3. Переход от прошлого ($n \rightarrow -\infty$) к будущему ($n \rightarrow +\infty$) в пределе $\tau_c \rightarrow 0$

Можно видеть, сколь сильно отличается описание внутреннего времени от традиционного представления о времени как о величине, изоморфной прямой (рис. 4), идущей из далекого прошлого ($t \rightarrow -\infty$) в далекое будущее ($t \rightarrow +\infty$) [10–12].

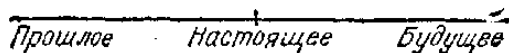


Рис. 4. Традиционное представление времени

Настоящее в таком представлении соответствует единственной точке, отделяющей прошлое от будущего. Настоящее возникает ниоткуда и исчезает в никуда. Стянутое в точку, оно бесконечно близко и прошлому и будущему. В традиционном представлении между прошлым, настоящим и будущим нет расстояний. В нашем представлении прошлое отделено от будущего интервалом, длина которого определяется характерным временем τ_c , и настоящее обретает *продолжительность*» [5, с. 204–205].

Выводы:

1. Введение нового понятия «внутреннее время» играет важную роль в переходе от динамического, обратимого во времени описания функционирования систем, характерного для классической механики, к вероятностному описанию.
2. Внутреннее время в корне отличается от астрономического времени, хотя оба они имеют одинаковое измерение.
3. Внутреннее время имеет совершенно иной смысл, так как возникает из-за случайного поведения траекторий, встречающегося в неустойчивых динамических системах.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ № 17-01-00244а

Литература

1. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Феномен «Время» в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем // Надежность и качество сложных систем. Пенза. 2016. № 4. С. 3–12.
2. Хокинг С. От большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени. М. : Мир, 1990.
3. Денисова Т. Ю. Философский и научный подходы к пониманию времени: перспективы синтеза // Актуал. проблемы гуманитар. и естеств. наук. 2017. Ч. III. № 3 (98). С. 161–165.
4. Денисова Т. Ю. Образ времени в мифологических моделях античности // Историч., философ., полит. и юрид. науки, культурология и искусствоведение. Вопр. теории и практики. 2017. № 3–1 (77). С. 58–63.
5. Пригожин И. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках : пер. с англ. / Под ред. и с послесл. Ю. Л. Климонтовича. Изд. 2-е, доп. М. : Едиториал УРСС, 2002. 288 с.
6. Пригожин И. Р. Конец определенности. Время. Хаос и новые законы природы Ижевск : НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2000. 208 с.
7. Белов С. В. Парадоксы времени // Природа России. URL: <http://www.priroda.ru/reviews/detail.php?ID=11383>.
8. Галкин В. А. Анализ математических моделей: системы законов сохранения, уравнения Больцмана и Смолуховского. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 408 с.
9. Ляпунов А. М. Собр. соч. Т.2. М. ; Л., 1956. 263 с.
10. Острейковский В. А. Постулаты парадокса времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных систем // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы II Междунар. науч.-практич. конф. Севастополь, 13–17 сентября 2016 г. Севастополь : СевГУ, 2016. С.105–106.
11. Вайнберг С. Мечты об окончательной теории: физика в поисках самых фундаментальных законов природы. М. : ЛКИ/URSS, 2008.
12. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М. : Мир, 1985. 415 с.