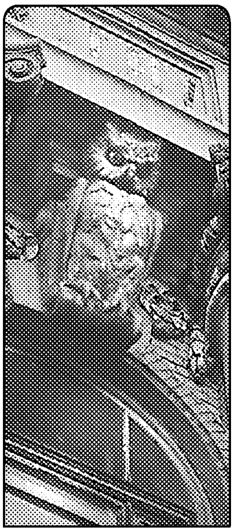
МЕТОДИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ



МЕТОДИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 4. С. 374–379
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2022, vol. 22, iss. 4, pp. 374–379
https://fizika.sgu.ru https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-4-374-379, EDN: DBCHKO

Научная статья
УДК 530

Необратимость времени в общей теории относительности

В. И. Цой

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Цой Валерий Иванович, кандидат физико-математических наук, tsoyvi@info.sgu.ru, https://orsid.org/0000-0001-8055-4385

Аннотация. Уравнения классической динамики частиц и волн допускают решения с обратным течением времени, и принято считать, что в них не отражается необратимость времени. В то же время энтропия в термодинамике и коллапсы волновых функций в квантовой механике свидетельствуют о том, что в этих разделах физики необратимость времени проявляется. Однако можно привести аргументы в пользу того, что основные классические уравнения непрерывного движения в механике, электродинамике и квантовой механике не допускают движения в обратной последовательности полностью по всем параметрам физических состояний. При этом преобразования с инверсией времени в совокупности с инверсией импульсов или связанных с ними величин возможны и приносят существенную пользу в анализе физических процессов. Для расширения картины преобразований со временем особый интерес представляет инверсия течения времени в уравнениях общей теории относительности, так как динамическими переменными в ней выступают метрические характеристики самого пространства-времени, а системы отсчёта являются неинерциальными. В данной статье рассмотрены преобразования с инверсией времени в динамических уравнениях гравитационного поля, частицы в гравитационном поле, а также в решениях уравнений для гравитационной волны и для изотропной космологической модели.

Ключевые слова: обратимость и необратимость движения, необратимость времени в общей теории относительности, стрела времени

Для цитирования: *Цой В. И.* Необратимость времени в общей теории относительности // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 4. С. 374–379. https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-4-374-379, EDN: DBCHKO

Article

Irreversibility of time in general relativity

V. I. Tsoy

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Valery I. Tsoy, tsoyvi@info.sgu.ru, https://orsid/org/0000-0001-8055-4385

Abstract. ***Background and Objectives*:** The equations of classical dynamics of particles and waves admit solutions with the reverse flow of time. Therefore, it is generally assumed that classical dynamics does not reflect the irreversibility of time. On the other hand, the increase in the entropy in thermodynamics, also the collapse of wave functions in quantum mechanics shows that the irreversibility of time is manifested in these disciplines of physics. However, arguments can be made that the classical equations of continuous motion do not allow motion in all parameters of physical states. This article considers the inverse of time flow in dynamic equations of gravitation fields and in dynamic equations of particles in gravitation fields. ***Methods*:** Synchronous coordinate system was used to analyze time dependences of dynamic variables in the space warped by matter. The invariant transformations of dynamic equations including the time flow inversion were seen to conclude about time irreversibility in general relativity. ***Conclusion*:** Transformations with reversed time have been seen in general equations of gravitation fields and in general equations of particle motion in gravitation fields. Also the gravitation plane wave and the isotropic cosmological model have been considered. These transformations show that only inversion of time flow without another inversion is impossible. Thus we can draw the arrow of time in dynamic equations as well as in thermodynamics or quantum mechanics.

Keywords: reversibility and irreversibility of motion, irreversibility of time in general relativity, arrow of time

For citation: Tsoy V. I. Irreversibility of time in general relativity. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 4, pp. 374–379 (in Russian). https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-4-374-379, EDN: DBCHKO

Введение

По выражению И. Р. Пригожина, в динамике, будь то классическая, квантовая или релятивистская динамика, время выступает лишь как некий внешний параметр, не имеющий выделенного направления, в динамике нет ничего такого, что позволяло бы отличать прошлое от будущего. Но второе начало термодинамики «вводит физическую величину (например, энтропию), наделяющую время выделенным направлением, или, если воспользоваться выражением Эддингтона, задающую стрелу времени» [1, с. 218]. При этом открытое Л. Больцманом описание термодинамических процессов с помощью статистической механики с самого начала оказалось в противоречии с обратимостью законов механики для молекул, составляющих термодинамическую систему. Как указывал И. Лошмидт, одновременное обращение всех импульсов молекул должно приводить с динамической точки зрения к возвратному движению в состояние с меньшей энтропией, тогда как со статистической точки зрения энтропия должна продолжать увеличиваться [2].

Одна из попыток найти переход от обратимой динамики ко второму началу термодинамики была сделана В. Ритцем, который показал, что волновые уравнения допускают решения не только с запаздывающими, но и с опережающими потенциалами. Ритц полагал, что отбор только запаздывающих и отбрасывание опережающих решений можно использовать для обоснования необратимости и второго начала термодинамики (цит. по.: [3]). Однако А. Эйнштейн настаивал, что решения с опережающими потенциалами не следует отбрасывать, так как они позволяют вычислять волновое поле по совокупности процессов поглощения. Он считал, что «необратимость покоится исключительно на вероятностных основах» [3, с. 180]. В этой связи естественно, что необратимость проявляется в квантовой механике. Хотя уравнение Шредингера допускает инвариантное преобразование с изменением знака времени и сопряжением волновой функции, вероятностная редукция состояния к измеренному состоянию квантовой системы не обратима и придает времени выделенное направление [4]. К этому надо добавить динамику детерминированного хаоса, возникающего в случае неустойчивости решений динамических уравнений к начальным условиям [5]. Еще один подход состоит в возведении второго начала термодинамики в динамический принцип и развит Пригожиным [1]. Предлагается рассматривать динамическое движение как внутренне случайное, а затем воспользоваться энтропией для отбора направления времени. К этому подходу близка позиция Ю. Л. Климонтовича, согласно которой детерминистическое описание системы частиц в механическом смысле не полно и обратимые уравнения для частицы в системе сталкивающихся частиц должны быть дополнены стохастическими членами, которые делают уравнения необратимыми (цит. по.: [1, с. 283]).

Но надо учитывать, что преобразования с комбинированной инверсией времени (не сводящиеся только к ней) в непрерывных динамических уравнениях позволяют обосновать многие важные закономерности в физике. Например, с их помощью объясняются особенности симметрии кинетических коэффициентов Онсагера [6], детали систематизации квантовых состояний и правил отбора переходов [4], обратное черенковское излучение и обратный эффект Доплера [7].

В работе [8] был представлен взгляд, согласно которому обратное течение времени в динамических уравнениях механики Гамильтона, электродинамики Максвелла и квантовой механики Шредингера запрещено самими этими уравнениями. В сжатом виде это можно представить с помощью обобщенной записи уравнений движения, представленной П. Дираком следующим образом: «Введем набор величин A любого в математическом отношении характера, чтобы описать физическое состояние в некоторый момент времени. Тогда уравнения движения имеют вид $dA/dt = f(A)$. Интегрируя эти уравнения, можно вычислить значения A в более поздний момент времени, выраженные через первоначальный набор величин A» [9, с. 121]. По часам, отсчитывающим время t' в прошлое, и по часам, отсчитывающим время t в будущее, знаки сдвигов во времени противоположны: $dt' = -dt$. Фиксируем по тем и другим часам моменты времени, отвечающие определенному значению динамической переменной $A(t) = A'(t')$. Получаем, что $dA'/dt' = -dA/dt$. Следовательно, $dA'/dt' = -dA/dt = -f(A) = -f(A')$, что не согласуется с исходным законом движения. Другими словами, динамические уравнения сами по себе содержат требование необратимости состояний во времени. Однако в определенных комбинированных преобразованиях с инверсией времени (например, с одновременным изменением направления импульсов частиц) законы движения выполняются, динамическая переменная A меняется в обратной хронологической последовательности, но на другой фазовой траектории.

В данной статье для большей полноты рассмотрены вопросы, касающиеся обращения времени в уравнениях общей теории относительности, – в искривленном тяготением пространстве и неинерциальных системах отсчета.

1. Необратимость времени в уравнениях гравитационного поля

Как известно, гравитационное поле эквивалентно искривлению четырехмерного пространства-времени (x^0, x^1, x^2, x^3), метрика которого определяется интервалом $ds^2 = g_{ik}dx^i dx^k$ с суммирующими повторяющимися индексами $i, k = 0, 1, 2, 3$, и метрический тензор g_{ik} отличается от метрического тензора $g_{ik}^{(0)}$ в галилеевой инерциальной системе отсчета $\left(g_{00}^{(0)} = 1, g_{11}^{(0)} = -1, g_{22}^{(0)} = -1, g_{33}^{(0)} = -1, g_{i\neq k}^{(0)} = 0\right)$ [10]. Несмотря на то, что в общей теории относительности невозможна взаимная неподвижность системы тел, а собственное время может быть различным в разных точках пространства, часто можно выбрать систему отсчета, в которой $g_{0\alpha} = 0, \alpha = 1, 2, 3$ и возможна полная синхронизация часов. Поэтому в синхронной системе отсчета имеет смысл говорить об общем течении времени и его направленности. При этом временная и пространственная компоненты в интервале $ds^2 = c^2dt^2 - \gamma_{\alpha\beta}dx^\alpha dx^\beta$ разделены. Таким образом, полевыми переменными гравитационного поля становятся элементы трехмерного метрического тензора $\gamma_{\alpha\beta} = -g_{\alpha\beta}$, зависящие от пространственных координат x^α и времени t. Функцией источников гравитационного поля по Эйнштейну является тензор энергии-импульса материи T_{ik} [11]. Полевые уравнения в синхронной системе удобно записать в смешанных компонентах в виде [10] (скорость света принята равной 1)

$$\frac{-1}{2}\frac{\partial\kappa_\alpha^\alpha}{\partial t} - \frac{1}{4}\kappa_\beta^\alpha\kappa_\alpha^\beta = 8\pi k\left(T_0^0 - \frac{1}{2}T\right), \quad (1)$$

$$\frac{1}{2}\left(\kappa_{\alpha;\beta}^\beta - \kappa_{\beta;\alpha}^\beta\right) = 8\pi k T_\alpha^0, \quad (2)$$

$$-P_\alpha^\beta - \frac{1}{2\sqrt{\gamma}}\frac{\partial}{\partial t}\left(\sqrt{\gamma}\kappa_\alpha^\beta\right) = 8\pi k\left(T_\alpha^\beta - \frac{1}{2}\delta_\alpha^\beta T\right), \quad (3)$$

где k – гравитационная постоянная; $\kappa_\beta^\alpha = \partial\gamma_\beta^\alpha/\partial t$ – скорость изменения метрического тензора; $\kappa_{\beta;\rho}^\alpha$ – ковариантная производная скорости κ_β^α по координате x^ρ; γ – определитель метрического тензора; P_α^β – трехмерный тензор кривизны Риччи, зависящий только от компонент метрического тензора и их пространственных производных; $T = T_i^i$ – след тензора энергии-импульса материи.

Проследим за движением при обращении течения времени $dt' = -dt$ по часам, отсчитывающим время $t' = -(t - t_0)$ от момента t_0, в реальном пространстве $x'_\alpha = x_\alpha$, $\gamma_\beta'^\alpha = \gamma_\beta^\alpha$. В системе дифференциальных уравнений (1), (2), (3) относительно компонент метрического тензора γ_β^α первое и третье – это уравнения второго порядка по времени, а второе – первого порядка. Уравнения (1) и (3) инвариантны по отношению к обращению течения времени $dt' = -dt$, но в момент инверсии в начальных условиях производные $\partial\gamma_\beta^\alpha/\partial t = \kappa_\beta^\alpha$ должны изменять знак. Необходимость смены знака κ_β^α видна из самих уравнений (1), (3). В уравнении (2) левая часть меняет знак при обратном течении времени, следовательно, меняет знак компонента T_α^0, т. е. инверсия времени требует также изменения направления потока энергии материи и направления плотности импульса. Таким образом, в уравнениях гравитационного поля допускается инверсия времени, но она должна быть комбинированной.

2. Необратимость времени в уравнениях частицы, движущейся в гравитационном поле

Уравнение движения частицы в гравитационном поле в синхронной системе отсчета имеет вид [10]

$$\frac{d^2x^\alpha}{dt^2} + \lambda^\alpha_{\beta\sigma}\frac{dx^\beta}{dt}\frac{dx^\sigma}{dt} = 0, \qquad (4)$$

где x^α – три координаты частицы, $\lambda^\alpha_{\beta\sigma}$ – трехмерный символ Кристоффеля, зависящий только от компонент трехмерного метрического тензора и их пространственных производных. Это дифференциальное уравнение второго порядка по времени инвариантно относительно обращения течения времени $dt' = -dt$. Однако если его рассматривать как уравнение относительно скорости $u^\alpha = dx^\alpha/dt$,

$$\frac{du^\alpha}{dt} + \lambda^\alpha_{\beta\sigma}u^\beta u^\sigma = 0, \qquad (5)$$

то видно, что скорость должна стать противоположной в момент инверсии, обеспечивая начальное условие для обращенного движения. Таким образом, уравнение движения частицы в гравитационном поле допускает только комбинированную инверсию времени.

3. Течение времени в гравитационной волне

Условия, при которых допустимы преобразования с формальной инверсией времени, можно найти не только в исходных динамических уравнениях, но и в их решениях. В качестве примера рассмотрим поле слабых возмущений $h_{ik} \ll g^{(0)}_{ik}$ на фоне галилеева пространства $g^{(0)}_{ik}$, т. е. метрику $g_{ik} = g^{(0)}_{ik} + h_{ik}$. Уравнения движения этого поля являются обычными волновыми уравнениями, и возможны плоские волны. В плоской волне $h_{ik}(x^1 - ct)$ вдоль оси x^1 отличны от нуля только компоненты h_{23}, $h_{22} = -h_{33}$, волна поперечна.

Динамические характеристики возмущенного поля даются псевдотензором t^{ik} энергии-импульса, который описывается формулой [10]

$$t^{ik} = \frac{c^4}{32\pi k}h^{n,i}_q h^{q,k}_n, \qquad (6)$$

т. е. определяется производными, обозначенными индексами через запятую, от полевых переменных. Отсюда плотность потока энергии ct^{01} в волне по оси x^1 характеризуется выражением

$$ct^{01} \propto \left(h^{2,0}_3 h^{3,1}_2 + h^{3,0}_2 h^{2,1}_3 + h^{2,0}_2 h^{2,1}_2 + h^{3,0}_3 h^{3,1}_3\right) = \\ = \left(-h_{23,0}h_{32,1} - h_{32,0}h_{23,1} - h_{22,0}h_{22,1} - h_{33,0}h_{33,1}\right). \qquad (7)$$

Так как волновые переменные $h_{\alpha\beta}$ определяются фазовым аргументом $(x^1 - ct)$, пространственная производная с индексом 1 равна по модулю и противоположна по знаку временной производной по $x^0 = ct$, и поток энергии (7) вдоль оси x^1 положителен. Но при инверсии течения времени временная производная изменяет знак, и поток энергии изменяет знак. Таким образом, волновое распространение гравитационного поля допускает только комбинированную инверсию времени с изменением направления потока энергии и плотности импульса.

4. Течение времени в космологической модели

Обратимся к простой космологической модели общей теории относительности для искривленного тяготением пространства с изотропной однородной метрикой [10]. Геометрия изотропного трехмерного пространства рассматривается как геометрия на гиперсфере с радиусом кривизны a в четырехмерном пространстве:

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = a^2. \qquad (8)$$

Элемент длины в стандартной сферической системе координат r, θ, φ дается при этом формулой

$$dl^2 = \frac{dr^2}{1 \mp (r/a)^2} + r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2\right), \qquad (9)$$

где $a > 0$, знак минус в знаменателе относится к пространству с положительной кривизной, знак плюс – к пространству с отрицательной кривизной, определяемой знаком скаляра P^α_α, образованного из трехмерного тензора Риччи. Ограничимся для определенности случаем с отрицательной кривизной. При подстановке $r = a\,\mathrm{sh}\chi$, где $\chi > 0$, выявляется пропорциональность элемента длины радиусу кривизны:

$$dl^2 = a^2\left[d\chi^2 + \mathrm{sh}^2\chi\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2\right)\right]. \qquad (10)$$

В изотропном пространстве вектор $g_{0\alpha} = 0$, так как иначе разные направления были бы неравноценными. Поэтому система отсчета является синхронной, интервал разделяется на обычные временную и пространственную части: $ds^2 = c^2dt^2 - dl^2$. Эволюцию кривизны пространства отражает зависимость 4-радиуса кривизны $a(t)$ от времени. Эта зависимость устанавливается решением полевых уравнений Эйнштейна в метрике, определяемой, согласно (10), интервалом

$$ds^2 = a^2\left[d\eta^2 - d\chi^2 - \mathrm{sh}^2\chi\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2\right)\right], \qquad (11)$$

где η – безразмерное время, приведенное к радиусу кривизны соотношением $cdt = a(t)\,d\eta$.

Если пренебречь тепловыми потерями энергии по сравнению с работой при изменении радиуса кривизны и плотности энергии ε, то из термодинамических соображений следует соотношение [10]

$$3\ln a = -\int \frac{d\varepsilon}{p+\varepsilon}. \qquad (12)$$

Отсюда видно, что для распределения материи в пространстве, подобном идеальному молекулярному газу $(p = \varepsilon/3)$, плотность энергии и радиус кривизны связаны соотношением $\varepsilon a^4 = \mathrm{const}$. С учетом этого условия в тензоре энергии-импульса материи эволюция радиуса кривизны пространства в метрике (11) дается решением [10]

$$a = a_1 \operatorname{sh}\eta, \qquad (13)$$

$$t = \frac{a_1}{c}\left(\operatorname{ch}\eta - 1\right), \qquad (14)$$

$$\varepsilon a^4 = \mathrm{const} = 3c^4 a_1^2/8\pi k. \qquad (15)$$

Отсюда следует, что

$$\frac{d\left(a^2\right)}{dt} = 2ca_1 \operatorname{ch}\eta. \qquad (16)$$

Из уравнения (16) видно, что преобразование с инверсией течения времени $dt' = -dt$ требует изменения знака константы a_1, т. е. должно быть комбинированным. При этом, согласно соотношению (13), должна изменить знак и временная переменная η. Полагая в интервале (11) угловые координаты θ, φ постоянными, нетрудно показать, что радиальная скорость $u_r = dr/ds$ изменяет знак вместе с a_1, η, т. е. направление плотности потока энергии и плотности импульса становится противоположным.

Заключение

Широко распространенное представление о том, что в детерминированных динамических законах физики не отражается направленность времени, можно уточнить. Действительно, динамические уравнения движения в классической механике и квантовой механике в инерциальных системах отсчета допускают инверсию времени в комбинации с инверсией импульсов. Аналогично уравнения классической электродинамики Максвелла допускают инверсию времени вместе с инверсией напряженности магнитного поля. При таких преобразованиях движение обретает черты обращенной в хронологическом порядке последовательности событий, например обратного движения по пройденной траектории. Это часто трактуется как возвращение во времени в прошлое. Однако при этом теряется другое представление о возвращении в прошлое, когда обращенное движение повторяет в обратной последовательности все параметры состояния, в частности, не только траекторию, но и направление импульсов. Такое движение невозможно, и это говорит о строго одностороннем направлении времени. Как видно из данной статьи, все вышесказанное обнаруживается и в динамике искривленного тяготением пространства в общей теории относительности. Благодаря синхронным системам отсчета можно следить за изменением метрики со временем во всем пространстве. Динамические уравнения гравитационного поля и массовой частицы в гравитационном поле допускают инверсию только вместе с инверсией направления импульсов. В решениях этих уравнений, в частности, для гравитационной волны и для изотропной космологической модели, некомбинированная инверсия времени также запрещена.

Таким образом, можно сказать, что динамические уравнения в физике сами по себе предполагают необратимость времени, – «стрелу времени». При этом следует заметить, что динамические уравнения состояний установлены только в физике низких энергий [9]. В физике высоких энергий главным предметом являются не состояния частиц, а акты распада и рождения частиц. Соответственно, из стандартной теории гравитации выпадают первые мгновения Большого Взрыва. Также надо подчеркнуть, что признание стрелы времени в динамических уравнениях физики не снимет вопросов о механизмах перехода от детерминистической динамики элементов к необратимым процессам систем. В связи с этим показательно компьютерное моделирование обращения движения молекул от неравновесного состояния к равновесному состоянию путем одномоментной инверсии импульсов [12]. Оказывается, что при такой инверсии, как и предполагал Лошмидт, увеличение энтропии действительно сменяется ее уменьшением. Однако энтропия не восстанавливается полностью, но снова начинает увеличиваться, а случившееся уменьшение оказывается преходящим. «Реальный мир управляется не детерминистическими законами, равно как и не абсолютной случайностью» [12, с. 224].

Список литературы

1. *Пригожин И.* От существующего к возникающему. М. : КомКнига, 2006. 328 с.

2. *Давыдов Б. И.* Великий физик (К 50-летию со дня смерти Людвига Больцмана) // УФН. 1957. Т. 61. С. 17–22. https://doi.org/10.3367/UFNr.0061.195701C.0017
3. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов : в 4 т. М. : Наука, 1966. Т. 3. 632 с.
4. *Ландау Д. Д., Лифшиц Е. М.* Квантовая механика. М. : Наука, 1989. 768 с.
5. *Кузнецов С. П.* Динамический хаос. М. : Физматлит, 2001. 295 с.
6. *Ландау Д. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика : в 2 ч. М. : Наука, 1976. Ч. 1. 584 с.
7. *Пафомов В. Е.* Переходное излучение и черенковское излучение // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. С. 1853–1858.
8. *Цой В. И.* Время в основных динамических уравнениях физики // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика. 2019. Т. 19, вып. 2. С. 146–152. https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-2-146-152
9. *Дирак П. А. М.* Можно ли использовать уравнения движения в физике высоких энергий? // УФН. 1971. Т. 103. С. 121–126. https://doi.org/10.3367/UFNr.0103.197101d.0121
10. *Ландау Д. Д., Лифшиц Е. М.* Теории поля. М. : Наука, 1988. 510 с.
11. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов : в 4 т. М. : Наука, 1965. Т. 1. 700 с.
12. *Пригожин И.*, *Стенгерс И.* Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. М. : Едиториал УРСС, 2003. 240 с.

References

1. Prigozhin I. *Ot suchshestvuyuchshego k voznikayuchshemu* [From Beimg to Arising]. Moscow, KomKniga Publ., 2006. 328 p. (in Russian).
2. Davydov B. I. Velikiy phizik (K 50-letiyu so dnya smerti Lyudviga Boltsmana) [The Great Physicist (Semicentenary from Ludwig Boltzmann Death-day)]. *UFN*, 1957, vol. 61, pp. 17–22 (in Russian). https://doi.org/10.3367/UFNr.0061.195701C.0017
3. Einstein A. *Sobranie nauchnykh trudov, tom 3* [Collection of Scientific Works, vol. 3]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 632 p. (in Russian).
4. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Kvantovaya mekhanika* [The Quantum Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 768 p. (in Russian).
5. Kuznetsov S. P. *Dinamicheskiy khaos* [The Dynamic Chaos]. Moscow, Physmatlit Publ., 2001. 295 p. (in Russian).
6. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Statisticheskaya fisika (chast 1)* [The Statistical Physics (part 1)]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 584 p. (in Russian).
7. Pafomov V. E. Transition Radiation and Cerenkov Radiation. *Soviet Physics JETF*, 1959, vol. 36, pp. 1321–1324.
8. Tsoy V. I. Time in Basic Dynamic Equations of Physics. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2019, vol. 19, iss. 2, pp. 146–152 (in Russian). https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-2-146-152
9. Dirac P. A. M. Can Equations of Motion be Used in High-Energy Physics? *Phys. Usp.*, 1971, vol. 103, pp. 121–126 (in Russian). https://doi.org/10.3367/UFNr.0103.197101d.0121
10. Landau L. D., Lifshitz E. M. *The Classical Theory of Fields*. Pergamon Press, Oxford, 1971. 374 p. (Russ. ed. : Moscow, Nauka Publ., 1988. 510 p.).
11. Einstein A. *Sobranie nauchnykh trudov, tom 1* [Collection of Scientific Works, vol. 1]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 700 p. (in Russian).
12. Prigozhin I., Stengers I. *Vremya, khaos, kvant. K resheniyu paradoksa vremeni* [Time, Chaos, Quant. To Decision of Time Paradox]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003. 240 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 03.09.2022; одобрена после рецензирования 19.10.2022; принята к публикации 20.10.2022
The article was submitted 03.09.2022; approved after reviewing 19.10.2022; accepted for publication 20.10.2022