

## Взрывоопасность локальной деформации пространства

Николай Львович Полетаев ✉

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Анализ взрывоопасности локального изменения хода времени в земной атмосфере (Полетаев, 2024) способствовал развитию релятивистского направления исследований в области обеспечения пожаро- и взрывобезопасности объектов. Основой анализа явилась зависимость хода часов от положения часов в равномерно ускоренной системе отсчета (Эйнштейн, 1907). Разумно полагать, что локальное изменение хода времени сопровождается локальной деформацией пространства (визуально наблюдаемым изменением длины линейки), которая также становится признаком появления локальной взрывоопасности.

**Постановка и решение задачи.** Поставлена и решена задача о взаимосвязи (для удаленного наблюдателя) относительных изменений хода часов и длины связанной с часами линейки при их перемещениях в однородном поле тяжести. Основой решения являлся закон равенства инертной и тяжелой массы, который позволил использовать математический маятник для установления искомой взаимосвязи. Показано, что в первом приближении относительное изменение длины линейки в два раза превышает относительное изменение хода часов (далее — соотношение поправок).

**Обсуждение результатов и выводы.** Изменения в локальной области земной атмосферы характеризуются ростом (снижением) давления в случае уменьшения (увеличения) длины помещенной в эту область стандартной линейки. Существенные (на порядки) взрывоопасные локальные изменения давления происходят при относительном изменении длины линейки в пределах  $\pm 2 \cdot 10^{-12}$ . Отмечено, что полученное соотношение поправок позволяет производить в первом приближении расчет некоторых эффектов теории гравитации, например, угла преломления луча света тяжелой массой или уточнения закона тяготения Ньютона, без привлечения известных уравнений гравитационного поля (Эйнштейн, 1915).

**Ключевые слова:** взрывобезопасность; релятивистские поправки; изменение хода времени; изменение размера при ускорении; математический маятник.

**Для цитирования:** Полетаев Н.Л. Взрывоопасность локальной деформации пространства // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 3. С. 34–39. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.34-39

✉ Полетаев Николай Львович, e-mail: nlpvniipo@mail.ru

## Explosion hazard of local space deformation

Nikolay L. Poletaev ✉

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The analysis of the explosion hazard of local changes in the time course in the Earth's atmosphere (Poletaev, 2024) contributed to the development of relativistic research in the field of ensuring fire and explosion safety of facilities. The analysis was based on the dependence of the clock rate on the position of the clock in a uniformly accelerated reference frame (Einstein, 1907). It is reasonable to assume that local changes in the course of time are accompanied by local deformation of space (a visually observable change in the length of the ruler), which also becomes a sign of the appearance of local explosion hazard.

**Problem statement and solution.** The problem of the relationship (for a distant observer) of the relative changes in the movement of the clock and the length of the ruler associated with the clock, as they move in a homogeneous gravity field, is posed and solved. The basis of the solution was the law of equality of inert and heavy mass or correction of Newton's law of gravitation, which allowed using a mathematical pendulum to establish the desired relationship. It is shown that, to the first approximation, the relative change in the length of the ruler is twice as large as the relative change in the movement of the clock (hereinafter referred to as the correction ration).

**Discussion of the results and conclusions.** Changes in the local area of the Earth's atmosphere are characterized by an increase (decrease) in pressure in the case of a decrease (increase) in the length of a standard ruler placed in this area. Significant (by orders of magnitude) explosive local pressure changes occur with a relative change in the length of the ruler in the range of  $\pm 2 \times 10^{-12}$ . It is noted that the obtained correction ratio makes it possible to calculate, in a first approximation, some effects of the theory of gravity, for example, the angle of refraction of a ray of light by a heavy mass or correction of Newton's law of gravitation, without involving the known equations of the gravitational field (Einstein, 1915).

**Keywords:** explosion safety; relativistic corrections; time change; size change during acceleration; mathematical pendulum

**For citation:** Poletaev N.L. Explosion hazard of local space deformation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(3):34-39. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.03.34-39 (rus).

✉ Nikolay Lvovich Poletaev, e-mail: nlpvniipo@mail.ru

## Введение

В работе [1] сообщалось о важности переписки ФГБУ ВНИИПО МЧС России с гражданами (далее — заявителями), искренне желающими усовершенствовать нормы и правила пожарной безопасности объектов промышленности и сельского хозяйства. Особое значение имеют случаи переписки с заявителями, чья многолетняя профессиональная деятельность связана с решением проблем оценки пожаро- и взрывоопасности объектов, а также связанных с этими проблемами ответами на вопросы пожарно-технической экспертизы. Такое взаимодействие имеет большое взаимное значение. С одной стороны, переписка позволяет выявить актуальные темы научных исследований. С другой — переписка предоставляет возможность разъяснить инициативным гражданам и коллегам объективную трактовку распространенных в обиходе понятий, неверное толкование которых может приводить к противоречиям. В ряде случаев упомянутые подробные разъяснения не могут ограничиться объемом письма и требуют написания научной статьи.

Примером подробного разъяснения является работа [1], в которой утверждение одного из заявителей, что время является материальным объектом, подверглось теоретическому анализу. Результатом анализа явилось соотношение, устанавливающее связь между изменением хода времени в локальной области пространства у поверхности Земли и взрывоопасностью этой области из-за возникновения в ней поля ускорения и связанных с этим ускорением перемещений воздуха. Другими словами, работа [1] открыла возможность утверждать: если часы, помещенные в локальную область пространства (далее — зону), отсчитывают время быстрее или медленнее, чем это делают такие же часы вне зоны, то внутри зоны устанавливается соответственно пониженное или повышенное давление воздуха. Изменение давления может достигать тысячекратных значений уже при малой относительной разнице хода часов порядка  $\pm 10^{-12}$ . Фактически, работа [1] наметила релятивистское направление исследований пожаровзрывоопасности объектов.

Тематика настоящей работы порождена вторым утверждением упомянутого выше заявителя, которое сводилось к тому, что «пустое» пространство также является материальным объектом. У специалистов института были сомнения в правомерности такого утверждения, изложенные в устном ответе заявителю. Тем не менее второе утверждение заявителя заставило обратить более серьезное внимание на возможную связь между искривлением пространства в некоторой зоне вблизи поверхности Земли и взрывоопасностью этой зоны.

Наличие такой связи демонстрирует следующее рассуждение. Согласно общей теории относительности (ОТО), деформация пространства (здесь и далее применение термина «искривление пространства» представляется менее удачным) неизбежно связана с изменением хода времени. Поэтому разумно полагать, что локальная деформация пространства вблизи поверхности Земли с необходимостью вызовет локальное изменение хода времени, которое, согласно работе [1], приведет к возникновению взрывоопасности. Здесь и в дальнейшем под деформацией пространства в зоне понимаем визуально фиксируемое отличие длины стандартной линейки, расположенной вне зоны, от длины такой же линейки, помещенной в зону. Во избежание недоумений отметим, что упоминание визуальной фиксации относится к мысленному эксперименту из-за наличия эффектов, искажающих изображение линейки. Таким эффектом в условиях атмосферы будет преломление (рефракция) света [2–4] вследствие различия плотностей воздуха в зоне и вне зоны. В условиях абсолютного вакуума к таким эффектам относится «гравитационная линза» [5–7].

С учетом вышесказанного цель работы сводится к установлению связи между деформацией пространства и изменением хода времени, расширяющей представления о последствиях деформации пространства. Учитывая трудности освоения ОТО в полном объеме, поиск искомой связи будем осуществлять простым и наглядным способом.

### Постановка задачи

Теоретическое исследование зависимости хода часов от расположения часов в равномерно ускоренной системе отсчета впервые проводилось в работе [8]. Там же предложено использовать аналогичную зависимость для локального стационарного однородного поля тяжести с соответствующим значением ускорения свободного падения – принцип эквивалентности (далее – ПЭ). Впоследствии эта аналогия была существенно ограничена как по промежутку времени, в течение которого она правомерна, так и по размерам области сопоставления [9]. Тем не менее полученное в работе [8] соотношение:

$$\frac{\delta T}{T_0} = \frac{\Phi}{c_0^2} \quad (1)$$

считается справедливым в первом приближении по малому параметру  $|\Phi|/c_0^2 \ll 1$  и широко используется в исследованиях гравитационных полей [10, 11] и при совершенствовании атомных часов [12–14]. Здесь и далее  $\delta T = T - T_0$ ;  $c_0$  — скорость света вне поля тяжести, где гравитационный потенциал (далее — потенциал) поля  $\Phi = 0$ .

Соотношение (1) выражает связь между отрезками времени  $T_0$  и  $T$ , отмеренными часами, расположенными в точках с потенциалами, равными нулю, и  $\Phi$ , соответственно, наблюдаемую из первой точки. Другими словами, наблюдатель из точки поля, где  $\Phi = 0$  (его обычно именуют «отдаленным» наблюдателем), отмечает, что за период времени  $T_0$ , отмеренный его часами, точно такие же часы в точке с потенциалом  $\Phi$  отмерили иной промежуток времени, равный  $T$ .

Естественно полагать, что, с точки зрения этого наблюдателя, находящаяся у него линейка длиной  $L_0$  при размещении в точке с потенциалом  $\Phi$  также претерпит изменение размера на  $\delta L = L - L_0$ , вычисление которого относится к цели настоящей работы. Ошибочное применение правила ПЭ

$$\delta L = 0 \quad (2)$$

вне области обоснованного использования ПЭ замечено у автора соотношения (1) (см. [8, 15]) и многих известных исследователей (см. обзор [16]). Для надежного определения искомого изменения в настоящей работе будет использован закон равенства инертной и тяжелой массы, подтвержденный с высокой точностью [17].

### Решение задачи

Рассмотрим, следуя мысленному эксперименту из работы [8], область пространства (далее — зону), в которой поле тяжести можно считать стационарным и однородным с ускорением свободного падения, постоянным по величине ( $g$ ) и направлению.

В качестве средства измерения времени в различных точках зоны будем использовать математический маятник, длина подвеса которого вне поля тяготения равна  $L_0$ . Для использования соотношений предыдущего раздела выберем длину  $L_0$  такой, чтобы величина  $2\pi\sqrt{L_0/g}$  совпала с величиной  $T_0$  из предыдущего раздела.

Ввиду ожидаемой (для отдаленного наблюдателя) зависимости длины подвеса от его положения в поле тяжести представим длину подвеса в виде:

$$L = L_0 + \delta L, \quad (3)$$

где изменение  $\delta L$  зависит от потенциала точки, в которой расположен маятник (здесь и далее под точкой расположения понимается окрестность этой точки ввиду конечной длины подвеса маятника).

Следуя [18], запишем выражение для «единицы хода» маятниковых часов с длиной подвеса (3):

$$\tau = 2\pi\sqrt{R/g},$$

где  $R$  — радиус кривизны бесконечно малой траектории груза (отрезка эллипса).

При отсутствии согласно (2) деформации траектории поперек направления  $g$ , несложно показать, что  $R = L_0^2/L$ , и возникает непривычное для евклидовой геометрии падение  $\tau$  с ростом  $L$ . С учетом (1), постоянства  $g$  и пропорции  $T \sim 1/\tau$  в первом приближении получим

$$\frac{\delta L}{L_0} = 2 \frac{\delta T}{T_0}, \quad (4)$$

Разумно полагать, что измерения времени с помощью маятника должны приводить к той же зависимости (1), полученной с помощью более известных (например, атомных) часов. Из выражений (1) и (4) имеем:

$$\frac{\delta L}{L_0} = 2 \frac{\Phi}{c_0^2}. \quad (5)$$

Из выражений (1), (4) и (5) следует, что с точки зрения отдаленного наблюдателя при смещениях его линейки с часами в стационарном и однородном поле тяжести относительное изменение размера линейки в два раза превышает относительное изменение хода часов.

Оценим в первом приближении влияние потенциала рассматриваемого поля тяжести на скорость, длину волны и частоту луча света в рамках следующего мысленного эксперимента. Допустим, что в точку поля с потенциалом  $\Phi$  переместился помощник наблюдателя, захвативший с собой линейку, длина которой вне поля тяжести совпадает с дли-

ной линейки наблюдателя  $L_0$ , и атомные (цезиевые) часы. Физический смысл (1) состоит в том, что свет монохроматического излучения (цезиевых часов) с частотой  $\nu_0 = 1/T_0$ , испущенный наблюдателем в сторону помощника, воспринимается последним как луч света с иной частотой  $\nu = 1/T$ , не совпадающей с частотой его цезиевых часов. Изменение частоты  $\delta\nu = \nu - \nu_0$  и изменение скорости гребня  $\delta c = c - c_0$  волны света в бесконечно малой окрестности точки поля удовлетворяют соотношениям [15]

$$\frac{\delta\nu}{\nu_0} = -\frac{\Phi}{c_0^2}, \quad \frac{\delta c}{c_0} = \frac{\Phi}{c_0^2}, \quad (6)$$

Из (6) следует изменение длины  $\lambda$  и скорости гребня волны света на конечных ( $\sim\lambda$ ) масштабах

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda_0} = 2\frac{\Phi}{c_0^2}; \quad \frac{\delta c}{c_0} = 2\frac{\Phi}{c_0^2}, \quad (7)$$

где  $\delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ ;

$c, \lambda$  — воспринимаемая удаленным наблюдателем скорость и длина волны света в точке с потенциалом  $\Phi$ ;

$\lambda = c/\nu$ ;  $\lambda_0 = c_0/\nu_0$  — длина волны света вне поля тяжести ( $\Phi = 0$ )

Из подобия соотношений (5) и (7) и независимости (7) от направления движения волны света разумно полагать независимость локального относительного изменения длины линейки  $\delta L/L_0$  от ориентации линейки в пространстве.

Соотношения (5) и (7) в соответствии с распространенным правилом из работы [8] разумно использовать при анализе процессов в неоднородных (т.е. реальных) стационарных слабых гравитационных полях. Один из таких процессов будет рассмотрен в следующем разделе работы.

### Результаты и их обсуждение

1. Основным результатом работы является установление связи между локальной деформацией пространства и соответствующим такой деформации локальным изменением хода времени. Данная связь с учетом выводов работы [1] предполагает возможность использовать локальную деформацию пространства в качестве признака взрывоопасности области деформированного пространства. С учетом выражения (4) и выводов работы [1] существенная взрывоопасность возникает при величине относительной деформации пространства порядка  $|\delta L|/L_0 \approx 2 \cdot 10^{-12}$ .

2. Независимость (4) от потенциала  $\Phi$  придает соотношению (4) характер универсального правила стационарного гравитационного поля.

3. Соотношения (1), (5)–(7) позволяют в первом приближении получать правильные оценки некоторых эффектов, вызванных полем тяжести, не обращаясь к общим уравнениям гравитационного поля [19]. Это, в частности, относится к расчету отклонения луча света, проходящего вблизи поверхности Солнца, заниженный результат которого в [15] объясняется ошибочным использованием принципа Гюйгенса для световой волны, частота которой зависит от места в поле тяжести. Ошибка приводит к необходимости использования в [15] неверных соотношений:

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Phi}{c_0^2}, \quad \frac{\delta c}{c_0} = \frac{\Phi}{c_0^2},$$

Переход в [15] к правильным соотношениям (7) немедленно приводит к точному (в первом приближении) результату расчета без необходимости обращения к ОТО [20]. Другим примером является коррекция закона тяготения Ньютона, позволяющая получить правильное значение прецессии перигелия Меркурия в евклидовом приближении:

$$g = \frac{GM}{r^2} \left( 1 + 3 \frac{GM}{c_0^2 r} \right),$$

где  $g$  — направленное к Солнцу ускорение Меркурия;

$G$  — гравитационная постоянная;

$M$  — масса Солнца;

$r$  — расстояние между Меркурием и Солнцем.

### Выводы

1. В первом приближении найдена связь между локальной относительной деформацией пространства и изменением хода времени в области пространства конечного размера.

2. Существенная взрывоопасность локальной деформации пространства возникает при относительной величине деформации порядка  $\pm 2 \cdot 10^{-12}$ .

3. Показана возможность получения правильной (в первом приближении) оценки некоторых эффектов, вызванных полем тяжести, без использования общих уравнений этого поля, в частности оценки отклонения луча света тяжелой массой и оценки поправки к закону тяготения Ньютона.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Полетаев Н.Л. Взрывоопасность локального изменения хода времени // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 6. С. 5–13. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.5-13



2. Auer L.H., Standish E.M. Astronomical Refraction: Computation for All Zenith Angles // *Astronomical Journal*. 2000. No. 119 (5). Pp. 2472–2474. DOI: 10.1086/301325
3. Lehn W.H., van der Werf S. Atmospheric refraction : a history // *Applied Optics*. 2005. No. 44 (27). Pp. 5624–5636. DOI: 10.1364/AO.44.005624
4. Kipping David. The “Terrascope”: On the Possibility of Using the Earth as an Atmospheric Lens // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. Columbia University, 2019. No. 131 (1005). P. 114503. DOI: 10.1088/1538-3873/ab33c0
5. Huang X., Storfer C., Gu A., Ravi V. Discovering New Strong Gravitational Lenses in the DESI Legacy Imaging Surveys // *The Astrophysical Journal*. 2021. No. 909 (1). P. 27. DOI: 10.3847/1538-4357/abd62b
6. Lonappan A.I., Namikawa T., Piccirilli G., Diego-Palazuelos P. LiteBIRD science goals and forecasts: a full-sky measurement of gravitational lensing of the CMB // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2024. No. 06. P. 009. DOI: 10.1088/1475-7516/2024/06/009
7. Martinez M.N., Gordon Y., Bechtol K., Cartwright G., Ferguson Peter S., Gorsuch M. Finding Lensed Radio Sources with the Very Large Array Sky Survey // *The Astrophysical Journal*. 2025. No. 979 (2). P. 132. DOI: 10.3847/1538-4357/ad9c37
8. Einstein A. Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen // *Radioaktivität u. Elektronik*. 1907. Bd. 4. S. 411. (Перевод: А. Эйнштейн. О принципе относительности и его следствиях. Собрание научных трудов. Т. I. «Наука». М., 1965. С. 65–114).
9. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. М. : ГИТТЛ, 1955. 504 с.
10. Pound R.V., Rebka G.A. Apparent Weight of Photons // *Physical Review Letters*. 1960. No. 4. P. 337. DOI: 10.1103/PhysRevLett.4.337
11. Delva P., Puchades N., Schönemann E., Dilssner F., Courde C., Bertone S. et al. Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites // *Physical Review Letters*. 2018. No. 121 (23). DOI: 10.1103/physrevlett.121.231101
12. Kennedy C.J., Oelker E., Robinson J.M., Bothwell T., Kedar D., Milner W.R. et al. Precision Metrology Meets Cosmology: Improved Constraints on Ultralight Dark Matter from Atom-Cavity Frequency Comparisons // *Physical Review Letters*. 2020. No. 125 (20). DOI: 10.1103/physrevlett.125.201302
13. Bothwell T., Kennedy C.J., Aepli A., Kedar D. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample // *Nature*. 2022. Vol. 602. Pp. 420–424. DOI: 10.1038/s41586-021-04349-7
14. Roura A. Atom interferometer as a freely falling clock for time-dilation measurements // *Quantum Science and Technology*. 2025. No. 10 (2). DOI: 10.1088/2058-9565/ad9e2e
15. Einstein A. Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Ann. Phys.* 1911. Bd. 35. Pp. 898–908. (Перевод: А. Эйнштейн. О влиянии силы тяжести на распространение света. Собрание научных трудов. Т. I. «Наука». М., 1965. С. 165–174).
16. Д'Абрамо Д. О выводе гравитационного сдвига частоты из закона сохранения энергии // *Успехи физических наук*. 2025. Т. 195. № 1. С. 94–100. DOI: 10.3367/UFN.2024.10.039774
17. Touboul P., Métris G., Rodrigues M., Bergé J., Robert A., Baghi Q. et al. MICROSCOPE mission: final results of the test of the Equivalence Principle // *Physical Review Letters*. 2022. No. 129. P. 121102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.121102
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Механика. 4-е изд. М. : Наука, 1988. С. 135.
19. Einstein A. Die Relativitätstheorie. In book “Die Physik”. Unter Redaktion von E. Lechner. T. 3. Abt. 3. Bd. 1. Leipzig, Teubner, 1915. Pp. 703–713. (Перевод: А. Эйнштейн, Теория относительности. Собрание научных трудов. Т. I. «Наука». М., 1965. С. 410–424).
20. Einstein A. Erklärung der Perihelbeivegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie. *Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss*, 1915. Bd. 47 (2). Pp. 831–839. (Перевод: А. Эйнштейн. Объяснение движения перигелия Меркурия в общей теории относительности. Собрание научных трудов. Т. I. «Наука». М., 1965. С. 439–446).

## REFERENCES

1. Poletaev N.L. Explosion hazard of time course local change. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(6):5-13. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.5-13 (rus).
2. Auer L.H., Standish E.M. Astronomical Refraction: Computation for All Zenith Angles. *Astronomical Journal*. 2000; 119(5):2472-2474. DOI: 10.1086/301325
3. Lehn W.H., van der Werf S. Atmospheric refraction : a history. *Applied Optics*. 2005; 44(27):5624-5636. DOI: 10.1364/AO.44.005624
4. Kipping David. The “Terrascope”: On the Possibility of Using the Earth as an Atmospheric Lens. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. Columbia University, 2019; 131(1005):114503. DOI: 10.1088/1538-3873/ab33c0

5. Huang X., Storfer C., Gu A., Ravi V. Discovering New Strong Gravitational Lenses in the DESI Legacy Imaging Surveys. *The Astrophysical Journal*. 2021; 909(1):27. DOI: 10.3847/1538-4357/abd62b
6. Lonappan A.I., Namikawa T., Piccirilli G., Diego-Palazuelos P. et al. LiteBIRD science goals and forecasts: a full-sky measurement of gravitational lensing of the CMB. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2024(06):009. DOI: 10.1088/1475-7516/2024/06/009
7. Martinez M.N., Gordon Y., Bechtol K., Cartwright G., Ferguson Peter S., Gorsuch M. et al. Finding Lensed Radio Sources with the Very Large Array Sky Survey. *The Astrophysical Journal*. 2025; 979(2):132. DOI: 10.3847/1538-4357/ad9c37
8. Einstein A. Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Radioaktivität u. Elektronik*. 1907; 4:411. (ger).
9. Fok V.A. *Theory of space, time and gravity*. Moscow, GITTL, 1955; 504. (rus).
10. Pound R.V., Rebka G.A. Apparent Weight of Photons. *Physical Review Letters*. 1960; 4:337. DOI: 10.1103/PhysRevLett.4.337
11. Delva P., Puchades N., Schönemann E., Dilssner F., Courde C., Bertone S. et al. Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites. *Physical Review Letters*. 2018; 121(23). DOI: 10.1103/physrevlett.121.231101
12. Kennedy C.J., Oelker E., Robinson J.M., Bothwell T., Kedar D., Milner W.R. et al. Precision Metrology Meets Cosmology: Improved Constraints on Ultralight Dark Matter from Atom-Cavity Frequency Comparisons. *Physical Review Letters*. 2020; 125(20). DOI: 10.1103/physrevlett.125.201302
13. Bothwell T., Kennedy C.J., Aepli A., Kedar D. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample. *Nature*. 2022; 602:420-424. DOI: 10.1038/s41586-021-04349-714
14. Roura A. Atom interferometer as a freely falling clock for time-dilation measurements. *Quantum Science and Technology*. 2025; 10(2). DOI: 10.1088/2058-9565/ad9e2e
15. Einstein A. Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Ann. Phys.* 1911; 35:898-908.
16. D'Abramo G. On gravitational frequency shift derived from energy conservation. *Advances in Physical Sciences*. 2025; 68:87-93. DOI: 10.3367/UFNe.2024.10.039774 (rus).
17. Touboul P., Métris G., Rodrigues M., Bergé J., Robert A., Baghi Q. et al. MICROSCOPE mission: final results of the test of the Equivalence Principle. *Physical Review Letters*. 2022; 129:121102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.121102
18. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Theoretical Physics: Mechanics*. 4th ed. Moscow, Nauka, 1988; 135. (rus).
19. Einstein A. *Die Relativitätstheorie*. In book "Die Physik". Unter Redaktion von E. Lechner. T. 3. Abt. 3. Bd. 1. Leipzig, Teubner. 1915; 703-713.
20. Einstein A. *Erklärung der Perihelbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss, 1915; 47(2):831-839.

Поступила 28.04.2025, после доработки 21.05.2025;

принята к публикации 22.05.2025

Received April 28, 2025; Received in revised form May 21, 2025;

Accepted May 22, 2025

### Информация об авторе

**ПОЛЕТАЕВ Николай Львович**, д.т.н., ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

### Information about the author

**Nikolay L. POLETAEV**, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RSCI: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru