



Математическое моделирование

УДК 521.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ, ЛУНЫ И СОЛНЦА, ОСНОВАННОЕ НА НОВОМ ПРИНЦИПЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

*А. Ф. Заусаев*Самарский государственный технический университет,
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Аннотация

Рассмотрен новый принцип взаимодействия окружающего пространства с материальными телами. Под окружающим пространством можно понимать физический вакуум, свойства которого в настоящее время пока находятся в стадии формирования. Полагается, что физический вакуум генетически предшествует полю и веществу, он порождает их. Гравитация — результат взаимодействия физического вакуума с движущимися материальными телами. Предполагается, что при движении материальных тел происходит изменение состояния всей системы, в местах, где находились материальные тела, образуются пустоты, т.е. области, плотности которых значительно меньше плотности окружающей среды. Тяготение объясняется свойством сжатия пространства относительно движущихся материальных тел. Получена система дифференциальных уравнений движения n материальных тел, которая не содержит явно массы тел и силовые взаимодействия. Путем численного интегрирования уравнений движения вычислены оскулирующие элементы орбит больших планет на интервале времени с 1600 по 2200 гг. Результаты вычислений сопоставлены с элементами орбит, определенных по данным координат и скоростей DE405/LE405. Показано, что координаты, скорости и элементы орбит больших планет, найденные по новому алгоритму, удовлетворительно согласуются с DE405/LE405. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы: дифференциальные уравнения движения вполне удовлетворительно описывают движение больших планет на интервале времени 600 лет; они значительно проще дифференциальных уравнений, учитывающих релятивистские эффекты, кроме того, по затратам машинного времени более чем в 2 раза эффективнее последних.

© 2014 Самарский государственный технический университет.

Образец для цитирования: Заусаев А. Ф. Исследование движения планет, Луны и Солнца, основанное на новом принципе взаимодействия // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2014. № 3 (36). С. 118–131. doi: [10.14498/vsgtu1304](http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1304).

Сведения об авторе: *Анатолий Федорович Заусаев* (д.ф.-м.н.; zausaev_af@mail.ru), профессор, каф. прикладной математики и информатики.

Ключевые слова: элементы орбит, численное интегрирование, дифференциальные уравнения движения, гравитация, экваториальная система координат, физический вакуум.

doi: <http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1304>

Введение. Закон всемирного тяготения был сформулирован Ньютоном с целью разработки математической теории движения небесных тел. На основе закона тяготения Ньютона была разработана небесная механика, которая до середины XIX века вполне удовлетворительно объясняла движение небесных тел в Солнечной системе. В начале 1850 г. французским ученым Лаврье (U.J.J. Le Verrier) была доказана невозможность представления наблюдений прохождения Меркурия по диску Солнца на основе ньютоновской динамики любой системой оскулирующих элементов и масс известных ему планет [1, 2].

В конце XIX столетия, наряду с установленными эмпирическими трудностями, стали все более выявляться и обсуждаться проблемы, связанные с феноменологическим характером ньютоновской теории. Закон всемирного тяготения Ньютона, лежащий в основе небесной механики, не связан с каким-либо конкретным представлением о природе или механизме взаимного притяжения между телами. Различные затруднения вызывали у ученых сомнения в точности закона Ньютона и делались многочисленные попытки внести поправки в формулу закона тяготения. Эти попытки улучшения закона всемирного тяготения оставались безуспешными, и лишь создание общей теории относительности, казалось бы, устранило все имеющиеся трудности, связанные с прогнозированием движения небесных тел, объяснив при этом невязки теоретических расчетов с наблюдениями в смещении перигелия Меркурия.

Однако общая теория относительности не свободна от недостатков. Важнейшим из них является вопрос о природе гравитации. В рамках общей теории относительности он так же, как и в теории гравитации Ньютона, рассматривается чисто феноменологически. Другим недостатком общей теории относительности является существенное усложнение дифференциальных уравнений в задаче n тел. Решение этой задачи приходится искать в виде рядов по степеням малых параметров, при этом учитываются лишь начальные члены разложения и совершенно не исследуется вопрос о сходимости рядов. Основным недостатком как ньютоновской динамики, так и теории тяготения Эйнштейна является, по мнению автора, наделение массы свойством, порождающим поле тяготения. В первом случае предполагается, что масса обладает свойством притяжения других материальных тел, во втором случае масса наделяется свойством искривлять окружающее пространство. Все вышеперечисленные недостатки как ньютоновской динамики, так и общей теории относительности отражаются на степени точности и достоверности исследований, проводимых на их основе.

1. Вывод дифференциальных уравнений движения материальных тел, основанных на новом принципе взаимодействия. Возникает вопрос: возможно ли создание математической модели, в которой присутствует другое объяснение природы гравитации. На основании многочисленных фундаментальных исследований, проведенных ранее, можно ответить, что в рамках существующих моделей этот вопрос не может быть решен положительно. По-видимому, первопричину гравитации следует искать не в наличии массы в материи, а в свойствах взаимодействия окружающего пространства с движущейся ма-

терией. Под окружающим пространством можно понимать физический вакуум, свойства которого в настоящее время пока находятся в стадии формирования. Физический вакуум стал предметом изучения физики благодаря трудам известных ученых: П. Дирака, Р. Фейнмана, Де Ситтера, Д. Казимира, Я. Б. Зельдовича и др. [3–6]. Ученые считают, что физический вакуум является особым состоянием материи, претендующим на первооснову мира. Физический вакуум генетически предшествует полю и веществу, он порождает их, поэтому вся Вселенная живет по его законам, которые науке предстоит еще открыть.

На основании построения простейшей модели, описывающей взаимодействие небесных тел с окружающим пространством, автором данной статьи получены дифференциальные уравнения движения n материальных тел в барицентрической системе координат. Для вывода этих уравнений допускается ряд упрощений: пространство, в котором движутся материальные тела, имеющие сферическую форму с равномерно распределенной плотностью, обладает свойством сжатия при изменении пространственной плотности. В любой заданный момент времени каждая фиксированная область пространства имеет свою определенную плотность. Очевидно, что в пространственных областях, где находятся материальные тела, плотность пространства выше по сравнению с окрестностью, окружающей это тело. При движении материальных тел происходит изменение состояния всей системы, в местах, где находились материальные тела, образуются пустоты, т. е. области, плотности которых значительно меньше плотности окружающей среды. Реакция пространства на образование пустот должна приводить к выравниванию плотностей или заполнению пустот окружающей средой. Таким образом, пространство сжимается, заполняя пустоты, образованные движущимися материальными телами.

Вывод дифференциальных уравнений движения основан на следующей идее. В каждый фиксированный момент времени материальное тело занимает в пространстве определенный объем. При перемещении тела пространство, занимаемое им в предыдущий момент времени, освобождается. При этом освободившееся пространство заполняется окружающей его средой, тем самым происходит сжатие окружающего пространства на величину объема, освобожденного движущимся объектом. Различные материальные тела занимают в пространстве определенные объемы. Однако вытесняемый ими объем, как правило, не равен фактическому объему и находится в прямой зависимости от плотности материального тела, т. е. для всякого материального тела существует предельная плотность, для которой можно рассчитать вытесняемый этим телом объем. Для сферически симметричных тел этот объем можно вычислить по формуле

$$V_0 = \frac{4}{3}\pi r_0^3.$$

где r_0 назовем эффективным радиусом материального тела, который равен радиусу этого тела, сжатого до предельной плотности.

На произвольном расстоянии r от центра материального тела пространство будет сжиматься на величину объема

$$\frac{4}{3}\pi r^3 - \frac{4}{3}\pi r_1^3 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \quad (1)$$

или, сокращая соотношение (1) на постоянный множитель, получим

$$r^3 - r_1^3 = r_0^3, \quad (2)$$

где r_1 — неизвестное расстояние, подлежащее определению.

Из выражения (2) найдем r_1 по формуле

$$r_1 = \sqrt[3]{r^3 - r_0^3}. \quad (3)$$

Из соотношения (2) находим величину сжатия на произвольном расстоянии r :

$$r - r_1 = \frac{r_0^3}{r^2 + rr_1 + r_1^2}. \quad (4)$$

С учетом (3) выражение (4) запишем в виде

$$r - r_1 = \frac{r_0^3}{r^2 + r\sqrt[3]{r^3 - r_0^3} + \sqrt[3]{(r^3 - r_0^3)^2}}.$$

Определим теперь T_0 (время сжатия пространства от $r = r_0$ до $r_1 = 0$), полагая, что r функционально зависит от ускорения $w(r)$ и времени t по закону

$$r = \frac{r_0^3}{r^2} = \frac{w(r)t^2}{2}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что ускорение за единицу времени обратно пропорционально квадрату расстояния. Выразим эту зависимость соотношением

$$w(r) = \frac{\mu}{r^2},$$

где μ — постоянная величина, значение которой находим из соотношения

$$\mu = r_0^2 w(r_0).$$

Для нахождения T_0 , используем соотношение

$$\frac{dr}{dt} = w(r)t.$$

Представим его в виде

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\mu t}{r^2}.$$

Интегрируя последнее выражение, получим

$$\frac{r_0^3}{3} = \frac{\mu T_0^2}{2}. \quad (6)$$

Выразив T_0 из (6), находим

$$T_0^2 = \frac{2r_0^3}{3\mu}. \quad (7)$$

Из (1), (2) следует, что относительно материального тела сжатое пространство можно представить в виде последовательности концентрических сфер, объемы которых равны объему данного тела. Допуская, что сжатие пространства от r до r_1 между каждой последовательной парой сфер происходит за одинаковое время, получим

$$\frac{r_0^3}{r^2 + r \sqrt[3]{r^3 - r_0^3} + \sqrt[3]{(r^3 - r_0^3)^2}} = \frac{w(r)T_0^2}{2}. \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) находим

$$w(r) = \frac{3\mu}{r^2 + r \sqrt[3]{r^3 - r_0^3} + \sqrt[3]{(r^3 - r_0^3)^2}}. \quad (9)$$

Таким образом, получено соотношение для нахождения ускорения на произвольном расстоянии от сферически симметричного (с равномерно распределенной плотностью) материального тела.

Дифференциальные уравнения движения в классической ньютоновской задаче n тел в прямоугольных координатах с началом в центре масс всей системы n материальных точек имеют следующий вид [7, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2X}{dt^2} &= \sum_i k^2 m_i \left(\frac{X_i - X}{\Delta_i^3} \right), & \frac{d^2Y}{dt^2} &= \sum_i k^2 m_i \left(\frac{Y_i - Y}{\Delta_i^3} \right), \\ \frac{d^2Z}{dt^2} &= \sum_i k^2 m_i \left(\frac{Z_i - Z}{\Delta_i^3} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

где $\Delta_i^2 = (X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2$. Здесь через X, Y, Z обозначены барицентрические координаты возмущаемого тела, а через m_i, X_i, Y_i, Z_i — массы и барицентрические координаты возмущающих тел.

Для получения дифференциальных уравнений движения, основанных на новом принципе взаимодействия, в барицентрической системе координат достаточно умножить ускорение возмущаемого тела на направляющие косинусы данного ускорения.

С учетом (9), дифференциальные уравнения движения возмущаемого тела в барицентрической системе координат примут следующий вид [9, 10]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2X}{dt^2} &= \sum_i \left(\frac{X_i - X}{\Delta_i} \right) \frac{3w_{0i}r_{0i}^2}{\Delta_i^2 + \Delta_i \sqrt[3]{\Delta_i^3 - r_{0i}^3} + \sqrt[3]{(\Delta_i^3 - r_{0i}^3)^2}}, \\ \frac{d^2Y}{dt^2} &= \sum_i \left(\frac{Y_i - Y}{\Delta_i} \right) \frac{3w_{0i}r_{0i}^2}{\Delta_i^2 + \Delta_i \sqrt[3]{\Delta_i^3 - r_{0i}^3} + \sqrt[3]{(\Delta_i^3 - r_{0i}^3)^2}}, \\ \frac{d^2Z}{dt^2} &= \sum_i \left(\frac{Z_i - Z}{\Delta_i} \right) \frac{3w_{0i}r_{0i}^2}{\Delta_i^2 + \Delta_i \sqrt[3]{\Delta_i^3 - r_{0i}^3} + \sqrt[3]{(\Delta_i^3 - r_{0i}^3)^2}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где r_{0i} — эффективный радиус i -того тела, w_{0i} — соответствующее ускорение для i -того тела на расстоянии r_{0i} от центра масс.

Дифференциальные уравнения (11) имеют более сложный вид по сравнению с уравнениями (10). Однако они значительно проще дифференциальных уравнений движения, учитывающих релятивистские эффекты [11–13].

Под эффективным радиусом материального тела будем понимать такой радиус сферы, которому соответствует сжатие пространства на величину фактического объема. Из физических соображений ясно, что тела различной плотности и одинакового размера не могут иметь равные эффективные радиусы. Их значения можно определить путем согласования решения уравнений (11) с наблюдениями.

Следует отметить, что система дифференциальных уравнений (11) не содержит масс тел и силовых взаимодействий. Дифференциальные уравнения (11) сохраняют принцип дальнего действия, так как в этих уравнениях отсутствуют силовые взаимодействия между телами и процесс сжатия пространства относительно всех материальных тел происходит одновременно.

Таким образом, дифференциальные уравнения (10), (11) описывают движение материальных тел в барицентрической системе координат. Уравнения (10) — обычные дифференциальные уравнения движения в ньютоновской форме. Вывод дифференциальных уравнений (11) основан на новом принципе взаимодействия материальных тел, в которых отсутствует явно понятие массы и силы. Понятие ускорения определяется через закон изменения величины радиус-вектора при сжатии пространства в процессе движения материального тела. При $r_{0i} \rightarrow 0$, т. е. при замене материальных тел конечных размеров материальными телами с бесконечно малыми линейными размерами, уравнения (11) обращаются в уравнения (10).

2. Численное интегрирование уравнений движения больших планет, Луны и Солнца на интервале времени с 1600 по 2200 гг. В настоящее время одной из высокоточных численных теорий движения больших планет является планетная теория DE405/LE405, созданная американскими учеными Ньюхаллом, Стендишем, Вильямсом (X. X. Newhall, E. M. Standish, Jr., and J. G. Williams) [11, 14], на интервале времени с 2305424.5 J.D. (1599 12 05) до 2525008.5 J.D. (2201 02 20). Полученные ими эфемериды для внутренних планет полностью согласованы с оптическими и радиолокационными наблюдениями.

С целью проверки эффективности различных математических моделей, описывающих движение больших планет, автором данной работы проведено сопоставление результатов численного интегрирования дифференциальных уравнений (10), (11) на интервале времени с 1600 по 2200 гг. с DE405/LE405.

Начальные данные координат X, Y, Z и скоростей $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$, фактических радиусов планет, Луны и Солнца r и ускорений w приведены в табл. 1.

В правую часть уравнений (11) в качестве постоянных входят эффективные радиусы r_{0i} и ускорения w_{0i} планет и Солнца, значения которых зависят от плотности тел. Очевидно, чем меньше плотность небесного тела, тем больше различаются его эффективный и фактический радиус. На основании тестовых расчетов путем согласования решения уравнений (11) с данными, полученными на основании DE405/LE405, были найдены эффективные радиусы и ускорения для всех планет Луны и Солнца.

Численное интегрирование уравнений движения (10), (11) было проведено модифицированным методом Эверхарта 27 порядка с шагом интегрирования 3 дня [16–18].

Результаты численного интегрирования представлены в табл. 2–9, в ко-

Таблица 1

Начальные данные (координаты (а.е.), скорости (а.е./сут), радиус (км) и ускорение (км/с²) для планет, Луны и Солнца на момент времени $T = 2440400.5$ J.D. (1969 06 28.0) [The initial data (coordinates (au), speeds (au/day), radius (km), and acceleration (km/sec²)) for the planets, the Moon and the Sun on the time $T = 2440400.5$ J.D. (1969 06 28.0)]

Меркурий [Mercury]		
$X = 0.361762714604$	$Y = -0.090781967730$	$Z = -0.085714983182$
$\dot{X} = 0.00336749391398$	$\dot{Y} = 0.02489452044680$	$\dot{Z} = 0.01294630068860$
$r = 2.424 \cdot 10^3$	$w = 0.3690666656 \cdot 10^{-2}$	
Венера [Venus]		
$X = 0.612751941342$	$Y = -0.348365368495$	$Z = -0.195278288980$
$\dot{X} = 0.0109520683617$	$\dot{Y} = 0.0156176843653$	$\dot{Z} = 0.00633110555360$
$r = 6.100 \cdot 10^3$	$w = 0.899027143 \cdot 10^{-2}$	
Земля [Earth]		
$X = 0.120527237123$	$Y = -0.925814243017$	$Z = -0.401527009924$
$\dot{X} = 0.01680396477149$	$\dot{Y} = 0.00175034387379$	$\dot{Z} = 0.000759242499157$
$r = 6.20315 \cdot 10^3$	$w = 0.979831333 \cdot 10^{-2}$	
Луна [Moon]		
$X = 0.119719059795$	$Y = -0.927808873018$	$Z = -0.402614272585$
$\dot{X} = 0.01740504958809$	$\dot{Y} = 0.00158289841317$	$\dot{Z} = 0.00067368035418$
$r = 1.738 \cdot 10^3$	$w = 0.163 \cdot 10^{-2}$	
Марс [Mars]		
$X = -0.110186074283$	$Y = -1.327599456133$	$Z = -0.605889132614$
$\dot{X} = 0.0144816530597$	$\dot{Y} = 0.00024246311776$	$\dot{Z} = -0.000281520734247$
$r = 4.812 \cdot 10^3$	$w = 0.469169773 \cdot 10^{-2}$	
Юпитер [Jupiter]		
$X = -5.379706898836$	$Y = -0.830480581460$	$Z = -0.224828700228$
$\dot{X} = 0.00109201154301$	$\dot{Y} = -0.00651811656579$	$\dot{Z} = -0.00282078316536$
$r = 7.144 \cdot 10^4$	$w = 2.484123914 \cdot 10^{-2}$	
Сатурн [Saturn]		
$X = 7.894392441979$	$Y = 4.596477801627$	$Z = 1.558697573530$
$\dot{X} = -0.00321755523930$	$\dot{Y} = 0.00433580985896$	$\dot{Z} = 0.00192864656566$
$r = 6.044 \cdot 10^4$	$w = 1.038017148 \cdot 10^{-2}$	
Уран [Uranus]		
$X = -18.265398306822$	$Y = -1.161944505518$	$Z = -0.250103483937$
$\dot{X} = 0.000221188417418$	$\dot{Y} = -0.00376247593285$	$\dot{Z} = -0.00165101470307$
$r = 2.486 \cdot 10^4$	$w = 0.939014231 \cdot 10^{-2}$	
Нептун [Neptune]		
$X = -16.055042583768$	$Y = -23.942181216179$	$Z = -9.400156723549$
$\dot{X} = 0.00264277104336$	$\dot{Y} = -0.00149831445536$	$\dot{Z} = -0.000679041903018$
$r = 2.650 \cdot 10^4$	$w = 1.000508651 \cdot 10^{-2}$	
Плутон [Pluto]		
$X = -30.483319603999$	$Y = -0.872478355496$	$Z = 8.911563040990$
$\dot{X} = 0.000322210447723$	$\dot{Y} = -0.00314357030215$	$\dot{Z} = -0.00107794882974$
$r = 2.900 \cdot 10^3$	$w = 0.1167183115 \cdot 10^{-2}$	
Солнце [Sun]		
$X = 0.0045025081562339$	$Y = 0.0007670747009324$	$Z = 0.0002660568051770$
$\dot{X} = -0.3517482096 \cdot 10^{-6}$	$\dot{Y} = 0.51776253996 \cdot 10^{-5}$	$\dot{Z} = 0.22291018544 \cdot 10^{-5}$
$r = 6.9596405726 \cdot 10^5$	$w = 273.9920358 \cdot 10^{-3}$	

Таблица 2

Элементы орбит внутренних планет, полученные по данным DE405/LE405 на дату 1602 09 04 [The elements of the orbits of the inner planets, obtained according to the DE405/LE405 on the date 1602 09 04]

Object	M	a	e	ω	Ω	i
Mercury	293.1782	0.387099	0.205553	27.9534	48.8676	7.0244
Venus	108.2540	0.723331	0.006953	53.8602	77.8905	3.3961
Earth + Moon	246.8564	1.000004	0.016900	106.2233	355.2989	0.0456
Mars	293.1929	1.523694	0.092958	283.4517	50.8750	1.8777

M — mean anomaly (degrees); a — orbit major semiaxis (au); e — orbit eccentricity; ω — orbit ascending node-perihelion angle (degrees); Ω — longitude of orbit ascending node (degrees); i — orbit inclination to the ecliptic plane (degrees)

Таблица 3

Расхождения в элементах орбит численного интегрирования уравнений движения (10) и (11) с данными табл. 2 на дату 1602 09 04 [Differences in the orbital elements of the numerical integration of the motion equations (10) and (11) with the data of table 2 on the date 1602 09 04]

Object	ΔM	Δa	Δe	$\Delta \omega$	$\Delta \Omega$	Δi
Mercury / Equ. (11)	-0.0003	-0.000001	0	0.0006	-0.0002	0
Mercury / Equ. (10)	0.0137	-0.000001	0	0.0443	-0.0001	0
Venus / Equ. (11)	-0.0018	0	0	0.0070	0	0
Venus / Equ. (10)	-0.0010	0	0	0.0092	0	0
Earth + Moon / Equ. (11)	0.0001	0	0	0.0042	-0.0009	0
Earth + Moon / Equ. (10)	0.0002	0	0	0.0048	-0.0010	0
Mars / Equ. (11)	0.0001	0	0	0.0012	0	0
Mars / Equ. (10)	0.0001	0	0	0.0013	0	0

Таблица 4

Элементы орбит внутренних планет, полученные по данным DE405/LE405 на дату 1702 09 24 [The elements of the orbits of the inner planets, obtained according to the DE405/LE405 on the date 1702 09 24]

Object	M	a	e	ω	Ω	i
Mercury	83.4455	0.387097	0.205573	28.2393	48.7423	7.0184
Venus	336.6162	0.723327	0.006946	54.0330	77.6097	3.3955
Earth + Moon	264.5779	1.000020	0.016821	107.0936	354.8071	0.0323
Mars	2.9941	1.523726	0.093150	284.2193	50.5817	1.8697

Таблица 5

Расхождения в элементах орбит численного интегрирования уравнений движения (10) и (11) с данными табл. 4 на дату 1702 09 24 [Differences in the orbital elements of the numerical integration of the motion equations (10) and (11) with the data of table 4 on the date 1702 09 24]

Object	ΔM	Δa	Δe	$\Delta \omega$	$\Delta \Omega$	Δi
Mercury / Equ. (11)	0	0	0	0.0001	0	0
Mercury / Equ. (10)	0.0002	0.000001	0	0.0319	0.0001	0
Venus / Equ. (11)	-0.0009	0	0	0.0046	0	0
Venus / Equ. (10)	-0.0004	0	0	0.0063	0	0
Earth + Moon / Equ. (11)	0.0001	0	0	0.0030	-0.0010	0
Earth + Moon / Equ. (10)	0.0002	0	0	0.0028	-0.0010	0
Mars / Equ. (11)	0	0	0	-0.0011	0	0
Mars / Equ. (10)	0.0001	0	0	-0.0010	0	0

Таблица 6

Элементы орбит внутренних планет, полученные по данным DE405/LE405 на дату 2069 06 28 [The elements of the orbits of the inner planets, obtained according to the DE405/LE405 on the date 2069 06 28]

Object	M	a	e	ω	Ω	i
Mercury	0.2858	0.387099	0.205631	29.2845	48.2828	6.9965
Venus	33.0207	0.723332	0.006779	55.2393	76.5939	3.3926
Earth + Moon	172.6113	0.999991	0.016691	286.0928	177.0134	0.0155
Mars	359.2689	1.523765	0.093561	286.8867	49.5031	1.8398

Таблица 7

Расхождения в элементах орбит численного интегрирования уравнений движения (10) и (11) с данными табл. 6 на дату 2069 06 28 [Differences in the orbital elements of the numerical integration of the motion equations (10) and (11) with the data of table 6 on the date 2069 06 28]

Object	ΔM	Δa	Δe	$\Delta \omega$	$\Delta \Omega$	Δi
Mercury / Equ. (11)	-0.0001	0	10^{-6}	0	0	0
Mercury / Equ. (10)	-0.0039	0	0	-0.0019	0.0001	0
Venus / Equ. (11)	0.0001	0	0	-0.0014	0	0
Venus / Equ. (10)	-0.0001	0	0	-0.0021	0	0
Earth + Moon / Equ. (11)	0	0	0	-0.0001	-0.0008	0
Earth + Moon / Equ. (10)	0	0	0	-0.0003	-0.0007	0
Mars / Equ. (11)	0	10^{-6}	0	-0.0003	0	0
Mars / Equ. (10)	0	10^{-6}	0	-0.0004	0	0

Таблица 8

Элементы орбит внутренних планет, полученные по данным DE405/LE405 на дату 2200 04 10 [The elements of the orbits of the inner planets, obtained according to the DE405/LE405 on the date 2200 04 10]

Object	M	a	e	ω	Ω	i
Mercury	358.8282	0.387099	0.205658	29.6552	48.1184	6.9887
Venus	241.9619	0.723335	0.0066686	55.6271	76.2302	3.3912
Earth + Moon	91.7078	1.000000	0.016646	288.0876	175.5105	0.0325
Mars	190.2019	1.523747	0.093485	287.8232	49.1155	1.8291

Таблица 9

Расхождения в элементах орбит численного интегрирования уравнений движения (10) и (11) с данными табл. 8 на дату 2200 04 10 [Differences in the orbital elements of the numerical integration of the motion equations (10) and (11) with the data of table 8 on the date 2200 04 10]

Object	ΔM	Δa	Δe	$\Delta \omega$	$\Delta \Omega$	Δi
Mercury / Equ. (11)	0	0	0	0.0001	-0.0001	0
Mercury / Equ. (10)	0	-10^{-6}	0	-0.0275	-0.0001	0
Venus / Equ. (11)	-0.0010	0	0	-0.0043	0	0
Venus / Equ. (10)	0.0005	0	0	-0.0057	0	0
Earth + Moon / Equ. (11)	-0.0001	0	0	-0.0011	-0.0008	0
Earth + Moon / Equ. (10)	-0.0002	0	0	-0.0015	-0.0008	0
Mars / Equ. (11)	-0.0001	0	10^{-6}	-0.0008	-0.0001	0
Mars / Equ. (10)	-0.0001	0	10^{-6}	-0.0009	-0.0001	0

торых приняты следующие обозначения: M — средняя аномалия; ω — аргумент перигелия; Ω — долгота восходящего узла; i — наклонение; ΔM , Δa , Δe , $\Delta \omega$, $\Delta \Omega$, Δi — отклонения элементов орбит, вычисленных на основе решения уравнений (10) и (11), от элементов, найденных по данным DE405/LE405. Все эти величины выражены в градусах и долях градусов; большая полуось a — в астрономических единицах.

В табл. 2, 4, 6, 8 приведены элементы орбит больших планет на четыре момента оскуляции, полученные с помощью использования банка данных DE405/LE405 [14]. В табл. 3, 5, 7, 9 показаны расхождения в элементах орбит численного интегрирования уравнений движения (10) и (11) с данными табл. 2, 4, 6, 8 соответственно. При этом данные первой строки табл. 3, 5, 7, 9 найдены путем решения дифференциальных уравнений (11), полученных на основе нового принципа взаимодействия, а данные второй строки получены путем решения классических ньютоновских дифференциальных уравнений (10).

Из сопоставления орбитальных элементов, приведенных в табл. 3, 5, 7, следует, что элементы орбит, найденные путем решения дифференциальных уравнений (11) и полученные с помощью использования банка данных DE405/LE405, отличаются незначительно. Максимальное различие в элементах орбит наблюдается в аргументах перигелиев в 1602 г. Для Меркурия расхождения в значениях аргумента перигелия составляет 0.0006° , что соответствует отклонению векового смещения от значений, полученных на основе банка данных DE405/LE405 — $0.59''$. Для Венеры вековое отклонение составляет $6.87''$, для барицентра Земля + Луна — $4.12''$ и для Марса — $1.18''$. Эти расхождения связаны с различной скоростью векового движения аргументов перигелиев у различных планет.

В табл. 10 представлены вековые смещения долгот перигелиев внутренних планет, вычисленных на основании решения дифференциальных уравнений (10) и полученных с использованием банка данных DE405/LE405. Как видно из табл. 10, вековое смещение долготы перигелия Меркурия в результате учета релятивистских эффектов и смещения полученного на основании решения уравнений (11) отличаются друг от друга на $0.3''$, что находится в пределах вычислительной погрешности. Скорости движения перигелиев Венеры, Земли и Марса отличаются друг от друга более значительно. Однако вследствие того, что погрешности смещений перигелиев внутренних планет составляют для Меркурия $\pm 0.44''$, для Венеры, Земли и Марса — $\pm 5.28''$, $\pm 1.79''$ и $\pm 0.27''$ соответственно [13], нет возможности однозначно ответить на вопрос, какие смещения перигелиев планет, приведенные в табл. 10 для внутренних планет, являются истинными.

Отличия остальных элементов орбит: больших полуосей a , эксцентриситетов e , долгот восходящих узлов Ω и наклонений i (см. табл. 2–9) у всех

Таблица 10

Вековое движение перигелиев внутренних планет [The secular movement of the perihelion of the inner planets]

Solution	Mercury	Venus	Earth + Moon	Mars
DE405/LE405	$43.25'' \pm 0.44''$	$8.06'' \pm 5.28''$	$5.01'' \pm 1.79''$	$1.07'' \pm 0.27''$
Equ. (11)	$42.95''$	$2.18''$	$0.60''$	$0.12''$

планет на всем интервале интегрирования с 1602 по 2200 гг. незначительные.

Сравнение элементов орбит внутренних планет, вычисленных с использованием дифференциальных уравнений (11) и DE405/LE405 (см. табл. 2–9), указывает на вполне удовлетворительное согласие, так как максимальная разность между элементами орбит находится в пределах вычислительных погрешностей.

Возникает естественный вопрос: выдвигались ли подобные гипотезы ранее, делались ли предположения, что причины проявления гравитации являются неотъемлемым свойством окружающего пространства, а не массы сосредоточенной в теле? Подобные объяснения причины гравитации были высказаны Б. Риманом [19], а впоследствии А. Пуанкаре [20].

Рассуждая о природе тяготения, Б. Риман пишет [19, с. 472]: «Существующую (...) в каждой точке пространства определенную по величине и направлению силу ускорения я пытаюсь объяснить движением некоей субстанции, наполняющей все бесконечное пространство. Эту субстанцию можно представить себе как физическое пространство, точки которого движутся в геометрическом пространстве.

На основании этого допущения все воздействия весомых тел на весомые тела передаются в пустом пространстве посредством названной субстанции. Таким образом, формы движения, лежащие в существе света и теплоты, посылаемых небесными телами, суть не что иное, как формы движения этой субстанции. Но названные явления, именно тяготение и распространение света сквозь пустое пространство, — единственные, которые должны были бы быть объяснены только движением этой субстанции».

А. Пуанкаре высказывает схожие с Б. Риманом суждения о причине тяготения. Говоря о тяготении, А. Пуанкаре пишет [20, с. 503]: «В то время как в ньютоновской механике количество энергии движущегося тела зависит от инерции тела, находящегося в движении, здесь энергия зависит от того, что называют инерцией эфира по отношению к электромагнитным силам. Инерция эфира возрастает вместе со скоростью и становится бесконечно большой, когда скорость электрона приближается к скорости света. Таким образом, кажущаяся масса электрона возрастает со скоростью (...). При этом новом представлении постоянной массы материи не существует. Инерцией обладает не материя, а эфир; он один оказывает сопротивление движению, так что можно было бы сказать: нет материи, есть только дыры в эфире».

Таким образом, размышляя о природе тяготения, как Б. Риман, так и А. Пуанкаре приходят к тому, что причину тяготения следует искать не в наличии массы в материальном теле, а в свойстве бесконечного пространства, которое у Б. Римана называется движущейся субстанцией, а у А. Пуанкаре свойством эфира.

В предложенной нами модели считается, что изменением движения материальных тел в каждый момент времени управляет состояние пространства. Относительно любой точки пространства можно сказать, что в данный момент времени она имеет определенное состояние вследствие того, что пространство рассматривается как одно целое. В этой связи понятие одновременности для всех точек пространства будет связано с понятием состояния пространства в данный момент времени, которое является вполне определенным. Силы взаимодействия между материальными телами заменяются изменением состояния пространства. В этом случае отсутствует необходимость в релятивистском подходе при исследовании движения материальных тел,

если считать, что изменения состояния всех точек пространства происходит одновременно.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы: дифференциальные уравнения движения (11) вполне удовлетворительно описывают движение больших планет, Луны и Солнца на интервале времени 600 лет; они значительно проще дифференциальных уравнений, учитывающих релятивистские эффекты; кроме того, по затратам машинного времени более чем в 2 раза эффективнее последних.

ORCID

Anatoliy Zausaev: <http://orcid.org/0000-0002-5035-9615>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Le Verrier U. J. J. Théorie du mouvement de Mercure // *Ann. Observ. Imp. Paris (Mém.)*, 1859. vol. 5. pp. 1–196.
2. Roseveare N. T. *Mercury's Perihelion, from Le Verrier to Einstein*. Oxford: Clarendon, 1982. 208 pp.
3. Дирак П. Электроны и вакуум // *Наука и жизнь*, 1957. № 1. С. 24–27.
4. Wheeler J. *Neutrinos, Gravitation and Geometry*. Princeton: Princeton Univ. Press, 1960.
5. Зельдович Я. Б. Космологическая постоянная и теория элементарных частиц // *УФН*, 1968. Т. 95, № 1. С. 209–230.
6. Jaffe R. L. The Casimir effect and the quantum vacuum // *Phys. Rev. D*, 2005. vol. 72, 021301(R). doi: [10.1103/PhysRevD.72.021301](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.72.021301).
7. Субботин М. Ф. *Введение в теоретическую астрономию*. М.: Наука, 1968. 800 с.
8. Чеботарев Г. А. *Аналитические и численные методы небесной механики*. М., Л.: Наука, 1965. 368 с.
9. Заусаев А. Ф. Теория движения n материальных тел, основанная на новом принципе взаимодействия // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2006. № 43. С. 132–139. doi: [10.14498/vsgtu463](https://doi.org/10.14498/vsgtu463).
10. Заусаев А. Ф., Заусаев А. А. *Математическое моделирование орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы*. М.: Машиностроение-1, 2008. 250 с.
11. Newhall X. X., Standish E. M., Williams J. G. DE 102 — A numerically integrated ephemeris of the moon and planets spanning forty-four centuries // *Astron. Astrophys.*, 1983. vol. 125, no. 1. pp. 150–167.
12. Богородский А. Ф. *Всемирное тяготение*. Киев: Наукова Думка, 1971. 352 с.
13. Брумберг В. А. *Релятивистская небесная механика*. М.: Наука, 1972. 384 с.
14. Standish E. M. *JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405*: Jet Prop Lab Technical Report, 1998, IOM 312. F–98–048.
15. Заусаев А. Ф., Абрамов В. В., Денисов С. С. *Каталог орбитальной эволюции астероидов, сближающихся с Землей с 1800 по 2204 гг.* М.: Машиностроение–1, 2007. 606 с.
16. Заусаев А. Ф., Заусаев А. А. *Каталог орбитальной эволюции короткопериодических комет с 1900 по 2100 гг.* М.: Машиностроение-1, 2005. 346 с.
17. Заусаев А. Ф., Заусаев А. А., Ольхин А. Г. Численное интегрирование уравнений движения больших планет (Меркурий–Плутон) и Луны с учетом радиолокационных наблюдений // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2004. № 26. С. 43–47. doi: [10.14498/vsgtu175](https://doi.org/10.14498/vsgtu175).
18. Everhart E. Implicit single-sequence methods for integrating orbits // *Cel. Mech.*, 1974. vol. 10, no. 1. pp. 35–55. doi: [10.1007/bf01261877](https://doi.org/10.1007/bf01261877).
19. Риман Б. *Натурфилософия / Сочинения*. М., Л.: ОГИЗ, ГИТТЛ, 1948. С. 467–477.
20. Пуанкаре А. *Последние мысли / О науке*. М.: Наука, 1983. С. 407–520.

Поступила в редакцию 20/III/2014;
в окончательном варианте — 01/VII/2014;
принята в печать — 27/VIII/2014.

MSC: 85-08; 70M20, 65L99

THE INVESTIGATION OF THE MOTION OF PLANETS, THE MOON, AND THE SUN BASED ON A NEW PRINCIPLE OF INTERACTION

A. F. Zausaev

Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation.

Abstract

A new principle of interaction of the surrounding space with material bodies is investigated. Under the surrounding space we understand the physical vacuum, whose properties are currently still in the formative stage. Gravity is the result of the interaction of the physical vacuum with moving material bodies. It is assumed that the movement of material objects leads to a change in the density of the surrounding space, i.e. areas which density is significantly less than the density of the environment are forming. Gravity is explained by the properties of compression space relative the motion of material bodies. The differential equations of motion of n material bodies are received. It should be noted that the system of differential equations does not contain the masses and forces of interaction between bodies explicitly. The elements of orbits of the large planets are calculated in the interval of time (1600–2200 years). The results of calculation are compared with elements of orbits founded on data of coordinates and of velocities DE405/LE405. It is shown that the coordinates and the elements of orbits of the large planets, the Moon and the Sun obtained with help of new method are in satisfactory agreement with the coordinates DE405/LE405. Based on the studies, the following conclusions are made: the differential equations of motion satisfactorily describe the motion of the major planets in the time interval of 600 years; these equations are significantly simpler than the differential equations taking into account the relativistic effects, moreover, outlay of machine time is more than twice smaller the latter's.

Keywords: orbital elements, numerical integration, differential equation of motion, gravity, equatorial system, physical vacuum.

doi: <http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1304>

ORCID

Anatoliy Zausaev: <http://orcid.org/0000-0002-5035-9615>

© 2014 Samara State Technical University.

How to cite Reference: Z a u s a e v A. F. The Investigation of the Motion of Planets, the Moon, and the Sun Based on a New Principle of Interaction, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.], 2014, no. 3 (36), pp. 118–131. doi: [10.14498/vsgtu1304](http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1304). (In Russian)

Author Details: *Anatoliy F. Zausaev* (Dr. Phys. & Math. Sci.; zausaev_af@mail.ru), Professor, Dept. of Applied Mathematics & Computer Science.

REFERENCES

1. Le Verrier U. J. J. Théorie du mouvement de Mercure, *Ann. Observ. Imp. Paris (Mém.)*, 1859, vol. 5, pp. 1–196.
2. Roseveare N. T. *Mercury's Perihelion, from Le Verrier to Einstein*. Oxford, Clarendon, 1982, 208 pp.
3. Dirac P. Electrons and vacuum, *Nauka i zhizn'*, 1957, no. 1, pp. 24–27 (In Russian).
4. Wheeler J. *Neutrinos, Gravitation and Geometry*. Princeton, Princeton Univ. Press, 1960.
5. Zel'dovich Ya. B The cosmological constant and the theory of elementary particles, *Sov. Phys. Usp.*, 1968, vol. 11, pp. 381–393. doi: [10.1070/PU1968v011n03ABEH003927](https://doi.org/10.1070/PU1968v011n03ABEH003927).
6. Jaffe R. L. The Casimir effect and the quantum vacuum, *Phys. Rev. D*, 2005, vol. 72, 021301(R). doi: [10.1103/PhysRevD.72.021301](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.72.021301).
7. Subbotin M. F. *Vvedenie v teoreticheskuiu astronomiiu* [Introduction to theoretical astronomy]. Moscow, Nauka, 1968, 800 pp. (In Russian)
8. Chebotarev G. A. *Analytical and Numerical Methods of Celestial Mechanics*, New York, 1967, xviii+331 pp.
9. Zausaev A. F. Theory of motion of n material bodies, based on a new interaction principle, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2006, no. 43, pp. 132–139 (In Russian). doi: [10.14498/vsgtu463](https://doi.org/10.14498/vsgtu463).
10. Zausaev A. F., Zausaev A. A. *Matematicheskoe modelirovanie orbital'noi evoliutsii malykh tel Solnechnoi sistemy* [Mathematical modelling of orbital evolution of small bodies of the Solar system]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2008, 250 pp. (In Russian)
11. Newhall X. X., Standish E. M., Williams J. G. DE 102 — A numerically integrated ephemeris of the moon and planets spanning forty-four centuries, *Astron. Astrophys.*, 1983, vol. 125, no. 1, pp. 150–167.
12. Bogorodsky A. F. *Vsemirnoe tiagotenie* [Universal Gravitation]. Kiev, Naukova Dumka, 1971, 352 pp. (In Russian)
13. Brumberg V. A. *Relativistskaia nebesnaia mekhanika* [Relativistic Celestial Mechanics]. Moscow, Nauka, 1972, 384 pp. (In Russian)
14. Standish E. M. *JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405*, Jet Prop Lab Technical Report, 1998, IOM 312. F–98–048.
15. Zausaev A. F., Abramov V. V., Denisov S. S. *Katalog orbital'noi evoliutsii asteroidov, sblizhaishchikhsia s Zemlei s 1800 po 2204 gg* [Catalogue of orbital evolution of asteroids approaching to the Earth between 1800 and 2204]. Moscow, Mashinostroenie–1, 2007, 606 pp. (In Russian)
16. Zausaev A. F., Zausaev A. A. *Katalog orbital'noi evoliutsii korotkoperiodicheskikh komet s 1900 po 2100 gg* [Catalogue of orbital evolution of short-period comets between 1800 and 2204]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2005, 346 pp. (In Russian)
17. Zausaev A. F., Zausaev A. A., Ol'khin A. G. The numerical integration of the equations of motion for large planets (Mercury and Pluto) and the Moon with the radar observations, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2004, no. 26, pp. 43–47 (In Russian). doi: [10.14498/vsgtu175](https://doi.org/10.14498/vsgtu175).
18. Everhart E. Implicit single-sequence methods for integrating orbits, *Cel. Mech.*, 1974, vol. 10, no. 1, pp. 35–55. doi: [10.1007/bf01261877](https://doi.org/10.1007/bf01261877).
19. Riemann B. Natural Philosophy, *Sochineniia* [Collected Works]. Moscow, Leningrad, OGIZ, GITTL, 1948, pp. 467–477 (In Russian).
20. Poincaré A. The Last Thought, *O nauke* [On Science. Collected Works]. Moscow, Nauka, 1983, pp. 407–520 (In Russian).

Received 20/III/2014;
 received in revised form 01/VII/2014;
 accepted 27/VIII/2014.