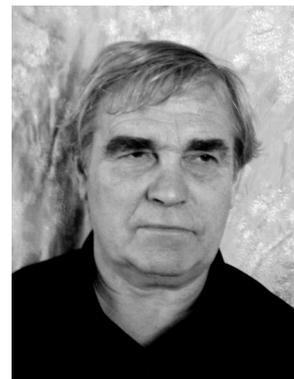


УДК 510.10



А.В. Кочетков



П.В. Федотов

Кочетков А.В.*,
Федотов П.В.**

От Ньютона до параметризованного постньютоновского формализма: нули и единицы

*Кочетков Андрей Викторович, доктор технических наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета и Саратовского государственного технического университета, член Президиума и председатель Поволжского отделения Российской академии транспорта
E-mail: soni.81@mail.ru

**Федотов Петр Викторович, инженер, эксперт ООО «Научно-исследовательский центр технического регулирования» (Саратов, Россия)
E-mail: klk50@mail.ru

После фундаментальных работ Леви-Чивита развитие общей теории относительности пошло в направлении параметризованного постньютоновского формализма, которые отличаются от стандартной модели Эйнштейна применением соответствующих параметров. Существуют другие теории параметризованного постньютоновского формализма, они отличаются от ОТО только набором параметров и коэффициентами в уравнениях. По нашему мнению, исходя из уравнений для микрополя Лоренца, можно составить уравнение магнитного взаимодействия не привлекая понятия «магнитного поля». В своей статье мы показываем, что так называемая магнитная сила Лоренца есть не что иное, как релятивистская поправка к электростатической силе взаимодействия. Как мы полагаем, нам удалось доказать, что «магнитная» поправка возникает в результате конечности скорости распространения электромагнитного взаимодействия.

Ключевые слова: общая теория относительности, магнитная поправка, магнитные заряды, электромагнитное взаимодействие, конечная скорость распространения.

Открытие Ньютоном закона всемирного тяготения стало большим шагом в развитии науки в целом. Дальнейшим развитием закона Ньютона явилось его применение в практике астрономических расчетов. Это стало возможным благодаря работам Кеплера. Его знаменитые три закона, определяющие движение небесных тел вокруг Солнца, явились продолжением развития науки о гравитации и позволили практически применить в астрономических расчетах закон всемирного тяготения.

Но, тщательные астрономические наблюдения, которые проводились еще с глубокой древности, не позволяли ученым успокоиться. Дело в том, что законы Кеплера являются только приближением к действительности. И то, что закон Ньютона и законы Кеплера являются только грубым приближением к действительности, было ясно всем исследователям. Особенно эти отклонения были заметны при наблюдениях за Меркурием.

С самого начала все попытки уточнения закона Всемирного тяготения основывались на аналогиях с электродинамикой. По мере выдвижения различных уравнений электромагнитных взаимодействий электрических зарядов практически сразу приводились эквиваленты этих уравнения для гравитации.

Первым подобным уравнением был закон Вебера для электрических зарядов (1846 г.)¹. В своих работах по электродинамике Вебер фактически разработал электродинамическую теорию взаимодействия дискретных электрических частиц. Это позволило ему выдвинуть знаменитый закон Вебера²:

$$F_g = -g_1 g_2 \left[\frac{1}{r^2} - \frac{1}{2c^2 r^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{1}{c^2 r} \left(\frac{d^2 r}{dt^2} \right) \right],$$

здесь g_1 и g_2 – гравитационные «заряды» взаимодействующих частиц; r – расстояние.

Вебер теоретически вывел закон взаимодействия движущихся зарядов, впервые выведя формулу, в которой учитывались не только знаки и величина этих зарядов, но и их относительная скорость перемещения, однако не учитывал конечности скорости взаимодействия – он считал, что силы действуют мгновенно, вне зависимости от расстояния. Выведенный закон включал в себя закон тяготения Кулона как частный случай взаимодействия, и при этом, как и закон взаимодействия в электродинамике, включал в себя члены, зависящие от относительной скорости и ускорения притягиваемых тел.

¹ Роузвер Н.Т. Перигелий Меркурия от Лаверье до Эйнштейна. М. : Мир, 1984. С. 139

² Бернштейн В.М. Масса и энергия. Развитие электродинамики и теория гравитации Вебера. М. : Спутник, 2010. С. 21.

Другие аналогичные законы в электродинамике были выдвинуты Гауссом, Риманом, Клаузиусом и для всех были созданы эквиваленты в теории тяготения.

Но, все эти попытки наталкивались на сложные расчеты Солнечной системы. С одной стороны, лаконичность и строгая красота законов Ньютона и Кеплера вступали в противоречие со сложными уравнениями, при попытке применения, которых пришлось бы отказаться от законов Кеплера. С другой стороны применение законов уточняющих закон тяготения Ньютона не давало существенных преимуществ повышения точности в расчетах.

С особенной ясностью недостатки теории тяготения Ньютона были заметны на основе попыток расчетов траекторий небесных тел. Никакие расчеты, на основе законов Ньютона и Кеплера, не давали возможность рассчитать движения этих тел. Проблема движения планет солнечной системы состоит в том, что согласно законам Ньютона и Кеплера планеты должны двигаться по статистическим эллипсам, но известно, что это не так, на самом деле планеты движутся по почти эллиптическим орбитам, большая ось которых медленно смещается в пространстве. Из-за малой величины это смещение большой оси получило название «векового смещения». Самая большая величина векового смещения у Меркурия, поэтому исследователи этого вопроса обращались к исследованию движения Меркурия. В 1916 г. А. Эйнштейн выступил со своей знаменитой Общей теорией относительности. В ней Эйнштейн выдвинул гипотезу о возможности замены силы притяжения искривлением геометрического пространства. После блестящего подтверждения расчетов, по формулам ОТО, смещения перигелия Меркурия ОТО Эйнштейна начало свое победное шествие в науке.

Но с самого начала в теории ОТО были заложены некоторые недостатки, которые не позволили окончательно победить новой теории.

Первый недостаток состоял в том, что решить задачу векового смещения перигелия Меркурия удалось путем внесения в уравнения теории гравитации одного единственного параметра – гравитационного радиуса Солнца (α)¹.

Применение тех же уравнений для других планет солнечной системы, которые имеют другие значения векового смещения, показало, что расчеты не совпадают с реальностью. Причем, если менять значение параметра α , произвольным образом, то можно получить точные значения векового смещения для одной планеты, причем любой заранее выбранной, но не для всех сразу. Но, по физическому смыслу α – это гравитационный радиус Солнца, а он не может произвольно меняться, тем более не может быть разным для разных планет. Это был первый подводный камень на пути распространения ОТО Эйнштейна.

Второй «камень» подложили фундаментальные работы Леви-Чивита².

«...открытие Леви-Чивита, который, в знаменитой работе, написанной в 1917 г., показал, как на произвольном римановом многообразии можно внутренним образом ввести понятие параллельного переноса, теперь называемое связностью Леви-Чивита. На римановом подмногообразии евклидова пространства R^k (такие многообразия главным образом до тех пор и рассматривали) он ввел ковариантную производную, построив касательную компоненту тривиальной ковариантной производной R^k . При этом оказалось, что соответствующий этой ковариантной производной параллельный перенос вдоль кривых не зависят от объемлющего пространства, т.к. полностью определяют индуцированной римановой метрикой M . Благодаря этому оказалось возможным ввести параллельный перенос на абстрактных римановых многообразиях (Levi-Civita T., *Nozione di parallelismo in una varietà qualunque e conseguente specificazione geometrica della curvatura Riemanniana*, Rend. Palermo, (1917), 173–205)».

До работ Леви-Чивита исследовались только римановы пространства, составляющие подмножества евклидовых пространств. Такие пространства отличаются тем, что для того, чтобы построить искривленное пространство Римана, необходимо сначала задать евклидово пространство, а только затем строить искривленное пространство, задавая тензор риманова пространства как связующее звено риманова пространства с евклидовым. После работы Леви-Чивита стало возможным задавать риманово пространство без относительно с порождающим евклидовым, но при этом геометрия произвольного риманова пространства может быть приведена к метрике евклидова пространства, путем параллельного переноса в вдоль любой кривой. Другими словами, отдельного неевклидова пространства, искривленного согласно идее Эйнштейна гравитирующих тел существовать не может.

На самом же деле существует одно неискривленное пространство Евклида, в котором можно вводить сколько угодно неевклидовых координат Римана, в том числе и «координаты Эйнштейна», и таким образом решать любые частные задачи, например, задачи гравитации³. Введение неевклидовых координат в ОТО полностью соответствует случаю, когда вводят «эквипотенциальные» координаты, упрощающие решения некоторых задач электростатики и др.

Все это совместно с большими сложностями в изучении и применения римановой геометрии и не позволили исполнить мечту Эйнштейна заменить физику геометризацией пространства.

Необычна и совершенно замечательна та ситуация, которая в настоящее время наблюдается в науке. ОТО Эйнштейна никто не опроверг и опровергать не собирается⁴. Общая теория относительности входит в курсы всех физико-математических университетов. Но сама ОТО на практике не имеет широкого распространения кроме некоторых энтузиастов этой теории. В настоящее время на практике используются лишь теории ППНФ. Расшифровывается эта аббревиатура как: Параметризованный Пост-Ньютоновский Формализм. Причем это не одна, а несколько теорий, объединенных общим свойством.

Этих свойств, объединяющих разнообразные ППНФ (или, более коротко ППН) теории, – два.

Первое, это то, что во всех этих теориях обязательно присутствует член Ньютона. Т.е. ППНФ теории пред-

¹ Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. Издание 2-е, дополненное. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1961.

² Громоу Д., Клингенберг В., Мейер В. Риманова геометрия в целом. Пер. с нем. Бураго Ю.Д. М.: Мир, 1971. С. 107.

³ Кочетков А.В., Федотов П.В. Анализ понятия «пространство» в общей теории относительности // Пространство и Время. 2012. № 4 (10). С. 42–49.

⁴ Кочетков А.В., Федотов П.В. Специальная теория относительности А. Эйнштейна: комментарии и сомнения // Пространство и Время. 2013. № 1 (11). С. 49–57.

ставляют собой сумму некоторых членов, первый из которых член, воспроизводящий закон всемирного тяготения Ньютона.

Остальные члены представляют собой произведения масс взаимодействующих тел, скоростей и ускорений, с некоторым коэффициентом, называемым параметром, которому приписываются некие физические свойства.

По исследованиям независимых исследователей таких параметров десять.

В обозначениях Уилла, Ни и Мизнера, Торна и Уилера ППН параметры имеют следующее значение¹:

γ – Насколько сильная пространственная кривизна в g_{ij} генерируется единицей массы покоя?

β – Насколько велика нелинейность в g_{00} при сложении гравитационных полей?

β_1 – Как много тяготения в g_{00} производится единицей кинетической энергии $\frac{1}{2}\rho_0 v^2$?

β_2 – Как много тяготения в g_{00} производится единицей гравитационной потенциальной энергии ρ_0/U ?

β_3 – Как много тяготения в g_{00} производится единицей внутренней энергии тела $\rho_0 P$?

β_4 – Как много тяготения в g_{00} производится единицей давления p ?

ζ – Разница между проявлением радиальной и трансверсальной кинетической энергией в тяготении в g_{00} .

η – Разница между проявлением радиальных и трансверсальных напряжений в тяготении в g_{00} .

Δ_1 – Как много увлечения инерциальных систем отсчёта в g_{0j} производится единицей импульса $\rho_0 v$?

Δ_2 – Разница между степенью увлечения инерциальных систем отсчёта в радиальном и трансверсальном направлении.

g_{ij} – симметричный метрический тензор 4 на 4, а пространственные индексы i и j пробегает значения от 1 до 3.

В теории Эйнштейна эти параметры соответствуют тому, что

1) для малых скоростей движения тел и их масс восстанавливается ньютоновское тяготение,

2) выполняются законы сохранения энергии, массы, импульса и момента импульса,

3) уравнения теории не зависят от системы отсчёта.

В таких обозначениях общая теория относительности имеет ППН параметры

$$\gamma = \beta = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \Delta_1 = \Delta_2 = 1 \text{ и } \zeta = \eta = 0$$

В других теориях встречаются другие параметры, но все они могут быть сведены к уже упомянутым десяти параметрам. Так, в более современной версии Уилла и Нордтведта, используемой также в работах Уилла², применяется другой эквивалентный набор из 10 ППН параметров:

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma, \\ \beta &= \beta, \\ \alpha_1 &= 7\Delta_1 + \Delta_2 - 4\gamma - 4, \\ \alpha_2 &= \Delta_2 + \zeta - 1, \\ \alpha_3 &= 4\beta_1 + 2\gamma - 2 - \zeta, \\ \zeta_1 &= 2\beta + 2\beta_2 - 3\gamma - 1, \\ \zeta_2 &= \beta_3 - 1, \\ \zeta_3 &= \beta_4 - \gamma, \\ \zeta_4 &= \zeta \end{aligned}$$

ξ получается из уравнения

$$3\eta = 12\beta - 3\gamma - 9 + 10\xi - 3\alpha_1 + 2\alpha_2 - 2\zeta_1 - \zeta_2$$

Замечательно, то, что восемь параметров из десяти, в ОТО равны единице, а два равны нулю.

В этом случае два параметра в ОТО можно совсем исключить из рассмотрения, а остальные восемь при подстановке в уравнения исчезают, т.к. тождественно равны единице и в расчетах практически не участвуют. После подстановки в уравнения ОТО значений ППН параметров приводятся к виду, который предлагал Гаусс и воплотил Вебер в своем уравнении. Т.е. обсуждаются ньютоновский член и члены, содержащие произведения масс и скоростей взаимодействующих тел.

Можно также рассмотреть вопрос, как в ППН задействовано магнитное поле или «магнитная поправка».

Авторы данной статьи предлагают другой путь построения теории гравитации.

В работе авторов³ была высказана идея, что электромагнитное поле не состоит из двух полей, как это принято в науке сейчас (из электрического и магнитного полей). Авторы заявляют, что должно быть рассмотрено только одно поле – электрическое. Но, законы электростатического поля (закон Кулона) действуют только в статике. При наличии относительных скоростей перемещения взаимодействующих тел появляется некая поправка к силе взаимодействия. Именно эта поправка и называется магнитной силой взаимодействия, или силой Лоренца. А гипотетическое поле, порождающее силу Лоренца – магнитным полем.

Данные утверждения основываются на уравнениях микрополя Лоренца⁴.

Между тем простыми преобразованиями из этих уравнений выводится выражение для вектора магнитной

¹ Will C.M. "Theoretical Frameworks for Testing Relativistic Gravity II: Parameterized post-Newtonian Hydrodynamics and the Nordtvedt Effect." *Astrophys. J.* 163 (1971): 611-628; Ni W-T. "Theoretic Frameworks for Testing Relativistic Gravity IV." *The Astrophysical Journal* 176 (1972): 769-796; Ni W-T. "A New Theory of Gravity." *Physical Review D*7 (1973): 2880-2883; Misner C.W., Thorne K.S., Wheeler J.A. *Gravitation*. San Francisco: W.H. Freeman and Co., 1973. См.: Мизнер Ч., Торн К., Уиллер Дж. Гравитация. В 3 т. Т. 3. М: Мир, 1977. С. 326.

² Will C.M., Nordtvedt K., Jr. "Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity I." *The Astrophysical Journal* 177 (1972): 757; Will C.M. *Theory and Experiment in Gravitational Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993; Will C.M., "The Confrontation between General Relativity and Experiment." *Living Rev. Relativity* 9.3 (2006). Web. <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2006-3/>

³ Кочетков А. В., Федотов П. В. Проявления исторического мышления в современной физике (Лекции для непрофессионалов). Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2001. 176 с.

⁴ Беллюстин С.В. Классическая электронная теория. М.: Высшая школа, 1971.352 с.

индукции:

$$B = \frac{1}{c^2} [uE]^1,$$

где c – скорость света; u – скорость заряженного тела создающего «магнитное поле»; E – напряженность электрического поля, создаваемого заряженным телом.

Подставляя это выражение в уравнение Лоренца для силы электромагнитного взаимодействия, получим уравнение²:

$$F = q \left\{ E + \frac{1}{c^2} [u_1 [u_2 E]] \right\}.$$

Здесь F – сила электромагнитного взаимодействия движущихся зарядов; q – заряд пробного заряда; E – напряженность электрического поля основного заряда; c – скорость света; u_1 – скорость пробного заряда; u_2 – скорость основного заряда.

Если в последнее уравнение подставить выражение для напряженности электрического поля, то можно получить:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r},$$

$$F = q_1 \left\{ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} + \frac{1}{c^2} \left[u_1 \left[u_2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \right] \right] \right\} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} + \frac{1}{c^2} \left[u_1 \left[u_2 \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \right] \right] \right\}.$$

Как известно, Лоренц исходил из гипотезы Эфира. Согласно этой гипотезе Лоренц предполагал, что движение заряженного поля относительно Мирового Эфира вызывает деформацию поля заряженного тела. Причем заряженное тело, неподвижное относительно Мирового Эфира, имеет сферически однородное поле. Соответственно, взаимодействие неподвижных заряженных тел подчиняется закону Кулона. При движении тел поля деформируются, и, соответственно, появляется член уравнения силового взаимодействия, называемый магнитной силой Лоренца.

Многочисленные эксперименты по обнаружению деформации поля движущихся зарядов относительно Мирового Эфира привели к отрицательному результату, а соответственно и к тому, что в науке отказались от идеи Эфира. Вместе с ним пропала и гипотеза Лоренца о деформации поля у движущихся зарядов.

Авторы высказали гипотезу, что магнитная поправка появляется не потому, что поле деформируется³, а вследствие запаздывания взаимодействия аналогично запаздывающим потенциалам Лиенара-Вихерта, т.е. является чисто релятивистским эффектом. Это следует из постулата о конечности скорости распространения взаимодействия поля. Для электрического поля эта скорость равна скорости света.

Как известно, формулы запаздывающих потенциалов Лиенара-Вихерта аналогичны формулам эффекта Доплера, причем как продольному, так и поперечному. Именно в этом смысле авторы и применили термин «эффект Доплера для поля» при обосновании введения магнитной поправки в уравнение взаимодействия движущихся электрических зарядов.

Замечательно, что для того, чтобы появилась «магнитная сила», необходимо и достаточно, чтобы силовое взаимодействие было не мгновенным, а распространялось с конечной скоростью. Причем величина скорости распространения взаимодействия поля значения не имеет.

Рассмотрим общие уравнения гравитационного поля.

Исходя из вышеизложенного, достаточно предположить, что гравитационное взаимодействие распространяется с конечной скоростью, из этого сразу следует, что для гравитационного поля, как и для электрического, можно написать уравнения гравитационного взаимодействия для двух движущихся тел:

$$F_G = \gamma \left\{ \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} + \frac{1}{c^2} \left[u_1 \left[u_2 \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \right] \right] \right\},$$

здесь F_G – сила гравитационного взаимодействия, для движущихся тел; γ – гравитационная постоянная; $m_{1,2}$ – массы первого и второго тела; c – скорость гравитационного взаимодействия; $u_{1,2}$ – скорости первого и второго тела.

Соответственно система уравнений Федотова-Кочеткова для электромагнитного поля приобретает следующий вид:

$$B = \frac{1}{c^2} [uE],$$

$$F = q \left\{ E + \frac{1}{c^2} [u_1 [u_2 E]] \right\},$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r},$$

$$F = q_1 \left\{ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} + \frac{1}{c^2} \left[u_1 \left[u_2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \right] \right] \right\} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} + \frac{1}{c^2} \left[u_1 \left[u_2 \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \right] \right] \right\},$$

$$F_G = \gamma \left\{ \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} + \frac{1}{c^2} \left[u_1 \left[u_2 \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \right] \right] \right\}.$$

¹ Кочетков А.В., Федотов П.В. Единые уравнения электромагнитного поля // Пространство и Время. 2013. № 3. С. 66–71.

² Там же.

³ Там же.

Компонента же магнитного поля представлена и выводится как показатель изменения движущегося электрического поля (как релятивистская поправка к электростатической силе взаимодействия).

Выводы

1. С самого начала внедрения в физику закона Всемирного тяготения Ньютона ученые столкнулись с неточностью закона Ньютона. Практически одновременно с законом Ньютона появлялись попытки его уточнения.
2. Практически все попытки уточнения закона Всемирного тяготения до Эйнштейна ограничивались эквивалентными уравнениями из электродинамики. Такие уравнения были предложены Вебером, Гауссом, Клаузиусом и Риманом.
3. Первой такой попыткой поправки закона Ньютона было уравнение, аналогичное уравнению Вебера. Сущность уравнения Вебера состояла в том, что кроме статического члена Кулона в уравнение Вебера входили члены, зависящий от скорости и ускорения взаимодействующих тел.
4. Общая теория относительности Эйнштейна явилась очередной попыткой исправить неточности закона Всемирного тяготения Ньютона. Эйнштейн, также как и его предшественники, исходил из уравнений электродинамики. Но, в отличие от предыдущих попыток, он не просто сымитировал уравнения электродинамики, а выдвинул идею геометризации пространства-времени.
5. Несмотря на громогласные заявления о победах ОТО Эйнштейна, в работах Леви-Чивита доказывалось, что строгое решение уравнений, основанных на идее искривления пространства-времени, невозможно. Именно поэтому в последних работах по ОТО исчез член с параметром α (гравитационный радиус Солнца).
6. После фундаментальных работ Леви-Чивита развитие ОТО пошло в направлении ППН формализма, которые отличаются от стандартной модели Эйнштейна применением ППН параметров.
7. Кроме ОТО существуют другие ППН теории, они отличаются от ОТО только набором параметров и коэффициентами в уравнениях.
8. В предыдущей статье¹ показано, что исходя из уравнений для микрополя Лоренца можно составить уравнение магнитного взаимодействия, не привлекая понятия «магнитного поля». Так называемая магнитная сила Лоренца есть не что иное, как релятивистская поправка к электростатической силе взаимодействия.
9. «Магнитная» поправка возникает в результате конечности скорости распространения электромагнитного взаимодействия.

Если принять гипотезу, что гравитационное взаимодействие распространяется не мгновенно, а с конечной скоростью, то автоматически возникает «гравимагнитная» поправка к уравнению Ньютона Всемирного тяготения и данный закон становится аналогом уравнения силы Лоренца для электромагнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беллюстин С.В. Классическая электронная теория. М.: Высшая школа, 1971. 352 с.
2. Бернштейн В.М. Масса и энергия. Развитие электродинамики и теория гравитации Вебера. М.: Спутник, 2010. 250 с.
3. Громол Д., Клингенберг В., Мейер В. Риманова геометрия в целом / Пер. с нем. Бураго Ю.Д. М.: Мир, 1971. 343 с.
4. Кочетков А.В., Федотов П.В. Анализ понятия «пространство» в общей теории относительности // *Пространство и Время*. 2012. № 4(10). С. 42–49.
5. Кочетков А.В., Федотов П.В. Вопросы гармонизации методологических основ теории Бора и классической механики. [Электронный ресурс] // *Russian Journal of Earth Sciences RJES*. 2012. Вып. 12(12). Режим доступа: <http://ores.su/index.php/-12122012/219-2012-12-24-13-22-02>.
6. Кочетков А.В., Федотов П.В. Единые уравнения электромагнитного поля // *Пространство и Время*. 2013. № 3(13). С. 66–71.
7. Кочетков А.В., Федотов П.В. Проявления исторического мышления в современной физике (Лекции для непрофессионалов). Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2001. 176 с.
8. Кочетков А.В., Федотов П.В. Специальная теория относительности А. Эйнштейна: комментарии и сомнения // *Пространство и Время*. 2013. № 1(11). С. 49–57.
9. Мизнер Ч., Торн К., Уиллер Дж. Гравитация. В 3 т. Т. 3. М.: Мир, 1977. 512 с.
10. Роузвер Н.Т. Перигелий Меркурия от Лаверьё до Эйнштейна. М.: Мир, 1984. 246 с.
11. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. Изд. 2-е, дополненное. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит. 1961. 568 с.
12. Misner C.W., Thorne K.S., Wheeler J.A. *Gravitation*. San Francisco: W.H. Freeman and Co., 1973.
13. Ni W-T. "A New Theory of Gravity." *Physical Review D* 7 (1973): 2880-2883
14. Ni W-T. "Theoretic Frameworks for Testing Relativistic Gravity IV." *The Astrophysical Journal* 176 (1972): 769-796.
15. Will C.M., "The Confrontation between General Relativity and Experiment." *Living Rev. Relativity* 9.3 (2006). Web. <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2006-3/>
16. Will C.M. "Theoretical Frameworks for Testing Relativistic Gravity II: Parameterized post-Newtonian Hydrodynamics and the Nordtvedt Effect." *Astrophys. J.* 163 (1971): 611-628;
17. Will C.M. *Theory and Experiment in Gravitational Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
18. Will C.M., Nordtvedt K., Jr. "Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity I." *The Astrophysical Journal* 177 (1972): 757.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Кочетков, А. В., Федотов, П. В. От Ньютона до параметризованного постньютоновского формализма: нули и единицы / А.В. Кочетков, П.В. Федотов // *Пространство и Время*. — 2013. — № 4(14). — С. 81—85.

¹ Кочетков А.В., Федотов П.В. Единые уравнения электромагнитного поля.