

## Исследовательские работы со школьниками на примере изучения солнечного ветра

С.Б. Рыжиков\* Ю.В. Рыжикова

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра общей физики  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра ОСиФН  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
(Поступила в редакцию 02.06.2024; подписана в печать 05.06.2024)

Рассмотрена методика поэтапного вовлечения школьников в исследовательскую деятельность от выбора темы до проведения вычислительного эксперимента, анализа результатов и их дальнейшей публикации. Для проведения расчетов предложено использовать схему Эйлера с модификацией для увеличения точности расчетов. В качестве направления исследования предложено использовать моделирование движения заряженных частиц в магнитном поле Земли. Для простоты расчетов поле Земли считали диполем, пренебрегали кулоновским взаимодействием и излучением частиц. Опыт показывает, что школьники прекрасно осваивают простые численные методы, могут рассчитать траектории движения частиц, проанализировать их, понять, что частицы могут достичь поверхности Земли только вблизи полюсов. Этапы исследования подобраны так, что школьники могут получить полезные для себя знания и умения, даже если у них не хватит терпения сделать работу до конца.

PACS: 41.20.-q; 02.70.-c УДК: 372.853

Ключевые слова: исследовательские работы школьников, компьютерное моделирование, схема Эйлера, магнитное поле Земли, сила Лоренца.

### ВВЕДЕНИЕ

Проведение исследовательских работ со школьниками является важнейшей составляющей развития их творческих способностей и изучения предмета [1–4].

**Целью** данной работы является описание возможной методики вовлечения школьников в исследовательскую деятельность.

Методика вовлечения школьников в исследовательскую деятельность включает несколько этапов. Важно понимать, что на каком-то этапе школьник может «сойти с дистанции» по самым разным обстоятельствам, в том числе не связанным с самой работой. Это нормально, поскольку школьник может посещать несколько кружков и занятия в одних кружках могут не оставлять времени и сил для продолжения работы в других кружках. Поэтому необходимо, чтобы школьник получил полезные для него знания и навыки, даже если он не завершит задачу.

Основной проблемой при проведении исследовательских работ является слабые знания школьников. Но ведь работы и проводятся для того, чтобы школьники изучали физические явления, причем зачастую за рамками школьного курса.

Для успешного развития творческих и исследовательских способностей детей необходимо, чтобы школьные (учебные) исследовательские работы имели структуру, схожую с этапами профессиональных исследований [1–4]. Иными словами, школьные работы должны содержать основные этапы профессиональных работ:

- видение проблемы, выбор темы (направления) работы;
- определение целей и задач работы;
- планирование и проведение натурального или вычислительного эксперимента;
- обработка результатов и подведение итогов;
- публикация.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ СО ШКОЛЬНИКАМИ

*Этап №1.* Видение проблемы, выбор темы (направления) работы.

Очень важно, чтобы темы работ были понятны и интересны школьникам. Одним из возможных путей решения этой проблемы являются работы в русле «физика вокруг нас», т.е. связанные с хорошо известными явлениями. Идеально, чтобы тему предложил сам школьник или научный руководитель незаметно подсказал направление исследования. Допустимо, чтобы школьник выбрал тему из списка, но в любом случае при выборе темы нужно исходить из интереса школьника.

Например, если школьнику интересны вопросы электричества и магнетизма или его интересуют атмосферные явления, то можно предложить ему подробнее изучить физические основы такого красивого физического явления, как полярное сияние.

Это можно сделать в виде незаметной подсказки направления исследования. Например, на уроке можно

\* sbr@physics.msu.ru

продемонстрировать фото полярного сияния. Это может быть как при изучении темы «токи в различных средах», так и безотносительно к темам уроков, просто красивое природное явление. Возможно, некоторых учеников заинтересует, почему возникают полярные сияния и почему они наблюдаются именно вблизи полюсов Земли.

*Этап №2.* Определение целей и задачи работы.

При наличии времени и интереса у школьников можно обсудить историю исследования полярного сияния. В древности народы севера считали их проявлением божественных сил. Позже ученые предположили, что сияния связаны с отражением света в арктических льдах.

Школьнику можно дать ссылку на популярную литературу [5] или рассказать, что полярное сияние обусловлено быстродвижущимися заряженными частицами так называемого солнечного ветра: протонами, электронами и альфа-частицами. Эти частицы на огромных скоростях летят от Солнца, и, когда они влетают в верхние слои атмосферы, то происходит ионизация воздуха, что и приводит к свечению. Известно, что полярное сияние не наблюдается в средних широтах. Поэтому темой исследования может быть ответ на вопрос: почему сияния наблюдаются только на полюсах?

Долететь частицам до Земли мешает магнитное поле. Таким образом, исследовательская работа сводится к расчету движения заряженных частиц в магнитном поле Земли.

*Этап №3.* Планирование вычислительного эксперимента. Знакомство со схемой Эйлера.

Данная работа не предполагает проведение экспериментов. Математический аппарат школьников не позволяет провести аналитические расчеты. Однако школьники могут воспользоваться простейшими численными методами. Авторы много раз проводили исследовательские работы со школьниками с использованием схемы Эйлера [1, 6].

Если не вдаваться в вопросы точности метода и не заниматься исследованием сходимости, то схема Эйлера интуитивно понятна школьникам.

Не вызывает сложности идея разбиения времени движения на множество малых интервалов времени  $\Delta t$  в течение которых тело движется равномерно или для большей точности расчетов равноускоренно. Поскольку движение происходит в пространстве, то расчеты нужно проводить по каждой координате. Изменение проекции скорости  $v_{x,n}$  и координаты  $x_n$  на  $n$ -м интервале описывается формулами:

$$\begin{aligned} v_{x,n+1} &= v_{x,n} + a_{x,n} \Delta t, \\ x_{n+1} &= x_n + 0.5 (v_{x,n} + v_{x,n+1}) \Delta t. \end{aligned}$$

Познакомившись со схемой Эйлера, можно для закрепления применить ее для решения какой-нибудь простой задачи с известным ответом. Например, рассчитать полет тела под углом к горизонту [6]. Даже если школьники не будут продолжать исследование, они

получат много полезной информации о компьютерном моделировании и численных методах.

*Этап №4.* Знакомство с силой Лоренца.

Для реализации схемы Эйлера необходимо знать зависимость ускорения частицы от координаты и скорости. Поскольку школьники знакомятся с силой, действующей на заряженную частицу в магнитном поле (силой Лоренца), только в конце 10-го класса, то школьникам ее нужно дать, как экспериментальный факт. Причем лучше не пугать их словами «векторное произведение», а просто дать выражение для ускорения частиц, движущихся под действием силы Лоренца в координатах [7]:

$$\begin{aligned} a_x &= (q/m)(v_y B_z - v_z B_y), \\ a_y &= (q/m)(v_z B_x - v_x B_z), \\ a_z &= (q/m)(v_x B_y - v_y B_x), \end{aligned}$$

где  $q$  — заряд частицы,  $m$  — ее масса,  $v$  — скорость,  $B$  — магнитная индукция поля.

Нужно объяснить школьникам, что любое физическое исследование проводится в определенных приближениях и важно понимать, чем именно мы пренебрегаем. В данной работе не будет учитываться кулоновское взаимодействие между частицами и излучение заряженных частиц, поскольку это достаточно сложный материал для школьников. Данные о частицах солнечного ветра можно взять из любого справочника [7].

Далее для расчета нужно написать программу на любом языке программирования. На начальном этапе работы можно ограничиться использованием электронных таблиц *Excel* или их аналогом в *LibreOffice*.

Чтобы школьники лучше разобрались с силой Лоренца целесообразно начать с однородного магнитного поля. Если школьники еще не знакомы с движением тел по окружности, то можно без вывода сказать, что теория предсказывает замкнутые круговые траектории радиусом:

$$R = mv/qB. \quad (1)$$

При начальных параметрах:  $x, y, z = 0$ ,  $v_x = 1000$  км/с,  $v_y = v_z = 0$ ,  $B_z = 1$  мкТл, теория предсказывает круговую орбиту  $R = 10.4384$  км с периодом  $T = 0.0656$  с. Расчеты по схеме Эйлера показывают, что при  $\Delta t = 1$  мкс радиус орбиты равен 10.4392 км, а период: 0.0656 с.

Таким образом, школьники видят хорошее соответствие между теорией и расчетами. Вместе с тем, уже на примере однородного поля видны недостатки схемы Эйлера, связанные с ее неточностью. Рассчитанная орбита оказывается не замкнутой. Радиус орбиты увеличивается за первый оборот примерно на 1.5 м. Пусть школьников не обескураживает этот факт. Нужно объяснить, что задача сложная и требует дальнейших усилий.

*Этап №5.* Первая корректировка схемы Эйлера.

Для увеличения точности расчетов использован факт, что сила Лоренца не меняет модуля скорости.

Таблица 1. Электрические параметры частиц солнечного ветра

Частица	Заряд, Кл	Масса, кг	$q/m$ , Кл/кг
Протон	$+1.6 \times 10^{-19}$	$1.673 \times 10^{-27}$	$9.58 \times 10^7$
$\alpha$ -частица	$+3.2 \times 10^{-19}$	$6.645 \times 10^{-27}$	$4.79 \times 10^7$
Электрон	$-1.6 \times 10^{-19}$	$9.109 \times 10^{-31}$	$1.76 \times 10^{11}$

Таблица 2. Динамические параметры частиц солнечного ветра

Параметр	Медленный солнечный ветер	Быстрый солнечный ветер
Плотность $n$ , см <sup>-3</sup>	12	4
Скорость $v$ , км/с	300–500	500–1200

Поэтому в компьютерной программе нужно провести корректировку скорости: нужно сохранить соотношения проекций скорости, изменив ее модуль. При старте программа запоминает начальную скорость  $v_0$ , затем по схеме Эйлера вычисляются проекции скорости  $v_x, v_y, v_z$ , и полная скорость  $v$ . Затем проекции скоростей корректируются по формулам:

$$u_x = v_x v_0 / v, \quad u_y = v_y v_0 / v, \quad u_z = v_z v_0 / v.$$

После проведения корректировки увеличение орбиты в условиях предыдущего запуска стало менее 0.3 мм, т.е. менее 0.000003%.

*Этап №6.* Расчет магнитного поля Земли.

Магнитное поле Земли имеет сложное строение, но в первом приближении его можно считать диполем [5]. Проекция магнитной индукции поля диполя вычисляются по формулам [7]:

$$B_x = \frac{3P}{r^5}xz, \quad B_y = \frac{3P}{r^5}yz, \quad B_z = \frac{P}{r^5}(3z^2 - r^2),$$

где  $P$  — дипольный момент Земли, который совпадает с осью  $OZ$ . Магнитный дипольный момент Земли направлен от южного к северному магнитному полюсу, составляет  $11^\circ$  с земной осью и равен  $7.7 \times 10^6$  (Тл $\times$ км<sup>3</sup>) [7].

Расчеты по этой формуле показывают, что индукция магнитного поля вблизи поверхности Земли составляет 60 мкТл у магнитных полюсов и 30 мкТл на магнитном экваторе, что соответствует табличным значениям.

*Этап №7.* Расчет движения частиц в магнитном поле Земли на большом удалении от Земли.

Расстояние от Земли до Солнца 150 млн. км (1 а.е.). С учетом наклона Земной оси  $23^\circ$  и наклона магнитного диполя Земли  $11^\circ$ , Солнце может находиться на  $34^\circ$  выше или ниже плоскости магнитного экватора Земли.

Для упрощения формул целесообразно в качестве начала координат выбрать центр Земли, а плоскость  $XY$  совместить с плоскостью магнитного экватора. Данная система отсчета будет неинерциальной, однако, учитывая малое время движение частиц вблизи

Земли, неинерциальностью можно пренебречь. После внесения в программу формул для вычисления магнитного поля Земли можно рассчитывать движения частиц. Начать можно с запуска частиц непосредственно от Солнца. На рис. 1 показана траектория протона, с параметрами запуска:  $x = -150$  млн. км,  $y = z = 0$ ,  $v_x = 1000$  км/с,  $v_y = v_z = 0$ ,  $\Delta t = 1$  с.

Хотя на графике кажется, что протон почти долетел до Земли, расчеты показывают, что протон отклонился, не долетев до Земли около 800 тыс. км. Анализ движения показывает, что поле Земли начинает заметно оказывать влияние на протон на расстоянии 3–5 млн. км. Поэтому школьники начинают понимать, что для лучшего представления материала нужно менять масштаб. Кроме этого, не имеет смысла тратить время на расчет движения протона далеко от Земли, а целесообразно начинать расчет движения примерно с 10 млн. км от Земли.

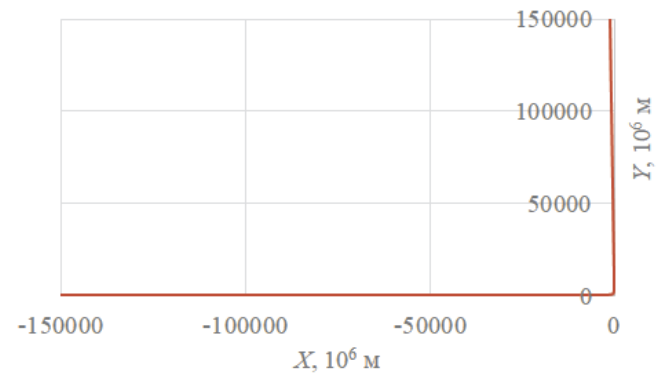


Рис. 1. Траектория движения протона со скоростью 1000 км/с

*Этап №8.* Вторая корректировка схемы Эйлера.

Вдали от Земли магнитное поле мало, поэтому интервал  $\Delta t$  может быть большим. По мере приближения к Земле индукция магнитного поля увеличивается, ускорение частиц увеличивается, и большой интервал времени может вносить существенную погрешность

в расчетах. Поэтому для ускорения расчетов имеет смысл сначала задать относительно большой интервал  $\Delta t$ , а затем его уменьшать. Например, можно предусмотреть в программе, что если:  $a\Delta t = \Delta v > 0.01v$ , то программа уменьшит интервал времени, чтобы изменение скорости за один шаг было не более процента от ее величины.

На рис. 2. приведены результаты расчетов движения протонов, летящих со скоростями в интервале от 300 до 1200 км/с. Видно, что протоны пролетают на значительных расстояниях от Земли. После того как школьники рассчитают некоторое число орбит, они поймут, что подбирать наугад скорости и углы не очень интересно. Но можно поступить наоборот: предположить, что частица приблизилась к Земле на расстоянии порядка 100 км, запустить ее в обратном направлении и посмотреть, откуда она могла прилететь.

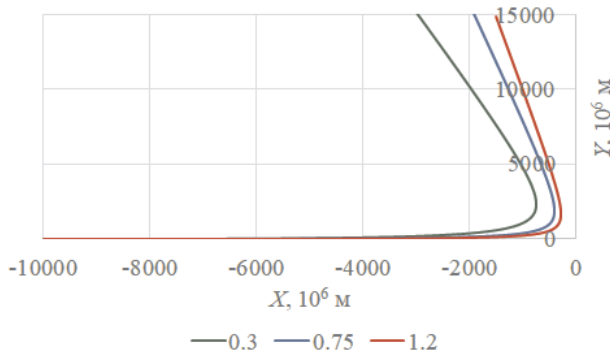


Рис. 2. Траектории движения протона при различных скоростях, старт:  $X = -10^{10}$  м,  $Y = Z = 0$ ,  $v_y = v_z = 0$ , значения  $v_x$  указаны внизу рис. в  $10^6$  м/с

*Этап №9.* Расчет движения частиц вблизи Земли.

На рис. 3 показана траектория протона, запущенного вблизи магнитного полюса Земли. Учитывая условие, что изменение скорости за один шаг должно быть не больше 1% от ее величины, интервал времени нужно выбирать  $\Delta t = 2$  мкс.

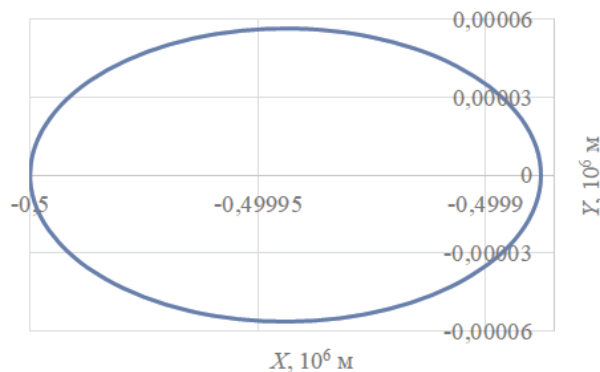


Рис. 3. Траектории движения протона около полюса, старт:  $X = -500$  км,  $Y = 0$ ,  $Z = 6500$  км,  $v_y = 300$  км/с,  $v_x = v_z = 0$

Видно, что протон движется по круговой траектории: период 0.0012 с, радиус 56 м, что соответствует расчетам по формуле (1). Если увеличить время слежения за протоном до 0.35 с, то видно, что орбита медленно дрейфует, как показано на рис. 4.

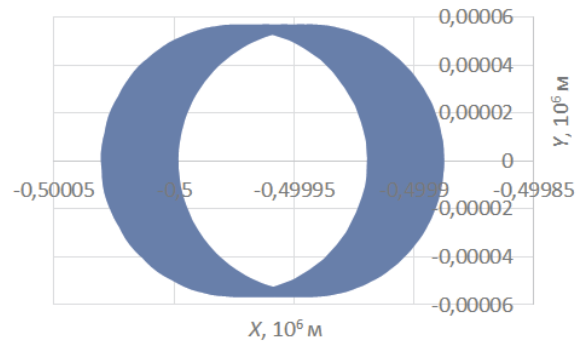


Рис. 4. Дрейф орбиты протона около полюса, старт:  $X = -500$  км,  $Y = 0$ ,  $Z = 6500$  км,  $v_y = 300$  км/с,  $v_x = v_z = 0$

Увеличивая время до 20000 с, мы увидим, что протон удаляется от Земли. Изменяя начальную координату  $X$ , мы увидим (рис. 5), что орбиты могут составлять большие углы с плоскостью  $OXY$ , а могут попасть в интервал  $34^\circ$ , т.е. лететь к Солнцу. Следовательно, летящие от Солнца протоны, могут добраться до полюсов. Заметим, что с учетом выбранного  $\Delta t$  программа выполняет более 10 миллиардов циклов, что приводит к большому времени счета.

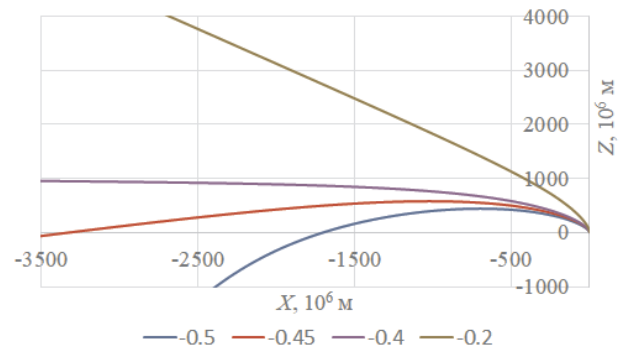


Рис. 5. Траектории движения протонов, старт:  $Y = 0$ ,  $Z = 6500$  км,  $v_y = 300$  км/с,  $v_x = v_z = 0$ , начальные величины  $X$  указаны под графиком ( $10^6$  м)

Запуская протон вблизи экватора (рис. 6), а также на широтах  $45^\circ$  и менее, можно видеть, что орбита протона дрейфует к плоскости магнитного экватора, из которой протон уже не может выбраться (рис. 7). При запуске на широтах  $60^\circ - 70^\circ$  орбита протона совершает колебания вокруг плоскости экватора (рис. 8, 9), не удаляясь от Земли далее 60 тыс. км. Таким образом, протоны не могут достичь этих широт, двигаясь от Солнца.

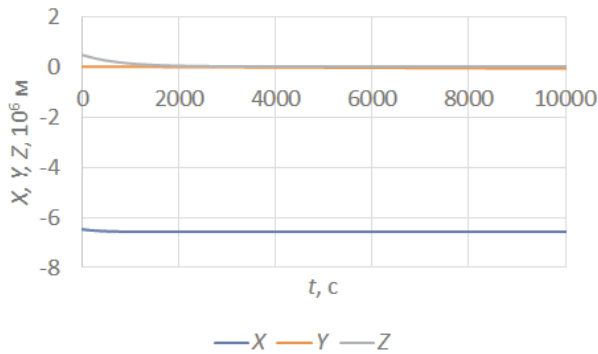


Рис. 6. Зависимость координат от времени, старт вблизи экватора:  $X = -6500$  км,  $Y = 0$ ,  $Z = 500$  км,  $v_y = 300$  км/с,  $v_x = v_z = 0$

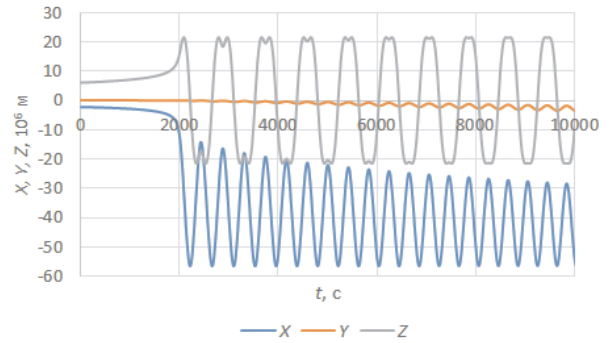


Рис. 9. Зависимость координат протона от времени, старт на широте  $70^\circ$ :  $X = -2200$  км,  $Y = 0$ ,  $Z = 6100$  км,  $v_y = 300$  км/с,  $v_x = v_z = 0$

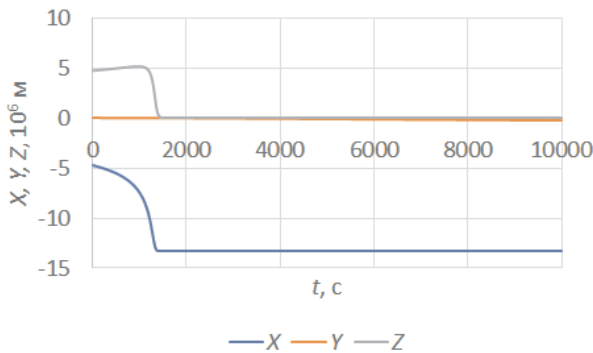


Рис. 7. Зависимость координат от времени, старт на широте  $45^\circ$ :  $X = -4700$  км,  $Y = 0$ ,  $Z = 4700$  км,  $v_y = 300$  км/с,  $v_x = v_z = 0$

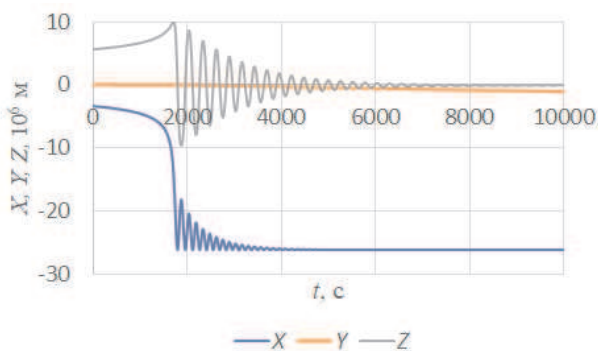


Рис. 8. Зависимость координат протона от времени, старт на широте  $60^\circ$ :  $X = -3300$  км,  $Y = 0$ ,  $Z = 5700$  км,  $v_y = 300$  км/с,  $v_x = v_z = 0$

Аналогичные результаты получаются с альфа-частицами. Расчет движение электронов затруднен тем, что ввиду большого отношения  $e/m$  ускорения получаются большими и шаг по времени приходится делать  $10^{-9}$  с и менее, что сильно увеличивает время счета. При этом, двигаясь вдали от Земли, электроны не могут приблизиться к ней ближе 10 млн. км

(рис. 10). Понятно, что такие результаты получаются без учета излучения при ускоренном движении.

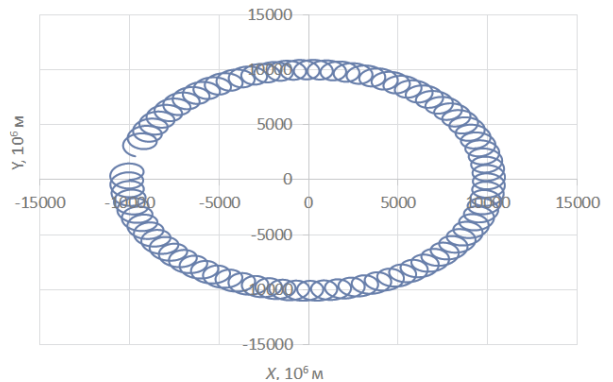


Рис. 10. Траектория движения электрона вдали от Земли:  $v_y = 300$  км/с,  $v_x = v_z = 0$

*10 этап.* Публикация. После окончания работ результаты нужно опубликовать на конкурсах (конференциях) школьных исследовательских работ. Руководителям следует учесть, что подготовка доклада (устного или стендового) занимает много времени, иногда столько же, сколько проведение работы. Подробнее о подготовке доклада в [1, 6].

Апробация методики. Исследовательские работы по изучению полярных сияний были выполнены учениками 8–9 классов Вечерней физической школы («Факториал») при физическом факультете МГУ имени М. В. Ломоносова и доложены на разных школьных конференциях: «Потенциал» (МЭИ), Конкурс имени В. И. Вернадского, «От атома до галактики».

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение со школьниками 8–10 классов исследовательских работ показало, что школьники прекрасно осваивают схему Эйлера и могут по данным им формулам провести исследования таких сложных движений,



как полет заряженных частиц солнечного ветра в магнитном поле Земли. Школьники с большим интересом

получают и анализируют сложные траектории частиц и с воодушевлением представляют результаты расчетов на конкурсах школьных исследовательских работ.

- [1] Рыжиков С.Б. Развитие исследовательских способностей одаренных школьников при обучении физике. — Диссертация на соискание ученой степени доктора педагогических наук. М. 2014.
- [2] Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. // Ученые записки физического факультета МГУ. №5. 2023. С. 2351001.
- [3] Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. // Ученые записки физического факультета МГУ. №4. 2021. С. 2041102.
- [4] Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. Исследовательские работы со школьниками на примере изучения полярных сияний. // Сборник тезисов докладов научной конференции Ломоносовские чтения. Секция физики. Москва. Физический факультет МГУ. 2024. С. 238.
- [5] Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. Как была проложена дорога в мир электроники. Учебное пособие. М.: ООО «Делу время». 2021.
- [6] Рыжиков С.Б. Развитие исследовательских компетенций школьников при выполнении исследовательских работ по физике с использованием численного моделирования: монография. М.: Школа будущего. 2012.
- [7] Буханов В.М. и др. Электричество и магнетизм. Методика решения задач. М.: МГУ. 2018.

## Research works with schoolchildren using the example of studying the solar wind

S.B. Ryzhikov<sup>1,a</sup>, Yu.V. Ryzhikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of General Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

<sup>2</sup>Department of optics, spectroscopy and nanosystems physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup>sbr@physics.msu.ru

The methodology for gradually involving schoolchildren in research activities from choosing a topic to conducting a computational experiment, analyzing the results and their further publication is considered. It is proposed to use the Euler scheme with modification to increase the accuracy of calculations. It is proposed to use modeling of the movement of charged particles in the Earth's magnetic field as a research direction. To simplify calculations, the Earth's field was considered a dipole. Coulomb interaction and particle radiation were neglected. Experience shows that schoolchildren master simple numerical methods very well. They can calculate particle trajectories, analyze them, and understand that particles can only reach the Earth's surface near the poles. The stages of the study are selected so that schoolchildren can gain useful knowledge and skills, even if they do not have the patience to complete the work.

PACS: 41.20.-q; 02.70.-c

Keywords: schoolchildren's research work, computer modeling, Euler's scheme, Earth's magnetic field, Lorentz force.  
Received 02 June 2024.

### Сведения об авторах

1. Рыжиков Сергей Борисович — доктор пед. наук, доцент, доцент; тел.: (495) 939-14-89, e-mail: sbr@physics.msu.ru.
2. Рыжикова Юлия Владимировна — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-57-40, e-mail: ryzhikovajuv@physics.msu.ru.