

УДК 372.853
ББК 74.262.23

DOI: 10.31862/1819-463X-2020-4-160-169

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ ШКОЛЬНИКОВ, СВЯЗАННЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ¹

Е. А. Михайлов, Е. В. Широков

Аннотация. Представлен опыт организации исследовательской деятельности школьников на базе НИИ ядерной физики и физического факультета МГУ. Тематика работ связана с различными разделами ядерной физики, изучение которой представляется авторам особенно важным в средней школе. При подготовке к их выполнению школьники слушают краткий курс, посвященный компьютерным методам в физике. После этого они составляют программы, позволяющие промоделировать различные ядерные явления. Затем проводится лабораторный эксперимент, позволяющий проверить и скорректировать результаты моделирования. В настоящей статье представлены два примера работ, авторы которых успешно выступали на различных научно-практических конференциях для школьников. Первая из них связана с поглощением гамма-излучения, вторая – с исследованием фона космического излучения. Особенно важно отметить, что данные работы проводились с учениками Лицея № 87 города Нижнего Новгорода в частично дистанционном формате. Это говорит о том, что подобные работы могут успешно выполняться школьниками, живущими в других городах и не имеющими возможность часто посещать лабораторию.

Ключевые слова: ядерная физика, математическое моделирование, гамма-излучение, радиационный фон.

¹ Исследовательские работы школьников были выполнены в рамках проекта «Базовые школы Российской академии наук». Авторы также выражают благодарность директору МБОУ «Лицей № 87 имени Л. И. Новиковой» (г. Нижний Новгород) С. В. Кулевой за помощь в организации занятий со школьниками.

© Михайлов Е. А., Широков Е. В., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

RESEARCH WORK OF SCHOOLCHILDREN RELATED TO THE USE OF COMPUTER MODELING IN PROBLEMS OF NUCLEAR PHYSICS

E. A. Mikhailov, E. V. Shirokov

Abstract. *The article presents the experience of organizing research activities of schoolchildren at the Institute of Nuclear Physics and the Faculty of Physics of Moscow State University. The subject matter of the works is connected with different sections of nuclear physics, the study of which is especially important in secondary school. In the process of preparing for their implementation schoolchildren listen to a short course devoted to computer methods in physics. They then develop programmes to simulate various nuclear phenomena. A laboratory experiment is then conducted to check and correct the results of the simulation. The article presents two examples of works, the authors of which have successfully performed at various scientific and practical conferences for schoolchildren. The first one is related to the absorption of gamma radiation and the second to the study of cosmic radiation background. It is especially important to note that these works were conducted with pupils of Lyceum № 87 of Nizhny Novgorod in a partly remote format. This suggests that such work can be successfully performed by schoolchildren living in other cities and not having the opportunity to visit the laboratory frequently.*

Keywords: *nuclear physics, mathematical modeling, gamma-radiation, radiation background.*

Введение

Согласно Федеральному государственному образовательному стандарту, изучение естественнонаучных предметов вообще и физики в частности призвано создавать у учащихся целостную картину окружающего мира, связанную с передовыми достижениями науки. В результате обучения школьники должны иметь представление о явлениях природы, относящихся к различным областям физики, начиная с механики и заканчивая квантовой физикой [1]. Отдельное внимание должно уделяться формированию понимания единства микромира и макромира. Это имеет важное мировоззренческое значение: благодаря этому школьники понимают, что явления в абсолютно различных пространственных масштабах могут описываться качественно схожими законами. Указанные принципы обуславливают структуру школьного курса физики, включающего в себя последовательно механику, молекулярную физику, электромагнетизм, оптику и основы атомной и ядерной физики. Тем не менее если первые четыре раздела, как правило, не вызывают

затруднений у учеников и в результате полноценного освоения программы в 7–11-м классе уровень знаний талантливых школьников по некоторым темам мало уступает таковому у выпускников технических вузов, то с ядерной физикой дело обстоит заметно хуже. Так, авторам настоящей работы, работающим со студентами младших курсов одного из ведущих отечественных вузов приходилось слышать от недавних выпускников школы высказывания, свидетельствующие об их крайне низкой грамотности в данной области. При этом стоит заметить, что речь идет об объективно наиболее способных молодых людях, заинтересованных в изучении физики и сдававших соответствующий экзамен в 11-м классе.

На наш взгляд, сложившаяся ситуация связана с несколькими причинами. Как в основной, так и в старшей школе вопросы, связанные со строением атома и его ядра, вынесены на самый последний период обучения. Это относится к третьему триместру (четвертой четверти) 9-го и 11-го класса, когда, с одной стороны, у большинства учителей уже не хватает времени на полно-

ценное изложение материала, с другой стороны, школьники в это время уже всю занятую подготовкой к экзаменам, что не лучшим образом сказывается на освоении текущей программы (даже если планируют сдавать физику).

Если говорить о самих экзаменах, то знание ядерной физики, вообще говоря, не является необходимым для успешной сдачи ЕГЭ и ОГЭ даже на отличную оценку. Так, согласно спецификации контрольных измерительных материалов для проведения основного государственного экзамена по физике лишь от 1 до 4 вопросов так или иначе могут быть связаны с квантовыми явлениями [2]. Не лучше обстоит дело и с олимпиадами: хотя знание ядерной физики и предполагается программой Всероссийской олимпиады школьников и Московской городской олимпиады школьников, в реальности действительно сложные задачи предлагаются учащимся редко. Все это способствует тому, что школьник, даже имеющий склонность к изучению физико-математических наук и планирующий поступать в вузы естественнонаучного и технического профиля, понимает, что хорошее знание ядерной физики вовсе не является безусловно необходимым для успешного участия в олимпиадах и последующего поступления на соответствующую специальность.

К сожалению, нужно отметить негативную роль некоторых журналистов и псевдопопуляризаторов науки. Используя вполне естественные страхи людей, связанные с авариями на Чернобыльской АЭС, АЭС «Фукусима-1», применением ядерного оружия в Хиросиме и Нагасаки, вызвавшими фатальные последствия для местного населения, они продвигают лженаучные идеи, не имеющие ничего общего с реальным строением атома и его ядра. Надо признать, что часто подобные материалы оказываются интересными подрастающему поколению, и формируют у них ложные представления об устройстве микромира.

Наконец, изучение ядерной физики в школе наталкивается на еще одну, вполне объективную проблему. Если изучение дру-

гих областей физики сопровождается проведением экспериментов по соответствующим темам, то в случае с ядерной физикой это практически невозможно в условиях подавляющего большинства отечественных школ. Более того, даже если говорить о высших учебных заведениях, то далеко не все из них имеют возможность проводить соответствующие эксперименты. Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова на протяжении нескольких десятилетий ведет работу со студентами 2–3-го курсов в специально оборудованном практикуме на базе входящего в структуру университета НИИ ядерной физики [3]. Отметим, что за время его существования было создано большое количество учебных лабораторий, позволяющих изучать самые разные разделы физики ядра и частиц (и количество установок постепенно увеличивается), подготовлено большое количество методических разработок, а также разработаны правила техники безопасности, которые призваны исключить какой-либо ущерб для здоровья учащихся и соответствуют действующим в Российской Федерации санитарным нормам радиационной безопасности.

В последнее время стало очевидно, что накопленный в ходе работы со студентами опыт может быть успешно применен и для школьников [4]. На протяжении ряда лет регулярно организуются экскурсии для учащихся московских школ, в ходе которых они проводят эксперименты, относящиеся к различным вопросам ядерной физики. На наш взгляд, наиболее эффективно освоить соответствующие разделы позволяет выполнение исследовательских работ из данной области. Тематика работ, которые можно предложить на базе имеющегося в нашем распоряжении оборудования, позволяет, с одной стороны, выполнять исследования, близкие к переднему краю развития науки, с другой – существует достаточно большое количество методических разработок, которые позволяют без особого труда изложить учащемуся требуемые разделы в ясной и понятной для него форме.

Отметим, что интерес к выполнению исследовательских работ проявляют учащиеся, которые живут не только в столице, но и в других регионах. Так, физический факультет и НИИ ядерной физики МГУ имеют договоры о сотрудничестве с учебными заведениями, расположенными в Твери, Владимире, Нижнем Новгороде, Ставропольском крае и других регионах. К сожалению, проводить с ребятами из этих учебных заведений систематическую экспериментальную работу достаточно трудно.

Одним из выходов может служить одновременное применение в исследовательской деятельности натурального эксперимента и математического эксперимента. Так, на физическом факультете существует обширный опыт проведения со школьниками исследовательских работ в области компьютерного моделирования. Еще в то время, когда компьютеры только начинали свое массовое распространение, в рамках Вечерней физической школы на факультете школьники составляли программы, позволявшие им решать «нерешаемые» задачи на компьютере [5]. Учащимся был проведен ряд работ, показавших принципиальную возможность использования компьютерных методов для достаточно интересных и понятных для ученика средней школы задач [6]. В настоящий момент уже около 4 лет на базе отделения прикладной математики действует практикум по математическому моделированию физических процессов, в который ежегодно набирается около 100 школьников [7]. В ходе обучения школьникам, которые добились наибольших успехов, предлагается выполнить исследовательскую работу, связанную с моделированием тех или иных физических явлений. На проводимой силами физического факультета МГУ научно-практической конференции «От атома до галактики» действует постоянная секция, посвященная применению компьютерных методов в физике и технике [8]. За время существования практикума было подготовлено достаточно много работ, некоторые из авторов этих работ в настоящее время успешно обучаются

в ведущих отечественных вузах и продолжают свою научную деятельность.

Так, на наш взгляд, можно проводить со школьниками исследование различных процессов из области физики ядра и частиц методами математического моделирования. Ученики могут у себя в школе, консультируясь с преподавателем университета в режиме онлайн (или во время его приездов в школу), составлять программы для моделирования тех или иных явлений, после чего, осознав их основные детали с теоретической точки зрения, могут совершить разовую поездку в университет с целью выполнения эксперимента и подтверждения (или опровержения) своих расчетов. После этого отдельной задачей может служить обработка результатов проведенного эксперимента. После окончания работы результаты представляются на различных научно-практических конференциях для школьников.

В настоящей статье мы описываем наш опыт взаимодействия между Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова и Лицеем № 87 имени Л. И. Новиковой (город Нижний Новгород). Физический факультет с 2017 г. имеет договор с Лицеем № 87 и ведет там достаточно интенсивную работу [9]. С 2019 г. лицей имеет договор о сотрудничестве и с НИИЯФ МГУ. Сотрудники университета несколько раз в год посещают Лицей с целью проведения занятий как по базовым курсам физики и математики, так и по методам выполнения исследовательских работ. В 2018–2019 гг. для школьников были организованы исследовательские работы, связанные с ядерной физикой и математическим моделированием: читались лекции, а также проводились консультации для тех ребят, которые заинтересованы в исследовательской деятельности. Заинтересованные учащиеся приезжали в НИИ ядерной физики и проводили эксперименты.

Мы представляем здесь наиболее успешные работы, выполненные учащимися нижегородского Лицея № 87. Одна связана с изучением поглощения излучения веществом, вторая – со статистическими

свойствами космического излучения. Данные работы были впоследствии представлены на различных научно-практических конференциях школьников.

Исследование поглощения излучения веществом

Данная работа основана на одной из основных работ, проводимых на базе общего ядерного практикума для студентов физического факультета МГУ [10]. Установка (рис. 1) состоит из источника гамма-квантов, представляющего из себя препарат цезия, находящегося внутри массивного свинцового блока. После этого излучение проходит через несколько пластин, изготовленных из свинца или алюминия. В верхней части установки находится сцинтилляционный детектор, который состоит из сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя.

В ходе выполнения работы школьник должен измерить излучение $I(0)$ от источника в отсутствие пластин. После этого ему необходимо варьировать число пластин и получить количество гамма-квантов $I(x)$, которое достигло детектора при различном их количестве. Таким образом, школьник может получить результаты для поглощения излучения веществом, имеющим характерную толщину $x = nd$.

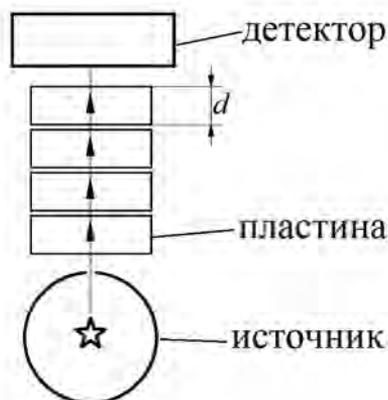


Рис. 1. Схема эксперимента по изучению поглощения излучения веществом

С теоретической точки зрения данный процесс может быть описан [11] следующим образом (рис. 2). Пусть атомы вещества имеют сечение взаимодействия (которое может быть представлено для школьников как площадь его поперечного сечения), равное σ . Если количество атомов в объеме составляет величину n , а площадь сечения пластины – S , то вероятность того, что гамма-квант столкнется с атомом и будет им поглощен, составляет величину:

$$p = \frac{n\sigma}{S}.$$

Объем фрагмента пластины толщиной Δx составляет величину:

$$\Delta V = S\Delta x,$$

то есть число атомов будет составлять величину:

$$n = N\Delta V = NS\Delta x.$$

Тогда вероятность поглощения гамма-кванта будет равна:

$$p = \frac{NS\sigma\Delta x}{S} = N\sigma\Delta x.$$

Введем для удобства коэффициент поглощения:

$$\gamma = N\sigma.$$

Можно полагать, что при прохождении соответствующего расстояния будет задержана доля гамма-квантов, соответствующая p :

$$\Delta I = pI(x).$$

Количество прошедших гамма-квантов составит:

$$I(x + \Delta x) = I(x) - \Delta I = I(x) - I(x)p = I(x)(1 - p).$$

Данную формулу можно переписать следующим образом:

$$I(x + \Delta x) = I(x)(1 - \gamma\Delta x).$$

Данные соображения могут быть использованы для математического моделирования процесса поглощения. Разобьем

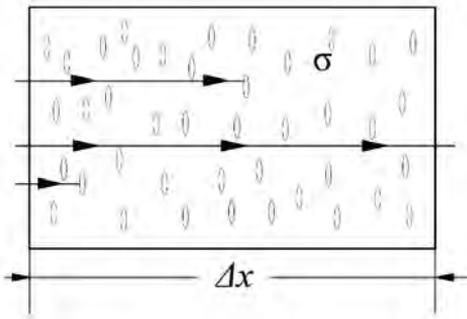


Рис. 2. Поглощение излучения веществом

интересующий нас промежуток на большое количество малых фрагментов длины Δx :

$$x_1 = \Delta x, x_2 = 2\Delta x, \dots, X = N\Delta x.$$

Тогда можно задать начальное значение интенсивности излучения I_0 и вычислить его в последующих точках:

$$I_1 = I(x_1); I_2 = I(x_2); \dots; I_N = I(x_N).$$

Для этого можно использовать формулу:

$$I_{n+1} = I_n(1 - \gamma\Delta x).$$

Данный расчет может быть реализован с помощью компьютерной программы. В случае наших учащихся использовалась среда программирования Lazarus, основанная на языке программирования FreePascal.

После этого школьником проводилось сравнение результатов, полученных в эксперименте и в ходе моделирования. Пример расчета для свинца приведен на рис. 3. Можно отметить, что составленная школьником программа достаточно хорошо воспроизводит результаты эксперимента.

Статистика регистрации частиц

Тематика следующей работы также связана с тем, что выполняют студенты второго курса физического факультета МГУ на базе оборудования Научно-исследовательского института ядерной физики университета [12]. Тем не менее ее очевидным преимуществом является то, что она может быть воспроизведена школьником в домашних

условиях, и для ее проведения необходимо иметь только хороший дозиметр, который может быть в наличии в школьной лаборатории или приобретен школьником самостоятельно.

Для начала важно отметить, что все явления в атомном и ядерном мире носят квантовый характер. Порой школьникам в это сложно поверить, но, даже хорошо зная соответствующие разделы физики, часто нет никакой возможности заранее точно предсказать, каким будет исход того или иного эксперимента. Большинство закономерностей в квантовом мире носят вероятностный характер – можно говорить лишь о вероятности того или иного результата. К сожалению, если учащиеся и имеют какие-то представления об этом, их знания сводятся к анекдотическим примерам в духе «кота Шредингера», которые воспринимаются как забавная гимнастика ума, никак не связанная с тем, что встречается в окружающем мире.

Тем не менее поверхность Земли постоянно подвергается «обстрелу» в виде космических лучей, приходящих к нам от далеких астрофизических объектов. В основном они представляют собой протоны (или ядра атома водорода) и ядра более тяжелых элементов. При взаимодействии с земной атмосферой они порождают вторичные лучи, которые, как правило, доходят до земной поверхности. Эти частицы создают естественный космический радиационный фон. Кроме того, нельзя не учитывать также и вклад со стороны земных ис-

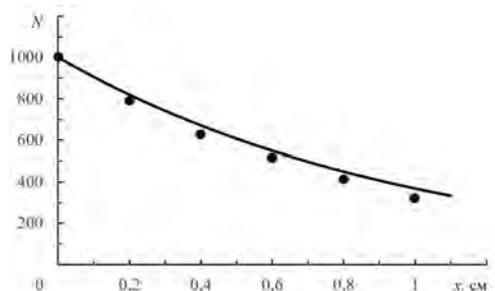


Рис. 3. Уменьшение числа гамма-квантов

точников, имеющих как природное, так и техногенное происхождение (однако на них приходится гораздо меньшее число частиц [12]). Суммарное излучение может быть зафиксировано с помощью счетчика Гейгера.

Не вызывает больших сомнений, что попадание частицы космического излучения в конкретную комнату, где проводится эксперимент, является событием случайного характера. В данном случае можно говорить лишь о вероятности p того, что за минуту в комнате окажется та или иная частица. Таким образом, мы можем составить компьютерную программу, которая будет перебирать N частиц. Для каждой из них она будет с помощью генератора случайных чисел определять значение переменной y_n . Значение данной переменной равномерно распределено в пределах $0 < y_n < 1$. В том случае, если $y_n < p$, будем считать, что частица достигла детектора, иначе – что «пролетела мимо». После этого вычислялось суммарное число частиц, которое попало в детектор.

Очевидно, что в реальном физическом эксперименте данные должны немного меняться от одного опыта к другому. В связи с этим разумно было запустить данный процесс многократно, например, несколько сотен раз. После этого строилась гистограмма, показывающая, насколько часто удалось добиться того или иного результата. Пример результата приведен на рис. 4. Отметим, что на ней четко выделяется пиковое значение (в данном случае – около

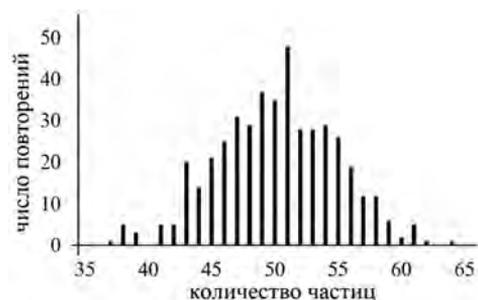


Рис. 4. Результат моделирования статистики регистрации частиц



Рис. 5. Эксперимент по измерению радиационного фона

51), а по мере удаления от максимума количество повторений заметно и быстро спадает.

После этого проводились замеры фонового излучения – числа частиц, которое попадало в детектор на протяжении длительного времени, например, 30 или 60 секунд (рис. 5). Эксперимент повторялся многократно, и для него также строилась гистограмма, которая показывала принципиально схожие результаты.

Заключение

Описанные в настоящей статье работы показывают, что ядерная физика может стать не только понятной для школьников, но и вызвать интерес к выполнению исследовательских работ, связанных с изучением соответствующих процессов. Если говорить о первой работе, то она помогает формировать у учащихся представления о том, как можно эффективно защищаться от радиации, как происходит поглощение гамма-излучения. Параллельное проведение экспериментов для свинца и алюминия дает им понять, почему в атомной промышленности настолько часто используется именно свинец. Работа, связанная с измерением фона космического излучения, показывает, что радиация – это не что-то страшное и неизвестное, а вполне рядовое явление, которое сопутствует человеку в нормальных земных условиях. Кроме того, отметим, что

вторая работа может быть воспроизведена и в условиях школьной лаборатории при не очень высоких материальных затратах.

Отметим также важность освоения школьниками простейших приемов компьютерного моделирования. С одной стороны, это восполняет существующий в школьной программе пробел, связанный с тем, что численным методам уделяется недостаточное внимание. С другой стороны, проведение «компьютерно-экспериментальных» лабораторных работ дает возможность выполнять часть работы дистанционно, общаясь с руководителем по электронной почте, приезжая в лабораторию выполнять эксперимент, примерный результат которого уже был им оценен в ходе моделирования. Это позволяет заметно

ускорить экспериментальную работу, что особенно ценно в случае руководства работой школьников, живущих в других городах и не имеющих возможность посещать лабораторию в еженедельном режиме. Таким образом, вполне возможно организовать работу частично в дистанционном формате.

Описанные исследовательские работы представлялись на различных научно-практических конференциях, таких как «От атома до галактики», «Форум молодых исследователей» и других, и были отмечены грамотами и дипломами [13; 14]. Это подтверждает востребованность соответствующей тематики и большой интерес к ней как со стороны школьников, так и со стороны экспертного сообщества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 17 декабря 2010 г. «Об утверждении Федерального государственного стандарта основного общего образования».
2. Спецификация контрольных измерительных материалов для проведения в 2020 году основного государственного экзамена по физике. М.: ФГБНУ «Федеральный институт педагогических измерений», 2019.
3. О новом подходе к созданию учебных лабораторных установок для физических практикумов / В. А. Квливидзе, В. А. Белавин, В. П. Петухов, В. В. Радченко // Физическое образование в вузах. 1998. Т. 4, № 4. С. 93–106.
4. Установка «Космический душ» как одно из средств формирования радиационной грамотности обучающихся во внеурочной деятельности / С. С. Бельшев, Е. В. Владимирова, В. В. Вязовский [и др.] // Наука и школа. 2017. № 6. С. 132–138.
5. *Рыжиков С. Б.* Классический опыт Галилея в век цифровой техники: учеб. пособие. М.: МЦНМО, 2008. 64 с.
6. *Михайлов Е. А., Рыжиков С. Б.* Исследовательские работы школьников, основанные на численном моделировании // Наука и школа. 2018. № 3. С. 101–105.
7. *Михайлов Е. А.* Применение методов компьютерного моделирования в проектных работах школьников по физике // Школа будущего. 2017. № 3. С. 279–285.
8. *Михайлов Е. А., Шапкина Н. Е.* Научно-практическая конференция «От атома до галактики»: опыт проведения // Школа будущего. 2019. № 1. С. 24–32.
9. *Кулева С. В., Михайлов Е. А.* Организация сотрудничества между вузом и школой на примере физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (г. Москва) и МБОУ «Лицей № 87 имени Л. И. Новиковой» (Нижний Новгород) // Физико-математическое и технологическое образование: проблемы и перспективы развития: материалы IV Междунар. науч.-метод. конф. М.: МПГУ, 2019. С. 186–188.
10. Лабораторная работа № 6. Определение эффективного сечения взаимодействия γ -квантов с веществом методом поглощения. URL: http://prac-gw.sinp.msu.ru/images/nucleus/descriptions%20nucleus/zad_06.pdf (дата обращения: 03.02.2020).

11. *Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Юдин Н. П.* Частицы и атомные ядра. М.: Изд-во Московского ун-та, 2005.
12. Лабораторная работа № 14(б). Статистика регистрации частиц. URL: http://prac-gw.sinp.msu.ru/images/nucleus/descriptions%20nucleus/zad_14.pdf (дата обращения: 03.02.2020).
13. Тезисы IV научно-практической конференции школьников «От атома до галактики» на базе ГБОУ Романовская школа: сб. тез. / под ред. Д. А. Коняева, Т. А. Кузьмич, Е. А. Михайлова [и др.]. М.: Физический фак. МГУ, 2019.
14. Однодневная школьная экскурсия на «передовой рубеж» ядерной физики / Е. В. Борисова, Е. В. Владимирова, А. А. Голубенко [и др.] // Проблемы и перспективы развития образования по физике: Общеобразовательные учреждения, педагогические вузы: доклады науч.-практ. конф. (г. Москва, 11–12 апреля 2018). М.: ИИУ МГОУ, 2018. С. 34–42.

REFERENCES

1. Prikaz Ministerstva obrazovaniya i nauki Rossiyskoy Federatsii ot 17 dekabrya 2010 g. “Ob utverzhdenii Federalnogo gosudarstvennogo standarta osnovnogo obshchego obrazovaniya”.
2. Spetsifikatsiya kontrolnykh izmeritelnykh materialov dlya provedeniya v 2020 godu osnovnogo gosudarstvennogo ekzamina po fizike. Moscow: FGBNU “Federalnyy institut pedagogicheskikh izmereniy”, 2019.
3. Kvlividze V. A., Belavin V. A., Petukhov V. P., Radchenko V. V. O novom podkhode k sozdaniyu uchebnykh laboratornykh ustanovok dlya fizicheskikh praktikumov. *Fizicheskoe obrazovanie v vuzakh*. 1998, Vol. 4, No. 4, pp. 93–106.
4. Belyshev S. S., Vladimirova E. V., Vyazovskiy V. V. et al. Ustanovka “Kosmicheskiiy dush” kak odno iz sredstv formirovaniya radiatsionnoy gramotnosti obuchayushchikhsya vo vneurochnoy deyatel'nosti. *Nauka i shkola*. 2017, No. 6, pp. 132–138.
5. Ryzhikov S. B. *Klassicheskiy opyt Galileya v vek tsifrovoy tekhniki: ucheb. posobie*. Moscow: MTsNMO, 2008. 64 p.
6. Mikhaylov E. A., Ryzhikov S. B. Issledovatel'skie raboty shkolnikov, osnovannye na chislennom modelirovanii. *Nauka i shkola*. 2018, No. 3, pp. 101–105.
7. Mikhaylov E. A. Primenenie metodov kompyuternogo modelirovaniya v proektnykh rabotakh shkolnikov po fizike. *Shkola budushchego*. 2017, No. 3, pp. 279–285.
8. Mikhaylov E. A., Shapkina N. E. Nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Ot atoma do galaktiki”: opyt provedeniya. *Shkola budushchego*. 2019, No. 1, pp. 24–32.
9. Kuleva S. V., Mikhaylov E. A. Organizatsiya sotrudnichestva mezhdru vuzom i shkoloj na primere fizicheskogo fakulteta MGU imeni M. V. Lomonosova (g. Moskva) i MBOU “Litsey № 87 imeni L. I. Novikovoy” (Nizhniy Novgorod). In: *Fiziko-matematicheskoe i tekhnologicheskoe obrazovanie: problemy i perspektivy razvitiya. Proceedings of the IV International scientific-methodological conference*. Moscow: MPG U, 2019. Pp. 186–188.
10. Laboratornaya rabota № 6. Opredelenie effektivnogo secheniya vzaimodeystviya γ -kvantov s veshchestvom metodom pogloshcheniya. Available at: http://prac-gw.sinp.msu.ru/images/nucleus/descriptions%20nucleus/zad_06.pdf (accessed: 03.02.2020).
11. Ishkhanov B. S., Kapitonov I. M., Yudin N. P. *Chastitsy i atomnye yadra*. Moscow: Izd-vo Moskovskogo un-та, 2005.
12. Laboratornaya rabota № 14(b). Statistika registratsii chastits. Available at: http://prac-gw.sinp.msu.ru/images/nucleus/descriptions%20nucleus/zad_14.pdf (accessed: 03.02.2020).

13. Konyaev D. A., Kuzmich T. A., Mikhaylov E. A. et al. *Abstracts of papers of the 4th scientific-practical conference of school pupils "Ot atoma do galaktiki" in GBOU Romanovskaja shkola*. Moscow: Fizicheskiy fak. MGU, 2019.
14. Borisova E. V., Vladimirova E. V., Golubenko A. A. et al. Odnodnevnyaya shkolnaya ekskursiya na "peredovoy rubezh" yadernoy fiziki. In: Problemy i perspektivy razvitiya obrazovaniya po fizike: Obshcheobrazovatelnye uchrezhdeniya, pedagogicheskie vuzy. *Proceedings of scientific-practical conference (Moscow, 11–12.04.2018)*. Moscow: IPU MGOU, 2018. Pp. 34–42.

Михайлов Евгений Александрович, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры математики, Физический факультет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

e-mail: ea.mikhajlov@physics.msu.ru

Mikhailov Evgeny A., PhD in Physics and Mathematics, assistant, Mathematics Department, Physics Faculty, Lomonosov Moscow State University

e-mail: ea.mikhajlov@physics.msu.ru

Широков Евгений Вадимович, кандидат физико-математических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

e-mail: shirokov@depni.sinp.msu.ru

Shirokov Evgeny V., PhD in Physics and Mathematics, Vice-director, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University

e-mail: shirokov@depni.sinp.msu.ru

Статья поступила в редакцию 08.02.2020

The article was received on 08.02.2020