

Практическая работа по физике как цельное научное исследование на основе открытых данных

И. В. Кузнецова^{1,*}, М. Е. Прохоров^{2†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Специализированный учебно-научный центр — школа имени А. Н. Колмогорова, кафедра физики
Россия, 121352, Москва, Кременчугская ул., д. 11

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга, лаборатория космических проектов
Россия, 119991, Москва, Университетский проспект 13

(Статья поступила 13.11.2017; Подписана в печать 23.11.2017)

В статье описана новая модель практической работы по физике на основе современных научных данных, размещенных в открытом доступе. В ней проводится оценка частоты падения астероидов на Землю по подсчетам кратеров на Луне, и рассматриваются различные механизмы образования кратеров в зависимости от параметров. Данная работа имеет несколько существенных методических преимуществ перед традиционными лабораторными работами. Во-первых, эта работа на актуальную сегодня научную тему. Во-вторых, формирует представление о многообразных связях изучаемых объектов и о научной методологии, когда учитываются одни аспекты явления и отбрасываются другие. В третьих, работа обладает мультидисциплинарностью. В ней используются справочные данные из различных разделов физики, геологии и астрономии. Практическая работа имеет неоспоримую наглядность и возможность варьировать фактический материал, применяемый при ее выполнении.

Предлагаемая лабораторная работа универсальна, не требует дорогого оборудования для ее проведения и может использоваться в дистанционном обучении.

PACS: 01.50.Qb, 96.20.Ka, 96.25.Pq, 96.30.Ys УДК: 378.14

Ключевые слова: научная методология, практические лабораторные работы по физике, открытые данные, мультидисциплинарность.

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача практикумов естественнонаучного профиля для школьников старших классов и студентов младших курсов — обучение учащихся навыкам экспериментальной работы и адаптация к выбранным дисциплинам на последующих этапах обучения. В задачи работ физических практикумов входит усиление экспериментальной составляющей практического курса физики с целью развития у учеников навыков активного наблюдения за природными явлениями, овладения ими культурой и приемами работы с измерительными приборами, развитие навыков анализа полученной информации. В желаемом результате необходимо сформировать у обучаемых целостные представления о методах физических исследований, как теоретических, так и экспериментальных, об их сочетании и взаимодействии. Важным представляется и формирование у учащихся понятий о «модельном» подходе в изучении конкретных физических явлений, достоинств и недостатков выбранного метода исследований.

К сожалению, существует ряд факторов, которые снижают интерес учащихся к проведению лабораторных работ. Один из них — использование при проведении практикумов и демонстрационных экспериментов

приборов и элементной базы давности 50-80-х гг. XX века [1]. К плюсам такого подхода можно отнести сохранение проверенных временем, методически выверенных лабораторных работ и демонстраций [2]. Однако минусов гораздо больше. В первую очередь это то, что учащиеся скорее всего никогда в жизни больше не столкнутся с подобными приборами.

Другой фактор состоит в том, что студент, выполняя лабораторную работу, не видит ее конечного назначения, не понимает, для каких целей может быть использован полученный им результат. Если для специализированных практикумов студентов-старшекурсников такой подход еще приемлем, то для младшекурсников, а особенно для учащихся школ с естественно-научной направленностью это не достаточно оправдано.

Первый из указанных факторов преодолевается путем модернизации лабораторного и демонстрационного оборудования. Подобная работа с разной успешностью ведется во многих вузах (например, [3]).

Для преодоления второго из указанных факторов авторы настоящей работы предлагают разработать цикл лабораторных работ, основанных на обработке современных открытых научных данных, знакомящих учащегося с полным циклом практического научного исследования. Полученный результат должен быть достаточно актуален в настоящее время и допускать сравнение с результатами профессиональных научных исследований. Рассматривается и обсуждается первая работа из предлагаемого цикла.

*E-mail: irinakuznetsova-64@mail.ru

†E-mail: ivanov@phys.msu.ru

1. ТРЕБОВАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ НОВОГО ЦИКЛА

Лабораторные работы должны за отведенное на их проведение ограниченное время позволить учащемуся провести следующие действия:

- ознакомиться с областью науки или наук, к которым относится лабораторная работа;
- освоить необходимую часть математического аппарата;
- получить и самостоятельно обработать исходные данные для лабораторной работы, полученные из открытых источников;
- довести обработку до конечных выводов и сравнить их с результатами подобных профессиональных научных исследований;
- учащийся должен быть снабжен всеми необходимыми справочными сведениями для проведения обработки данных в рамках лабораторной работы.

Следует заметить, что актуальные современные фундаментальные исследования очень дороги. Они проводятся на чрезвычайно сложных и дорогих научных установках, наиболее сложные из которых создается, поддерживается и используется в рамках международной кооперации — никакая отдельная страна не может позволить себе подобные затраты. Это направление современных экспериментальных исследований получило название «Mega Science».

Воспроизвести подобную установку для лабораторного практикума даже в многократно урезанном и упрощенном виде не может себе позволить практически ни один университет. Однако вместо подобной сверхсложной и дорогой экспериментальной установки можно предоставить учащемуся реальные «сырые» или частично обработанные экспериментальные данные, полученные на ней и позволить провести их полноценную обработку. Доступу к таким данным способствует настойчиво проводимая в последние десятилетия политика открытого доступа к данным международных фундаментальных научных исследований [4].

2. СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Материалы предлагаемых лабораторных работ должны в обязательном порядке содержать следующие части.

- Обзорная часть — описывает наиболее важные полученные результаты и современное состояние проблемной области.
- Теоретическая часть — описывает основные физические и математические соотношения, важные

для выполнения расчетов в рамках лабораторной работы. Крайне желательно, чтобы ряд этих соотношений был выведен учащимися, в рамках упрощенных моделей.

- Практическая часть — собственно лабораторная работа, включающая:
 - исходные данные, взятые из открытых источников;
 - рекомендации по их обработке;
 - справочные данные, необходимые для всех этапов обработки исходных данных.
- Методическая часть — предназначенная для преподавателей, проводящих лабораторную работу.

3. ПЕРВАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА НОВОГО ЦИКЛА

В качестве темы для первой лабораторной работы нового цикла была выбрана «Оценка частоты падения астероидов на Землю по подсчетам кратеров на Луне».

Проблема астероидно-кометной опасности — актуальная в настоящий момент область исследований на стыке астрономии, физики Солнечной системы, геофизики, геологии, космических исследований, обеспечения безопасности жизнедеятельности человека. Если какой-либо астероид захватывается гравитационным полем Земли, то при столкновении с поверхностью вся его кинетическая энергия почти мгновенно переходит в тепло, что приводит к мощному взрыву. Скорость столкновения астероидов с Землей варьируется слабо — от 11 км/с до нескольких десятков км/с, а вот их массы могут различаться на много порядков. Опасными считаются падения астероидов размерами более 100–140 м — вызванные ими взрывы могут разрушить крупный поселок или маленький город. С ростом размера астероида его опасность резко усиливается: так падение астероида диаметром 1 км вызовет региональную катастрофу и приведет к глобальным климатическим последствиям. Падение 10 км астероида вызовет глобальную катастрофу и «ядерную зиму» длительностью в десятилетие. Падение подобного астероида 65 млн лет назад возможно привело к вымиранию динозавров. Кратер Чиксулуб, от этого падения, диаметром около 180 км расположен на полуострове Юкатан. Опасными могут быть и более мелкие астероиды, промерами могут служить Тунгусский метеорит, размеры которого оцениваются в 30 м, и Челябинский (Чебаркульский) метеорит (18 м, соответственно).

Об опасности, связанной с падением астероидов и комет на Землю, было известно давно, но актуальность данное направление исследований приобрело в последние десятилетия, в связи с интенсификацией изучения малых тел Солнечной системы как с Земли (с новых больших телескопов), так и с космических

аппаратов, а также в связи с появлением возможных средств противодействия астероидно-кометной опасности.

На Земле сегодня известно всего несколько сотен ударных кратеров. Возраст самых старых из них (одновременно они являются и самыми крупными) сотни миллионов лет, что много меньше возраста Земли. Это связано с процессами эрозии и вулканизма, которые стирают следы падений небесных тел с поверхности Земли.

За XX и XXI век было зафиксировано падение на Землю 6 космических объектов диаметром от 10 до 30 м (а также большое число падений более мелких метеороидов). Эти объекты в несколько раз меньше нижней границы размеров «опасных» космических тел. Для оценки частоты падения таких объектов приходится прибегать к значительной экстраполяции.

Земля и ее спутник Луна расположены настолько близко друг к другу, что имеют шанс столкнуться с одними и теми же астероидами, т.е. подвергаются воздействию одного и того же потока космических тел. При этом на Луне отсутствует атмосфера и практически прекратилась геологическая активность, из-за чего кратеры, возникшие на поверхности Луны, сохраняются практически вечно.

Подсчет кратеров на поверхности Луны позволяет оценить частоту падения астероидов на Землю. При этом эта оценка будет более точной, чем по кратерам на Земле (из-за действия эрозии) или по прямым наблюдениям крупных объектов (из-за малого числа зарегистрированных событий и из-за экстраполяции).

Ниже описано содержание частей лабораторной работы. Более подробно с этой работой можно ознакомиться в [5, 6].

А. Обзорная часть работы

Обзорная часть содержит описание проблемы астероидно-кометной опасности, которое было кратко изложено в предыдущем подразделе, а также сведения о происхождении, свойствах и классификации малых тел Солнечной системы.

Помимо этого в обзорную часть были включены сведения о геологических структурах ударных кратеров и о кратерах, обнаруженных на поверхности Земли.

В. Теоретическая часть работы

В теоретической части работы учащиеся самостоятельно, на основе рассмотрения простых моделей, выводят соотношения, позволяющие ответить на следующие вопросы:

- Космические объекты каких размеров эффективно тормозятся атмосферой Земли?

- Скорость космических объектов каких размеров существенно уменьшится при их падении в океаны за время пересечения толщи воды?
- Как связаны размер и скорость падающего на Землю или Луну астероида с диаметром образующегося кратера?
- Каково отношение частоты падения астероидов на Луну и на Землю? Как на это отношение влияют гравитационные поля этих планет (эффект «гравитационной фокусировки»)?

Наиболее важным для проведения практической работы является соотношение, связывающее размеры импактора и образуемого им ударного кратера. Для его получения были использованы две простые модели. В обеих моделях вся кинетическая энергия падающего астероида выделяется мгновенно в точке его столкновения с поверхностью Земли.

В первой модели эта энергия идет на нагрев вещества поверхности планеты до его расплавления (при падении на каменную поверхность) или до его испарения (при падении на лед). Зная термические характеристики соответствующих пород и льда, получаем оценку размера выплавленного кратера.

Во второй модели предполагается, что твердые породы поверхности Земли или Луны внутри формирующегося кратера дробятся, а осколки выбрасываются за пределы кратера. Для переноса раздробленного материала за пределы чаши кратера его необходимо поднять на высоту не менее глубины кратера, совершая работу против силы тяготения планеты. На это тратится энергия, выделившаяся при падении.

Указанные модели очень просты, и проведение по ним оценок, при наличии соответствующих справочных данных, по силам даже школьникам старших классов. Следует заметить, что модели дают несколько различающиеся зависимости диаметра образующегося кратера от размера падающего тела, но при этом результаты гораздо более точного моделирования процесса падения на основе трехмерных гидродинамических компьютерных расчетов [7, 8] попадают в интервал, задаваемый этими простыми оценками.

С. Практическая часть работы

В практической части учащийся должен выполнить следующие действия:

- на выданной ему фотографии фрагмента поверхности Луны подсчитать количество кратеров, определить их размеры и рассортировать по величине;
- определить какие из этих кратеров образованы астероидами, превышающими «опасные размеры»;

- вычислить частоту падения «опасных астероидов» на Луну в целом;
- получить оценку падения «опасных астероидов» на Землю;
- сравнить эту оценку с частотой падения астероидов на Землю, полученной другими способами (из справочных данных).

Изображения поверхности Луны брались из открытого архива фотографий, полученных серией космических аппаратов Lunar-Orbiter [9]. Пять космических аппаратов Lunar-Orbiter произвели картографирование 99% поверхности Луны. Архив содержит изображения с разными разрешениями, представляющих собой оцифрованные оригинальные фотографические изображения, их объединения и усреднения. Для практической работы использовались изображения низкого разрешения, на которых видны кратеры размером от 1 км. Вся поверхность Луны покрывается примерно сотней «листов» низкого разрешения.

Каждый такой лист снабжен копией изображения, на которой отмечены границы и подписаны названия некоторых наиболее крупных кратеров, а также таблицей, в которой указаны размеры подписанных кратеров в километрах. Один из таких листов с подписанными кратерами, показан на рис. 1.

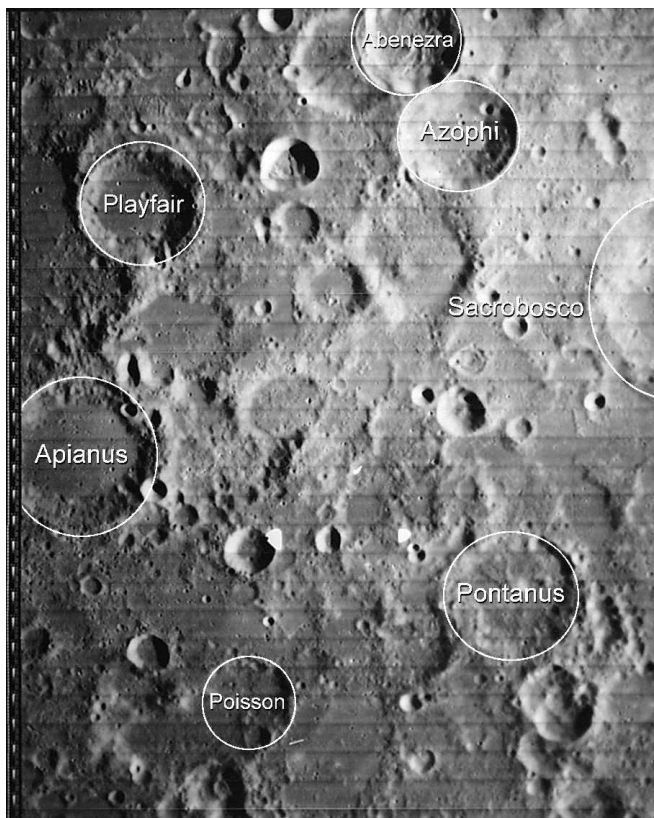


Рис. 1: Лист с подписанными кратерами из архива изображений Lunar-Orbiter

Число кратеров на листе низкого разрешения слишком велико для проведения подсчетов одним учащимся, поэтому лист делится на несколько частей (наиболее удобно деление листа на 9, 12 или 16 равных частей). Каждому учащемуся выдаются: фрагмент листа для подсчета кратеров, изображение полного листа из которого взят фрагмент с подписанными большими кратерами, таблица с размерами этих кратеров. Изображения могут выдаваться в электронном или в печатном виде. В последнем случае фрагмент для подсчетов печатается с большим разрешением, чем лист с подписанными кратерами.

С этими изображениями и таблицей учащийся должен проделать следующие действия:

1. отождествить фрагмент листа для подсчета кратеров с полным листом;
2. найти на фрагменте подписанные кратеры и измерить их линейные размеры;
3. определить масштаб изображения на фрагменте для подсчетов (км/мм или км/пиксель), используя размеры подписанных кратеров из таблицы;
4. определить нижнюю границу размера подсчитываемых кратеров (кратеры размером 1 км, которые видны на листах низкого разрешения из архива Lunar-Orbiter, образуются при падении объектов размером около 100 м — уже опасных, т.е. в подсчет должны включаться все видимые кратеры);
5. произвести подсчет кратеров на фрагменте и определить размеры их изображений;
6. измерить линейные размеры фрагмента для подсчета;
7. с помощью полученного масштаба изображения перевести размеры кратеров и области подсчета в линейные размеры на поверхности Луны;
8. вычислить среднюю плотность кратеров (на квадратный километр) на фрагменте изображения и частоту падения опасных тел на Луну (возраст Луны берется из справочника).

Для завершения лабораторной работы используются формулы, выведенные в теоретической части работы и справочные материалы.

Справочная часть работы содержит следующие сведения, необходимые для проведения практической части:

1. химический состав метеоритов, их плотности и частоты встречаемости;
2. плотности, теплоемкости и температуры плавления некоторых горных пород;
3. термические характеристики льда;

4. распределение метеоритов и астероидов по скоростям;
5. сводное распределение астероидов по размерам;
6. возраста, массы, диаметры Земли и Луны.

Д. Методическая часть работы

Методическая часть работы предназначена для преподавателей. В ней излагаются цели и рекомендуемый план проведения работы, даны рекомендации по оформлению полученных результатов и список возможных контрольных вопросов.

Отдельно рассмотрены затраты времени на проведение лабораторной работы и отдельных ее частей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная лабораторная работа позволяет учащемуся самостоятельно провести небольшое, но цельное научное исследование на актуальную тему и сравнить свои результаты с результатами современных научных исследований. В описанной выше работе учащийся знакомится с оперирует с данными нескольких наук: физики, астрономии, геологии. Такой подход побуждает учащегося к более раннему и более глубокому ознакомлению с научной деятельностью [10].

Работа является практической, при этом ее проведение не требует практически никакого технического оборудования, т.е. может проводиться в любых вузах и школах, а также включаться в курсы дистанционного обучения. Следует также отметить большую потенциальную вариативность рассмотренной работы. Даже

без изменения ее плана и содержания, большой объем архива исходных данных позволяет обеспечить независимыми исходными материалами большое число учащихся. При этом можно легко видоизменить работу несколькими способами.

Первая возможность — предположить, что масштаб изображения не является постоянным в пределах кадра. Изменение масштаба может быть связано с наклоном фотокамеры космического аппарата к поверхности Луны. В этом случае учащийся должен будет построить модель изменения масштаба в пределах фрагмента для подсчета кратеров (например, линейную).

Другая возможность — подсчитать плотность кратеров на более кратерированных материках Луны и на менее богатых кратерами морях. Эта разница объясняется тем, что в первый миллиард лет существования Луны моря были залиты лавой, которая скрыла ранее образовавшиеся кратеры. Целью этой работы может быть сравнение частот падения астероидов во время «поздней тяжелой астероидной бомбардировки» Солнечной системы [11] с частотой падения в более поздний период (включая настоящее время). Для этого варианта работы в справочник должны быть включены возраста лунных морей.

Еще один вариант — определение и сравнение частот падения астероидов на Луну и на Марс (вариант: на Луну и Меркурий). Конечным результатом этого варианта будет сравнение частоты падения астероидов в разных частях Солнечной системы (на разных расстояниях от Солнца).

Предложенный новый тип лабораторных работ обсуждался на конференциях «Современный физический практикум» (МГТУ, 2016) и «XVII Колмогоровские чтения» (МГУ, 2017).

- [1] Грабовский М. А., Млодзеевский А. Б., Телеснин Р. В., Шаскольская М. П., Яковле И. А. Лекционные демонстрации по физике. / Под ред. Ивероновой В.И. М.: Наука, 1972.
- [2] Селиверстов А. В. Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. 2016. 3. 163004.
- [3] Морозов А. Н., Еркович О. С., Тимченко С. Л., Поздышев М. Л. Физическое образование в вузах. 2014. 20, № 3. С. 3.
- [4] Willinsky J. The Access Principle: The Case for Open Access to Research and Scholarship. MIT Press. 2006.
- [5] Кузнецова И. В., Прохоров М. Е. Оценка астероидной опасности по кратерам на Луне. СУНЦ МГУ. М., 2017.
- [6] Кузнецова И. В., Прохоров М. Е. Оценка астероидной опасности по кратерам на Луне. Практическая работа

по физике. LAP LAMBERT Academic Publishing. Саарбрюккен, 2017.

- [7] Астероидно-кометная опасность. Вчера, сегодня, завтра / Под ред. Шустова Б. М. М.: Физматлит, 2010.
- [8] Gisler G. R., Weaver R. P., Made C. L., Gittings M. L. Computing in Science & Engineering. 2004. 6, N3. P. 46.
- [9] Ссылка на архив фотографий Луны, полученных с космических аппаратов Lunar-Orbiter. <http://www.lpi.usra.edu/resources/lunarorbiter/>.
- [10] Астахова А. А., Дегтярева А. П., Колясников О. В., Менделеева Е. А., Морозова Н. И., Сергеева М. Г., Сугеев А. С. Наука и школа. 2017. № 4. С. 135.
- [11] Gomes R., Levison H. F., Tsiganis K., Morbidelli A. Nature. 2005. 435, P. 466.

Practical work on physics as a whole scientific research based on open data

I. V. Kuznetsova^{1,a}, M. E. Prokhorov^{2,b}

¹*Kolmogorov's Advanced Educational Scientific Center, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow, 121352, Russia*

²*Sternberg Astronomical Institute, M.V.Lomonosov Moscow State University. Moscow, 119991, Russia*

E-mail: ^airinakuznetsova-64@mail.ru, ^bmike@sai.msu.ru

The article describes a new model of practical work in physics on the basis of modern scientific data placed in the public domain. It assesses the frequency of asteroids falling to Earth by counting the number of craters on the Moon and discusses the various mechanisms of the formation of craters depending on the parameters. This work has several significant methodical benefits over traditional teaching labs. Firstly, the work is dedicated to the relevant scientific problem. Secondly, it forms in students an idea of the diverse relationships between studied objects and scientific methodology that takes into account some aspects of the phenomenon and discarded others. Third, the work has a multidisciplinary. It uses reference data from different branches of physics, geology and astronomy. Practical elaboration has a distinct visibility and it offers the possibility to vary the data materials used in the work.

The proposed laboratory work is universal, does not require expensive equipment to carry it out, and can be used in distance education.

PACS: 01.50.Qb, 96.20.Ka, 96.25.Pq, 96.30.Ys

Keywords: scientific methodology, practical laboratory work on physics, open data, multidisciplinary.

Received 13 November 2017.

Сведения об авторах

1. Кузнецова Ирина Витальевна -- канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 305-39-28, e-mail: irinakuznetsova-64@mail.ru.
2. Прохоров Михаил Евгеньевич -- доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. лабораторией, тел.: (495) 939-50-06, e-mail: mike@sai.msu.ru.