

В. Р. Костылева¹✉, В. С. Болдырев², А. Н. Дорошенко¹, Л. И. Горохова¹

Моделирование результатов наблюдения Земли методами транзитного анализа

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vika.kostyleva2002@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты компьютерного моделирования транзитных кривых системы Солнце-Земля, полученных методами транзитного анализа для стороннего наблюдателя, расположенного в плоскости орбиты Земли. Моделирование основано на численном интегрировании потока излучения от единичных элементов площади поверхности Солнца с учетом угловой зависимости интенсивности излучения. Для описания отражения излучения от поверхности Земли использована модель Фонга, из которой учтена только диффузная составляющая ввиду низкой интенсивности фонового и зеркального отражения. Поток вычислен для ряда длин волн видимого диапазона с шагом 50 нм, спектральные характеристики излучения Солнца и отражения Земли получены путем оцифровки графиков с помощью разработанной программы «Graph analyser». Интегрирование выполнено итеративным перебором точек в окрестности видимого диска Земли с учетом перекрытия с диском Солнца. Показано, что годовая транзитная кривая содержит два узких провала, обусловленных взаимным перекрытием излучающей поверхности звезды и отражающей поверхности планеты, а также широкий пик, связанный с диффузным отражением от освещенной стороны Земли. Установлено, что форма провалов различается: левый провал гладкий, правый имеет резкие границы, что объясняется соотношением размеров Солнца и Земли. Работа демонстрирует возможность идентификации планеты по вкладу диффузного отражения в транзитную кривую.

Ключевые слова: транзитный анализ, экзопланеты, компьютерное моделирование, численные методы, астрономия, солнечная система

V. R. Kostyleva¹✉, V. S. Boldyrev², A. N. Doroshenko¹, L. I. Gorokhova¹

Modeling of Earth observation results using transit analysis methods

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vika.kostyleva2002@gmail.com

Abstract. The article presents the results of computer modeling of transit curves of the Sun-Earth system obtained by transit analysis methods for an external observer located in the plane of the Earth's orbit. The simulation is based on numerical integration of the radiation flux from single elements of the Solar surface area, taking into account the angular dependence of the radiation intensity. To describe the reflection of radiation from the Earth's surface, the Phong model was used, from which only the diffuse component was taken into account due to the low intensity of background and specular reflections. The flux is calculated for a number of wavelengths of the visible range in increments of 50 nm, the spectral characteristics of solar radiation and Earth reflection are obtained by digitizing graphs using the developed Graph analyser program. The integration was performed by iteratively selecting points in the vicinity of the visible disk of the Earth, taking into account the overlap with

the disk of the Sun. It is shown that the annual transit curve contains two narrow dips caused by the mutual overlap of the radiating surface of the star and the reflecting surface of the planet, as well as a wide peak associated with diffuse reflection from the illuminated side of the Earth. It was found that the shape of the sinkholes varies: the left sinkhole is smooth, the right one has sharp boundaries, which is explained by the size ratio of the Sun and the Earth. The work demonstrates the possibility of identifying a planet by the contribution of diffuse reflection to the transit curve.

Keywords: transit analysis, exoplanets, computer modeling, numerical methods, astronomy, solar system

Введение

Объекты в космическом пространстве расположены на огромных расстояниях, понимание которых недоступно обывателю. Это приводит к специфическому облику космического пространства – звезды размером во много раз больше Солнца для наблюдателя выглядят как точки. Таким образом, для нас доступно наблюдение звезд, но не планет, окружающих их – экзопланет. В силу своего размера и отсутствия собственной светимости экзопланеты не различимы на небе, а на любом устройстве для астрономических наблюдений они будут занимать один пиксель со своей звездой на фотоприемной матрице [1, 2].

Существуют методы наблюдения, позволяющие определить не только наличие экзопланет на орбите звезды, но и некоторые их параметры, такие как масса, линейные размеры, а также в некоторой степени состав. Это, например, метод транзитного анализа, основанный на наблюдении изменений потока излучения от звезды с течением времени, обусловленных перекрытием звезды планетой с точки зрения наблюдателя [3].

Однако далеко не все экзопланеты расположены так, чтобы их можно было наблюдать транзитным методом. Шанс наблюдать перекрытие в силу соотношения размеров звезды и габаритов орбит планет меньше доли процента. Помимо транзитного анализа также широко применяются метод радиальных скоростей, основанный на доплеровском сдвиге излучения звезды, циклично смещающейся из-за притяжения планеты. В свою очередь метод астрометрии улавливает сами смещения звезды [4].

Транзитный анализ не требует дорогого дополнительного оборудования, такого как интерферометры или чувствительные матрицы большого разрешения. Для наблюдения транзитных кривых необходимо лишь продолжительное наблюдение интегрального потока излучения от звезды. Обыкновенно для того, чтобы утверждать об обнаружении планеты методом транзитного анализа, необходимо наблюдать минимум три транзита, что усложняет наблюдение планет, удаленных от своей звезды [5].

Например, обнаружение Земли заняло бы минимум 3 года, а Плутона – 740 лет. В итоге, транзитный метод лучшим образом проявляет себя в обнаружении горячих юпитеров – класса экзопланет, имеющих массу, близкую к массе Юпитера, и расположенные на орбите на порядок меньше орбиты Меркурия. Именно горячие юпитеры раньше обнаруживали чаще всего.

Текущий уровень развития оборудования позволяет обнаружить даже планеты, подобные Земле [6, 7].

В данной статье будет рассмотрен вид транзитных кривых Земли, доступных для стороннего наблюдателя. Для наглядности будет рассмотрен случай, когда наблюдатель расположен в плоскости орбиты Земли. Это позволит добиться максимально возможного контраста кривой и наилучшим образом рассмотреть ее особенности.

В основе модели будет лежать численное интегрирование потока излучения от единичных элементов площади поверхности Солнца. При этом важно учесть неоднородность интенсивности излучения на видимой поверхности Солнца, поскольку при разбиении на единичные элементы они будут сориентированы к наблюдателю под разными углами и иметь разную наблюдаемую площадь. Можно прийти к выражению (1) для потока без учета удаленности наблюдателя:

$$\Phi_{изл.} = \int_S I(\vec{n} \cdot \vec{v}) dS, \quad (1)$$

где n – вектор нормали единичного элемента;

v – вектор направления на наблюдателя;

I – интенсивность излучения элементов.

Для описания транзитов в интегрирование необходимо внести условие на перекрытие единичного объема планетой. Кроме того, в световом потоке от системы Солнце-Земля имеют место отражения от поверхности планеты.

Целесообразно будет так же разбивать отражающую поверхность на единичные объемы и использовать модель Фонга [8, 9], в которой представлены три вида отражений: фоновое (ambient), диффузное (diffuse) и зеркальное (occlusion):

$$I_{отр.} = I_{фон} + I_{диф.} + I_{зер.} \quad (2)$$

В общем случае интенсивность отражения от элемента площади в рамках модели Фонга можно расписать через векторы нормали элемента, направления от источника света на элемент, а также вектора направления в сторону наблюдателя:

$$I_{отр.} = k_{фон} I_{фон} + \sum_i^{ист.} (k_{диф.} (\vec{n} \cdot \vec{l}_i) + k_{зер.} (\vec{r}_i \cdot \vec{v})) I_i, \quad (3)$$

где $\vec{r}_i = 2(\vec{l}_i \cdot \vec{n})\vec{n} - \vec{l}_i$;

l – вектор направления от источника света на элемент;

r – вектор зеркально отраженного света, n – вектор нормали единичного элемента;

v – вектор направления на наблюдателя;

$I_{фон}$ и I_i фоновая интенсивность и интенсивность i -го источника;

$k_{\text{фон}}$, $k_{\text{диф}}$ и $k_{\text{зер}}$ — соответственно коэффициенты фонового, диффузного и зеркального отражения, характеризующие свойства отражающей поверхности.

В системе Солнце-Земля фоновое излучение будет иметь крайне низкую интенсивность, поскольку все посторонние источники чрезмерно удалены и относительно немногочисленны. Также можно пренебречь зеркальным отражением в силу состава атмосферы и характера поверхности Земли [10, 11].

Вклад в световой поток от звезды и планеты вносят излучение самого Солнца и диффузное отражение этого излучения от поверхности Земли (рис. 1.).

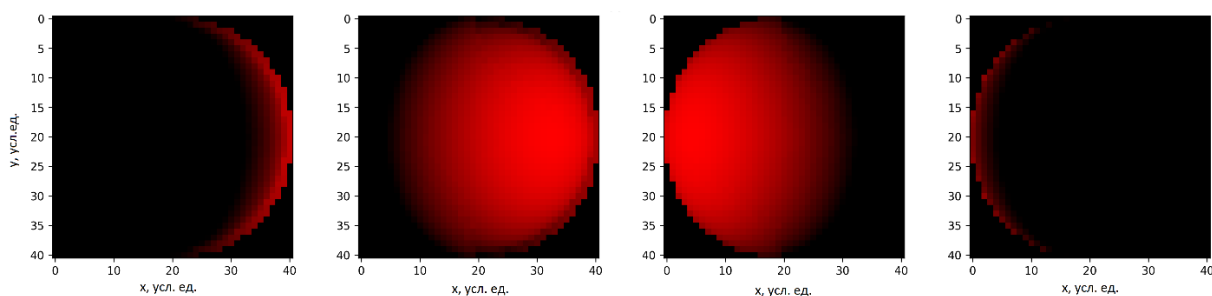


Рис. 1. Диффузное отражение излучения звезды от поверхности планеты в произвольных точках орбиты

В данной статье будут рассмотрены транзитные кривые, соответствующие ряду длин волн видимого диапазона. От длины волны будут зависеть интенсивность, испускаемая элементами площади Солнца, и коэффициенты диффузного отражения поверхности Земли.

Нахождение спектральных характеристик испускания и отражения было получено посредством оцифровки печатных графиков [12, 13] в разработанной программе «Graph analyser», позволяющей восстановить точки графика по его изображению (рис. 2).

На основе графиков излучения и отражения были выбраны точки в видимом диапазоне с шагом 50 нм (рис. 3).

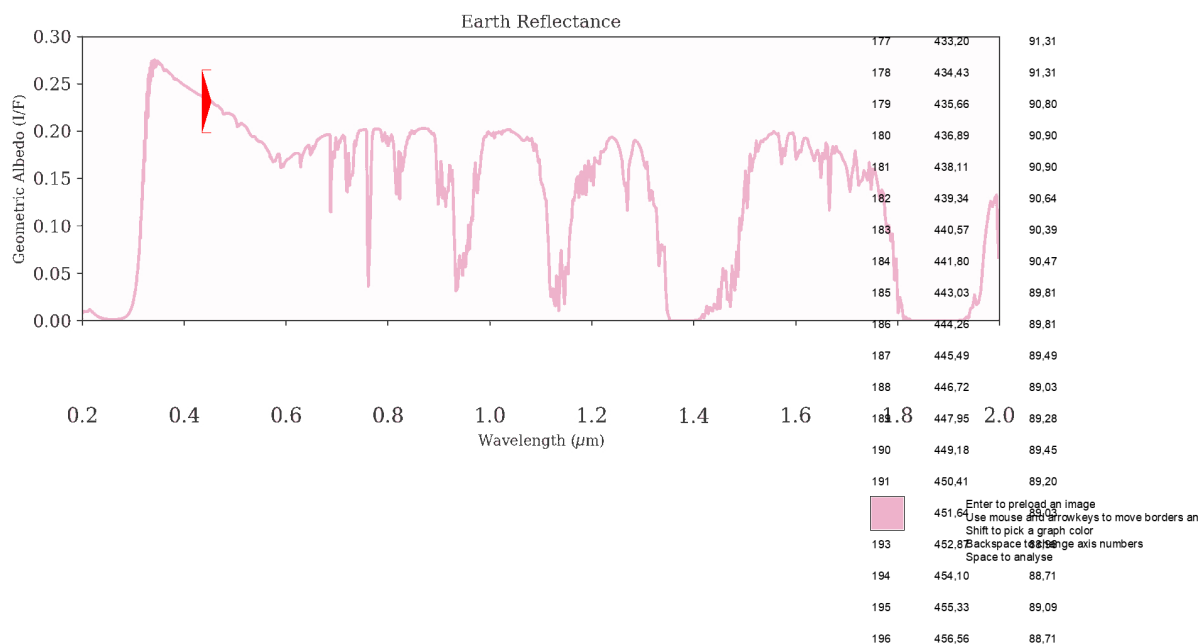


Рис. 2. Программа «Graph analyser» в процессе оцифровки графика отражения поверхности Земли

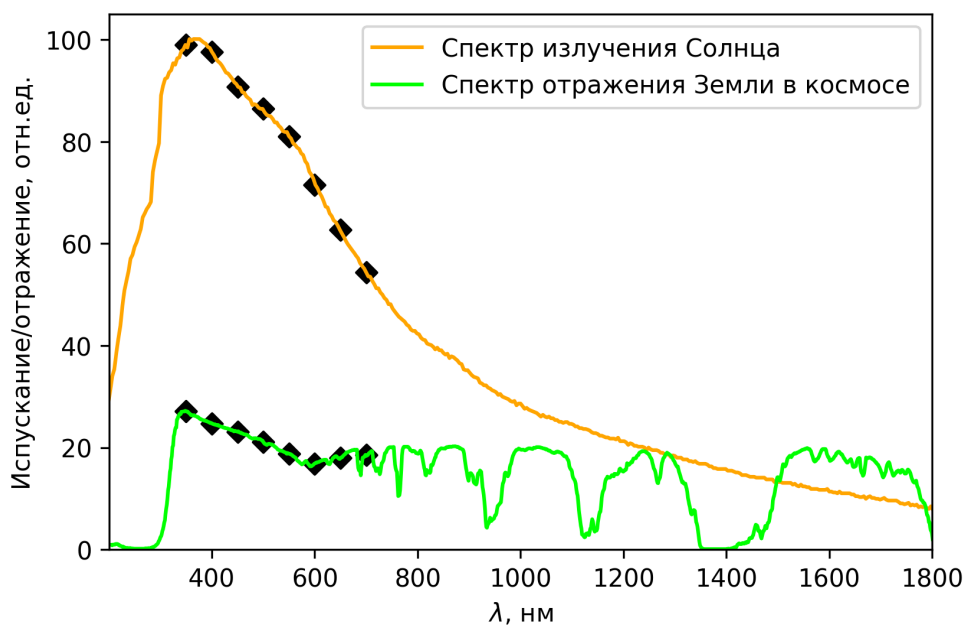


Рис. 3. Нормированные спектры испускания Солнца и отражения Земли

Для длин волн, отмеченных на (рис. 3), получим выражение, описывающее суммарный поток (4) на основе (1) и (3):

$$\Phi_{\text{итоговый}}(\lambda) = \left(\int_{S_{\odot}} (\vec{n}_{\odot} \cdot \vec{v}) dS - \int_{S_{\oplus} \cdot S_{\odot}} (\vec{n}_{\odot} \cdot \vec{v}) dS + \int_{S_{\oplus}} k_{\text{out}}(\lambda) (\vec{n}_{\oplus} \cdot \vec{l}_i) dS - \int_{S_{\odot} \cdot S_{\oplus}} k_{\text{out}}(\lambda) (\vec{n}_{\oplus} \cdot \vec{l}_i) dS \right) \cdot I(\lambda), \quad (3)$$

где $S_{\odot}$ площадь полусферы Солнца;

S_{+} площадь полусферы Земли;

$S_{\odot} \cdot S_{+}$ и $S_{+} \cdot S_{\odot}$ площадь перекрытия Солнца Землей и Земли Солнцем,

n – вектор нормали единичного элемента;

v – вектор направления на наблюдателя;

$I(\lambda)$ интенсивность в спектральном диапазоне вблизи длины волны λ ;

$k_{\text{диф}}(\lambda)$ коэффициент диффузного отражения поверхности Земли для длины волны λ .

При моделировании транзитных переходов интегрирование выполнялось посредством итеративного перебора в окрестности видимых точек изображения Земли внутри двойного цикла (по x и y), при попадании точки в окружность Земли к общему потоку прибавлялся поток диффузного отражения от единичного элемента площади Земли, при попадании точки также в окружность Солнца вычитался поток излучения от элемента площади Солнца или отражения от элемента Земли в зависимости от того, с какой стороны от звезды находилась планета [14, 15].

При этом величина падения потока от Солнца была невелика по сравнению со значением самого потока, поэтому для наглядности моделировалось именно изменение уровня излучения относительно постоянного (суммарного потока от звезды без учета перекрытий) (5). Моделирование годового транзита Земли вокруг Солнца приведено на (рис. 4).

$$\Phi_{\text{отн.}}(\lambda) = \left(\sum_{S_{\oplus}} k_{\text{диф.}}(\lambda)(\vec{n}_{\oplus} \cdot \vec{l}_i) - \sum_{S_{\oplus} \cdot S_{\odot}} (\vec{n}_{\odot} \cdot \vec{v}) - \sum_{S_{\odot} \cdot S_{\oplus}} k_{\text{диф.}}(\lambda)(\vec{n}_{\oplus} \cdot \vec{l}_i) \right) \cdot I(\lambda) \quad (4)$$

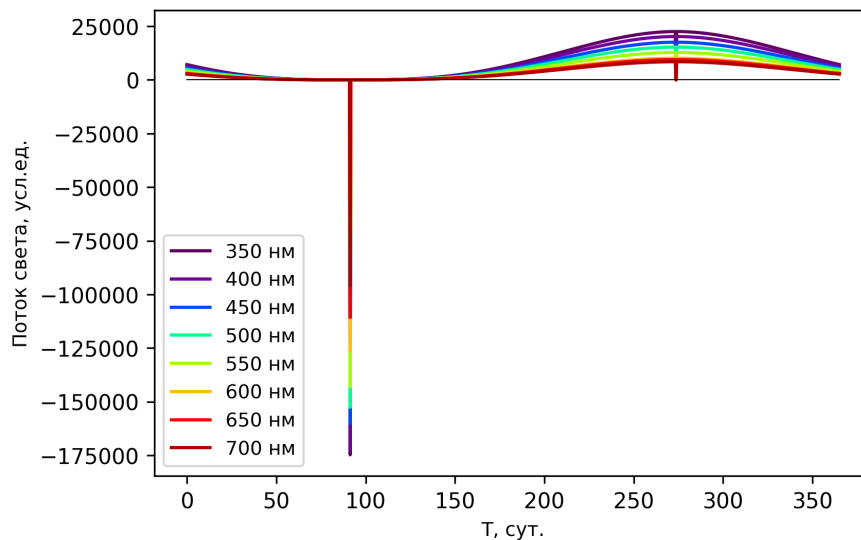


Рис. 4. Годовая транзитная кривая Земли на фоне Солнца для видимого и близких к нему спектральных диапазонов с шагом 50 нм (поток относительно постоянного)

Узкие провалы на транзитной кривой обусловлены перекрытием излучающей поверхности Солнца Землей (левый провал (рис. 5а)) и перекрытием Солнцем отражающей поверхности Земли (правый провал (рис. 5б)), наличие широкого пика излучения обусловлено диффузным отражением от поверхности Земли – чем ближе она к дальней от наблюдателя точке орбиты, тем лучше освещается видимая поверхность и больший поток отражается [16, 17].

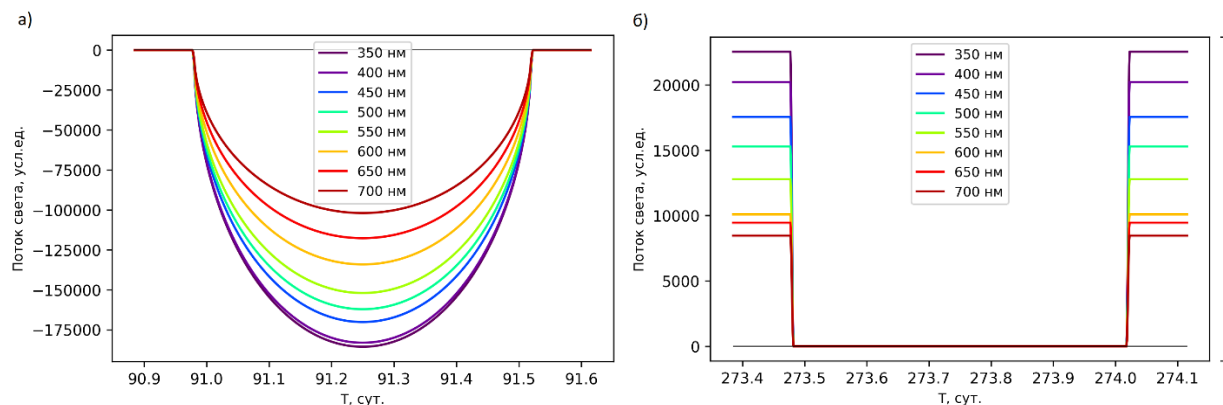


Рис. 5. Провалы на транзитной кривой, обеспеченные взаимным перекрытием Солнца и Земли

Можно отметить гладкость левого провала и резкие границы правого – это обусловлено тем, что размеры Солнца много больше размеров Земли, поэтому Земля постепенно перекрывает все более яркие элементы площади, Солнце же быстро закрывает всю поверхность Земли и поток не изменяется до окончания перекрытия [18].

Заключение

В статье были представлены транзитные кривые, описывающие взаимное перекрытие Солнца и Земли, которые были бы видны стороннему наблюдателю.

Отмечен вклад диффузного отражения от поверхности планеты, которое при достаточной чувствительности оборудования может быть зафиксировано и указать на наличие планеты на орбите, а также на состав ее атмосферы и поверхности. Последующие исследования могут быть направлены на нахождение дистанций, на которых находящиеся в эксплуатации или разработке средства астрономического наблюдения могли бы обнаружить планету в системе звезда-планета с параметрами, подобными параметрам Земли и Солнца.

Также возможно проанализировать, в каких звездных системах возможно обнаружить наличие Земли на орбите Солнца методом транзитного анализа, используя устройства наблюдения, схожие по параметрам с существующими и, соответственно, в каких системах с Земли возможно обнаружить подобную экзопланету.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Метагалактика. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Метагалактика>
2. Космические объекты. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://nebo-nsk.ru/pcosmoobjects>
3. Методы обнаружения экзопланет. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Методы_обнаружения_экзопланет
4. Мушаилова, Б. Р., Теплицкая, В.С. Спектрометрический метод обнаружения экзопланет как еще один тест для проверки инвариантности скорости света. – Москва: Вестник Московского университета. Номер 6. Серия 3. Физика. Астрономия, 2011. – 142 с.
5. Радиальные скорости и экзопланеты. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://elementy.ru/problems/1399/Radialnye_skorosti_i_ekzoplanety
6. Иванов, К. И. Высокоточная ПЗС- фотометрия транзитных экзопланетных систем.– Иркутск: Известия Иркутского государственного университета. Том: 1. Серия: Науки о Земле, 2012. – 156 с.
7. Ученый рассказала, как находят планеты у других звезд. Статья. [Электронный ресурс]. <https://ria.ru/20260515/kosmos-2092565067.html>
8. Newman, W. Illumination for Computer Generated Pictures. Communications of the ACM, 1975. – 317 с.
9. Особенности моделирования света: Аппроксимации Фонга. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ixbt.com/video/light-model-phong.html>
10. Солнечный спектр. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://elementy.ru/kartinka_dnya/1172/Solnechnyy_spektr
11. Поглощение солнечного излучения атмосферой и гидросферой земли и жизнь. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://samlib.ru/o/oleg_w_m/cdocumentsandsettingsolegmo_sinmoidokumentypoglosheniesolnechnogoizlucheniyaatmosferojigidrosferojzemrtf.shtml
12. Теоретическая часть. Цвет и его оптические характеристики. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://ido.tsu.ru/other_res/courses1/course8/pr/R1.htm
13. Видимое излучение. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Видимое_излучение
14. Экзопланеты. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://cosmomerch.ru/blogs/blog/ekzoplanety-kak-my-nahodim-novye-miry>
15. Экзопланеты: изучение других миров. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/sberbank/articles/906932/>
16. Основные законы солнечной энергии. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/5354086/page:2/>
17. О дальнем и сверхдальнем распространении коротких волн. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qrz.ru/solar/articles/hfprognoz.shtml>
18. Путешествие из центра Солнца. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/430647/Puteshestvie_iz_tsentra_Solntsa

© В. Р. Костылева, В. С. Болдырев, А. Н. Дорошенко, Л. И. Горохова, 2026