

## **Влияние плотности внутреннего заполнения PLA-деталей на прочность, массу и время изготовления**

*Ёлгин Роман Николаевич*

*Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема*  
*Студент*

*Андриенко Иван Сергеевич*

*Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема*  
*Студент*

### **Аннотация**

В данной статье рассматривается влияние плотности внутреннего заполнения (infill density) на основные эксплуатационные характеристики деталей, изготовленных методом послойного наплавления (FDM) из полилактидовой кислоты (PLA) на 3D-принтере Ender-3 с использованием слайсера Ultimaker Cura. Проведены практические исследования влияния структуры заполнения на прочность полимерных образцов. В качестве варьируемого параметра выбрана плотность заполнения в диапазоне от низких до высоких значений при фиксированных остальных настройках печати. Проведена оценка прочности образцов под весом, их массы и времени изготовления. На основе анализа полученных и литературных данных сформулированы рекомендации по выбору плотности заполнения PLA-деталей для обеспечения требуемых механических свойств при минимизации расхода материала и времени печати.

**Ключевые слова:** 3D-печать, FDM, PLA, плотность заполнения, прочность, Ultimaker Cura, Ender-3.

## **Influence of infill density of PLA parts on strength, stiffness, mass and manufacturing time**

*Yolgin Roman Nikolaevich*

*Sholom-Aleichem Priamursky State University*  
*Student*

*Andrienko Ivan Sergeevich*

*Sholom-Aleichem Priamursky State University*  
*Student*

### **Abstract**

This article examines the effect of infill density on the main performance characteristics of parts made by FDM from polylactic acid (PLA) on an Ender-3 3D printer using an Ultimaker Cura slicer. Practical studies of the effect of the filling structure on the strength and rigidity of polymer samples have been carried out. The

filling density is selected as a variable parameter in the range from low to high values with the remaining print settings fixed. The strength and rigidity of the samples underweight, their mass and the time of production were evaluated. Based on the analysis of the obtained and literature data, recommendations were formulated for choosing the density of filling PLA-parts to ensure the required mechanical properties while minimizing the material consumption and printing time.

**Keywords:** 3D printing, FDM, PLA, infill density, strength, stiffness, Ultimaker Cura, Ender-3.

## 1. Введение

### 1.1 Актуальность исследования

В последние годы технологии аддитивного производства стремительно развиваются и находят применение в машиностроении, медицине, образовании и бытовом секторе. Одной из наиболее распространённых технологий является послойное наплавление расплавленной нити (Fused Deposition Modeling, FDM), отличающаяся относительной простотой оборудования и доступной стоимостью расходных материалов.

Одним из наиболее популярных материалов для настольных принтеров является полилактидная кислота (PLA). Данный термопластик обладает низкой усадкой, экологичностью и достаточной прочностью для изготовления прототипов и функциональных деталей малой нагруженности. Вместе с тем механические свойства FDM-деталей из PLA существенно зависят от параметров процесса печати.

Ключевую роль играет внутренняя структура изделия, формируемая слайсером. Пользователь задаёт в программе плотность заполнения (infill density), а также тип узора заполнения. На практике выбор значения плотности часто осуществляется интуитивно, что приводит либо к избыточному расходу материала и увеличению времени изготовления, либо к недостаточной прочности готовых изделий.

Таким образом, возникает задача количественной оценки влияния плотности внутреннего заполнения на прочность, массу и время изготовления PLA-деталей, напечатанных на типовом настольном 3D-принтере.

### 1.2 Обзор исследований

А.С. Карад и др. экспериментально показали что изменение плотности внутреннего заполнения существенно влияет на прочность 3D-деталей на растяжение и изгиб, что позволяет подбирать оптимальный компромисс между массой и несущей способностью [1]. А.П. Агравал исследовал совместное влияние шаблона заполнения, его плотности и толщины слоя на механические свойства деталей из ABS, напечатанных методом FFF, и выявил наиболее чувствительные к изменению параметров комбинации режимов [2]. Х. Афшари с применением методологии поверхностей отклика оценил влияние основных параметров FDM-печати на прочностные характеристики PLA-образцов и построил модели, позволяющие прогнозировать поведение деталей при разных настройках заполнения [3]. М. С. Дудеску, Л. Ракз, Ф.

Попа установили, что тип внутреннего рисунка заполнения заметно влияет на усталостную долговечность полимерных образцов, причём некоторые структуры обеспечивают более высокий ресурс при той же массе детали [4]. Е. Йорке и Б. В. Чоудэри предложили многоцелевой подход к оптимизации параметров FFF-печати PLA, позволяющий одновременно повышать механические характеристики и технологичность за счёт подбора плотности и схемы заполнения [5]. М. Доши систематизировал данные о влиянии режимов печати и типа материалов на механические свойства изделий, выделив плотность и структуру заполнения как одни из ключевых факторов для FDM-технологии [6]. Е. У. Энемоу показал, что параметры FDM-процесса, включая плотность заполнения, оказывают значимое влияние не только на физико-механические характеристики, но и на энергопотребление и продолжительность изготовления деталей [7].

### **1.3 Цель исследования и задачи**

Цель исследования — определить влияние плотности внутреннего заполнения PLA-деталей, изготавливаемых методом FDM-печати на 3D-принтере Ender-3, на их прочность, массу и время изготовления и сформулировать практические рекомендации по выбору данного параметра.

## **2. Материалы и методы**

Оборудование и программное обеспечение:

- В качестве оборудования используется настольный 3D-принтер Creality Ender-3 с диаметром сопла 0,6 мм. Печать выполняется филаментом PLA фирмы Unid диаметром 1,75 мм одного производителя и цвета, что позволяет минимизировать влияние вариаций свойств материала.
- Для подготовки управляющих программ применяется слайсер Ultimaker Cura версии 5 и выше. Моделирование образцов возможно в любой CAD-системе; геометрия сохраняется в формате STL, OBJ.
- При печати используется стеклянная или стандартная платформа принтера с нанесённым адгезионным слоем (клей-карандаш, лента и т.п.). Уровень стола предварительно калибруется по стандартной методике производителя.

## **3. Результаты и обсуждение**

### **3.1 Подготовка образца и печать 3D-модели**

В качестве испытательного образца выбран куб размерами 20×20×20 мм. Такая форма проста в моделировании и печати, легко повторяется, а также удобна для нагружения сверху различными грузами при испытаниях на прочность.

Модель куба была создана в бесплатном онлайн-редакторе 3д-моделей «3d.sumo.app» и экспортирована в формате OBJ (рис. 1).

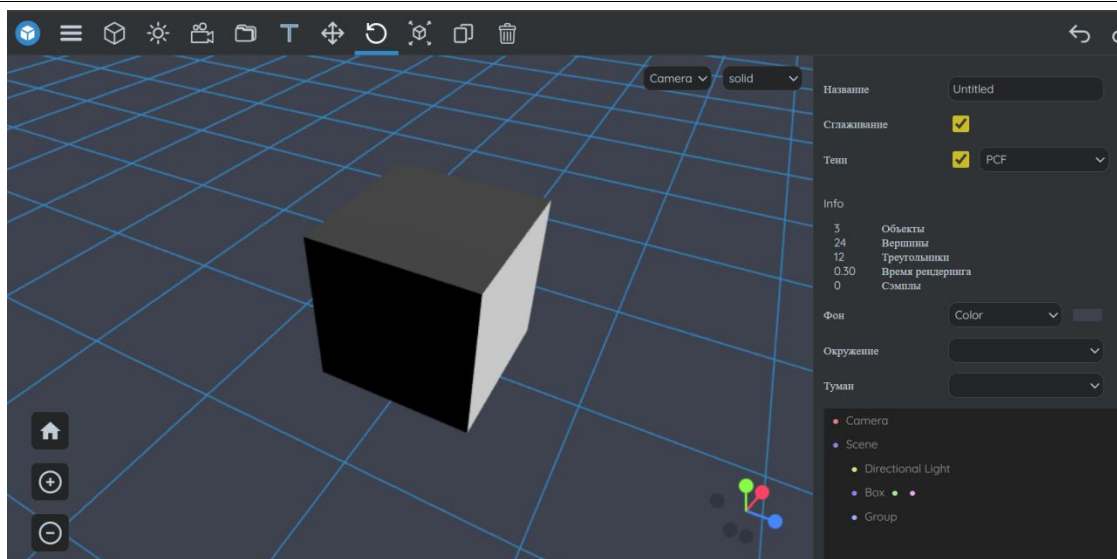


Рис 1. 3D-модель кубического образца 20×20×20 мм в окне Ultimaker Cura

Далее файл был загружен в Ultimaker Cura, где выполнялось позиционирование на рабочем столе и предварительный просмотр траекторий печати, зададим нашей модели нумерацию, чтобы не перепутать модели (рис. 2).

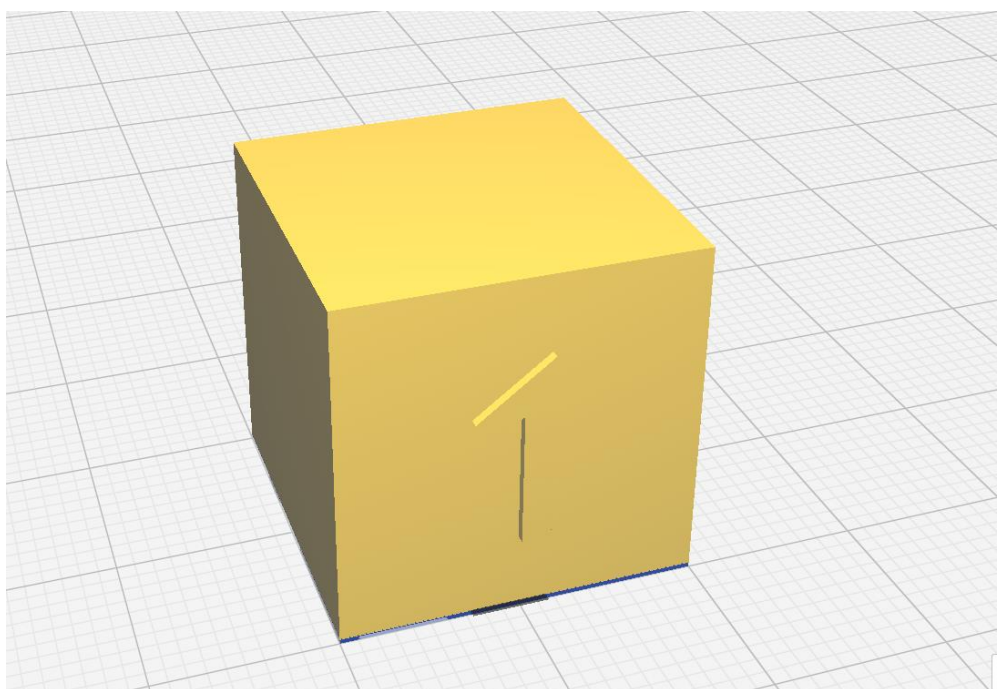


Рис 2. Подготовка к печати в окне Ultimaker Cura

Для исключения влияния побочных факторов все параметры печати, кроме плотности внутреннего заполнения, фиксируются. В качестве базовых настроек могут быть приняты:

- высота слоя — 0,25 мм;
- ширина линии экструдера — 0,6 мм;
- количество внешних стенок (Wall Line Count) — 1;

- толщина верхних и нижних слоёв — 0 мм;
- тип заполнения — Grid (сетка);
- скорость печати — 50 мм/с;
- температура сопла — 200–205 °C
- температура стола — 60 °C;
- процент обдува — 100 % после первых слоёв;
- тип подложки — отсутствует.

Варьируемым параметром является плотность внутреннего заполнения. Планируется исследовать, следующие уровни: 0, 15, 25, 35 %.

Создаём 4 заготовки для печати (рис. 3).

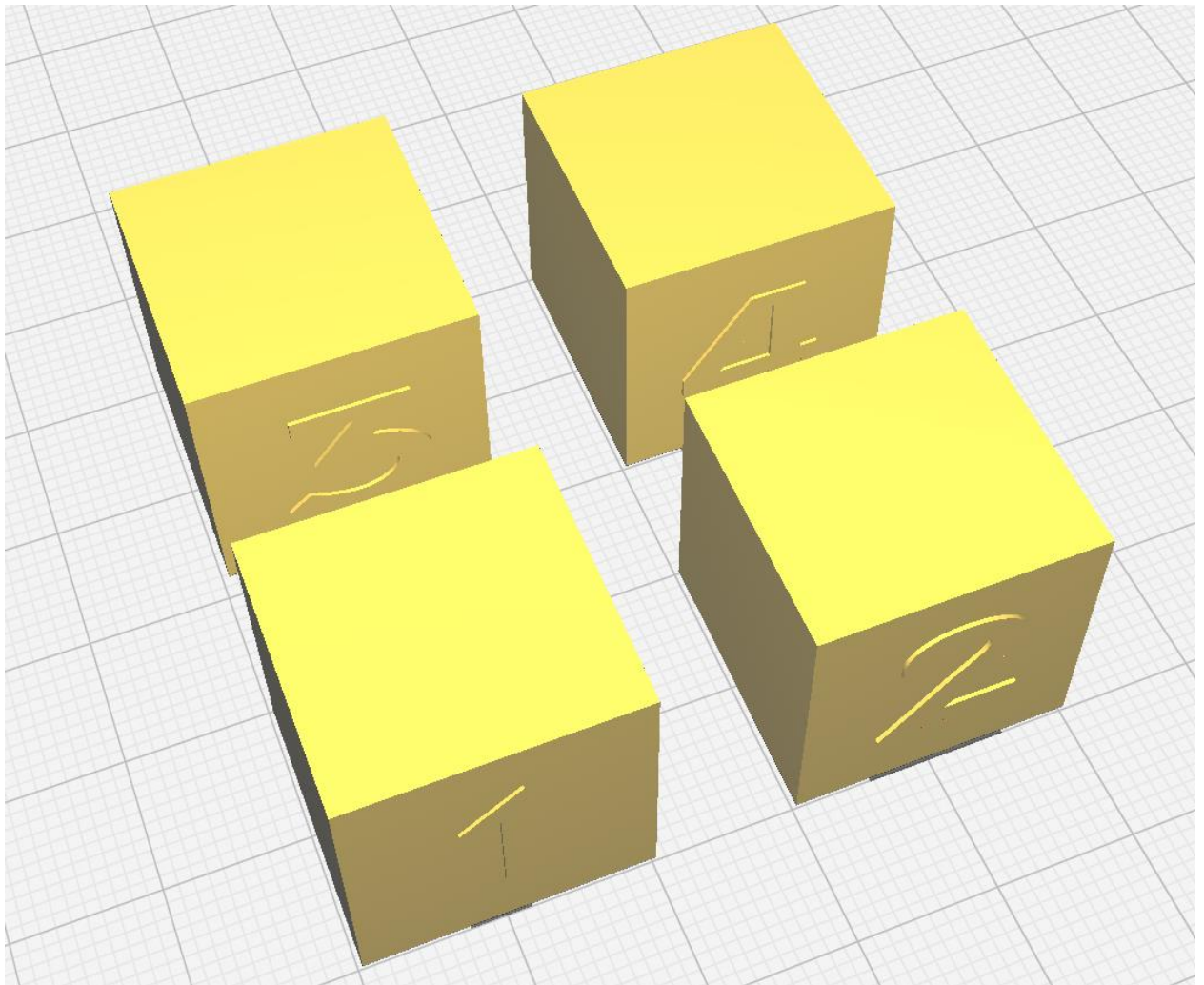


Рис 3. Подготовка к печати в окне Ultimaker Cura

Процесс печати на 3д-принтере Ender 3 представлен ниже (рис. 4).

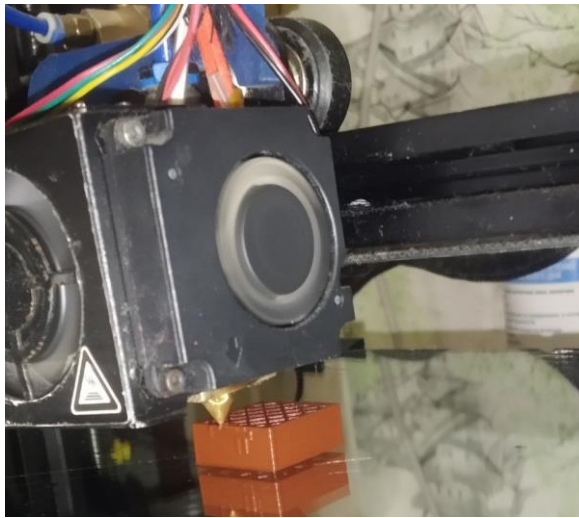


Рис 4. Процесс печати

Завершение 3д-печати моделей для испытаний (рис. 5).



Рис 5. Завершение печати

### 3.2 Замеры испытательных образцов

После завершения печати каждый образец очищается от возможных наплывов и поддержек, но дополнительная механическая обработка не выполняется. Далее проводится измерение массы образца на бытовых электронных весах с точностью не хуже 0,1 г: (рис. 6):

- 0% - 1г;
- 15% - 3г
- 25% - 4г;
- 35% - 5г.



Рис 6. Измерение массы куба на весах

расчётное время печати фиксируется по данным слайсера Cura. При наличии возможности дополнительно измеряется фактическое время по таймеру:

- 0% - 12 мин;
- 15% - 14 мин
- 25% - 15 мин;
- 35% - 16 мин.

### 3.3 Результаты проверки прочности

Для оценки прочности была выбрана схема нагружения весом куба сверху. Образец устанавливался на жёсткую горизонтальную поверхность, сверху на куб прикладывалась вертикальная нагрузка в виде набираемой стопки грузов (гирь и ёмкостей с водой), равномерно распределённой по верхней грани куба. Испытания были проведены с весом 5, 10, 15 и 20 кг (рис. 7-10).



Рис 7. Оценка прочности образцов весом 5кг



Рис 8. Оценка прочности образцов весом 10кг

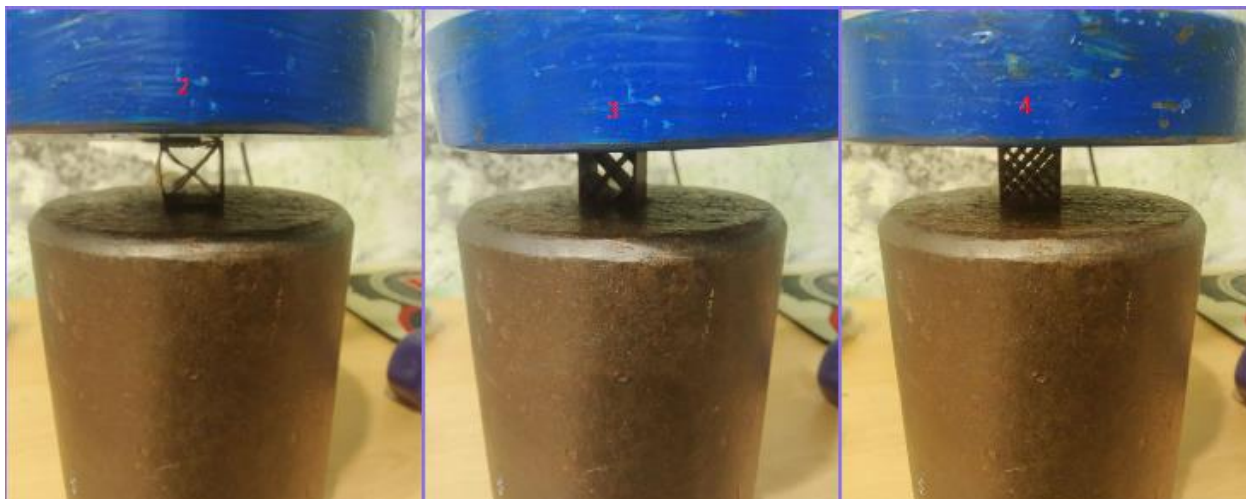


Рис 9. Оценка прочности образцов весом 15кг



Рис 10. Оценка прочности образцов весом 20кг

По завершении испытаний для каждого значения плотности заполнения были получены следующие показатели:

Испытания с весом 5 кг:

1. 0% - выдержал;
2. 15% - выдержал;
3. 25% - выдержал;
4. 35% - выдержал.

Испытания с весом 10 кг:

1. 0% - не выдержал;
2. 15% - выдержал;
3. 25% - выдержал;
4. 35% - выдержал.

Испытания с весом 15 кг:

1. 0% - не выдержал;
2. 15% - выдержал;
3. 25% - выдержал;
4. 35% - выдержал.

Испытания с весом 20 кг:

1. 0% - не выдержал;
2. 15% - не выдержал;
3. 25% - выдержал;
4. 35% - выдержал.

Финальный внешний вид тестовых образцов после испытаний (рис. 11).



Рис 11. Образцы после испытаний

По результатам испытаний кубов 20×20×20 мм из PLA с разной плотностью заполнения (0 %, 15 %, 25 %, 35 %) установлено:

- Куб без заполнения (0 %) выдерживает только 5 кг, при 10 кг и выше разрушается — одной оболочки недостаточно.
- Заполнение 15 % уже даёт заметный прирост прочности: образец выдержал до 15 кг, но разрушился при 20 кг.
- Кубы с заполнением 25 % и 35 % выдержали все испытания до 20 кг без разрушения.

С учётом роста массы и времени печати при увеличении заполнения оптимальным для таких деталей можно считать уровень порядка 25 %: он обеспечивает надёжность, сопоставимую с 35 %, при меньшем расходе материала.

#### 4. Выводы

В ходе работы рассмотрено влияние плотности внутреннего заполнения PLA-деталей, изготавливаемых методом FDM-печати на 3D-принтере Ender-3, на их прочность, массу и время изготовления. На основе анализа литературных источников и разработанной методики эксперимента можно сделать следующие выводы:

Плотность внутреннего заполнения является одним из ключевых параметров, определяющих механические свойства FDM-деталей из PLA. Увеличение infill density приводит к росту прочности, однако сопровождается увеличением массы и времени печати.

Учитывая увеличение массы и времени печати при росте заполнения, наиболее рациональным для таких деталей является заполнение около 25 %: при меньшем расходе материала оно даёт прочность, практически не уступающую варианту с 35 %.

Разработанная методика может быть использована для дальнейшего исследования влияния других параметров FDM-печати, в том числе типа шаблона заполнения, ориентации слоёв и параметров охлаждения, а также для оптимизации настроек печати под конкретные задачи.

### Библиографический список

1. Karad A. S. et al. Experimental study of effect of infill density on tensile and flexural strength of 3D printed parts //Journal of Engineering and Applied Science. 2023. Т. 70. №. 1. С. 104. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s44147-023-00273-x>
2. Agrawal A. P. et al. An investigation of combined effect of infill pattern, density, and layer thickness on mechanical properties of 3D printed ABS by fused filament fabrication //Heliyon. 2023. Т. 9. №. 6. URL: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)03738-6](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)03738-6)
3. Afshari H. et al. Studying the effects of FDM process parameters on the mechanical properties of parts produced from PLA using response surface methodology //Colloid and Polymer Science. 2024. Т. 302. №. 6. С. 955-970. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00396-024-05246-x>
4. Dudescu M. C., Racz L., Popa F. Effect of infill pattern on fatigue characteristics of 3D printed polymers //Materials Today: Proceedings. 2023. Т. 78. С. 263-269. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322071346>
5. Yorke E., Chowdary B. V. Optimising process parameters for enhanced performance in PLA-based fused filament fabrication: A multi-objective approach //Journal of Micromanufacturing. 2024. С. 25165984251316091. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/25165984251316091>
6. Doshi M. et al. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects //Materials Today: Proceedings. 2022. Т. 50. С. 2269-2275. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321064671](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321064671)
7. Enemuoh E. U. et al. Effect of process parameters on energy consumption, physical, and mechanical properties of fused deposition modeling //Polymers. – 2021. Т. 13. №. 15. С. 2406. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/15/2406>