

УДК 691.5

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Г.А. Титов**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

**Аннотация.** Аддитивная печать становится популярным направлением возведения зданий и сооружений с помощью строительных принтеров, позволяющих сократить сроки строительства, а также уменьшить трудозатраты за счет использования минимального количества ресурсов. Правильный подбор компонентов смеси позволяет развивать использование 3D-технологий в процессе строительства, а также в значительной мере расширять архитектурную вариативность. Технология 3D-печати, применительно к строительной отрасли, может рассматриваться как перспективная с точки зрения ее реализации при проектировании, строительстве, эксплуатации, реконструкции, то есть в период всех этапов строительного процесса. В статье приведено сравнение аддитивных и традиционных технологий, описаны виды материалов для аддитивной печати и их сфера применения, описаны виды 3D-печати (FDM, CJP, SLS, MJM, SLA), представлено одно из последних достижений в сфере аддитивных технологий - первый российский 3D-принтер для печати в условиях невесомости. Проведенный анализ современных тенденций научных исследований в сфере материалов для 3D-печати позволил сделать вывод, что особый интерес ученых представляет возможность использования отходов производства отечественных промышленных предприятий, добавок из растительных материалов, создание строительных смесей для использования при отрицательных температурах, повышение прочностных характеристик напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов, совместное использование 3D-печати и BIM-технологий.

**Ключевые слова:** 3D-печать, 3D-принтер, аддитивные технологии, строительные смеси, строительные материалы, WinSun, метод послойного экструдирования, древесные отходы, доменный шлак, Индустрия 4.0.

**Ссылка для цитирования:** Титов Г.А. Материалы для аддитивных технологий в строительстве // Инженерные исследования. 2022. №3 (8). С. 38-49. EDN: HJDIE

## MATERIALS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

**G.A. Titov**

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)*

**Abstract.** Additive printing is becoming a popular way of constructing buildings and structures using construction printers, which can reduce construction time, as well as reduce labor costs by using a minimum amount of resources. The correct selection of the mixture components allows to develop the use of 3D technologies in the construction process, as well as to greatly expand the architectural variability. 3D printing technology, in relation to the construction industry, can be considered as promising in terms of its implementation in the design, construction, operation, reconstruction, that is, during all stages of the construction process. The article compares additive and traditional technologies, describes the types of materials for additive printing and their scope, describes the types of 3D printing (FDM, CJP, SLS, MJM, SLA), presents one of the latest achievements in the field of additive technologies - the first Russian 3D -printer for printing in weightless conditions. The analysis of modern trends in scientific research in the field of materials for 3D printing led to the conclusion that scientists are of particular interest in the possibility of using waste products from domestic industrial enterprises, additives from plant materials, creating building mixtures for use at low temperatures, improving the strength characteristics of printed on building materials. structural elements printer, sharing 3D printing and BIM technologies.

**Keywords:** 3D printing, 3D printer, additive technologies, building mixtures, building materials, WinSun, layer-by-layer extrusion, wood waste, blast-furnace slag, Industry 4.0.

**For citation:** Titov G.A. Materials for additive technologies in construction // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.3 (8). Pp. 38-49. EDN: HJDIE

## ВВЕДЕНИЕ

Первые исследования по внедрению аддитивных технологий были направлены на изучение возможности эффективного применения сырья. Аддитивное производство позволяет уменьшить стоимость сырья за счет точного и нужного нанесения материала, а точность изготавливаемых изделий при этом повышается. Также снижается количество отходов в ходе строительного производства [1-5].

Аддитивные технологии (Additive Manufacturing – от слова аддитивность – прибавляемый) – это послойное наращивание и синтез объекта с помощью компьютерных 3D-технологий. Если при традиционном производстве изначально имеется заготовка, от которой в последствии отсекается все лишнее или она деформируется, то в случае с аддитивными технологиями из «ничего» (расходного материала) изготавливается новый объект.

Первопроходцем в этой технологии является Чарльз Халл (Charles Hull). В 1983 г. он спроектировал первый стереолитографический трехмерный принтер, который создавал 3D-модель посредством нанесения фотополимеризующегося материала на подвижную платформу. Основой служил заранее смоделированный на компьютере цифровой макет. 3D-принтер Чарльза Халла создавал трехмерные объекты, поднимаясь на 0,1-0,2 мм (высоту слоя). Первым 3D-печатным объектом стал небольшой пластиковый стакан [6]. Несмотря на то, что первый аппарат обладал множеством минусов, технология получила свое применение.

Одним из последних достижений в сфере аддитивных технологий стала разработка инженеров Томского политехнического университета (ТПУ) - первый российский 3D-принтер для печати в условиях невесомости. С его помощью российские космонавты смогут делать детали, необходимые для работы с оборудованием станции, чтобы их не пришлось доставлять с Земли. 3D-печать в невесомости отличается от земных условий. При печати на Земле гравитация вносит существенный вклад в «склеивание» слоев при послойном формировании детали. Отсутствие гравитации требует изменений и в технологии, и в конструкции принтера [7]



**Рис. 1.** Первый 3D-принтер SLA-1<sup>1</sup>  
**Fig. 1.** The first 3D printer SLA-1



**Рис. 2.** Первый российский 3D-принтер для работы в космосе [7]  
**Fig. 2.** The first Russian 3D printer to work in space

Первые аддитивные системы производства работали с полимерными материалами. Сегодня 3D-принтеры способны работать также с инженерными пластиками, композитными порошками, разными типами металлов, керамикой, песком. Аддитивные технологии все больше используются в строительстве, машиностроении, промышленности, науке, образовании, проектировании, медицине, литейном производстве и многих других сферах.

Архитекторы и инженеры находят различные способы применения аддитивных технологий в строительстве, хотя такие технологии, как правило, используются для печати небольших объектов [1]. В строительной отрасли 3D-печать очень полезна для возведения сложных и уникальных сооружений, создания макетов для анализа прочности возводимых конструкций. Есть также и другие преимущества применения аддитивных технологий в строительстве, которые представлены на рис.3.

<sup>1</sup> 3D-принтер: что это и как он работает? [Электронный ресурс]. - URL: [https://gb.ru/posts/how\\_3d\\_printing\\_works](https://gb.ru/posts/how_3d_printing_works) (дата обращения: 05.04.2022)

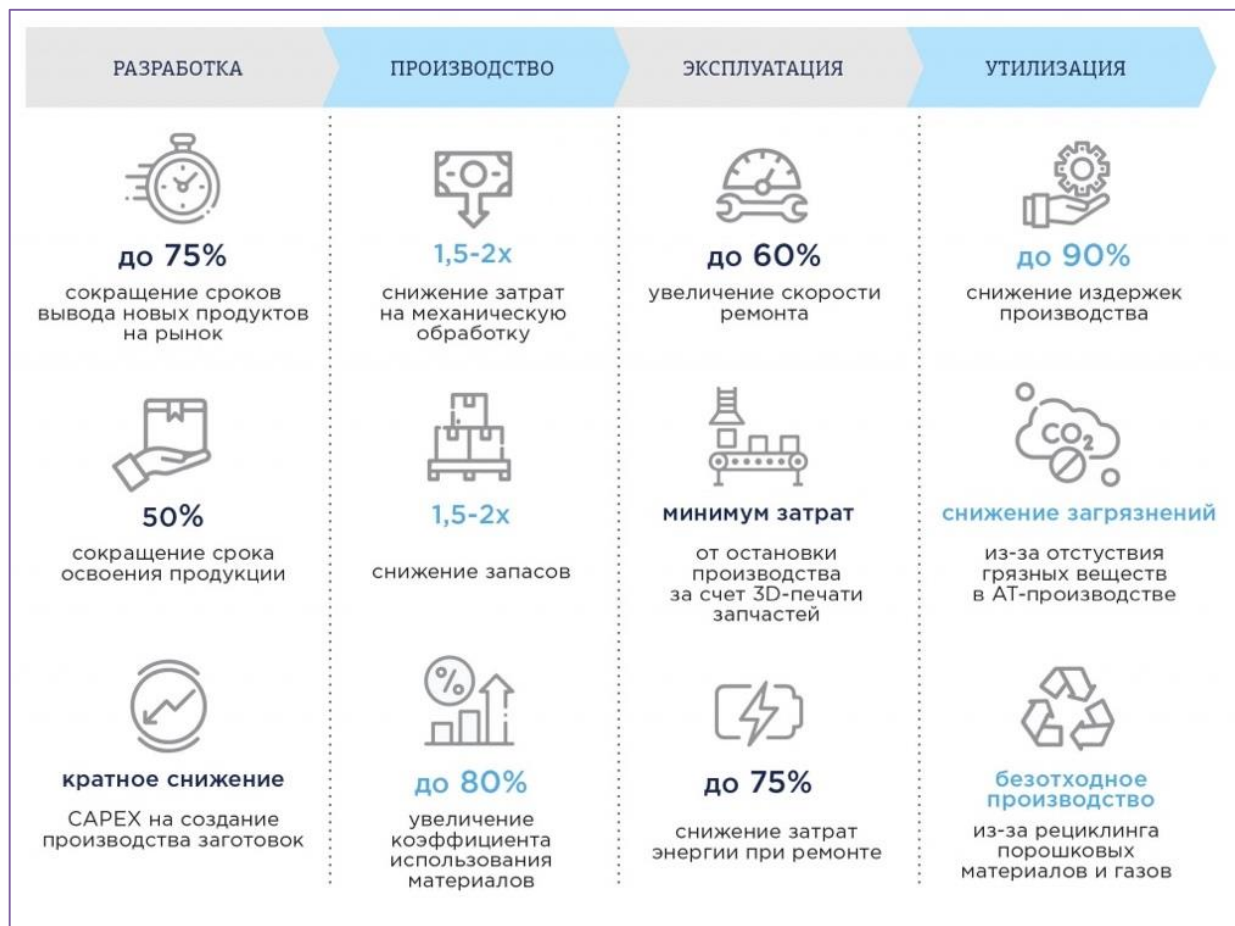


Рис. 3. Преимущества аддитивных технологий в строительстве<sup>2</sup>

Fig. 3. Advantages of additive technologies in construction

Отечественные предприятия с каждым годом все больше и больше используют системы 3D-печати в производственных и научных целях. Оборудование для аддитивного производства, грамотно внедренное в производственную цепочку, предоставляет возможность не только сократить издержки и сэкономить время, но и начать выполнять более непростые задачи.

Согласно отчету GlobalData, в настоящее время на долю рынка 3D-печати приходится менее 0,1% от общего мирового производственного рынка, который оценивается в 12,7 трлн долл [8]. Россию пока нельзя провозгласить лидером в данной сфере. Доля РФ составляет всего 2%, страна находится на 11 месте в мире по производству и внедрению АТ. Однако рынок 3D-печати в России за последние 8 лет вырос в 10 раз, совокупные продажи оборудования, материалов и услуг в области аддитивного производства (включая НИОКР) выросли до 4,5 млрд руб. в год. На закупку оборудования и материалов приходится около 80% объемов рынка. В целом, в настоящее время на российском рынке аддитивных технологий отечественное оборудование занимает порядка 42%, иностранное оборудование – около 60%. Таким образом, за последние годы в данной сфере снизилась импортозависимость с 96% до 60% [9].

### СРАВНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ И ТРАДИЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

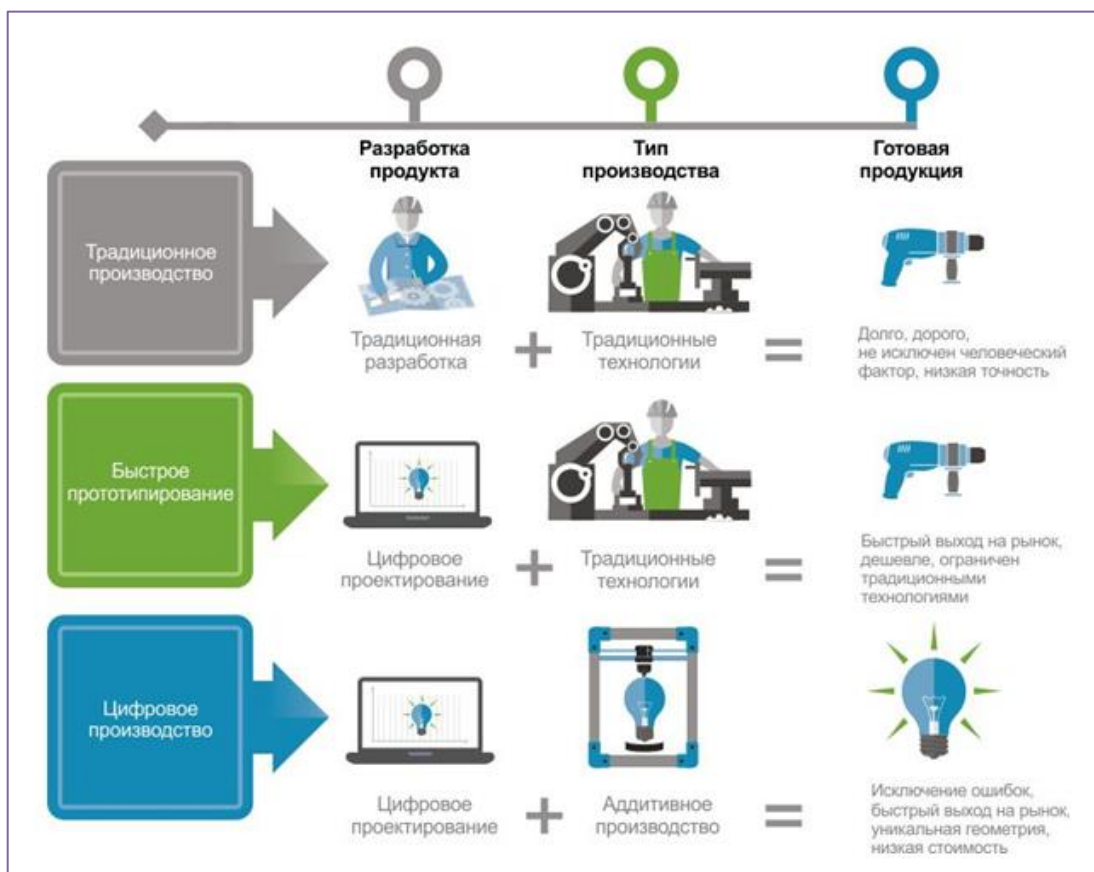
Аддитивные технологии – один из главных мировых трендов, который стоит на пороге новой (четвертой) промышленной революции, получившей название Индустрия 4.0. Технология 3D-печати, дополняя традиционное производство, имеет свои достоинства и недостатки. Одно из главных преимуществ – сокращение сроков производства. Схематично сравнение технологии традиционного и аддитивного производства представлено на рис.4.

<sup>2</sup> Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство [Электронный ресурс]. - URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv/> (дата обращения: 11.04.2022)



**Рис. 4.** Процессы, ведущие к готовому продукту<sup>3</sup>  
**Fig. 4.** Processes leading to the finished product

Схематично различия в традиционном и аддитивном производстве представлены на рис.5.



**Рис. 5.** Схема производств различного типа<sup>4</sup>  
**Fig. 5.** Scheme of productions of various types

<sup>3</sup> Суть и преимущества аддитивных технологий и производства [Электронный ресурс]. - URL: <https://top3dshop.ru/wiki/additive-technologies.html> (дата обращения: 13.04.2022)

<sup>4</sup> Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство [Электронный ресурс]. - URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv/> (дата обращения: 12.04.2022)

## ВИДЫ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Основные материалы, которые используются в аддитивных процессах:

- термопластики в виде нитей или гранул;
- УФ- и фотоотверждаемые жидкие фотополимеры;
- керамонаполненные жидкие фотополимеры;
- полистирол в виде порошка;
- стеклонаполненные, угленаполненные и металлонаполненные полиамиды в виде порошка;
- воск;
- гипсовый порошок;
- металлические сплавы в виде порошка и др.

Состав используемой рабочей смеси является определяющим в корректном использовании технологии 3D-печати. Он должен обладать быстрым набором прочности, который мог бы обеспечить необходимую схватываемость между слоями, оказывающими нагрузки на нижележащие, без деформации. Для этого смесь должна иметь оптимальный предел текучести и, в то же время, быть довольно жидкой для экструзии. В основу оптимального компонентного состава должен быть положен быстротвердеющий бетон с включением различных добавок для улучшения его свойств [6].



**Рис. 6.** Пример 3D-печати, с помощью бетонной смеси [10]

**Fig. 6.** Example of 3D printing with concrete mix

Так же, как и в обычном бетоне, за основу берут вяжущие материалы: цемент, зола-унос, микрокремнезем, каолиновая глина и т.д. [11]. Но если в обычном бетоне в качестве заполнителей используют песок, щебень или гравий, то в бетоне для трехмерной печати, используют только песок различных фракций, армирование стеклянной или полипропиленовой фиброй, небольшое количество воды для схватывания. Неотъемлемой частью изготавливаемой смеси являются химические добавки, придающие бетону свойства, без которых не обойдется реализация печати (пластификаторы, ускорители или замедлители твердения, водоредуцирующие добавки и т.д.).

## ВИДЫ 3D-ПЕЧАТИ

Динамически развивающиеся быстрыми темпами аддитивные технологии 3D-печати используются в прогрессивных производствах. Существует несколько инновационных видов аддитивных технологий.

**FDM** (Fused deposition modeling) – изделие формируется послойно из расплавленной пластиковой нити. Экструдер – печатающая головка, выдавливающая материал [10]. В данной технологии экструдер выдавливает расплавленный пластик в двумерной плоскости. После нанесения слоя экструдер поднимается и наносится второй слой, который соединяется с первым. Так, из тонкой нити пластика создается трехмерная фигура.

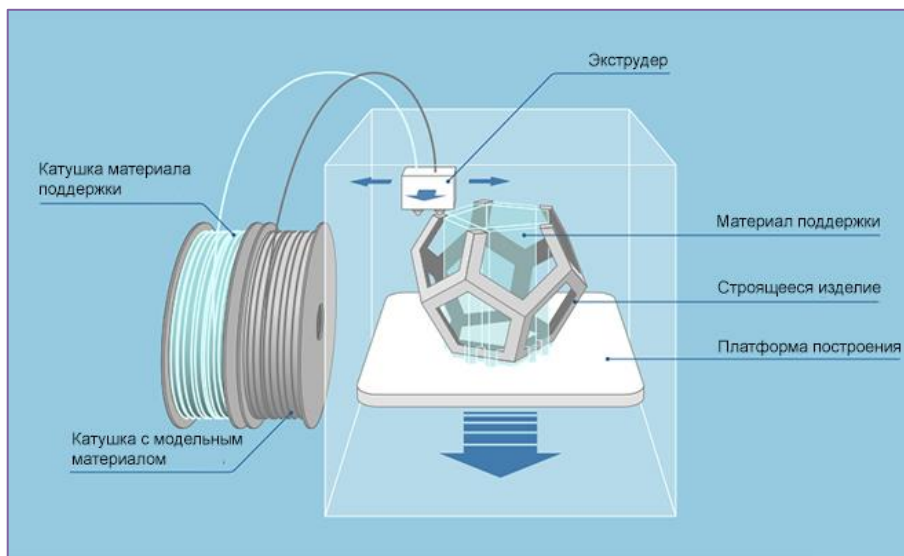


Рис. 7. Принцип работы FDM<sup>5</sup>  
Fig. 7. Principle of operation FDM

**CJP** (ColorJet printing) – единственная в мире 3D полноцветная печать с принципом склеивания порошка, состоящего из гипса. Из порошкообразного материала – гипса, который может быть окрашен в различные цвета, получают послойно склеенные предметы. Порошок раскатывается по рабочей поверхности специальным роликом. Затем на данный слой наносится клеящий состав с помощью аналога печатающей головки. Состав может быть окрашен в разные цвета, а модель, созданная таким способом, разноцветная [10].

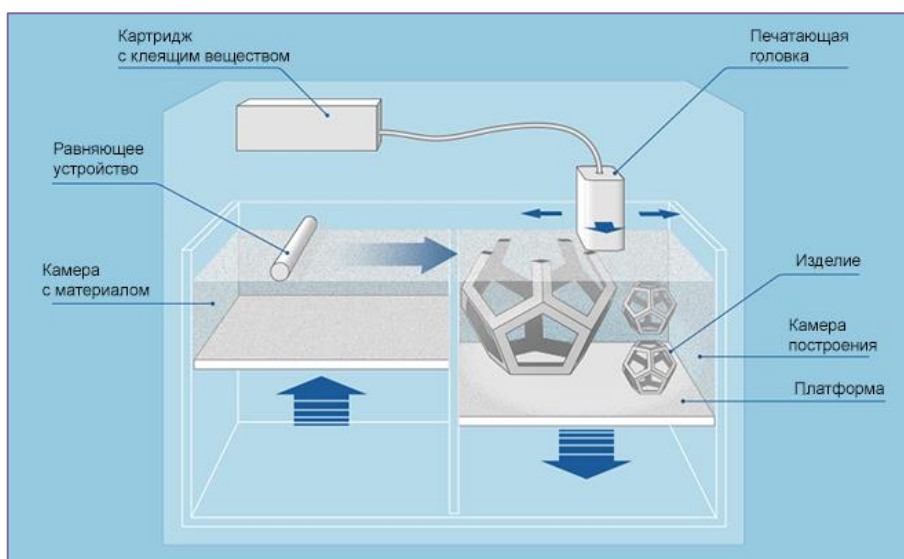
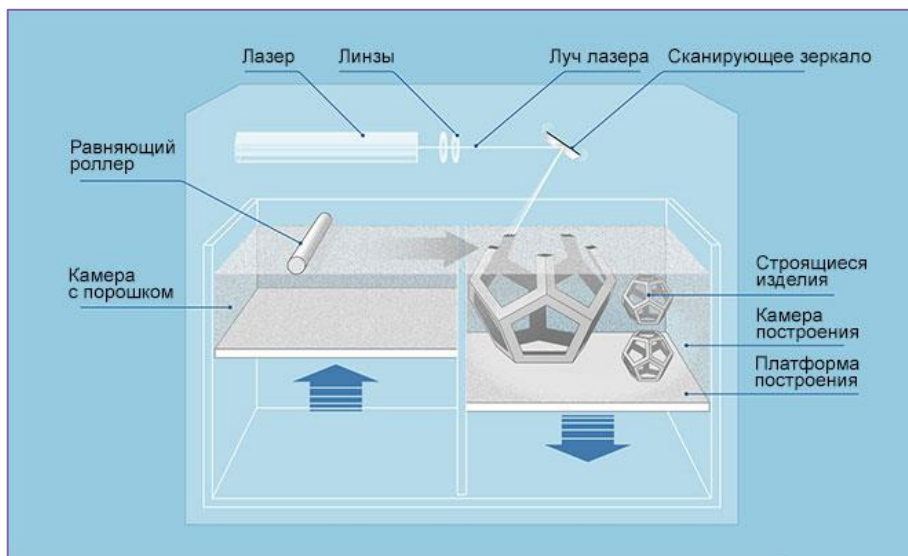


Рис. 8. Принцип работы CJP<sup>6</sup>  
Fig. 8. Principle of operation CJP

**SLS** (Selective Laser Sintering) – технология лазерного запекания, при которой образуются особо прочные изделия различных размеров. Технология, схожая с предыдущей по способу нанесения материала, но затвердевание происходит по-другому: с помощью лазеров высокой мощности происходит спекание материала, разравненного специальным ракелем по рабочей плоскости [10].

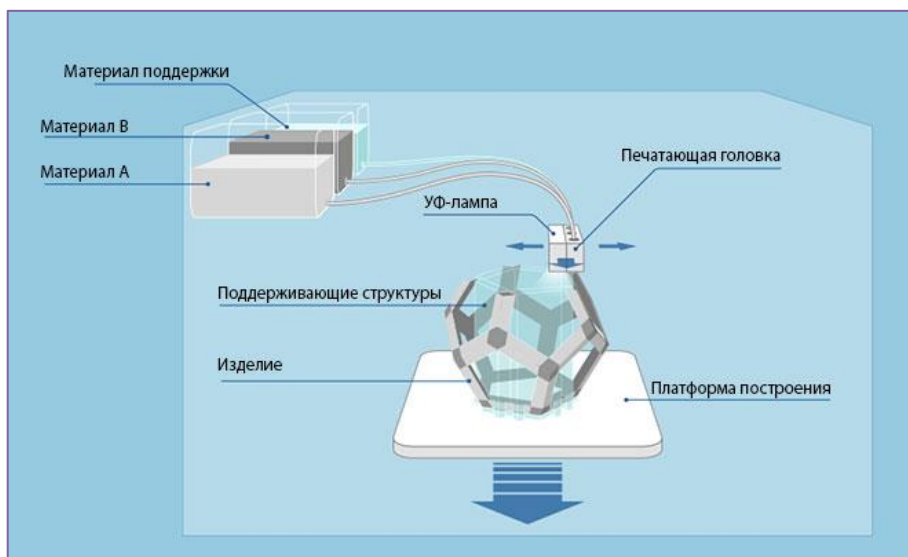
<sup>5</sup> Технология 3D-печати FDM (Fused Deposition Modeling) [Электронный ресурс]. - URL: [https://3d.globatek.ru/3d\\_printing\\_technologies/fdm/](https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/fdm/) (дата обращения: 05.04.2022)

<sup>6</sup> Технология 3D-печати CJP (Color Jet Printing) [Электронный ресурс]. - URL: <https://cybercad.ru/info/articles/tekhnologiya-3d-pechati-cjp-color-jet-printing/> (дата обращения: 05.04.2022)



**Рис. 9.** Принцип работы SLS<sup>7</sup>  
**Fig. 9.** Principle of operation SLS

**MJM** (MultiJet Modeling) многоструйное 3D-моделирование с использованием фотополимеров и воска. Технология многоструйного моделирования подразумевает использование жидкообразного фотополимера, который наносится на рабочую поверхность печатающей головкой при помощи большого количества форсунок и послойно отверждается ультрафиолетовым проектором [10].

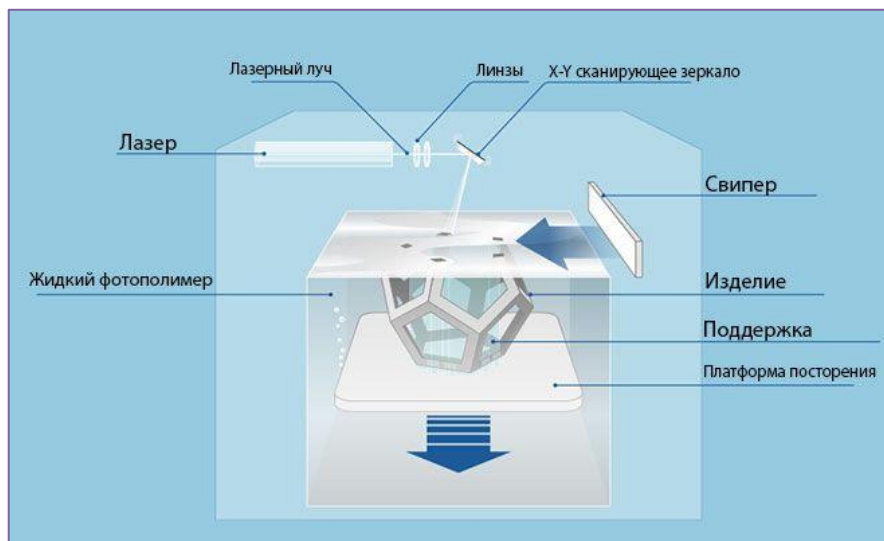


**Рис. 10.** Принцип работы MJM<sup>8</sup>  
**Fig. 10.** Principle of operation MJM

**SLA** (Laser Stereolithography) – при помощи лазера происходит послойное отвердевание жидкого полимера. В ванночку наливается фотополимер, застывающий от ультрафиолетового излучения и после туда опускается плоскость, к которой прикрепляется первый слой. На дне ванны располагается дисплей, который засвечивает определенную область [10]. После данных манипуляций слой полимеризуется на вышележащем, а рабочая поверхность поднимается и происходит засвечивание последующего слоя.

<sup>7</sup> Технология спекания порошков SLS (Selective Laser Sintering) [Электронный ресурс]. - URL: [https://3d.globatek.ru/3d\\_printing\\_technologies/sls-tech/](https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/sls-tech/) (дата обращения: 05.04.2022)

<sup>8</sup> Технология 3D-печати MJM (Multi Jet Modeling) [Электронный ресурс]. - URL: [https://3d.globatek.ru/3d\\_printing\\_technologies/mjm/](https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/mjm/) (дата обращения: 05.04.2022)



**Рис. 11.** Принцип работы SLA<sup>9</sup>  
**Fig. 11.** Principle of operation SLA

Впервые о данной технологии в строительстве было упомянуто в работах профессора Бехроха Хошневиса из Южно-Калифорнийского университета в августе 2012 г. Его научная группа выдвинула идею конструкции огромного, собираемого на строительной площадке 3D-принтера по типу мостового крана. Данный метод стал основополагающим для 3D-принтеров китайской компании WinSun, которая первой напечатала несколько настоящих домов в начале 2014 г. [12]. Уникальность сооружения заключается в использовании запатентованного материала, который представляет собой смесь строительного мусора, бетона и добавок. Такие дома относятся к классу недорогого быстровозводимого жилья.



**Рис. 12.** Пример дома, напечатанный с помощью послойного экструдирования<sup>10</sup>  
**Fig. 12.** An example of a house printed using layer-by-layer extrusion

Метод послойного экструдирования является одним из основных способов 3D-печати большинства строительных принтеров. Суть заключается в том, что рабочее сопло, или экструдер, 3D-машины выдавливает быстротвердеющую смесь (состав смеси может быть различным), в которую включены различные добавки, улучшающие характеристики будущей конструкции. Каждый очередной слой выдавливается 3D-принтером поверх предыдущего, благодаря этому формируется определенная конструкция [12].

<sup>9</sup> SLA 3D-принтер для печати миниатюрных изделий [Электронный ресурс]. - URL: <https://втораяиндустриализация.рф/sla-3d-printer/> (дата обращения: 05.04.2022)

<sup>10</sup> Топ-10 зданий, напечатанных на 3D-принтере [Электронный ресурс]. - URL: [https://www.architime.ru/specarch/top\\_10\\_3d\\_print\\_buildings/3d\\_print.htm](https://www.architime.ru/specarch/top_10_3d_print_buildings/3d_print.htm) (дата обращения: 11.04.2022)



### ПРИМЕРЫ ЗДАНИЙ, ПОСТРОЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Каждый год благодаря постоянному развитию аддитивных технологий появляется всё больше зданий и сооружений, построенных по технологии 3D-печати.

Российский опыт аддитивного строительства начался с октября 2017 года, в Ярославле компания Спецавиа построила первый в СНГ и Европе жилой дом с помощью метода 3D-печати (рис.13).

Развитие аддитивных технологий является критически значимым направлением для Российской Федерации. Основные потребители аддитивных технологий сконцентрированы в стратегически важных для экономики отраслях, таких как авиация и космос (30%), медицина (15%), машиностроение (25%) и центры аддитивного производства (15%), прочие отрасли (15%). Россия к 2030 году намерена стать одним из мировых лидеров в области аддитивных технологий<sup>11</sup>. Для достижения поставленной цели разработана дорожная карта «Технологии новых материалов и веществ», утверждена Стратегия развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 г., создана Ассоциация развития аддитивных технологий.



**Рис. 13.** Полностью напечатанный дом [13]  
**Fig. 13.** Fully printed house



**Рис. 14.** Проект временного жилья для беженцев и лишившихся жилья от природных катаклизмов<sup>12</sup>  
**Fig. 14.** Temporary housing project for refugees and displaced by natural disasters

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СФЕРЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Евдокимов Н.В., Кеутаева А.Н. дают оценку возможности использования древесных отходов в аддитивных технологиях [14]. На основании анализа существующих технологий авторы дают рекомендации по условиям подготовки древесных отходов для их использования в 3D-печати. Авторы анализируют возможность использования древесных отходов, возникающих в целлюлозно-бумажной промышленности, для чего рассматривают одну из распространенных схем древесно-подготовительного цеха ЦБП, которая предполагает образование 2-5% опилок. Приводят описание оборудования, в результате работы которого может образоваться требуемая для 3D-печати фракция древесных отходов [15].

Все больше научных публикаций появляется на тему исследования возможности использования материалов или добавок, характерных для российских регионов. Так, например, в работе [16] Бондарев Б.А., Баязов В.А., Корнеев О.О., Востриков И.А., Мещеряков А.А., Корнеева А.О. приводят результаты экспериментов, позволяющих оптимизировать состав строительных смесей для 3D-печати с помощью использования доменного шлака, который является побочным продуктом ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Результаты подобных исследований представлены в работах [17-19], где Усанова К.Ю., Барабанщиков Ю.Г., Акимов С.В., Беляева С.В., Кротов О.М., Pakrastins L. и другие провели исследования керамзитобетона с добавками молотого гранулированного доменного шлака, микрокремнезема, добавки суперпластификатора и воздухововлекающей добавки для 3D-печати. Исследованы тепловыделение бетона и теплопроводность бетона в зависимости от состава бетона (цемент, водоцементный коэффициент, керамзит), добавок (шлак, микрокремнезем) и примесей (суперпластификатор, воздухововлекающий агент). Также проведены аналогичные исследования бетона с другими добавками. Кириллова Н.К., Алексеева А.Н., Егорова А.Д. [20] привели результаты

<sup>11</sup> Россия к 2030 году намерена стать одним из мировых лидеров в области аддитивных технологий [Электронный ресурс]. - URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/13103861> (дата обращения: 13.08.2022)

<sup>12</sup> Есть ли перспективы у 3D-печати домов в России? [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.oknamedia.ru/novosti/est-li-perspektivy-u-3d-pechati-domov-v-rossii-52305> (дата обращения: 11.08.2022)

исследования свойств глинистого сырья Санниковского, Намцырского и Кангаласского месторождений Республики Саха (Якутия). Загороднюк Л.Х., Елистраткин М.Ю., Подгорный Д.С., Ал Мамури С.К.Ш. представили результаты исследований композиционных вяжущих для аддитивных технологий с использованием портландцемента и техногенных отходов - отходов мокрой магнитной сепарации Старооскольского электрометаллургического комбината, модифицированных добавками-ускорителями и пластификаторами. Авторы доказали эффективность использования полученного композиционного вяжущего, применение которого обеспечивает повышение реологических свойств, а также даёт возможность экономить дорогостоящий портландцемент [21].

В последние годы стали появляться научные исследования в сфере создания строительной смеси, которую можно использовать при отрицательных температурах, что позволит использовать технологию 3D-печати зимой, увеличить продолжительность строительного сезона и расширить географию применения аддитивных технологий [22-25]. Беляева С.В., Баранов А.О., Самохвалова К.А., Клещевникова В.И., Рогозинникова Д.В. провели ряд экспериментов, которые показали, что в качестве компонента по замещению цемента хорошо показал себя доменный шлак. Для применения смеси в условиях пониженных температур необходимо использовать специальные добавки: хлористый натрий, формиат натрия, нитрит натрия, поташ, но их применение зависит от остальных составляющих смеси. Количество противоморозной добавки не должно превышать 25% от массы раствора, превышение этого показателя может привести к потере прочности и образованию высолов [23].

Отдельное внимание исследователи уделяют определению прочностных характеристик напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов [26, 27]. В общем случае, исследования предполагают сравнение прочности на сжатие монолитных и напечатанных на строительном 3D-принтере конструктивных элементов. Более детально основные этапы исследования представлены, например, в работе [27]:

1. Разработка модели для печати в программных комплексах AutoCAD, SheetCAM, Mach3;
2. Печать конструктивных элементов на строительном принтере «АМТ» S-6044;
3. Испытание образцов на прессе Гагарина;
4. Сравнение прочности на сжатие монолитных и напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов.

Перспективным направлением исследований является идея объединить две технологии, которые до недавнего времени существовали абсолютно отдельно: 3D-печать и BIM-технологии. Например, архитектор разрабатывает BIM-модель, а инженер с помощью поэтажного плана или даже всей конструкции здания считает толщину и прочность компонентов, время затвердевания бетона и т.д. Затем эта информация передается инженеру, работающему с 3D-принтером, а он уже в соответствии с ней настраивает скорость печати и т.д. Эти данные крайне важны для 3D-печати и должны храниться в BIM-модели, из которой их можно извлечь в любой момент [28, 29].

Кроме перспектив совместного использования BIM-технологий и 3D-печати необходимо учитывать и возможности строительной техники. Сегодня основным видом техники на строительных площадках по-прежнему являются строительные краны. Для постепенного перехода к автоматизированному строительству Салахова А.В., Демидова Ю.А., Кротов О.М. предлагают возможность повышения функционала стандартного башенного крана, используемого на строительной площадке, для проведения работ по аддитивной печати (для автоматизированного безопасного бетонирования), а также определяют целесообразность такого решения [30].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современном развивающемся мире механизация и цифровизация окружают нас во всех сферах жизни, включая строительство. Одним из примеров автоматизации являются аддитивные технологии или 3D-печать. Строительство является довольно трудной, дорогостоящей и травмоопасной отраслью. В свою очередь 3D-печать имеет несколько главных преимуществ, способных снизить стоимость строительства, уменьшить время возведения зданий, а также снизить количество несчастных случаев, тем самым повысить уровень безопасности на строительной площадке [31]. Было предпринято много усилий для реализации применения возможностей аддитивных технологий, но все еще остаются некоторые практические вопросы.

Исследованиями и разработками аддитивных технологий в строительстве активно занимаются крупные мировые институты, большие строительные компании, отдельные исследователи, которым интересно применение 3D-печати при возведении зданий и сооружений. Ожидается, что улучшение и

оптимизация строительной отрасли будут происходить одновременно сразу по нескольким основным направлениям. Основными тенденциями отечественных научных исследований в сфере материалов для 3D-печати в последние годы являются: использование древесных отходов, доменного шлака и прочих добавок, характерных для российских регионов, поиск наиболее эффективных при отрицательных температурах составов строительной смеси для аддитивной печати, определение прочностных характеристик напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов, возможность совместной работы 3D-печати и BIM-технологий и др. При этом в технологии 3D-печати все еще остается множество неисследованных проблем, требующих более детального изучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панфилова А.Д., Шиняева М.В., Когай В.В., Шаранова А.В. Материалы для аддитивных технологий в строительстве // Дни науки. материалы межвузовской научно-технической конференции студентов и курсантов на базе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет». 2019. С. 372-375.
2. Shatornaya A.M., Chislova M.M., Drozdetskaya M.A., Ptušina I.S. Efficiency of 3D printing in civil engineering // Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. № 9 (60). С. 22-30.
3. Беляева С.В., Кротов О.М., Гокканен А.И., Обмачкин В.А. Применение 3D-принтера в строительной отрасли // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием, Инженерно-строительный институт: В 3 частях. Ответственные редакторы: Н. Д. Беляев, В. В. Елистратов. 2019. С. 83-85.
4. Сабаева С.В. Применение 3D-печати в строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 5(5). С. 39-44. URL: <http://eng-res.ru/archive/2021/5/39-44.pdf>
5. Демиденко А.К., Кулибаба А.В., Иванов М.Ф. Перспективы применения 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 12 (63). С. 71-96. DOI: 10.18720/CUBS.63.4
6. Коротеев Д.Д., Коренева А.И. Применение аддитивных технологий производства в строительстве на примере разработки 3D-модели с последующей печатью // Системные технологии. 2021. № 2 (39). С. 21-30.
7. В Томске разработали первый российский 3D-принтер для работы в космосе [Электронный ресурс]. - URL: <https://ria.ru/20220505/tpu-1786916688.html> (дата обращения: 05.04.2022)
8. Ильина Л.В., Завадская Л.В. Аддитивные технологии в строительстве // В сборнике: Повышение качества и эффективности строительных и специальных материалов. Сборник Национальной научно-технической конференции с международным участием. 2019. С. 200-207.
9. Ильина Л.В., Завадская Л.В. Особенности и задачи строительного материаловедения по освоению 3D-технологий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 10 (718). С. 98-106.
10. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1 (52). С. 27-46. DOI: 10.18720/CUBS.52.3
11. Алексеева А.Н., Егорова А.Д. Применение аддитивных технологий в строительстве и при изготовлении керамических изделий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 134-141.
12. Славчева Г.С. Строительная 3d-печать сегодня: потенциал, проблемы и перспективы практической реализации // Строительные материалы. 2021. № 5. С. 28-36.
13. Михайлов Н.И. 3D-печать в строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 3 (3). С. 28-35. EDN: OHOVFM
14. Евдокимов Н.В., Кеутаева А.Н. Оценка возможности использования древесных отходов в аддитивных технологиях // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 103-109. DOI: 10.46418/2619-0729\_2022\_1\_16
15. Евдокимов Н.В., Кеутаева А.Н. Характеристика древесных отходов при производстве технологической щепы с оценкой возможности их использования в аддитивных технологиях // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2022. № 2. С. 119-122. DOI: 10.46418/2619-0729\_2022\_2\_21
16. Бондарев Б.А., Баязов В.А., Корнеев О.О., Востриков И.А., Мещеряков А.А., Корнеева А.О. Подбор составов смесей для 3D печати // Вестник евразийской науки. 2021. Т. 13. № 3. DOI: 10.15862/29SAVN321
17. Usanova K., Barabanshchikov Yu.G., Pakrastins L., Akimov S.V., Belyaeva S.V. Heat release and thermal conductivity of expanded-clay concrete for 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 2 (102). С. 10210.
18. Usanova K., Barabanshchikov Yu.G., Krasova A.V., Akimov S.V., Belyaeva S.V. Plastic shrinkage of concrete modified by metakaolin // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 3 (103). С. 10314.
19. Шамсутдинова В.Ф., Кротов О.М., Барабанщиков Ю.Г. Расширяющаяся добавка для бетона на основе золы-уноса Назаровской ГРЭС // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. сборник материалов Всероссийской конференции. 2022. С. 351-352.

20. Кириллова Н.К., Алексеева А.Н., Егорова А.Д. Применение аддитивных технологий в строительстве и при изготовлении керамических изделий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 134-141. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-134-141
21. Загороднюк Л.Х., Елистраткин М.Ю., Подгорный Д.С., Ал Мамури С.К.Ш. Композиционные вяжущие для 3D аддитивных технологий // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 4 (80). С. 428-439. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-4-428-439
22. Самохвалова К.А., Клещевникова В.И., Беляева С.В. Экспериментальное исследование свойств бетонных смесей для 3D-печати // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 56-58.
23. Самохвалова К.А., Рогозинникова Д.В., Беляева С.В. Смеси для строительной печати в условиях пониженных температур // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 59-61.
24. Kleshchevnikova V., Belyaeva S., Baranov A. Optimization of mix designs and experimental study of the properties of concrete mix for 3D printing // В сборнике: Proceedings of EECSE 2020. Energy, Environmental and Construction Engineering. Cham, 2021. С. 151-160.
25. Беляева С.В., Клещевникова В.И., Баранов А.О. Оптимизация составов и экспериментальное исследование свойств бетонной смеси для 3D печати // В сборнике: Инженерные задачи: проблемы и пути решения. Материалы II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова. 2021. С. 24-27.
26. Кротов О.М., Птухина И.С. Разработка элементов зданий с помощью мобильного строительного принтера // В сборнике: Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2021. Сборник докладов Второй Национальной научной конференции. Москва, 2022. С. 943-948.
27. Школяр Ф.С., Кротов О.М. Определение прочностных характеристик напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 35-38.
28. Эффективное сочетание BIM и 3D-печати бетоном [Электронный ресурс]. - URL: <https://file-system.ru/poleznaya-informatsiya/news/4865/> (дата обращения: 16.04.2022)
29. Krause M., Otto J. 3D-concrete-printing: Digital data flow with BIM // Bauingenieur. 2019. Т.94. Vol.5. Pp. 171-178.
30. Салахова А.В., Демидова Ю.А., Кротов О.М. Автоматизация башенных кранов с целью строительной 3D-печати // В сборнике: BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры. Материалы V Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией А.А. Семенова. Санкт-Петербург, 2022. С. 246-251.
31. Горелова А.А., Вавилова А.М. Разработка алгоритма действий по предотвращению несчастных случаев на производстве // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2020. С. 104-106.

## ОБ АВТОРАХ

**Герман Андреевич Титов** – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: [german.titov.03@mail.ru](mailto:german.titov.03@mail.ru)

## ABOUT THE AUTHORS

**German A. Titov** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: [german.titov.03@mail.ru](mailto:german.titov.03@mail.ru)