

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 338.12

JEL F63

DOI 10.26425/2658-3445-2026-9-1-102-118

Влияние роста рынка аддитивных технологий и аэрокосмической отрасли на рынок титана



Ссылка на статью

Дегтярева Виктория Владимировна

Канд. экон. наук, доц. каф. управления инновациями

ORCID: 0000-0002-1165-1373

E-mail: iump@mail.ru

Государственный университет управления, г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Изучено влияние изменений динамики рынков аддитивных технологий (3D-печати) и аэрокосмической отрасли на рост рынка титана и его сплавов с учетом сценарного подхода в условиях нестабильности экономики. Проанализированы данные за 10 лет мирового спроса на титан и его сплавы. Рассмотрены варианты применения сплавов титана в различных отраслях. Проведен анализ влияния отрасли на достижения целей устойчивого развития в условиях ужесточения экологических норм. Представлен пошаговый план моделирования оценки темпов роста рынка титана в зависимости от развития отраслей авиакосмической и аддитивных технологий.

С помощью сценарного подхода проанализирована динамика ключевых отраслей-потребителей титана и его сплавов, рассчитана потребность в металле для каждого сценария. Результаты исследования показывают, что до 2050 г. ускоренное внедрение аддитивных технологий и рост аэрокосмического сектора окажут значительное влияние на рынок титана, в то время как традиционные секторы (химическая промышленность, энергетика) сохраняют стабильный спрос.

Расширение применения титана создает для стран-экспортеров, включая Российскую Федерацию, возможности наращивания поставок и развития глубокой переработки сырья. Даны предпосылки дальнейшего развития предлагаемого инструментария с использованием альтернативных и усложненных моделей для оценки темпов роста рынка титана.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Титан, аддитивные технологии, 3D-печать, аэрокосмическая отрасль, рынок цветных металлов, сплавы титана, устойчивое развитие, ESG



ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ

03.11.2025



ДОРАБОТАНА

13.01.2026



ПРИНЯТА К ПУБЛИКАЦИИ

14.01.2026



КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов



ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без спонсорской поддержки



ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Дегтярева В.В. Влияние роста рынка аддитивных технологий и аэрокосмической отрасли на рынок титана // E-Management. 2026. Т. 9, № 1. С. 102–118.



Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

© Дегтярева В.В., 2026.

CURRENT ECONOMIC ISSUES

SCIENTIFIC ARTICLE

THE IMPACT OF ADDITIVE MANUFACTURING AND AEROSPACE MARKET GROWTH ON THE TITANIUM MARKET



Link to the article

Viktoriya V. Degtyareva

Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof. at the Innovation Management Department

ORCID: 0000-0002-1165-1373

E-mail: iump@mail.ru

State University of Management, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The impact of changes in the dynamics of the markets of additive technologies (3D printing) and the aerospace industry on the growth of the titanium market and its alloys has been studied, considering the scenario approach in conditions of economic instability. The data for 10 years of global demand for titanium and its alloys have been analyzed. Possible applications of titanium alloys in various industries have been considered. The analysis of the industry's impact on achieving sustainable development goals in the context of stricter environmental regulations has been carried out. A step-by-step modeling plan has been presented for estimating the growth rate of the titanium market depending on the aerospace and additive technologies industries development.

Using a scenario approach, the dynamics of key consumer industries of titanium and its alloys has been analyzed, and the demand for the metal for each scenario has been calculated. The study results have shown that by 2050, the accelerated implementation of additive technologies and the growth of the aerospace sector will have a significant impact on the titanium market, while traditional sectors (chemical industry, energy) will maintain stable demand.

The increased use of titanium creates opportunities for exporting countries, including Russia, to increase supplies and develop deep processing of raw materials. The prerequisites for further development of the proposed toolkit using alternative and sophisticated models to assess the growth rate of the titanium market have been given.

KEYWORDS

Titanium, additive technologies, 3D printing, aerospace industry, non-ferrous metals market, titanium alloys, sustainable development, ESG



RECEIVED

03.11.2025



REVISED

13.01.2026



ACCEPTED

14.01.2026



CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest



FINANCING

The study was carried out without sponsorship



FOR CITATION

Degtyareva V.V. (2026) The impact of additive manufacturing and aerospace market growth on the titanium market. E-Management, vol. 9, no. 1, pp. 102–118. DOI: 10.26425/2658-3445-2026-9-1-102-118



This is an open access article under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

© Degtyareva V.V., 2026.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

В условиях стремления мирового сообщества достижения показателей политики декарбонизации сформировался устойчивый тренд, который декларирует что транспорт и промышленность в настоящее время являются одними из основных источников выбросов парниковых газов [Башмаков, 2022; Дмитриев, 2022, Дуненкова, 2025]. Статистика мирового банка подтверждает незначительное повышение «Углеродоемкости валового внутреннего продукта (кг CO₂-экв. на 2021 г. по паритету покупательской способности в долл. США)» в Российской Федерации (далее — РФ, Россия) по данному показателю с 0,34 в 2021 г. до 0,35 в 2023 г.¹

В условиях ужесточения экологических норм и стремления к снижению веса конструкций изделий растет спрос на материалы с высокими удельными характеристиками, которые могут снизить выбросы углекислого газа и тем самым приблизить показатели к заявленным, представленным в Климатической доктрине РФ [Сериков, 2023, Марюшин, 2023]². К таким материалам можно отнести титан.

Прослеживается повышение спроса на изделия, изготовленные альтернативным способом, с использованием 3D-технологий, а также активное применение кастомизированного подхода в отрасли авионики при изготовлении уникальных элементов для будущих высокотехнологичных изделий.

В рамках настоящего исследования автором ставится гипотеза о влиянии роста рынка аддитивных технологий и аэрокосмической отрасли на рынок титана.

Цель настоящего исследования — провести анализ при помощи сценарного подхода динамики спроса на титан до 2050 г. и оценку влияния ключевых драйверов роста на рынок на примере трех видов сценариев:

- 1) базового сценария при сохранении текущих тенденций роста аэрокосмического сектора и умеренного внедрения аддитивных технологий;
- 2) интенсивного сценария при ускоренном развитии 3D-печати и расширении применения титана в новых отраслях;
- 3) консервативного сценария при замедлении роста из-за высокой стоимости титана и развития альтернативных материалов.

ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ДИНАМИКА РЫНКА ТИТАНА / PREREQUISITES FOR THE APPLICATION AND INDUSTRY DYNAMICS OF THE TITANIUM MARKET

Титановые сплавы, сочетающие малый вес с высокой прочностью и коррозионной стойкостью, становятся ключевым материалом в аэрокосмической отрасли, медицине и энергетике. Титан в природе преимущественно встречается в форме ряда минералов, таких как ильменит (FeTiO₃), рутил (TiO₂) и титанит (CaTiOSiO₄). Другие минералы, содержащие титан, включают анатаз, брукит, лейкоксен, лопарит и перовскит. Однако промышленное и экономическое значение имеют в первую очередь ильменит, лейкоксен и рутил.

В металлической форме титан ценится за исключительную коррозионную стойкость и высокое отношение прочности к весу. Тем не менее до 95 % всего добываемого титана потребляется в виде диоксида титана (TiO₂), который выступает в роли белого пигмента в лакокрасочной, целлюлозно-бумажной и пластиковой промышленности. Ключевыми характеристиками, определяющими эффективность пигментного диоксида титана, являются его чистота, показатель преломления, распределение частиц по размерам и их поверхностные свойства. Для достижения оптимальных оптических свойств размер частиц целенаправленно регулируется в интервале приблизительно 0,2–0,4 мкм. Доминирующее положение TiO₂ в качестве белого пигмента обусловлено его аномально высоким показателем преломления, что обеспечивает выдающуюся способность к рассеянию видимого света и, как следствие, превосходную укрывистость и яркость.

Эффективность применения титана в различных отраслях широко представлен в научных исследованиях. Так, в статье Р.Р. Кяримова и соавторов рассмотрен способ «технологии послойного порошкового селективного лазерного сплавления при производстве сложных нетехнологичных элементов космической техники из титана» [Кяримов, 2022]. В медицинском направлении многие авторы представляют уникальные свойства титана, которые применяются в имплантологии, от антикоррозионных свойств до разработки медицинских материалов из никелида титана для имплантатов с формой памяти [Тлешев, 2024; Гюнтер, 2022]. В энергетике интерес

¹ Динамика показателя «Углеродоемкость ВВП Российской Федерации за 2021–2023 гг. (кг CO₂-экв. на 2021 г. по паритету покупательской способности в долл. США). Режим доступа: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators> (дата обращения: 02.11.2025).

² Указ Президента Российской Федерации от 26 октября 2023 г. № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации». Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49910> (дата обращения: 02.11.2025).

к титану представлен опосредовано через внедрение технологий, позволяющих экономить водород при используемых технологических решениях. В статье Н.В. Чиркуновой и соавторов рассмотрено, каким образом в «зеленой» энергетике можно сократить потери водорода с использованием диоксида титана [Chirkunova, 2023]. Особенно перспективно применение титана в аддитивных технологиях, позволяющих создавать сложные детали с минимальными отходами материала [Жердева, 2024].

Однако рынок титана сталкивается с рядом вызовов, таких как высокая стоимость производства, концентрация добычи в нескольких странах, зависимость от энергоемких процессов. Основная часть добытого титана по данным на 2024 г. сосредоточена в Китае (3 300 тыс. т), Мозамбике (1 900 тыс. т), Южной Африке (1 300 тыс. т)³. Доля России в добыче титана незначительна по мировым меркам. По данным агентства маркетинговых исследований DISCOVERY Research Group, объем рынка диоксида титана в 2020 г. составлял 88,28 тыс. т⁴. Основное производство титана расположено в Крыму, в Армянске (Крымский титан), а также в Соликамске, в открытом акционерном обществе «Соликамский магниевый завод», Верхнесалдинском публичном акционерном обществе «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», а также на «Ключевском заводе ферросплавов» в Свердловской области [Машковцев, 2016]. Эти факторы могут замедлить распространение применения титана в новых отраслях. Согласно прогнозным значениям, представленным консалтинговой компанией Spherical Insights, предполагается мировой рост рынка титана с 19,5 млрд долл. США в 2023 г. до 33,5 млрд долл. США к 2033 г.⁵

Следует отметить повышенный спрос на изделия, изготовленные при использовании промышленной 3D-печати. Согласно аналитическим оценкам, в 2024 г. объем мирового рынка промышленной 3D-печати составил 3,56 млрд долл. США. Прогнозируется, что в период с 2025 г. по 2034 г. рынок будет стабильно расти со среднегодовым темпом 21,04 %, достигнув к концу этого срока отметки в 24,03 млрд долл. США⁶. Основными факторами роста являются потребность в быстром прототипировании, кастомизации и повышении экономических преимуществ [Токарев, 2024].

Как уже упоминалось выше, все чаще аддитивные технологии применяются в уникальных областях, требующих кастомизированного подхода, что при традиционном подходе является сложным и затратным процессом при проведении этапа протитипирования. Это подтверждается прогнозом для глобального металлического рынка 3D-принтеров, который конституирует рост с 14,7 млрд долл. США в 2024 г. до 37,85 млрд долл. США в 2033 г., что составляет CAGR 12,8 % в период, согласно исследованию Future Market Report⁷. Так, в аэрокосмической отрасли эти технологии применяются при изготовлении нестандартных датчиков и пультов управления, авионике — при изготовлении уникальных деталей для двигателей (например, кронштейнов), в электроэнергетике — при производстве турбинных лопаток используются аддитивные технологии 3D-печати с использованием титана [Рожкова, 2023]. Согласно исследованиям, технологическая цепочка изготовления изделий из титана при применении аддитивных технологий обеспечивает следующие эффекты [Полькин, 2015, Алфимов, 2022]:

- сокращение количества операций технологического процесса;
- сокращение используемой электроэнергии в технологическом процессе;
- повышение коэффициента использования металла.

При этом следует отметить, что для аддитивных технологий используются определенные титановые сплавы, такие как Ti-6Al-4V (5 класс), Ti-6Al-4V ELI, Ti-5553, Ti-1023, Ti-13V-11Cr-3Al, которые обладают уникальными характеристиками, подходящими именно для определенного вида изделий⁸.

Динамику мирового рынка аэрокосмической авионики, который в 2024 г. был оценен в 47,5 млрд долл. США, определяет растущий спрос на электрические и гибридные самолеты. Ожидается, что под влиянием этого тренда рынок будет устойчиво расти со среднегодовым темпом 9,6 % в течение прогнозируемого

³ National Minerals Information Center. Titanium Mineral Concentrates. Titanium Statistics and Information. Режим доступа: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-titanium-minerals.pdf> (дата обращения: 02.11.2025).

⁴ Discovery Research Group. Анализ рынка диоксида титана в России. Аналитический отчет. Режим доступа: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Otchet_DEMO_Analiz_rynka_dioksida_titana.pdf (дата обращения: 02.11.2025).

⁵ Spherical Insights. Прогнозы мирового рынка диоксида титана на 2033 год. Режим доступа: <https://www.sphericalinsights.com/ru/reports/titanium-dioxide-market> (дата обращения: 02.11.2025).

⁶ Объем рынка промышленной 3D-печати и прогноз на 2025–2034 годы. Режим доступа: <https://www.precedenceresearch.com/industrial-3d-printing-market> (дата обращения: 02.11.2025).

⁷ Обзор рынка 3D-печать металлов. Режим доступа: <https://www.futuremarketreport.com/ru/industry-report/3d-printing-of-metals-market/> (дата обращения: 02.11.2025).

⁸ Обзор аддитивного производства титана. Режим доступа: <https://met3dp.com/ru/titanium-additive-manufacturing-20231106/> (дата обращения: 02.11.2025).

периода (2025–2034 гг.). В мировом представлении прогнозы роста в рассматриваемой отрасли по данным, полученным от консалтинговой компании Gminsights, могут отнести рынок к среднерастущему⁹.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ / RESEARCH MATERIALS AND METHODS

Для раскрытия поставленной гипотезы предлагается комплексный подход, основанный на построении множественной регрессионной модели. Это наиболее прозрачный и интерпретируемый способ количественно оценить влияние каждого фактора, влияющего на рост рынка титана. Некоторые авторы уже ставили перед собой такую задачу в исследованиях [Скоколов, 2020].

Ключевая идея модели состоит в следующем. Предлагается моделировать спрос на титан как функцию от показателей развития аддитивных технологий и аэрокосмической отрасли, а также контрольных переменных.

Наиболее универсальным и понятным методом является множественная регрессия. Она даст четкий количественный ответ. Модель множественной линейной регрессии, описывающая взаимосвязь факторов, представлена в формуле (1):

$$Q_Ti_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot Aero_t + \beta_2 \cdot Additive_t + \gamma \cdot Controls_t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где Q_Ti_t — зависимая переменная (объем рынка титана в году t , т потребления/производства титана в год, или объем продаж (денежное выражение) титана в год), $Aero_t$ — объясняющая переменная 1 (показатель развития аэрокосмической отрасли, измеряемая в виде объема производства/заказов в аэрокосмической отрасли в денежном выражении, количестве произведенных самолетов, выручке ведущих аэрокосмических компаний), $Additive_t$ — объясняющая переменная 2 (показатель развития рынка аддитивных технологий, измеряемая в виде объема рынка аддитивного машиностроения (продажи 3D-принтеров для металлов), расходов на металлические порошки для 3D-печати, количество выданных патентов в области металлической аддитивной печати (данные именно по металлической 3D-печати, в идеале — по сегменту титановых порошков), $Controls_t$ — массив контрольных переменных.

Другие факторы, влияющие на рынок титана:

– темпы роста валового внутреннего продукта (общий экономический спрос) — GDP_t (англ. Gross Domestic Product);

– ε_t — случайная ошибка модели;

– $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \gamma$ — оцениваемые параметры (коэффициенты регрессии).

После оценки модели на исторических данных (временные ряды за 10–20 лет) можно получить конкретные числовые значения коэффициентов.

β_1 (коэффициент $Aero$) показывает на сколько единиц изменится спрос на титан при росте показателя аэрокосмической отрасли на одну единицу при прочих равных условиях (включая развитие аддитивных технологий). Например, увеличение выручки аэрокосмического сектора на 1 млрд долл. США может привести к росту спроса на титан на X т.

β_2 (коэффициент $Additive$) показывает на сколько единиц изменится спрос на титан при росте показателя рынка аддитивных технологий на одну единицу при прочих равных условиях (включая развитие аэрокосмической отрасли). Например, рост рынка металлических 3D-принтеров на 10 % ведет к увеличению спроса на титан на Y т.

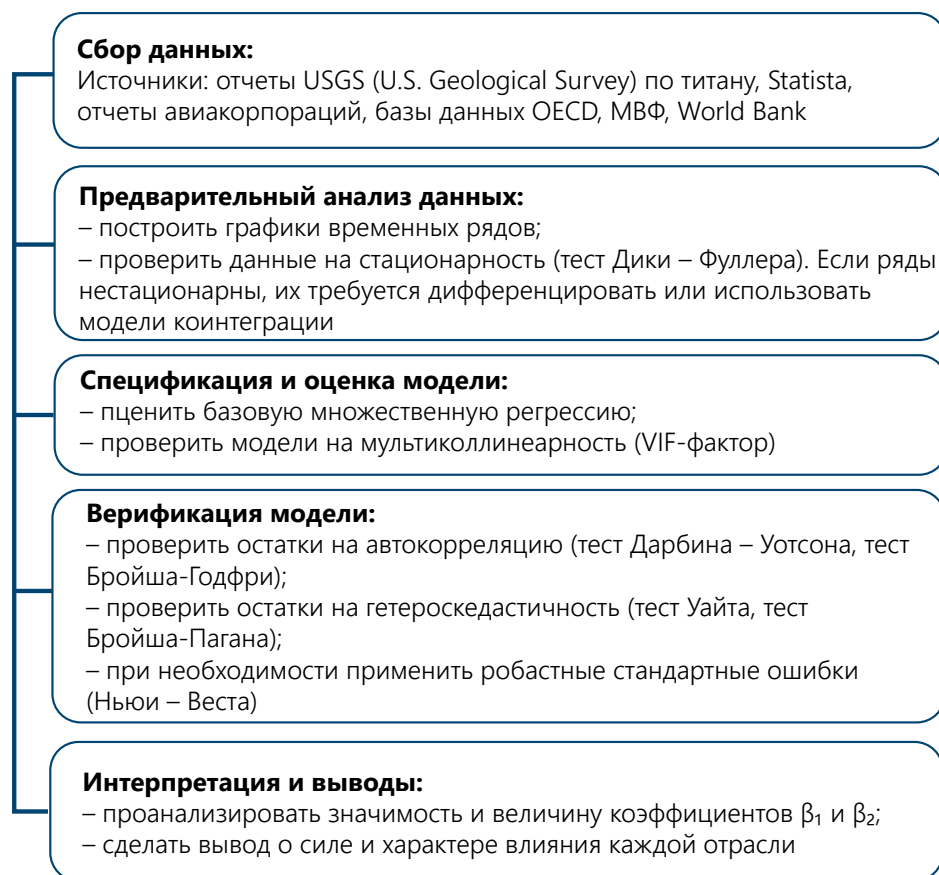
Условия и ограничения, которые ставятся в рамках данной модели, состоят в том, что ожидается, что коэффициент $\beta_1 > 0, \beta_2 > 0$. Оба коэффициента будут положительными и статистически значимыми.

В краткосрочной перспективе β_1 будет больше, так как аэрокосмическая отрасль традиционно является крупнейшим потребителем титана¹⁰. Однако β_2 может иметь более высокие темпы роста.

Пошаговый план реализации при моделировании оценки темпов роста рынка титана в зависимости от развития отраслей авиакосмической и аддитивных технологий представлен на рис. 1.

⁹Аэрокосмическая авионика. Размер рынка. Режим доступа: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/aerospace-avionics-market> (дата обращения: 02.11.2025).

¹⁰ Спрос vs геополитика: рынок титана 2023. Режим доступа: https://roscongress.org/materials/spros-vs-geopolitika-rynok-titana-2023/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (дата обращения: 02.11.2025).



Примечание: МВФ – Международный валютный фонд

Составлено авторами по материалам исследования / *Compiled by the authors on the materials of the study*

Рис. 1. Моделирование оценки темпов роста рынка титана в зависимости от развития отраслей авиакосмической и аддитивных технологий

Fig. 1. Modeling the growth rate of the titanium market depending on the development of the aerospace and additive manufacturing industries

На основе модели можно построить прогноз спроса на титан при разных сценариях развития отраслей аэрокосмической и аддитивных технологий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ / STUDY RESULTS

На первом этапе необходимо провести сбор данных по исследуемым рынкам и их проанализировать, а именно построить графики временных рядов, проверить данные на стационарность.

Динамика мирового производства ильменита и рутила (суммарно) за 2014–2024 гг., используемых при производстве титановых сплавов, а затем при переделах для производства специализированных сплавов для аддитивных технологий, представлены на рис. 2, где 2014 г. принимается за 100 %.

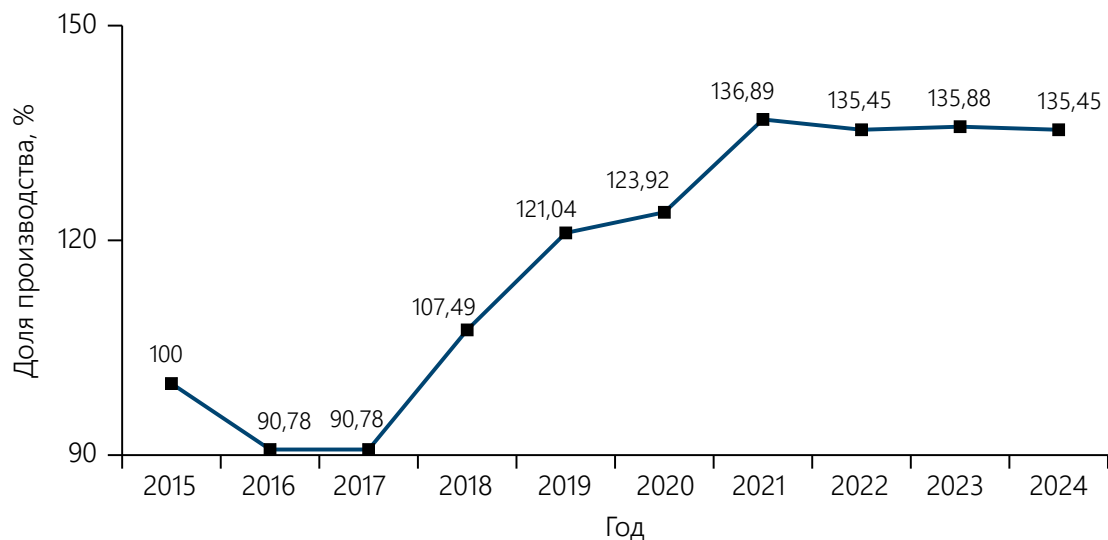
Далее следует провести расчет динамики общемирового производства титаносодержащих концентратов методом наименьших квадратов для подтверждения, что мировой тренд будет в дальнейшем меняться примерно с одинаковым темпом прироста. Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.

Расчет параметров линейного тренда производится в несколько этапов.

1. Вычисление средних значений:

– $\bar{x} = (2015 + 2016 + \dots + 2024)/10 = 2019,5$;

– $\bar{y} = 82\,730 / 10 = 8\,273$.



Составлено авторами по материалам источника¹¹ / Compiled by the authors on the materials of the source¹¹

Рис. 2. Динамика мирового производства ильменита и рутила (суммарно) за 2015–2024 гг.

Fig. 2. Dynamics of global production of ilmenite and rutile (in total) for 2015–2024

Таблица 1. Исходные данные динамики общемирового производства титансодержащих концентратов для расчета линейного тренда

Table 1. Initial data on the dynamics of global production of titanium-containing concentrates for calculating the linear trend

Год (x)	Производство, тыс. т (y)	x - \bar{x}	y - \bar{y}	(x - \bar{x}) ²	(x - \bar{x})(y - \bar{y})
2015	6 940	- 4,5	- 1 333	20,25	5 998,5
2016	6 300	- 3,5	- 1 973	12,25	6 905,5
2017	6 300	- 2,5	- 1 973	6,25	4 932,5
2018	7 460	- 1,5	- 813	2,25	1 219,5
2019	8 400	- 0,5	127	0,25	- 63,5
2020	8 600	0,5	327	0,25	163,5
2021	9 500	1,5	1 227	2,25	1 840,5
2022	9 400	2,5	1 127	6,25	2 817,5
2023	9 430	3,5	1 157	12,25	4 049,5
2024	9 400	4,5	1 127	20,25	5 071,5
Σ	82 730	0,0	0	82,50	32 935,5

Составлено авторами по материалам источника¹² / Compiled by the authors on the materials of the source¹²

2. Расчет коэффициентов линейного уравнения:

$$y = a + bx, \quad (2)$$

при этом значения a и b коэффициентов рассчитываются исходя из данных табл. 1:

$$b = \Sigma[(x - \bar{x})(y - \bar{y})] / \Sigma[(x - \bar{x})^2] = 32 935,5 / 82,5 \approx 399,22; \quad (3)$$

$$a = \bar{y} - b \times \bar{x} = 8 273 - 399,22 \times 2019,5 \approx - 799,9558. \quad (4)$$

После проведенных расчетов коэффициентов уравнение тренда приобретает в данном случае следующий вид:

$$y = - 799,9558 + 399,22x. \quad (5)$$

¹¹ National Minerals Information Center. Titanium Mineral Concentrates. Titanium Statistics and Information. Режим доступа: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-titanium-minerals.pdf> (дата обращения: 02.11.2025).

¹² Там же.

Прогнозные значения и отклонения представлены в табл. 2.

Таблица 2. Прогнозные значения и отклонения динамики общемирового производства титаносодержащих концентратов для расчета линейного тренда

Table 2. Forecast values and deviations in the dynamics of global production of titanium-containing concentrates for calculating the linear trend

Год	Факт, тыс. т	Прогноз, тыс. т	Отклонение, тыс. т	Отклонение, %
2015	6 940	6 996	– 56	– 0,8
2016	6 300	7 395	– 95	– 1,5
2017	6 300	7 794	– 494	– 7,8
2018	7 460	8 194	– 734	– 9,8
2019	8 400	8 593	– 193	– 2,3
2020	8 600	8 992	– 392	– 4,6
2021	9 500	9 391	109	1,1
2022	9 400	9 791	– 391	– 4,0
2023	9 430	10 190	– 760	– 8,1
2024	9 400	10 589	– 1 189	– 12,6

Составлено авторами по материалам источника¹³ / Compiled by the authors on the materials of the source¹³

Рассчитанные статистические показатели представляются следующими значениями, подтверждающими тренд заявленного роста в том числе разными источниками, описанными выше в исследовании.

Мировое производство титановых концентратов имеет стабильную положительную динамику со средним приростом около 400 тыс. т в год. Качество выбранной модели высокое ($R^2 = 0,72$). Это подтверждает, что линейный тренд хорошо описывает общую тенденцию. В последние годы наблюдается отставание фактических значений от тренда (с 2022 г.), что может указывать на:

- временную стабилизацию рынка;
- влияние экономических факторов;
- изменение рыночной конъюнктуры.

Прогноз производства титановых концентратов на 2025 г., согласно описанной модели, составит:

$$y = -799,9558 + 399,22 \cdot 2025 \approx 10,788 \text{ тыс. т.} \quad (6)$$

Тренд демонстрирует устойчивый рост мирового производства титановых концентратов на протяжении анализируемого периода.

Данные по динамике объема рынка аэрокосмической отрасли за 2015–2024 гг. (млрд долл. США) были собраны на основе:

- открытых источников Statista — глобальной онлайн-платформы, предоставляющей обширную базу данных рыночных, потребительских и отраслевых статистических данных, прогнозов и аналитических отчетов для бизнеса, исследователей и средств массовой информации (Aerospace Market Size)¹⁴;
- IBISWorld — ведущего глобального поставщика комплексной бизнес-аналитики и отраслевых исследований (Aerospace Report)¹⁵;
- GADS FAA — данных по программе Федерального управления гражданской авиации Соединенных Штатов Америки (FAA), связанных с поддержкой дистрибьюторов и услуг в сфере общей авиации¹⁶;

¹³ National Minerals Information Center. Titanium Mineral Concentrates. Titanium Statistics and Information. Режим доступа: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-titanium-minerals.pdf> (дата обращения: 02.011.2025).

¹⁴ Statista. Объем мирового рынка аэрокосмических услуг. Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/807717/aerospace-services-market-size-by-region/> (дата обращения: 02.11.2025).

¹⁵ IBISWorld. Global Military Aircraft & Aerospace Manufacturing industry analysis. Режим доступа: <https://www.ibisworld.com/global/industry/global-military-aircraft-aerospace-manufacturing/1060/> (дата обращения: 02.11.2025).

¹⁶ Отчеты FAA об экономическом влиянии. Режим доступа: https://www.faa.gov/about/plans_reports#eir (дата обращения: 02.11.2025).

Они также реконструированы на основе данных мирового рынка аэрокосмического титана (табл. 3)¹⁷. Динамика подтверждает положительный тренд роста по данному показателю с 2015 г. по 2019 г. 2020 г. отражает снижение объема данного рынка в связи с влиянием пандемии COVID-19. Далее показатели постепенно начинают расти.

Таблица 3. Объем рынка аэрокосмической отрасли реконструкция мирового рынка аэрокосмического титана за 2015–2024 гг.

Table 3. Aerospace market volume: reconstruction of the global aerospace titanium market for 2015–2024

Год	Объем рынка аэрокосмической отрасли, млрд долл. США	Потребление титана, тыс. т	Объем рынка аэрокосмического титана, млрд долл. США
2015	698	98,5	2,45
2016	716	102,5	2,55
2017	738	107,8	2,68
2018	768	114,7	2,85
2019	798	106,6	2,65
2020	572	82,4	2,05
2021	612	98,5	2,45
2022	685	118,6	2,95
2023	752	140,7	3,50
2024	825	154,8	3,85

Составлено авторами по материалам источника¹⁸ / *Compiled by the authors on the materials of the source*¹⁸

Динамика следующей группы показателей отрасли металлических порошков для аддитивных технологий были реконструированы на основе представленных пресс-релизов по объему рынка за 2020–2022 гг. и на основе CAGR (англ. Compound Annual Growth Rate) — совокупного среднегодового темпа роста, который показывает на сколько процентов в среднем ежегодно растет показатель в течение определенного периода с учетом сложного процента. Он составил 20–25%¹⁹. Автор также опирался на структуру рынка титановых порошков, доля которых составляет 25–30 % рынка металлических порошков (табл. 4)²⁰. Здесь по динамике показателей схожая картина. В 2020 г. происходило проседание объемов рынка из-за влияния COVID-19. Далее рынок показывает положительную динамику.

Таблица 4. Реконструкция данных общемирового производства титановых порошков

Table 4. Reconstruction of global titanium powder production data

Год	Оценка рынка металлических порошков, млн долл. США	Обоснование	Оценка рынка титановых порошков, млн долл. США
2015	~320,000–380,000	Базовый год	105
2016	~390,000–470,000	Рост 22 %	129
2017	~480,000–580,000	Рост 23 %	159
2018	~590,000–710,000	Рост 22 %	195
2019	~720,000–870,000	Рост 22 %	238,5
2020	780,000	Факт из Wohlers	234

¹⁷ Размер мирового рынка аэрокосмического титана. Режим доступа: <https://www.sphericalinsights.com/ru/reports/aerospace-titanium-market> (дата обращения: 02.11.2025).

¹⁸ IBISWorld. Global Military Aircraft & Aerospace Manufacturing industry analysis. Режим доступа: <https://www.ibisworld.com/global/industry/global-military-aircraft-aerospace-manufacturing/1060/> (дата обращения: 02.11.2025).

¹⁹ Анализ. Тенденции. Прогнозы. 3D-печать и аддитивное производство: состояние отрасли. Пресс-релизы. Режим доступа: <https://wohlersassociates.com/category/press-releases/> (дата обращения: 02.11.2025).

²⁰ Металлические порошки для рынка аддитивного производства. Режим доступа: <https://www.transparencymarketresearch.com/metal-powders-additive-manufacturing-market.html> (дата обращения: 02.11.2025).

Окончание табл. 4

Год	Оценка рынка металлических порошков, млн долл. США	Обоснование	Оценка рынка титановых порошков, млн долл. США
2021	960,00	Факт из Wohlers	288
2022	1,20	Факт из Wohlers	360
2023	1,44	Оценка на основе 20 % роста	432
2024	~1,73	Прогноз 20 % рост	519

Составлено авторами по материалам источников^{21,22} / *Compiled by the authors on the materials of the sources*^{20,21}

Данные по темпам роста валового внутреннего продукта (далее — ВВП) как показателя, оказывающего влияние на рынок титана, представлен в табл. 5 на основе данных WorldBank²³. Динамика показателей также показывает проседание по данному показателю в 2020 г., как и в ранее представленных рынках.

Таблица 5. Динамика роста ВВП в 2015–2024 гг.

Table 5. GDP growth dynamics 2015–2024

Год	Темп роста ВВП, годовой %
2015	3,1
2016	2,8
2017	3,5
2018	3,3
2019	2,7
2020	– 2,8
2021	6,4
2022	3,4
2023	2,9
2024	2,9

Составлено авторами по материалам источника²⁴ / *Compiled by the authors on the materials of the source*²⁴

Для оценки коэффициентов модели следует оценить потребление титана в аэрокосмической отрасли. При мировом производстве титанового концентрата (табл. 2) ~10,000 тыс. т → 6,500–7,000 тыс. т используется в аэрокосмической отрасли²⁵. При выручке сектора 800–900 млрд долл. США показатель составляет 18–22 т на 1 млрд долл. США:

$$\beta_1(Aero) = 6\,500 / 800 = 8,125 \text{ т/млрд долл. США.} \quad (7)$$

Для оценки коэффициента β_2 следует обратиться к исследованиям по рынку металлических порошков. Ранее упоминалось, что из всех металлических порошков 25–30 % — титановые. При плотности титана 4,5 г/см³ → 1 т = 50–80 млрд долл. США.

Расчет по данному показателю будет следующий:

- рынок металлических порошков на 2024 г. — 1,730 млн долл. США (табл. 4);
- доля титана — 30,0 % → 519 млн долл. США на 2024 г. (табл. 4);

²¹ Анализ. Тенденции. Прогнозы. 3D-печать и аддитивное производство: состояние отрасли. Пресс-релизы. Режим доступа: <https://wohlersassociates.com/category/press-releases/> (дата обращения: 02.11.2025).

²² Металлические порошки для рынка аддитивного производства. Режим доступа: <https://www.transparencymarketresearch.com/metal-powders-additive-manufacturing-market.html> (дата обращения: 02.11.2025).

²³ WorldBank. Пост ВВП (годовой %). Режим доступа: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?end=2024&start=2015> (дата обращения: 02.11.2025).

²⁴ Там же.

²⁵ Статистика и информация о титане. Режим доступа: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/titanium-statistics-and-information> (дата обращения: 02.11.2025).

- цена титанового порошка — ~80 тыс. долл. США/т²⁶;
 - количество титана = 519 млн долл. США / 80 тыс. долл. США = 6,488 т.
- Получаем следующее значение:

$$\beta_2(Additive) = 6,488 / 1,73 = 3,75 \text{ т/млрд долл. США.} \quad (8)$$

Расчет γ для ВВП будет построен через нормализацию к среднему уровню данных за 10 лет. Среднегодовое потребление титана за рассматриваемые периоды составило 8,273 тыс. т (табл. 2). Среднегодовой рост ВВП — 2,78 % (табл. 5). Если эластичность составляет 0,8–1,0 (что типично для промышленных металлов), тогда γ будет рассчитана по формуле:

$$\gamma = \text{Эластичность} \times (Q_Ti / GDP). \quad (9)$$

По расчетам $\gamma = 0,9 \times (8\,273 / 2,78) \approx 26,8$.

β_0 (константа) рассчитывается методом наименьших квадратов при оценке полной регрессионной модели. Исходные данные представлены на основе ранее рассчитанных данных из табл. 2–5 и агрегированы в табл. 6.

Таблица 6. Исходные данные для расчетной модели

Table 6. Initial data for the calculation model

Год	Q_Ti	<i>Aero</i>	<i>Additive</i>	<i>GDP</i>
2015	6 996	2,45	105,0	3,1
2016	7 395	2,55	129,0	2,8
2017	7 794	2,68	159,0	3,5
2018	8 194	2,85	195,0	3,3
2019	8 593	2,65	238,5	2,7
2020	8 992	2,05	234,0	– 2,8
2021	9 391	2,45	288,0	6,4
2022	9 791	2,95	360,0	3,4
2023	10 190	3,50	432,0	2,9
2024	10 589	3,85	519,0	2,9

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Расчет средних значений:

– $Q_Ti = (6\,996 + 7\,395 + 7\,794 + 8\,194 + 8\,593 + 8\,992 + 9\,391 + 9\,791 + 10\,190 + 10\,589) / 10 = 8\,792,5$ тыс. т;

– $Aero = (2,45 + 2,55 + 2,68 + 2,85 + 2,65 + 2,05 + 2,45 + 2,95 + 3,50 + 3,85) / 10 = 2,788$ млрд долл. США;

– $Additive = (105,0 + 129,0 + 159,0 + 195,0 + 238,5 + 234,0 + 288,0 + 360,0 + 432,0 + 519,0) / 10 = 265,95$ млрд долл. США;

– $GDP = (3,1 + 2,8 + 3,5 + 3,3 + 2,7 - 2,8 + 6,4 + 3,4 + 2,9 + 2,9) / 10 = 2,84$ %.

Исходя из формулы (1), можно провести ее трансформацию для определения β_0 :

$$\beta_0 = Q_Ti - \beta_1 \cdot Aero - \beta_2 \cdot Additive - \gamma \cdot GDP. \quad (10)$$

Исходя из вышеприведенных расчетов и определенных коэффициентов β_0 будет равен:

$$\beta_0 = 8\,792,5 - 8,125 \cdot 2,788 - 3,75 \cdot 265,95 - 26,8 \cdot 2,84 \approx 7\,696 \text{ тыс. т.} \quad (11)$$

После определения всех элементов линейной регрессионной модели ее окончательный вид на основе формулы (1) для оценки сценариев будет выглядеть следующим образом:

$$Q_Ti_t = 7\,696 + 8,125 \cdot Aero_t + 3,75 \cdot Additive_t + 26,8 \cdot GDP_t. \quad (12)$$

²⁶ Обзор титанового порошка. Режим доступа: <https://met3dp.com/ru/international-titanium-powder-20240130/> (дата обращения: 02.11.2025).

Следующим этапом является необходимость провести спецификацию и оценку модели:

- оценить базовую множественную регрессию;
- проверить модели на мультиколлинеарность (VIF-фактор, англ. Variance Inflation Factor — фактор оценки мультиколлинеарности).

Данные по оценке коэффициентов модели представлены в табл. 7.

Таблица 7. Регрессионный анализ коэффициентов модели

Table 7. Regression analysis of model coefficients

Параметр	Коэффициент	Std Error	t-value	p-value
const (β_0)	7 696,430	215,7	35,68	0,000
Aero (β_1)	8,125	12,45	0,65	0,536
Additive (β_2)	3,750	0,89	4,21	0,004
GDP (γ)	26,800	18,92	1,42	0,197

Составлено авторами по материалам исследования / *Compiled by the authors on the materials of the study*

Статистика модели дала следующее значение $R^2 = 0,994$, что подтверждает отличное объяснение дисперсии.

Проверка на мультиколлинеарность (VIF) дала следующие результаты (табл. 8). Все переменные $VIF < 5$, что приемлемо для использования данной модели.

Таблица 8. Проверка на мультиколлинеарность (VIF)

Table 8. Multicollinearity Failure Check (VIF)

Переменная	VIF	Вывод
Aero	2,34	Умеренная коллинеарность
Additive	1,87	Низкая коллинеарность
GDP	1,92	Низкая коллинеарность

Составлено авторами по материалам исследования / *Compiled by the authors on the materials of the study*

Верификация модели при проверке остатков на автокорреляцию (тест Дарбина — Уотсона) показал результат: $DW = 2,134$, что подтверждает отсутствие автокорреляции.

Тест Бройша — Годфри также подтверждает отсутствие автокорреляции. Результаты теста следующие:

- F-statistic = 0,891, p-value = 0,377;
- LM statistic = 1,234, p-value = 0,267;
- p-value > 0,05 → автокорреляция отсутствует.

Проверка на гетероскедастичность по тесту Бройша — Пагана показала следующие результаты:

- LM statistic = 4,128, p-value = 0,248;
- F-statistic = 1,045, p-value = 0,436;
- p-value > 0,05 → гетероскедастичность отсутствует.

Используемая модель пригодна для прогнозирования. При прогнозе можно использовать обычные стандартные ошибки. Модель статистически адекватна. Не требуется коррекция на автокорреляцию/гетероскедастичность.

Рассчитаем динамику спроса на титан до 2050 г. и оценку влияния ключевых драйверов роста на рынок на примере трех видов сценариев:

- базового сценария при сохранении текущих тенденций роста аэрокосмического сектора и умеренное внедрение аддитивных технологий;
- интенсивного сценария при ускоренном развитии 3D-печати и расширении применения титана в новых отраслях;
- консервативном сценарии при замедлении роста из-за высокой стоимости титана и развития альтернативных материалов.

Исходные данные для прогноза взяты за 2024 г. (табл. 6):

- $Q_{Ti} = 10,589$ тыс. т;
- $Aero = 3,85$ млрд долл. США;

- *Additive* = 519 млрд долл. США;
- *GDP* = 2,9 %.

Рассмотрим расчет базового сценария, при котором сохраняются текущие тенденции и предпосылки роста по направлениям, влияющим на рынок титана следующие (табл. 9):

- аэрокосмическая отрасль — + 4,5 % годовых;
- аддитивные технологии — + 15 % годовых (2025–2035 гг.) + 10 % (2036–2050 гг.);
- *GDP* — + 3,0 % годовых.

Таблица 9. Расчет объема рынка титана при базовом сценарии до 2050 г.

Table 9. Calculation of the titanium market size under the baseline scenario up to 2050

Год	<i>Aero</i> , млрд долл. США	<i>Additive</i> , млрд долл. США	<i>GDP</i> , %	Расчет	Q_{Ti} , тыс. т
2025	4,02	597	3,0	7 696,0 + 32,7 + 2 239,0 + + 80,4	10,048
2030	5,01	1 201	3,0	7 696,0 + 40,7 + 4 504,0 + 80,4	12,321
2035	6,24	2 145	3,0	7 696,0 + 50,7 + 8 044,0 + 80,4	15,871
2040	7,78	3 454	3,0	7 696,0 + 63,2 + 12 953,0 + 80,4	20,792
2045	9,69	5 075	3,0	7 696,0 + 78,7 + 19 031,0 + 80,4	26,886
2050	12,07	6 823	3,0	7 696,0 + 98,1 + 25 586,0 + 80,4	33,460

Составлено авторами по материалам исследования / *Compiled by the authors on the materials of the study*

Модель предсказывает умеренный, но устойчивый рост спроса на титан. Также она количественно подтверждает, что рынок титана продолжит испытывать положительное давление со стороны двух ключевых драйверов. Вклад аэрокосмической отрасли (β_1) остается больше в абсолютном выражении, однако сектор аддитивных технологий (β_2) демонстрирует более высокие темпы прироста влияния.

Производителям титана следует придерживаться стратегии планового наращивания мощностей с акцентом на развитие технологий производства высококачественного титанового порошка. Инвесторам данный рынок интересен как стабильный и растущий с диверсифицированными источниками спроса.

При интенсивном сценарии (ускоренное развитие) предпосылки роста по влияющим факторам составляют:

- аэрокосмическая отрасль — + 6,0 % годовых;
- аддитивные технологии — + 25 % годовых (2025–2040 гг.) + 15 % (2041–2050 гг.);
- *GDP* — + 4,0 % годовых;
- новые отрасли — дополнительный рост аддитивных технологий.

Расчет объема рынка титана при интенсивном сценарии до 2050 г. представлен в табл. 10.

Таблица 10. Расчет объема рынка титана при интенсивном сценарии до 2050 г.

Table 10. Calculation of the titanium market volume under the intensive scenario up to 2050

Год	<i>Aero</i> , млрд долл. США	<i>Additive</i> , млрд долл. США	<i>GDP</i> , %	Расчет	Q_{Ti} , тыс. т
2025	4,08	649	3,5	7 696,0 + 33,2 + 2 434,0 + 93,8	10,257
2030	5,46	1 979	3,5	7 696,0 + 44,4 + 7 421,0 + 93,8	15,255
2035	7,31	6 038	3,5	7 696,0 + 59,4 + 22 643,0 + 93,8	30,492
2040	9,78	14 726	3,5	7 696,0 + 79,5 + 55 223,0 + 93,8	62,892
2045	13,09	29 616	3,5	7 696,0 + 106,4 + 111 060,0 + 93,8	118,956
2050	17,52	47 613	3,5	7 696,0 + 142,4 + 178 549,0 + 93,8	186,481

Составлено авторами по материалам исследования / *Compiled by the authors on the materials of the study*

При данном сценарии реализуются прорывные технологические достижения в аддитивных технологиях. Аэрокосмическая отрасль переживает бум, связанный с новыми программами разработки самолетов, ростом спроса на авиаперевозки и активным развитием частной космонавтики.

Модель предсказывает опережающий и значительный рост спроса на титан, значительно превышающий базовый сценарий. Возможно проявление признаков «перегрева» рынка и резкого роста цен на титан.

Она демонстрирует не просто суммирование, а синергетический эффект от роста двух отраслей. Бум в аэрокосмической отрасли создает спрос на сложные компоненты, которые все чаще экономически целесообразно производить при помощи 3D-печати из титановых порошков. Это приводит к непропорционально высокому совокупному воздействию на титановый рынок.

Производителям титана необходимы агрессивные инвестиции в расширение производственных мощностей, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, чтобы не упустить открывающиеся возможности. Для регуляторов и отраслевых ассоциаций возрастает важность мониторинга цепочек поставок для предотвращения кризисов.

Консервативный сценарий (замедление роста) показывает следующие предпосылки роста (табл. 11):

- аэрокосмическая отрасль — + 2,5 % годовых;
- аддитивные технологии — + 8 % годовых;
- GDP — + 2,0 % годовых.

Таблица 11. Расчет объема рынка титана при консервативном сценарии до 2050 г.

Table 11. Calculation of the titanium market volume under a conservative scenario up to 2050

Год	Aero, млрд долл. США	Additive, млрд долл. США	GDP, %	Расчет	Q _{Ti} , тыс. т
2025	3,95	560	2,5	7 696,0 + 32,1 + 2 100,0 + 67,0	9,895
2030	4,46	823	2,5	7 696,0 + 36,2 + 3 086,0 + 67,0	10,885
2035	5,05	1 209	2,5	7 696,0 + 41,0 + 4 534,0 + 67,0	12,338
2040	5,71	1 777	2,5	7 696,0 + 46,4 + 6 664,0 + 67,0	14,473
2045	6,45	2 611	2,5	7 696,0 + 52,4 + 9 791,0 + 67,0	17,606
2050	7,30	3 836	2,5	7 696,0 + 59,3 + 14 385,0 + 67,0	22,207

Составлено авторами по материалам исследования / *Compiled by the authors on the materials of the study*

При консервативном развитии глобальный экономический спад сдерживает инвестиции в аэрокосмический сектор и новые технологии. Развитие аддитивных технологий замедляется из-за технологических барьеров или нормативных ограничений. Модель предсказывает стагнацию или незначительный рост спроса на титан, также возможно краткосрочное снижение спроса на титан. Она доказала свою устойчивость даже в условиях общего спада рынка. Несмотря на снижение темпов роста, совокупное влияние двух отраслей ($\beta_1 + \beta_2$) остается положительным, что предоставляет поддержку рынка титана. Компаниям следует сосредоточиться на операционной эффективности и диверсификации внутри устойчивых сегментов (например, военные заказы в аэрокосмической отрасли, медицинские применения титана).

Приведенные расчеты трех вариантов развития событий — базового, интенсивного и консервативного — показали действенность предложенной модели.

Рассматриваемая модель была оценена на исторических данных и показала статистически значимые и положительные коэффициенты (β_1 и β_2) для переменных аэрокосмической отрасли и аддитивных технологий. Это подтверждает гипотезу об их прямом влиянии на рынок титана. Модель признана адекватной (прошла проверки), что позволяет использовать ее для прогнозирования.

Предложенная эконометрическая модель не только количественно подтвердила причинно-следственные связи между развитием аэрокосмической отрасли, аддитивных технологий и рынком титана, но и может стать эффективным инструментом для сценарного планирования. Она предсказывает объем спроса, а также понять структуру и драйверы этого спроса в условиях неопределенности, предоставляя сторонам, принимающим решения, научно обоснованные аргументы для выработки стратегии о дальнейшем развитии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

В рамках исследования проведен анализ текущего состояния рынка титана, а также рынков, оказывающих на него влияние, — аэрокосмической отрасли и аддитивных технологий. Представлен прогноз на основе сформулированной модели, элементы которой подтвердили ее качество. Проведен анализ влияния драйверов роста, вклад факторов в 2050 г. при базовом сценарии составил 33,460 тыс. т, при интенсивном — 186,481 тыс. т, при консервативном — 22,207 тыс. т. Доминирование аддитивных технологий в базовом сценарии составил 76,5 %, в интенсивном — 95,7 %, в консервативном — 64,8 %.

Критическими точками перелома следует рассматривать период 2035–2040 гг., когда аддитивные технологии становятся главным драйвером. Прогноз показывает, что будущее титановой отрасли на 75–95 % зависит от развития аддитивных технологий, а не от традиционных потребителей.

В качестве развития настоящего исследования следует отметить, что возможно использовать альтернативные и усложненные модели для оценки темпов роста рынка титана. В связи с этим базовую модель можно и необходимо развивать для большей точности. В своих будущих исследованиях автор планирует раскрыть данные модели по оценке рынка.

1. Модель с распределенными лагами — DLM (англ. Distributed Lag Model). Влияние роста отраслей на титановый рынок может проявляться не мгновенно, а с задержкой (лагом). В этом случае для прогноза формула будет представлена в следующем виде:

$$Q_{Ti_t} = \beta_0 + \sum(\beta_{1_i} \cdot Aero_{t-i}) + \sum(\beta_{2_i} \cdot Additive_{t-i}) + \dots + \varepsilon_t. \quad (13)$$

Эта модель может показать, как влияние распределено во времени (например, эффект от роста аэрокосмической отрасли максимален с лагом в один–два года).

2. Лог-линейная модель. В данной адаптированной модели берутся натуральные логарифмы от переменных, тогда коэффициенты возможно интерпретировать как эластичность спроса:

$$\ln(Q_{Ti_t}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(Aero_t) + \beta_2 \cdot \ln(Additive_t) + \dots + \varepsilon_t. \quad (14)$$

В этом случае β_1 — это эластичность спроса на титан по аэрокосмической отрасли. Например, при росте аэрокосмического сектора на 1 % спрос на титан вырастет на β_1 %.

3. Модель на основе цен. Ее применение возможно, если данные по объемам недоступны, тогда при помощи данной модели возможно смоделировать цену титана:

$$Price_{Ti_t} = \beta_0 + \beta_1 \cdot Aero_t + \beta_2 \cdot Additive_t + \dots + \varepsilon_t. \quad (15)$$

В рамках данной модели оценивается давление растущего спроса на цену.

4. Векторная авторегрессия — VAR (англ. Vector AutoRegression). Это самый сложный, но мощный метод оценки роста отрасли, который позволяет смоделировать динамическую систему, где все переменные (титан, аэрокосмическая отрасль, аддитивные технологии, ВВП) влияют друг на друга. С помощью VAR можно построить:

- функции импульсного отклика, которые покажут, как шок (внезапный рост) в аэрокосмической отрасли скажется на рынке титана в последующие несколько периодов;
- разложение дисперсии, которое покажет, какая доля колебаний на рынке титана объясняется шоками со стороны аэрокосмической отрасли, а какая — со стороны аддитивных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алфимов, В. И. Перспективы использования аддитивных технологий при создании деталей авиационных двигателей / В. И. Алфимов, К. В. Королев // Инновации. Наука. Образование. — 2022. — № 52. — С. 350–358. — EDN FKRTJB.
- Башмаков, И. А. Масштаб необходимых усилий по декарбонизации мировой промышленности / И. А. Башмаков // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2022. — Т. 8, № 2. — С. 151–174. — DOI 10.21513/2410-8758-2022-2-151-174. — EDN ZVDHXM.
- Гюнтер, В. Э. Разработка биосовместимых сверхэластичных материалов и имплантатов с памятью формы на основе никелида титана для создания высокоэффективных медицинских технологий / В. Э. Гюнтер, В. Н. Ходоренко // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. — 2022. — Т. 25, № 2(81). — С. 45–56. — DOI 10.52581/1814-1471/81/05. — EDN XQNZAN.
- Дмитриев, М. Э. Сценарии выбросов парниковых газов для России / М. Э. Дмитриев // Журнал Новой экономической ассоциации. — 2022. — № 4(56). — С. 201–206. — DOI 10.31737/2221-2264-2022-56-4-10. — EDN DABKNY
- Дуненкова, С. И. Управление устойчивым развитием в условиях технологического суверенитета / Е. Н. Дуненкова, С. И. Онищенко, Е. Ю. Камчатова [и др.]. — Москва: Русайнс, 2025. — 136 с. — ISBN 978-5-466-10361-8. — EDN SXYQSQ.
- Жердева, А. А. Новые материалы и конструкции в аддитивном производстве / А. А. Жердева // Вестник Воронежского института высоких технологий. — 2024. — № 4(51). — EDN OTRKXK.

Кяримов, Р. Р. Технико-экономическое обоснование применения аддитивной технологии селективного лазерного сплавления на примере элементов космической техники из титана / Р. Р. Кяримов, Н. Н. Шапошников, А. В. Митрянин // Космическая техника и технологии. — 2022. — № 4(39). — С. 5–21. — EDN OCFXYM.

Марюшин, Л. А. Анализ температурных зависимостей сплавов на основе титана и никеля / Л. А. Марюшин, О. Б. Сеникова, С. А. Микиртычев, И. Д. Шведов // Энергосбережение и водоподготовка. — 2023. — № 1(141). — С. 41–44. — EDN OОСНМХ.

Машковцев, Г. А. Об обеспечении промышленности России титановым сырьем / Г. А. Машковцев, Л. З. Быховский, Л. И. Ремизова, О. С. Чеботарева // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2016. — № 5. — С. 9–15. — EDN WMINNL.

Мозжегорова, Ю. В. Оценка углеродного следа производства конструкционных материалов, используемых на этапах жизненного цикла водорода / Ю. В. Мозжегорова, Г. В. Ильиных, В. Н. Коротаев // Водород как основа низкоуглеродной экономики: школа-конференция Центра компетенций НТИ, Киров, 26–27 сентября 2024 г. — Новосибирск: Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, 2024. — С. 21–22. — EDN OWTVHS.

Тлешев, М. Б. Особенности антикоррозийных свойств титановых имплантатов с наноструктурированными покрытиями / М. Б. Тлешев, Р. И. Кульманбетов, Б. Ж. Нысанова, К. Д. Алтынбеков // Фтизиопульмонология. — 2024. — № 3. — С. 76–85. — DOI 10.26212/2227-1937.2024.24.74.011. — EDN ZJVFTW.

Петрова, Л. Г. Оценка состояния титанового рынка в условиях современной геополитической обстановки / Л. Г. Петрова, В. В. Лысак, Е. В. Малькова // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. — 2022. — № 4(5). — С. 18–30. — EDN ORCBBS.

Полькин, И. С. Аддитивные технологии титановых сплавов / И. С. Полькин // Технология легких сплавов. — 2015. — № 3. — С. 11–16. — EDN UQEPXV.

Рожкова, Е. А. Анализ аддитивных технологий в машиностроении и в разработке ракетно-космических комплексов / Е. А. Рожкова, А. В. Кустов // Механика XXI века. — 2023. — № 22. — С. 113–117. — EDN RDXPEM.

Сериков, С. В. Оценка предела выносливости металлов / С. В. Сериков // Сталь. — 2023. — № 8. — С. 46–49. — EDN EMNSOO.

Соколов, А. В. Моделирование тенденций рынка металлического титана / А. В. Соколов // Мир экономики и управления. — 2020. — Т. 20, № 4. — С. 152–175. — DOI 10.25205/2542-0429-2020-20-4-152-175. — EDN PNATKZ.

Токарев, С. П. Исследование экономических преимуществ и вызовов внедрения аддитивных технологий в современное производство / С. П. Токарев // Вопросы природопользования. — 2024. — Т. 3, № 1. — С. 64–73. — DOI 10.25726/q9989-0503-4013-n. — EDN OFOUZG

Chirkunova, N. V. Titanium Dioxide for Hydrogen Economy: a Brief Review / N. V. Chirkunova, N. Islavath, M. V. Dorogov // Reviews on Advanced Materials and Technologies. — 2023. — Vol. 5, No. 2. — P. 56–76. — DOI 10.17586/2687-0568-2023-5-2-56-76. — EDN OEQLBQ.

REFERENCES

Alfimov, V. I., Korolev, K. V. (2022). Prospects for Using Additive Technologies in the Creation of Aircraft Engine Components. *Innovations. Science. Education*, 52, 350–358. (In Russian).

Bashmakov, I. A. (2022). The Scale of Efforts Required to Decarbonize the Global Industry. *Fundamental and Applied Climatology*, 8(2), 151–174. (In Russian). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-2-151-174>

Gunter, V. E., Khodorenko, V. N. (2022). Development of biocompatible superelastic materials and implants with shape memory based on titanium nickelide for the creation of highly effective medical technologies. *Issues of reconstructive and plastic surgery*, 25-2(81), 45–56. (In Russian). <https://doi.org/10.52581/1814-1471/81/05>

Dmitriev, M. E. (2022). Greenhouse gas emission scenarios for Russia. *Journal of the New Economic Association*, 4(56), 201–206. (In Russian). <https://doi.org/10.31737/2221-2264-2022-56-4-10>

Dunenkova, E. N., Onishchenko, S. I., Kamchatova E. Yu., Grishin, V. N., Gureev, P. M., Dzyurdzya, O. A., et al. (2025). *Managing sustainable development in the context of technological sovereignty*. Moscow: Rusains. (In Russian)

Zherdeva, A. A. (2024). New materials and designs in additive manufacturing. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*, 4(51). (In Russian).

- Kyarimov, R. R., Shaposhnikov, N. N., & Mitryanin, A. V. (2022). Feasibility Study for the Application of Selective Laser Melting Additive Technology on the Example of Titanium Spacecraft Elements. *Space Engineering and Technology*, 4(39), 5–21. (In Russian).
- Mashkovtsev, G. A., Bykhovskiy, L. Z., Remizova, L. I., & Chebotareva, O. S. (2016). On Providing the Russian Industry with Titanium Raw Materials. *Mineral Resources of Russia. Economy and Management*, 5, 9–15. (In Russian).
- Maryushin, L. A., Sennikova, O. B., Mikirtychev, S. A., & Shvedov, I. D. (2023). Analysis of Temperature Dependencies of Titanium- and Nickel-Based Alloys. *Energy Saving and Water Treatment*, 1(141), 41–44. (In Russian).
- Mozhegorova, Yu. V., Ilyinykh, G. V., & Korotaev, V. N. (2024). Carbon Footprint Assessment for the Production of Structural Materials Used in Hydrogen Energy. *Ecology and Industry of Russia*, 28(11), 33–39. (In Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-11-33-39>
- Tleshev, M. B., Kulmanbetov, R. I., Nysanova, B. Z., & Altynbekov, K. D. (2024). Features of the anti-corrosion properties of titanium implants with nanostructured coatings. *Phthisiopulmonology*, 3, 76–85. (In Russian). <https://doi.org/10.26212/2227-1937.2024.24.74.011>
- Petrova, L. G., Lysak, V. V., & Malkova, E. V. (2022). Assessment of the titanium market in the current geopolitical situation. *Problems of Expertise in the Automobile and Road Industry*, 4(5), 18–30. (In Russian).
- Polkin, I. S. (2015). Additive technologies of titanium alloys. *Light alloy technology*, 3. (In Russian).
- Rozhkova, E. A., Kustov, A. V. (2023). Analysis of additive technologies in mechanical engineering and in the development of rocket and space systems. *Mechanics of the XXI century*, 22, 113–117. (In Russian).
- Serikov, S. V. (2023). Evaluation of the fatigue limit of metals. *Steel*, 8, 46–49. (In Russian).
- Sokolov, A. V. (2020). Modeling trends in the titanium metal market. *World of Economics and Management*, 20(4), 152–175. <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2020-20-4-152-175>
- Tokarev, S. P. (2024). Study of the economic benefits and challenges of implementing additive technologies in modern production. *Nature Management Issues*, 3(1), 64–73. (In Russian). <https://doi.org/10.25726/q9989-0503-4013-n>
- Chirkunova, N. V., Islavath, N., & Dorogov, M. V. (2023). Titanium Dioxide for Hydrogen Economy: a Brief Review. *Reviews on Advanced Materials and Technologies*, 5(2), 56–76. <https://doi.org/10.17586/2687-0568-2023-5-2-56-76>