

ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ

И. П. Эльяшевич¹

НИУ «Высшая школа экономики» (Москва, Россия)

УДК: 658.783

doi: 10.55959/MSU0130-0105-6-58-4-10

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЗАПАСАМИ В ЛОГИСТИКЕ И ЦЕПЯХ ПОСТАВОК

Статья посвящена изучению возможностей использования аппарата гармонического анализа при планировании потребности в запасах различных категорий. Вопросы совершенствования материального планирования (прогнозирования) в настоящее время являются достаточно актуальными прикладными задачами в бизнесе, а также имеют интерес в плане развития теории логистики и управления цепями поставок. Среди подходов планирования потребности в складских запасах на практике используется широкий спектр методов теории статистики, среди которых можно выделить две большие группы, такие как однопараметрические модели анализа временных рядов, для товаров стабильного и относительно стабильного спроса, а также корреляционно-регрессионные модели для запасов хаотичного расхода. Большинство товаров, реализуемых конечным потребителям, имеют сезонную составляющую, которая не всегда может быть явно выражена в статистике. Однако в силу периодической смены времен года регулярные колебания значений расхода со склада вокруг среднего хронологического или тренда могут обуславливать необходимость регулярного пересчета основных параметров моделей управления запасами, таких как максимальный, страховой, пороговый уровни запасов и др. Кроме того, статистика продаж может содержать колебания более высокого порядка, если реализуемые запасы обладают жизненными циклами интереса к товарам на рынке, которые можно также отнести к периодическим или квазипериодическим процессам. Одним из методов формализации таких циклических процессов может быть тригонометрическая аппроксимация или гармонический анализ, когда значения временного ряда представляются в виде слагаемых ряда Фурье (гармоник), имеющих соответствующие амплитуды и фазы. В статье проводится сравнение эффективности (точности) прогнозов потребности в складских запасах, выполненных с помощью гармонического анализа и традиционных методов экстраполяции временных рядов.

Ключевые слова: гармонический анализ, тригонометрическая аппроксимация, управление закупками и запасами, планирование потребности, периодические колебания продаж, товарно-материальные запасы.

¹ Эльяшевич Иван Павлович — д.э.н., профессор департамента операционного менеджмента и логистики, НИУ «Высшая школа экономики»; e-mail: ielyashevich@hse.ru, ORCID: 0000-0002-5645-2327.

Цитировать статью: Эльяшевич, И. П. (2023). Гармонический анализ при управлении запасами в логистике и цепях поставок. *Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика*, 58(4), 223–246. <https://doi.org/10.55959/MSU0130-0105-6-58-4-10>.

I. P. Elyashevich

National Research University Higher School of Economics (HSE)
(Moscow, Russia)

JEL: C15, L26, M21

doi: 10.55959/MSU0130-0105-6-58-4-10

HARMONIC ANALYSIS IN INVENTORY MANAGEMENT IN LOGISTICS AND SUPPLY CHAINS

The article examines the possibilities of using harmonic analysis apparatus while planning the need in stocks of various categories. The issues of improving material planning (forecasting) are currently quite relevant applied tasks in business, and are also of interest in terms of developing the theory of logistics and supply chain management. Among the approaches to planning the need for inventory, a wide range of statistical theory methods are used in practice, among which two large groups can be distinguished, such as one-parameter time series analysis models for goods of stable and relatively stable demand, as well as correlation and regression models for chaotic consumption stocks. Most of the goods sold to end consumers have a seasonal component, which may not always be explicitly expressed in statistics. However, due to change of seasons, regular fluctuations in the values of consumption from the warehouse, around the average chronological or trend, may necessitate regular recalculation of the main parameters of inventory management models, such as maximum, insurance, threshold inventory levels, etc. In addition, sales statistics may contain fluctuations of a higher order if the stocks sold have life cycles of interest in goods on the market, which can also be attributed to periodic or quasi-periodic processes. One of the methods to formalize such cyclic processes can be trigonometric approximation or harmonic analysis, when the values of a time series are represented as terms of a Fourier series (harmonics) having corresponding amplitudes and phases. The article compares the effectiveness (accuracy) of forecasts of inventory requirements made using harmonic analysis and traditional time series extrapolation methods.

Keywords: harmonic analysis, trigonometric approximation, purchasing and inventory management, demand planning, periodic sales fluctuations, inventory.

To cite this document: Elyashevich, I. P. (2023). Harmonic analysis in inventory management in logistics and supply chains. *Lomonosov Economics Journal*, 58(4), 223–246. <https://doi.org/10.55959/MSU0130-0105-6-58-4-10>.

Введение

В условиях возрастающей степени рыночной конкуренции в большинстве отраслей экономики многие производственные и торговые ком-

пании, а также организации, оказывающие различные услуги, сталкиваются с проблемой адекватного планирования (прогнозирования) потребности в материальных ресурсах (запасах), которые используются ими при выполнении основной деятельности. Это связано прежде всего с тем, что усиливающаяся борьба за потребителя приводит к необходимости расширения ассортимента и диверсификации методов управления запасами различных категорий (Дыбская, Сергеев, 2023; Царькова, 2020). Кроме того, каналы закупок, по которым поступают необходимые ресурсы снабжения, подразделяются на два вида: основные и вспомогательные. В рамках основных каналов производственные предприятия получают сырье, материалы и комплектующие, используемые для выпуска готовой продукции, а торговые компании — широкий ассортимент товаров для дальнейшей перепродажи (Сергеев, 2023). По вспомогательным каналам в компании поступают расходные материалы, используемые для поддержания в рабочем состоянии объектов производственной и логистической инфраструктуры, их технического обслуживания и эксплуатации (операционные ресурсы). Значимость закупок операционных ресурсов сегодня существенно возросла (Батуров, Дробная, 2019; Стерлигова, Фель, 2022).

Традиционно используемые подходы экстраполяции временных рядов (Стерлигова, 2022), такие как методы простого, скользящего, экспоненциального сглаживания и др., хорошо оправдывают себя при планировании потребности в запасах стабильного и относительно стабильного расхода, на достаточно коротких горизонтах. Однако для запасов хаотичного расхода указанные подходы дают крайне низкую точность прогнозов (Лукинский (ред.), 2023). Кроме того, для адекватных расчетов страховых запасов в условиях неопределенности необходимо знание закона распределения значений расхода (продаж), которые являются случайными величинами. Если статистика продаж распределена не по нормальному закону, то задача адекватного прогнозирования потребности в складских запасах многократно усложняется. Ошибки в плановых расчетах приводят к формированию избыточных складских запасов, требующих привлечения дополнительных складских площадей, а также отвлечению из оборота свободных денежных средств (Дыбская, 2023; Моисеева, Олейник, 2022; Зайцева и др., 2021; Турченко, 2021).

В статье рассматриваются результаты применения гармонического анализа, модифицированного для целей планирования потребности в запасах, в статистике расхода которых преобладают периодические процессы. На примере практических расчетов показано, что гармонический анализ может быть более эффективным инструментом прогнозирования, чем традиционные методы экстраполяции временных рядов. Повышение точности прогнозирования позволит компаниям снизить

уровни страховых запасов, что положительно скажется на текущих затратах, связанных с хранением и иммобилизацией оборотного капитала, без потери качества логистического сервиса (Мищенко, Пилюгина, 2023; Мищенко, Михеева, 2019; Маркина, Харина, 2018). Снижение степени неопределенности расхода запаса будет в данном случае основным драйвером повышения рентабельности и конкурентоспособности компаний (Голов, Рюмкин, 2018).

В существующих работах по математической статистике рассматриваемые методы и модели носят универсальный характер, без привязки к конкретной отрасли бизнеса, видам деятельности компаний и материальных ресурсов (Глебкова, Чурилова, 2023; Елисеева (ред.), 2023; Салин, Шпаковская (ред.), 2023). При этом вопросы специфики использования данных методов в промышленности или торговле носят фрагментарный характер и не связаны между собой.

Для целей исследования была использована статистика выдачи в производственный процесс запасов операционных ресурсов (ресурсов жизнедеятельности), составляющих около 90% всей номенклатуры, закупаемых компаниями горнодобывающей промышленности Российской Федерации, за период 2015–2022 гг. Среди категорий запасов, информация о которых легла в основу работы, можно отметить: сортовой прокат черных и цветных металлов; трубная продукция; электроды сварочные; кабельно-проводниковая продукция; лесоматериалы; горюче-смазочные материалы; зубья ковшей экскаваторов; канаты стальные; рельсы; шпалы деревянные; взрывчатые вещества и средства взрывания. В работе были использованы данные примерно 100 ключевых горнодобывающих компаний — лидеров отрасли в РФ, которые осуществляют добычу угля и черных металлов. Номенклатура потребляемых ресурсов в данных компаниях составляет от 10 тыс. до 15 тыс. наименований.

Основными источниками информации являлись Федеральная служба государственной статистики Российской Федерации и отчетность горнодобывающих предприятий, публикуемая в сети Интернет. При обработке исходных данных использовались методы математической статистики и теории логистики. Анализ выбранной статистики по номенклатуре операционных ресурсов показал в целом ее соответствие нормальному распределению.

Статья состоит из трех разделов. В первом разделе приводится описание существующих подходов планирования потребности в материальных ресурсах методами экстраполяции временных рядов. Во втором — рассматривается суть гармонического анализа и направления его применения при управлении запасами в логистике и цепях поставок. В третьем разделе приводятся примеры прогнозов потребности в материальных ресурсах и сравнение их точности.

Традиционные подходы к планированию потребности в материальных ресурсах методами экстраполяции временных рядов

Среди многообразия методов экстраполяции временных рядов самым простым в плане реализации является прогнозирование по тренду или среднему хронологическому значению продаж, предполагающего формализацию преобладающей тенденции в виде математического уравнения и ее продолжение в область будущих значений. Однако данные методы эффективны исключительно для запасов стабильного расхода с коэффициентом вариации до 10% (группа X по XYZ-анализу), которых в ассортименте компании может быть не более 5–10%. Для запасов с относительно стабильным расходом с коэффициентом вариации от 10 до 25% (группа Y), обычно используют различные методы сглаживания, такие как прогнозирование по простой средней, скользящей средней, взвешенной скользящей средней, взвешенной экспоненциальной скользящей средней и др. (Лукинский (ред.), 2023; Стерлигова, 2022).

В этих методах исходный ряд также описывается с помощью математических зависимостей, которые кроме тренда могут включать периодические колебания, вызванные сменой времен года, жизненные циклы товаров, общие экономические циклы, а также отклонения (выбросы), связанные с проведением мероприятий по стимулированию продаж. Далее прогноз строится на аналогичных гипотезах о сохранении тенденций, выявленных в прошлом на будущие периоды (экстраполяция). При этом точность таких прогнозов сильно зависит от горизонта планирования и не позволяет строить долгосрочные планы на длительные периоды, необходимость в которых может быть обусловлена работой с удаленными поставщиками и длительными циклами выполнения заказов на поставку. Например, при поставках из стран Восточной и Юго-Восточной Азии, что в современных геополитических условиях является особенно актуальным вопросом.

Для запасов наиболее многочисленной группы Z с коэффициентом вариации более 25% методы экстраполяции временных рядов неэффективны и в качестве альтернативы обычно используют корреляционно-регрессионные модели. Но они более трудоемки, требуют более высокой квалификации аналитиков, а значит больших затрат на фонд оплаты труда, но при этом не всегда дают корректные результаты.

Рассмотрим основные составляющие временного ряда расхода запаса, которые представляют основной интерес при прогнозировании. Расход запаса со склада в некоторый момент времени (t) можно представить в виде алгебраической суммы нескольких входящих в него элементов (аддитивная модель):

$$\hat{S}_t = f_t + \omega_t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где f_t — тренд или долговременная составляющая, которая характеризует общую тенденцию изменений расхода запасов со склада; ω_t — сезонная составляющая расхода, появление которой связано со сменой времен года и соответственным изменением предпочтений клиентов относительно разных групп и видов товаров; ε_t — случайная компонента или шум, которая обусловлена локальными факторами, влияющими на потребность в запасах. Выделение и описание влияния таких локальных факторов представляет собой отдельную задачу для специалистов по управлению запасами.

Как правило, тренды для временных рядов, не превышающих одного года, описываются уравнениями первого порядка. Для более длительных рядов (более года) тренды могут аппроксимироваться нелинейными зависимостями. В этом случае задачей аналитика является подбор функции, которая максимально соответствует долговременной динамике отгрузок запаса по соответствующей позиции (категории). Как правило, тренды обнаруживаются в большинстве статистических рядов расхода запасов, хотя не всегда долговременные тенденции присутствуют в явном виде. Временной ряд может быть сильно искажен влиянием локальных факторов, не позволяющим выделить тренд без предварительной фильтрации. Наличие тренда само по себе не свидетельствует об эффективных отгрузках запасов или, наоборот, о какой-либо проблеме, требующей незамедлительного решения.

Например, положительные тенденции в статистике выдачи в производственный процесс операционных ресурсов могут свидетельствовать о постепенном износе основных фондов и об увеличении объема работ по их текущему и капитальному ремонту. В данном случае руководству компании стоит задуматься об инвестициях в производственную и (или) логистическую инфраструктуру с целью обновления парка используемых основных средств (Сергеев, Эльяшевич, 2023).

Второй наиболее часто встречающейся компонентой временных рядов расхода запасов является сезонная волна, которая обусловлена циклическими колебаниями климата при смене времен года. Сезонная волна может иметь два или четыре экстремума. В первом случае статистика расхода запасов в течении года характеризуется одним максимальным и одним минимальным значениями, как правило в летние и зимние месяцы. Во втором — двумя максимумами и двумя минимумами, как в случае работы с запасами, потребность в которых увеличивается в осенний и весенний периоды года и, наоборот, снижается в летние и зимние месяцы. Для формализации сезонной волны можно использовать *индексы сезонности* (I_s), которые будут определяться по следующей формуле в зависимости от наличия или отсутствия устойчивого тренда (f_t) в статистике расхода запаса со склада (Елисеева, 2023):

$$I_{s_t} = \begin{cases} \frac{\bar{S}_t}{\bar{S}_0}, & \text{при } f_t = 0 \\ \frac{\bar{S}_t}{f_t}, & \text{при } f_t \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Однако использование индексов сезонности не позволяет выявить периодические колебания отгрузок запаса, которые происходят вследствие процессов более высокого порядка. Среди таких колебаний можно выделить изменения продаж в рамках этапов жизненных циклов интереса к товарам на рынке или в результате долговременных экономических циклов, природа которых до конца не изучена.

Наличие случайной компоненты или шума связано с влиянием локальных факторов или редких событий, предсказать появление которых достаточно сложно. Это могут быть факторы природной среды, которые вызывают стихийные бедствия и для устранения их последствий требуются в большом объеме запасы определенных (аварийно-спасательных) категорий и т.д. Учесть влияние случайной компоненты можно с помощью оценки ошибки прогноза по формуле стандартного (среднеквадратического) отклонения (Елисеева (ред.), 2023; Салин, Шпаковская (ред.), 2023):

$$\sigma_{\hat{S}} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (S_t - \hat{S}_t)^2}{N-1}}. \quad (3)$$

Тогда формулу (1) для прогноза расхода запаса со склада можно переписать следующим образом:

$$\hat{S}_t = (a \cdot t + b) \cdot I_{s_t} \pm z \cdot \sigma_{\hat{S}}, \quad (4)$$

где z — параметр нормального закона распределения случайной величины, соответствующий целевому уровню доступности запаса для клиентов компании.

Формула (4) представляет собой предлагаемую модель прогноза потребности в запасах стабильного и относительно стабильного расхода (группы X и Y), корректность которой будет проверена далее.

В логистике и управлении цепями поставок широко используется понятие «уровень логистического сервиса», которое включает оценку удовлетворенности потребителей компании по комплектности выполненных заказов и их полноте, времени выполнения заказов и его отклонения от заранее согласованных в договорах поставки значениях, времени комплектации заказов на складе поставщика и др. (Лукинский (ред.), 2023; Дыбская, Сергеев, 2023; Стерлигова, 2022). Данный показатель является комплексным и какие-либо универсальные методики

его расчета на практике отсутствуют. Для целей исследования предлагается заменить его на показатель «Уровень доступности запасов», представляющий собой долю потребности клиентов компании (внутренних или внешних), которая может быть удовлетворена с помощью наличных складских запасов. Фактический уровень доступности запаса, с которым в данный момент работает компания, можно определить по следующей формуле:

$$SL_z = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^{\text{факт}}}{\sum_{i=1}^N S_i}, \quad (5)$$

где $\sum_{i=1}^N S_i$ — общая потребность в запасах по позициям (категориям) за рассматриваемый период времени; $\sum_{i=1}^N S_i^{\text{факт}}$ — фактическое количество запасов по позициям (категориям), которые были отпущены со склада клиентам компании; N — количество позиций (категорий) запаса, хранящихся на складе компании.

Предельное (идеальное) значение уровня доступности запаса составляет 1,0 (100%). Однако на практике в силу объективных причин $\sum_{i=1}^N S_i^{\text{факт}} < \sum_{i=1}^N S_i$, поэтому чем меньше отличаются друг от друга величины $\sum_{i=1}^N S_i$ и $\sum_{i=1}^N S_i^{\text{факт}}$, с тем более высоким уровнем доступности работает компания и тем ближе $SL_z \rightarrow 1,0$. Однако простое увеличение складских запасов с целью достижения максимального уровня доступности может привести к формированию избыточных остатков и появлению сверхнормативных потерь в смежных областях деятельности, что негативно отразится на рентабельности бизнеса. Поэтому для нахождения «экономического компромисса» или баланса между разными статьями затрат компании целесообразно определение оптимальных значений уровня доступности, для разных позиций (категорий) запасов. Для этого может быть использовано правило «трех сигм»¹ с учетом соотношения стоимости хранения запаса на складе и потерь от его дефицита.

При нормальном распределении статистики расхода стандартное отклонение является количественной основой при расчете страховых запасов, для соответствующего уровня доступности. Если обозначить $(\bar{S})$ — средний расход запаса со склада, а (σ_{S_i}) — его стандартное отклонение по позиции (i), то интервал $[\bar{S} \pm z \cdot \sigma_{S_i}]$ будет содержать определенное количество всех возможных значений расхода запаса в выборке. Напри-

¹ Здесь «сигма» — стандартное отклонение расхода запаса со склада.

мер, интервал $[\bar{S} \pm \sigma_{s_i}]$ будет содержать 68,2% таких значений, интервал $[\bar{S} \pm 2 \cdot \sigma_{s_i}]$ — 95,4%, а интервал $[\bar{S} \pm 3 \cdot \sigma_{s_i}]$ — 99,7%.

Для целей расчета страхового запаса целесообразно использовать только верхнюю границу данного интервала как вероятность того, что значения расхода могут принимать любые значения начиная от нуля, но не больше чем $[\bar{S} + z \cdot \sigma_{s_i}]$. Тогда уровни складских запасов, сформированные с помощью (σ_{s_i}) , обеспечат уровень доступности на складе в 84,1%. При формировании страхового запаса в размере $(2\sigma_{s_i})$, когда общий уровень складского остатка составит $[\bar{S} + 2\sigma_{s_i}]$, уровень доступности запаса увеличится до 97,7%. И наконец, при увеличении страхового запаса до $(3\sigma_{s_i})$, а общего уровня запасов — до $[\bar{S} + 3\sigma_{s_i}]$ уровень доступности примет максимальное значение — 99,85% (Джорж, 2017).

При определении целевого (оптимального) значения уровня доступности запаса на складе для конкретной категории (позиции) предлагается модифицировать формулу (5) и руководствоваться соотношением потерь от дефицита и стоимостью хранения:

$$SL_z^{opt} = \frac{H_k}{H_k + I_k}, \quad (6)$$

где I_k — удельная стоимость хранения запаса на складе по позиции (категории) (k) ; H_k — потери от дефицита единицы запаса по позиции (категории) (k) , которые можно вычислить, используя следующее выражение: $H_k = r_k - c_k$, где c_k — удельная стоимость запаса, закупаемая у поставщика; r_k — цена реализации единицы запаса клиентам компании.

Для производственных компаний потери от дефицита запаса на складе могут быть интерпретированы так же как убытки от простоя оборудования в случае временного отсутствия сырья, материалов, комплектующих или операционных ресурсов (Сергеев, Эльяшевич, 2023; Бармина, Борисова, 2017). Кроме того, дефицит вспомогательных и расходных материалов, необходимых для технического обслуживания и эксплуатации основных фондов, также может повлечь потери из-за простоя инфраструктуры независимо от вида деятельности компании. Блок-схема предлагаемого алгоритма расчета прогнозных значений расхода запасов по временным рядам приведена на рис. 1.

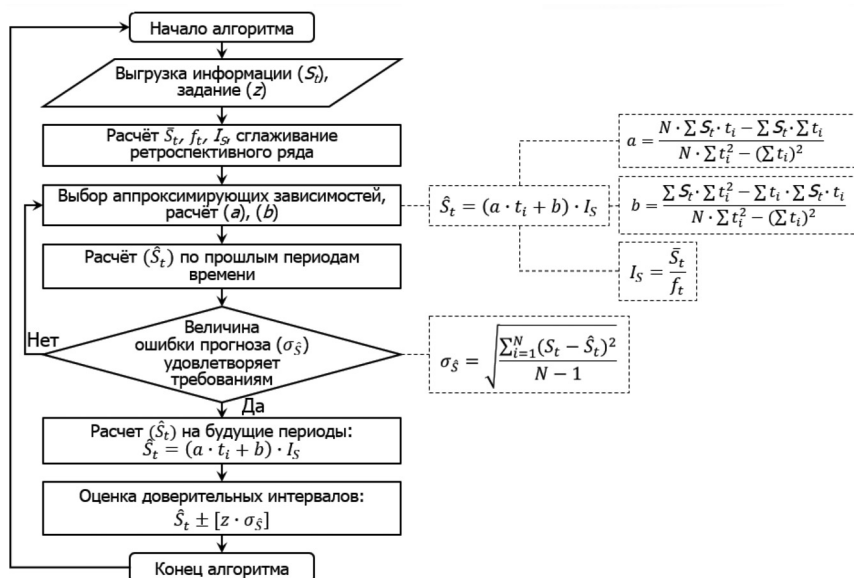


Рис. 1. Блок-схема предлагаемого алгоритма расчета прогнозных значений расхода запасов по временным рядам

Источник: составлено автором.

Гармонический анализ при планировании материальных ресурсов в логистике

Рассмотренные выше традиционные подходы экстраполяции временных рядов при планировании складских запасов имеют ряд недостатков, связанных с необходимостью предварительной обработки статистической информации, объективность которой напрямую зависит от опыта эксперта. Для исключения случайной компоненты используются различные виды сглаживания, которые должны представить исходный ряд в таком виде, чтобы, с одной стороны, он был чувствителен к фактическим изменениям расхода запаса, а с другой — не содержал шума. Отдельной проблемой является выбор адекватного периода сглаживания, поскольку усреднение исходного ряда по большому количеству периодов является неэффективным для целей прогноза.

В результате такого осреднения кривая фактического расхода запаса превратится в горизонтальную линию, прогнозирование с помощью которой потеряет всякий смысл, поскольку уровень доступности запаса, сформированного таким образом, не превысит 50%. Аналогичная ситуация будет иметь место и при планировании потребности в запасах сезонного

и хаотичного характера потребления с использованием линейного тренда. Кроме того, статистика отгрузок, которая была накоплена в разные периоды времени, при построении прогнозов должна учитываться и с разной значимостью, как это применяется в методе взвешенной скользящей средней. Однако процесс подбора весовых коэффициентов также является субъективным. Эмпирически подбираются и специальные константы при использовании метода экспоненциального сглаживания (Глебкова, Чурилова, 2023; Елисеева (ред.), 2023).

Поскольку расход запаса в большинстве случаев можно отнести к периодическим процессам, то в качестве альтернативы традиционным методам экстраполяции временных рядов можно применять гармонический анализ, в рамках которого статистика представляется в виде суммы «гармоник». Данный метод широко и успешно применяется в гидрометеорологии, при анализе и прогнозировании климатических параметров, изменения которых связаны в первую очередь со сменой сезонов, а также циклами солнечной активности. Накоплен также значительный опыт использования гармонического анализа в электронике. Однако в бизнесе применение данного метода имеет фрагментарный характер, хотя многие экономические процессы имеют цикличность, вызванную сезонностью и другими периодическими колебаниями. Кроме того, применение гармонического анализа возможно и при планировании потребности в запасах хаотичного расхода (группа Z). Функцию $S(t)$ на временном интервале $[t; t + 2\pi]$ можно представить в виде ряда Фурье следующим образом (Юров, 2018; Власова и др., 2016):

$$S(t) = \bar{S} + \sum_{n=1}^N [a_n \cdot \cos(n \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot t)], \quad (7)$$

где $\bar{S}$ — среднее арифметическое функции $S(t)$; N — количество членов временного ряда продаж запасов; n — номер гармоники; a_n и b_n — коэффициенты уравнения, определяемые как:

$$a_n = \frac{2 \cdot \sum_{n=1}^N [S_t \cdot \cos(n \cdot t)]}{N}, \quad (8)$$

$$b_n = \frac{2 \cdot \sum_{n=1}^N [S_t \cdot \sin(n \cdot t)]}{N}. \quad (9)$$

Иными словами, аппроксимация исходных временных рядов осуществляется с помощью тригонометрических полиномов с использованием метода наименьших квадратов. Используя гармонический анализ, мы можем получить математическую модель, формализующую исходный временной ряд расхода запаса со склада, на основе которой можно выполнять прогнозирование потребности на будущие периоды. При этом гармониками

называются слагаемые ряда Фурье $\hat{S}_n = a_n \cdot \cos(n \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot t)$, при $n = 1, 2, 3, \dots$ Формулы для отдельных гармоник:

- для первой гармоники

$$\hat{S}_1 = \bar{S} + a_1 \cdot \cos t + b_1 \cdot \sin t; \quad (10)$$

- для второй гармоники

$$\hat{S}_2 = \bar{S} + a_2 \cdot \cos(2t) + b_2 \cdot \sin(2t) \text{ и т.д.} \quad (11)$$

Формулу для суммы двух первых гармоник можно представить в следующем виде:

$$\hat{S}_{12} = \bar{S} + a_1 \cdot \cos t + b_1 \cdot \sin t + a_2 \cdot \cos 2t + b_2 \cdot \sin 2t.$$

Формулы для сумм последующих гармоник получаются аналогичным образом. Значения времени (t) в приведенных выше формулах задаются в интервале $[t = 0, \dots, N]$ с периодом, равным $\left(\frac{2 \cdot \pi}{N}\right)$. При этом время (t) принимает следующие значения $\left[0; \frac{2 \cdot \pi}{N}; 2 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N}; 3 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N}; \dots; (N-1) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N}\right]$ (табл. 1).

Таблица 1

**Значения параметра времени (t)
при длине ряда расхода запасов ($N = 12$)**

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	12
t	0	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$	$5\pi/6$	π	$7\pi/6$	$4\pi/3$	$3\pi/2$	$5\pi/3$	$11\pi/6$

Источник: составлено автором на основе (Власова и др., 2016).

Разложение Фурье тем точнее представляет значения заданной функции, чем более продолжительным является исходный временной ряд расхода запасов. Однако в этом случае возрастает число гармоник, которые участвуют в разложении Фурье. Если число значений временного ряда

составляет (N), то число гармоник будет равно $\left(\frac{N}{2}\right)$. Например, при ис-

следовании годового ряда расхода запаса со склада ($N = 12$ мес.), первая гармоника будет иметь период, равный длине основного ряда (12 мес.), вторая — период, равный половине длины основного ряда (6 мес.), третья — период, равный 1/3 основного ряда (4 мес.), а последняя — шестая гармоника будет иметь период, равный 2 мес. Как было указано выше, большинство запасов имеют сезонный ход значений расхода, который может иметь полугодовой или кварталный период (в случае работы с демисезонными товарами). Поэтому при исследовании годичной статистики часть выделяемых гармоник будет иметь вполне реальные анало-

гии с процессами продаж товаров. Получаемые таким образом значения страховых запасов можно использовать при оптимизации размеров заказов и формировании систем управления запасами в компаниях (Чашина, Онохина, 2020).

Оценка точности прогнозов потребности в запасах при использовании гармонического анализа и традиционных методов экстраполяции временных рядов

Рассмотрим последовательно примеры построения прогнозов потребности в складских запасах с помощью традиционных методов экстраполяции и гармонического анализа. В табл. 2 приведены исходные значения отгрузок запаса по категории «Трубы стальные» за 2020–2022 гг. со склада открытого хранения горнодобывающей компании, используемых для монтажа систем водоотлива в местах добычи угля и железной руды. Необходимо сделать прогноз потребности в трубах на 2023 г.

Таблица 2

Расход запасов по категории «Трубы стальные» за 2020–2022 гг., тыс. руб.

Год	Номер квартала	№ п/п (<i>t</i>)	Расход (<i>S_t</i>)
2020	I	1	3703
	II	2	4932
	III	3	2297
	IV	4	4169
2021	I	5	4211
	II	6	5486
	III	7	2525
	IV	8	4354
2022	I	9	4691
	II	10	6842
	III	11	3248
	IV	12	5524

Источник: составлено автором.

1. Метод экстраполяции тренда и сезонной волны. На первом этапе построения модели прогноза воспользуемся возможностями программы MS Excel. Уравнение будет иметь следующий вид: $f_t = 128,6 \cdot t + 3495,9$. Значение коэффициента уравнения ($a = 128,6$) означает, что расход запасов по категории «Трубы стальные» за рассматриваемый период увеличи-

вался в среднем на 128,6 тыс. руб. за квартал. Положительное значение коэффициента (a) также свидетельствует об устойчивой тенденции к росту расхода запаса со склада по данной категории. Это может быть связано с расширением территории добычи и соответственно увеличением объема работ по монтажу систем водоотлива.

На следующем этапе рассчитаем индексы сезонности, для чего воспользуемся формулой (2) для случая наличия в статистике тренда.

Таблица 3

Расход запасов по категории «Трубы стальные» за 2020–2022 гг. и прогноз на 2023 г., с учетом общей тенденции и сезонной волны, тыс. руб.

Год	Номер квартала	№ п/п (t)	Расход (S_t)	Тренд (f_t)	Сезонная волна ($S_t - f_t$)	Индекс сезонности (I_s)
2020	I	1	3703	3625	79	1,02
	II	2	4932	3753	1179	1,31
	III	3	2297	3882	–1585	0,59
	IV	4	4169	4010	159	1,04
2021	I	5	4211	4139	72	1,02
	II	6	5486	4268	1219	1,29
	III	7	2525	4396	–1871	0,57
	IV	8	4354	4525	–171	0,96
2022	I	9	4691	4653	38	1,01
	II	10	6842	4782	2060	1,43
	III	11	3248	4911	–1663	0,66
	IV	12	5524	5039	485	1,10
2023 (прогноз)	I	13	—	5168	—	1,02
	II	14	—	5296	—	1,34
	III	15	—	5425	—	0,61
	IV	16	—	5554	—	1,03

Источник: составлено автором.

Индексы сезонности на прогнозный период 2023 г., приведенные в табл. 3, рассчитаны как средние за исходный трехлетний интервал статистики расхода запаса. Полученные значения индексов сезонности свидетельствуют, что наибольшая потребность в запасе трубной продукции приходится на II квартал, а наименьшая — на III, что может позволить оптовой компании провести совершенствование методики управления запасами для увеличения эффективности продаж. Уравнение, с помощью которого можно формализовать расход запаса со склада с учетом тренда и сезонности, будет иметь следующий вид: $\hat{S}_t = (128,6 \cdot t + 3495,9) \cdot I_{S_t}$.

На завершающем этапе рассчитаем ошибку прогноза, чтобы учесть влияние случайных отклонений и определить оптимальный уровень страхового запаса, в соответствии с заданным уровнем доступности трубной продукции для внутренних потребителей компании. Для этого воспользуемся формулой (3). Тогда итоговое уравнение модели прогноза потребности в трубной продукции горнодобывающей компании по временным рядам можно записать следующим образом: $\hat{S}_t = (128,6 \cdot t + 3495,9) \cdot I_{S_t} + 223,0$. Прогнозные значения потребности, в том числе по прошлым временным периодам приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расчет ошибки прогноза расхода запасов по категории «Трубы стальные» на 2023 г., тыс. руб.

Год	Номер квартала	№ п/п (t)	Расход (S_t)	Прогноз расхода ($\hat{S}_t$)	Отклонение ($S_t - \hat{S}_t$)
2020	I	1	3703	3682	21
	II	2	4932	5042	-110
	III	3	2297	2365	-68
	IV	4	4169	4141	28
2021	I	5	4211	4204	7
	II	6	5486	5733	-247
	III	7	2525	2678	-153
	IV	8	4354	4673	-319
2022	I	9	4691	4726	-35
	II	10	6842	6424	418
	III	11	3248	2991	257
	IV	12	5524	5204	320
2023 (прогноз)	I	13	—	5249	—
	II	14	—	7116	—
	III	15	—	3305	—
	IV	16	—	5735	—
Ошибка прогноза ($\sigma_{\hat{s}}$):					223,0

Источник: составлено автором.

Оценку точности модели произведем с помощью средней относительной ошибки аппроксимации (E), критерия множественной детерминации (R) и критерия Фишера (F). Сравним отклонения, прогнозных значений, расположенных в столбцах табл. 4 «Расход (S_t)» и «Прогноз расхода ($\hat{S}_t$)». Для этого воспользуемся инструментом РЕГРЕССИЯ па-

кета АНАЛИЗ ДАННЫХ MS Excel. В результате получаем следующие значения: $E = 3,75\%$; $R^2 = 0,9718$; $F = 344,7$. Для оценки качества модели сравним полученное значение критерия Фишера с табличным. Воспользуемся таблицами F -критерия Фишера, по которым найдем, что при степенях свободы $k_1 = 1$ (однофакторная модель), $k_2 = n - m - 1 = 12 - 1 - 1 = 10$ и $\alpha = 0,05$, $F_{\text{табл.}} = 4,96$, где n — число наблюдений (12 квартальных значений), m — число факторов в модели. Поскольку $F > F_{\text{табл.}}$, то модель может быть признана статистически значимой, а уравнение надежным.

2. Гармонический анализ. Используя исходные данные о квартальных значениях расхода запаса по категории «Трубы стальные», приведенные в табл. 2, рассчитаем прогнозную потребность на 2023 г. с помощью гармонического анализа. При обработке исходной информации данные о расходе запаса были предварительно очищены от влияния тренда. После этого были рассчитаны значения отдельных первых шести гармоник по примеру формул (10) и (11) (рис. 2).

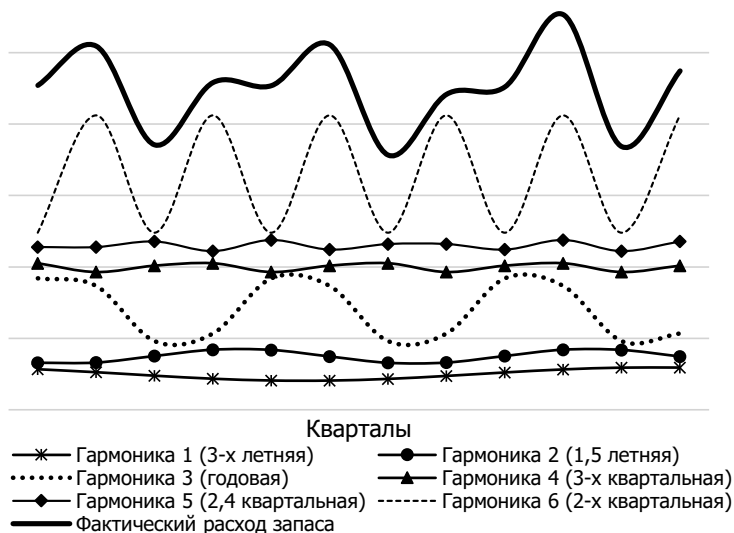


Рис. 2. Результаты гармонического анализа статистики расхода запаса по категории «Трубы стальные» в 2020–2023 гг.

Источник: составлено автором.

На рис. 2 видно, что наибольшее влияние на изменение характеристик отгрузок запаса со склада имеют гармоника 3 (годовая) и гармоника 6 (2-хквартальная). Это имеет практическое объяснение, поскольку трубы являются продукцией сезонного потребления и потребность в них возрастает в весенний период, при увеличении объема добычи, так и в конце лета, ближе к началу подготовки инженерных

сетей компаний к отопительному сезону. Аналогичные ситуации можно увидеть и в других отраслях промышленности и торговли, поскольку используемые большинством компаний запасы имеют сезонные тенденции потребления, которые в некоторых случаях могут быть не так явно выражены.

Уравнения модели прогноза, полученные с помощью формул (7)–(9) по сумме пяти и шести гармоник, имеют следующий вид:

$$\hat{S}_5 = 2,6 + 136,6 \cdot \cos t - 131,3 \cdot \sin t - 183,5 \cdot \cos 2t - 98,4 \cdot \sin 2t + \\ + 879,7 \cdot \cos 3t + 664,2 \cdot \sin 3t + 104,2 \cdot \cos 4t - 102,5 \cdot \sin 4t - \\ - 41,3 \cdot \cos 5t - 155,0 \cdot \sin 5t$$

$$\hat{S}_6 = 2,6 + 136,6 \cdot \cos t - 131,3 \cdot \sin t - 183,5 \cdot \cos 2t - 98,4 \cdot \sin 2t + \\ + 879,7 \cdot \cos 3t + 664,2 \cdot \sin 3t + 104,2 \cdot \cos 4t - 102,5 \cdot \sin 4t - \\ - 41,3 \cdot \cos 5t - 155,0 \cdot \sin 5t - 1638,5 \cdot \cos 6t$$

Изучение 7-й и 8-й гармоник показало, что прогнозные значения расхода трубной продукции со склада почти не отличаются от прогноза по 6-й гармонике. При этом прогнозы расхода, рассчитанные по сумме гармоник 5 и 6, имеют одинаковые значения стандартных отклонений (ошибок) $\sigma_{\hat{S}} = 856$ тыс. руб./квартал, которые превышают в 3,7 раза ошибку прогноза, выполненного с помощью метода экстраполяции тренда и сезонной волны (табл. 5 и рис. 3).

Таблица 5

**Результаты прогноза расхода запаса по категории «Трубы стальные»
с использованием гармонического анализа, тыс. руб.**

Год	Номер квартала	t	t (знач.)	Расход (S_t)	Прогноз ($\hat{S}_t$)		
					по сумме 5 гармоник	по сумме 6 гармоник	среднее значение
2020	I	0	0,000000	3703	4523	2884	3704
	II	$\pi/6$	0,523599	4932	4113	5751	4932
	III	$\pi/3$	1,047198	2297	3116	1477	2297
	IV	$\pi/2$	1,570796	4169	3350	4989	4169
2021	I	$2\pi/3$	2,094395	4211	5030	3392	4211
	II	$5\pi/6$	2,617994	5486	4667	6306	5486
	III	π	3,141593	2525	3344	1706	2525
	IV	$7\pi/6$	3,665191	4354	3534	5173	4354

Год	Номер квартала	t	t (знач.)	Расход (S_t)	Прогноз ($\hat{S}_t$)		
					по сумме 5 гармоник	по сумме 6 гармоник	среднее значение
2022	I	$4\pi/3$	4,188790	4691	5511	3872	4691
	II	$3\pi/2$	4,712389	6842	6023	7661	6842
	III	$5\pi/3$	5,235988	3248	4097	2458	3278
	IV	$11\pi/6$	5,759587	5524	4705	6343	5524
2023 (прогноз)	I	0	0,000000	—	6066	4427	5247
	II	$\pi/6$	0,523599	—	5656	7295	6475
	III	$\pi/3$	1,047198	—	5354	3455	4404
	IV	$\pi/2$	1,570796	—	5625	7523	6574

Источник: составлено автором.

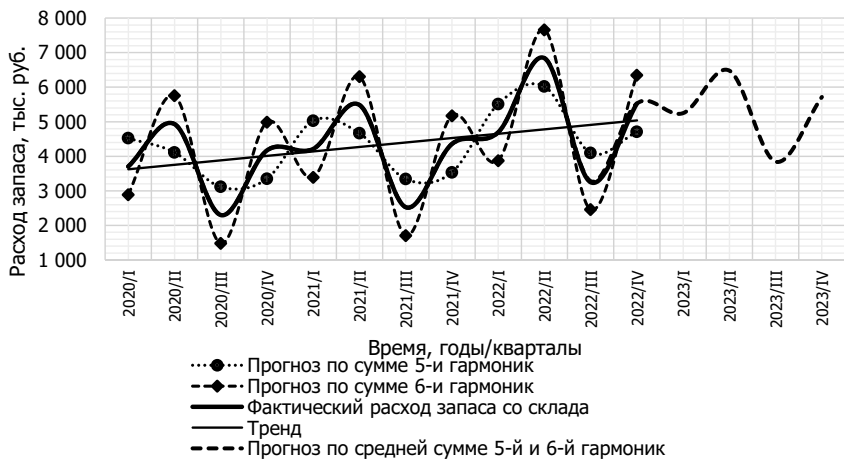


Рис. 3. Прогноз потребности в запасе по категории «Трубы стальные», для разных значений доступности, полученные с помощью гармонического анализа

Источник: составлено автором.

Из рис. 3 видно, что прогнозные значения расхода запаса, полученные по сумме 5-й и 6-й гармоник, располагаются симметрично по обе стороны от кривой, построенной по исходным данным. Поэтому при планировании потребности в запасе будет целесообразно взять за основу осредненные прогнозные значения, полученные по суммам 5-й и 6-й гармоник. Для оценки точности модели сравним отклонения прогнозных значений,

расположенных в столбцах «Расход (S_t)» и «Прогноз ($\hat{S}_t$), среднее значение», представленные в табл. 5. В результате получаем следующие значения: $E = 0.08\%$; $R^2 = 0,99996$; $F = 249834,6$. При этом $F_{\text{табл.}} = 4,96$ (при степенях свободы $k_1 = 1, k_2 = 10$, уровне значимости $\alpha = 0,05$) (Елисеева (ред.), 2023). Поскольку $F > F_{\text{табл.}}$, модель прогноза, построенная с помощью гармонического анализа, также может быть признана статистически значимой. Ошибка прогноза при этом составит $\sigma_{\hat{S}} \approx 9$ тыс. руб./квартал.

Целевой (оптимальный) уровень доступности запаса можно определить по формуле (6), а параметр нормального закона распределения (z), соответствующий (SL_z^{opt}) — по специальным таблицам, которые приводятся в литературе по статистике (Елисеева (ред.), 2023; Глебкова, Чурилова, 2023). Страховые запасы и общая потребность в трубной продукции, рассчитанные по результатам экстраполяции тренда и сезонной волны, а также с помощью гармонического анализа приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Сравнение прогнозных значений страховых запасов
и общего количества трубной продукции,
рассчитанных методами экстраполяции временных рядов
и гармонического анализа**

Номер квартала	Уровень доступности запаса (SL_z), %	z	Экстраполяция временных рядов		Гармонический анализ	
			Страховой запас, тыс. руб.	Общий запас, тыс. руб.	Страховой запас, тыс. руб.	Общий запас, тыс. руб.
I	50,0	—	0	5249	0	5247
II				7116		6475
III				3305		3840
IV				5735		5712
I	84,1	1	223	5472	9	5256
II				7338		6484
III				3528		3849
IV				5958		5721
I	97,7	2	446	5695	18	5265
II				7561		6493
III				3751		3858
IV				6181		5730
I	99,85	3	669	5918	27	5274
II				7784		6502
III				3974		3867
IV				6404		5739

Источник: составлено автором.

Среднегодовые уровни запасов для максимального уровня доступности ($SL_z = 99,85\%$) при экстраполяции временных рядов и с использованием гармонического анализа будут иметь значения 6020 и 5346 тыс. руб. соответственно. А страховые запасы, рассчитанные рассмотренными методами, будут составлять 11 и 0,5% от общего количества требуемых запасов. То есть, общий уровень запасов, сформированный по результатам расчетов предлагаемым методом, окажется ниже на 11%. Таким образом, использование тригонометрической аппроксимации дает более точные результаты по сравнению с традиционными методами экстраполяции временных рядов. А планирование потребности в запасах сезонного характера потребления с использованием методов гармонического анализа будет способствовать снижению общего уровня запасов на складах крупных промышленных компаний. При этом появится возможность снижения затрат, среди которых можно особенно отметить: стоимость хранения запасов, включающую суммы списания неликвидной продукции и потери от иммобилизации оборотного капитала. И как следствие — повышение рентабельности как отдельных горнодобывающих компаний, так и их цепей поставок, что имеет особо важное значение в современных условиях конкурентной борьбы за потребителя.

Используя данные о бухгалтерской отчетности АО «УК «Кузбассразрезуголь» за 2022 г., размещенной в открытых источниках (Тинькофф Банк, н.д.), можно произвести оценку экономического эффекта от совершенствования подходов к планированию потребности в запасах. По итогам 2022 г. компания занимает 2-е место в РФ по объему добычи угля (Портал eRUDA.ru..., н.д.), себестоимость которой составила около 126,1 млрд руб. В среднем по отрасли затраты на закупку операционных ресурсов составляют около 25% от себестоимости. Таким образом, общее снижение стоимости приобретаемых запасов, если масштабировать вышеприведенный эффект по категории на весь ассортимент, составит примерно 3,5 млрд руб. Высвобождение данной суммы приведет к соответствующему сокращению складских затрат и увеличению рентабельности активов компании, в том числе за счет снижения потерь от иммобилизации оборотного капитала на 131,3 млн руб., рассчитанных по ключевой ставке ЦБ РФ в размере 7,5% годовых.

Заключение

В статье были рассмотрены теоретические аспекты двух подходов к планированию потребности в логистике — с помощью экстраполяции тренда, сезонной волны и с помощью тригонометрической экстраполяции. Рассмотренный практический пример показал более высокую точность прогноза при гармоническом анализе, что может свидетельствовать о его большей эффективности и возможности использования при планировании

потребности в запасах повседневного и сезонного расхода. Кроме того, данный метод можно рекомендовать при расчете нормативов страховых запасов для запасов хаотичного потребления, в качестве альтернативы корреляционно-регрессионным методам, которые являются достаточно трудоемкими и более сложными в практическом плане. Увеличение точности прогнозов позволит снизить степень неопределенности, что окажет положительное влияние на уровни страховых и общих запасов во всех звеньях цепей поставок горнодобывающих компаний.

Аналогичный эффект можно ожидать при планировании потребности в запасах производственных компаний, осуществляющих свою деятельность в других отраслях экономики, с учетом доли затрат на закупки операционных ресурсов в себестоимости выпуска готовой продукции. Однако в компаниях, не относящихся к добывающим отраслям, с помощью гармонического анализа можно также планировать потребность в запасах основного сырья и комплектующих, а не только в операционных ресурсах, когда ожидаемый эффект может быть еще более осязаемым. Кроме того, гармонический анализ могут использовать организации торговли или предприятия сервиса, оказывающие логистические услуги (перевозка, складское хранение и др.), управляющие запасами широкого ассортимента операционных ресурсов, используемых для проведения ремонта и эксплуатации объектов транспортной и складской инфраструктуры.

Список литературы

Бармина, Е. Ю., & Борисова, В. В. (2017). *Запасы в условиях неопределенности: учебное пособие*. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного экономического университета.

Батуров, А. В., & Дробная, Е. Н. (2019). Экономическая роль материально-производственных запасов в производственном процессе. *Экономический рост как основа устойчивого развития России*, 78–83.

Власова, Ю. Е., Малич, А. В., & Закревская, Е. А. (2016). Прогнозирование продаж методами гармонического анализа. *Международный студенческий научный вестник*, 2, 102.

Глебова, И. Ю., & Чурилова, Э. Ю. (2023). *Социально-экономическая статистика: учебник*. М.: КноРус.

Голов, В. А., & Рюмкин, В. И. (2018). Оптимизация системы управления запасами при стационарном случайном спросе. *Современные направления развития управления, экономики и образования*, 78–82.

Джордж, Л. М. (2017). *Бережливое производство + шесть сигм в сфере услуг. Как скорость бережливого производства и качество шести сигм помогают совершенствованию бизнеса*. М.: Манн, Иванов и Фербер.

Дыбская, В. В. (2023). *Проектирование системы распределения в логистике: монография*. М.: ИНФРА-М. <https://doi.org/10.12737/24760>

Дыбская, В. В., & Сергеев, В. И. (2023). *Логистика. В 2 ч.: учебник для бакалавриата и магистратуры*. М.: Юрайт.

Елисеева, И. И. (ред.). (2023). *Бизнес-статистика: учебник и практикум для вузов*. 2-е изд.). М.: Юрайт.

Зайцева, И. В., Малафеев, О. А., Резеньков, Д. Н., Рыжов, А. В., & Пожидаев, С. В. (2021). Экономико-математическое моделирование минимизации общих затрат в управлении запасами. *Фундаментальные исследования*, 2, 18–22. <https://doi.org/10.17513/fr.42960>

Лукинский, В. С. (ред.). (2023). *Управление запасами в цепях поставок. В 2 ч.: учебник и практикум для вузов*. М.: Юрайт.

Маркина, С. А., & Харина, Н. Л. (2018). Управление оборотными активами торговых организаций с использованием оптимизационных моделей в целях обеспечения экономической безопасности. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент*, 8, 4(29), 223–234.

Мищенко, А. В., & Михеева, Е. В. (2019). *Методы оценки эффективности управления производственно-финансовой деятельностью предприятия: монография*. М.: НИЦ ИНФРА-М. www.dx.doi.org/10.12737/monography_5d1ae60d82d6d9.87533425

Мищенко, А. В., & Пилюгина, А. В. (2023). *Методы финансового планирования и оценки эффективности управления производственно-финансовой деятельностью предприятия: монография*. М.: НИЦ ИНФРА-М. <https://doi.org/10.12737/1875454>

Моисеева, Н. К., & Олейник, С. П. (2022). *Экономические основы логистики: учебник*. 2-е изд. М.: ИНФРА-М. <https://doi.org/10.12737/1439631>

Портал eRUDA.ru — рейтинг золотодобывающих компаний РФ (н.д.). Ведущие угледобывающие компании РФ — 2022 г. Дата обращения 22.04.2023, http://www.eruda.ru/gdp/top_50_vedushchikh_ugledobyvayushchikh_kompaniy_rf_reyting.htm

Салин, В. Н., & Шпаковская, Е. П. (ред.). (2023). *Статистика. (Социально-экономическая статистика): учебник*. М.: КноРус.

Сергеев, В. И. (2023). *Управление цепями поставок: учебник для вузов*. М.: Юрайт. <https://doi.org/10.12737/1844337>

Сергеев, В. И. (ред.). (2023). *Корпоративная логистика в вопросах и ответах: монография*. 2-е изд. М.: ИНФРА-М. <https://doi.org/10.12737/2373>

Сергеев, В. И., & Эльяшевич, И. П. (2023). *Логистика снабжения: учебник для вузов*. 5-е изд. М.: Юрайт.

Сергеев, В. И., & Эльяшевич, И. П. (2023). *Управление закупками и запасами в цепях поставок: учебник*. М.: НИЦ ИНФРА-М. <https://doi.org/10.12737/1844337>

Стерлигова, А. Н. (2022). *Управление запасами в цепях поставок: учебник*. М.: НИЦ ИНФРА-М.

Стерлигова, А. Н., & Фель, А. В. (2022). *Операционный (производственный) менеджмент: учебное пособие*. М.: НИЦ ИНФРА-М.

Тинькофф Банк (н.д.). *Бухгалтерская отчетность контрагентов за 2022 г.* Дата обращения 22.04.2023, <https://www.tinkoff.ru/business/contractor/legal/1034205040935/financial-statements/>

Турченко, А. А. (2021). Явные и альтернативные издержки как инструмент для изучения возможных транзакционных издержек субъекта в рамках логистического аутсорсинга. *Актуальные проблемы учета, экономического анализа и финансово-хозяйственного контроля деятельности организации*, 187–190.

Царькова, Е. В. (2020). Модели управления запасами в условиях неопределенности. *Трансформация национальной социально-экономической системы России*, 506–514.

Чашина, Д. А., & Онохина, Е. А. (2020). Использование модели Уилсона для обеспечения конкурентоспособности предприятия. *Modern Science*, 3-1, 154–162.

Юров, В. М. (2018). Технология прогнозирования периодических экономических процессов на основе методов гармонического анализа в MS Excel. *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика*, 3, 19–28. <https://doi.org/10.18384/2310-6646-2018-3-19-28>

References

Baturov, A. V., & Drobnaya, E. N. (2019). The economic role of inventory in the production process. *Economic growth as a basis for sustainable development of Russia*, 78–83.

Chashchina, D. A., & Onokhina, E. A. (2020). Using the Wilson model to ensure the competitiveness of the enterprise. *Modern Science*, 3-1, 154–162.

Dybskaya, V. V. (2023). *Designing a distribution system in logistics: a monograph*. M.: NIC INFRA-M. <https://doi.org/10.12737/24760>

Dybskaya, V. V., & Sergeev, V. I. (2023). *Logistics in 2 hours: textbook for bachelor's and master's degrees*. M.: Yurayt Publishing House.

Eliseeva, I. I. (ed.). (2023). *Business statistics: textbook and workshop for universities*. 2nd ed. M.: Yurayt Publishing House.

George, L. M. (2017). *Lean manufacturing + six sigma in the service sector. How the speed of lean manufacturing and the quality of six sigma help business improvement*. M.: Mann, Ivanov and Ferber.

Glebkova, I. Yu., & Churilova, E. Yu. (2023). *Socio-economic statistics: textbook*. M.: Knorus.

Golov, V. A., & Ryumkin, V. I. (2018). Optimization of the inventory management system for stationary random demand. *Modern trends in the development of management, economics and education*, 78–82.

Lukinsky, V. S. (ed.). (2023). *Inventory management in supply chains in 2 hours: textbook and workshop for universities*. M.: Yurayt Publishing House.

Markina, S. A., & Kharina, N. L. (2018). Management of current assets of trading organizations using optimization models in order to ensure economic security. *Proceedings of the Southwestern State University. Series: Economics. Sociology. Management*, 8, 4(29), 223–234.

Mishchenko, A. V., & Mikheeva, E. V. (2019). *Methods of assessing the effectiveness of the management of production and financial activities of the enterprise. Monograph*. M.: NIC INFRA-M. www.dx.doi.org/10.12737/monography_5d1ae60d82d6d9.87533425

Mishchenko, A. V., & Pilyugina, A. V. (2023). *Methods of financial planning and evaluation of the effectiveness of management of production and financial activities of the enterprise: monograph*. M.: NIC INFRA-M. <https://doi.org/10.12737/1875454>

Moiseeva, N. K., & Oleinik, S. P. (2022). *Economic fundamentals of logistics: textbook*. 2nd ed. M.: NIC INFRA-M. <https://doi.org/10.12737/1439631>

Portal eRUDA.ru — rating of gold mining companies of the Russian Federation (n.d.). Leading coal mining companies of the Russian Federation — 2022. Retrieved April 22, 2023, from http://www.eruda.ru/gdp/top_50_vedushchikh_ugledobyvayushchikh_kompaniy_rf_reyting.htm

Salin, V. N., & Shpakovskaya, E. P. (ed.). (2023). *Statistics. (Socio-economic statistics): textbook*. M.: Knorus.

Sergeev, V. I. (2023). *Supply chain Management: Textbook for universities*. M.: Yurayt Publishing House. <https://doi.org/10.12737/1844337>

Sergeev, V. I. (ed.). (2023). *Corporate logistics in questions and answers: a monograph*. 2nd ed. M.: NIC INFRA-M. <https://doi.org/10.12737/2373>

Sergeev, V. I., & Elyashevich, I. P. (2023). *Logistics of supply: textbook for universities*. 5th ed. M.: Yurayt Publishing House.

Sergeev, V. I., & Elyashevich, I. P. (2023). *Procurement and inventory management in supply chains: Textbook*. M.: NIC INFRA-M. <https://doi.org/10.12737/1844337>

Sterligova, A. N. (2022). *Inventory management in Supply chains: A textbook*. M.: SIC INFRA-M.

Sterligova, A. N., & Fel, A. V. (2022). *Operational (production) management: A textbook*. M.: NIC INFRA-M.

Tinkoff Bank (n.d.). Accounting statements of counterparties for 2022. Retrieved April 22, 2023, from <https://www.tinkoff.ru/business/contractor/legal/1034205040935/financial-statements/>

Tsarkova, E. V. (2020). Inventory management models under uncertainty. *Transformation of the National socio-economic system of Russia*, 506–514.

Turchenko, A. A. (2021). Explicit and opportunity costs as a tool for studying possible transaction costs of an entity within the framework of logistics outsourcing. *Actual problems of accounting, economic analysis and financial and economic control of the organization's activities*, 187–190.

Vlasova, Yu. E., Malich, A. V., & Zakrevskaya, E. A. (2016). Sales forecasting by harmonic analysis methods. *International Student Scientific Bulletin*, 2, 102.

Yurov, V. M. (2018). The technology of forecasting periodic economic processes based on harmonic analysis methods in MS Excel. *Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Economics*, 3, 19–28. <https://doi.org/10.18384/2310-6646-2018-3-19-28>

Zaitseva, I. V., Malafeev, O. A., Rezenkov, D. N., Ryzhov A. V., & Pozhidaev, S. V. (2021). Economic and mathematical modeling of minimizing total costs in inventory management. *Fundamental Research*, 2, 18–22. <https://doi.org/10.17513/fr.42960>