

УДК 338.242

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.47.4.025](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.47.4.025)

## Модель управления запасами при реализации строительных проектов, основанная на марковских случайных процессах

Е.А. Серебрякова✉

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж,  
Российская Федерация*

**Резюме.** В статье описана разработанная математическая модель, позволяющая на основе вероятностных методов в динамике оценивать возможности возникновения рисков, связанных с дефицитом ресурсов при реализации строительных проектов. Предлагаемая модель дает возможности осуществлять мониторинг запасов дефицитных ресурсов при реализации строительных проектов, учитывая стохастический характер их пополнения и расходования, что позволит осуществлять профилактические мероприятия, направленные на поддержку имеющихся запасов на необходимом уровне. Математической основой модели послужили теории стационарных марковских случайных процессов и массового обслуживания. Для реализации вычислительных процедур по модели на практике описана методика осуществления расчетов в табличном процессоре MS Excel. Расчет по вычислительному листу Excel предполагает ввод необходимого ресурса, для которого необходимо управление запасами по каждому периоду времени, а также диапазон потребления данного ресурса при проведении строительных работ. Далее рассчитываются приведенная интенсивность расхода ресурса на несколько периодов реализации проекта и вероятности наличия ресурса как функции времени и количества завезенного запаса ресурса. На основе вычислительного листа можно оценивать вероятности имеющегося в запасе ресурса на несколько временных прогнозных периодов с целью минимизации возможных рисков, связанных с нехваткой ресурса. В заключительной части работы приведены результаты апробации модели в деятельности строительной организации, которая показала, что применение модели позволит сэкономить от 5 до 10 % денежных средств, связанных с издержками от приостановки строительных работ из-за нехватки необходимых ресурсов.

**Ключевые слова:** управление запасами, строительство, марковские случайные процессы, теория массового обслуживания, математическое моделирование.

**Для цитирования:** Серебрякова Е.А. Модель управления запасами при реализации строительных проектов, основанная на марковских случайных процессах. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1734> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.025

## A model of inventory management in construction projects based on Markov random processes

Е.А. Serebryakova✉

*Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation*

**Abstract.** The article describes the developed mathematical model that allows, based on probabilistic methods, to dynamically assess the possibility of risks associated with resource shortages during construction projects. The proposed model makes it possible to monitor the reserves of scarce resources during construction projects, taking into account the stochastic nature of their replenishment and expenditure, which will allow for preventive measures aimed at maintaining existing reserves at the required level. The mathematical basis of the model is the theory of stationary Markov random processes and mass service. To implement the computational procedures for the model in practice, a methodology

for performing calculations in the MS Excel spreadsheet is described. Calculation using the Excel calculation sheet involves entering the required resource for which inventory management is required for each time period, as well as the range of consumption of this resource during construction work. Next, the reduced intensity of resource consumption for several periods of project implementation is calculated, and the probabilities of resource availability as a function of time and the amount of delivered resource stock. Based on the calculation sheet, it is possible to estimate the probabilities of the resource available in stock for several time forecast periods in order to minimize possible risks associated with resource shortages. The final part of the work presents the results of testing the model in the activities of a construction organization, which showed that the use of the model will save from 5 to 10% of funds associated with the costs of suspending construction work due to a lack of necessary resources.

**Keywords:** inventory management, construction, Markov random processes, queuing theory, mathematical modeling.

**For citation:** Serebryakova E.A. A model of inventory management in construction projects based on Markov random processes. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(4). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1734> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.025

## Введение

Проблема управления запасами в строительной сфере в России в настоящее время играет значимую роль и влияет на множество аспектов этой отрасли [1]. В частности, управление запасами напрямую связано с экономической эффективностью строительных проектов. Оптимальные запасы позволяют снижать затраты на хранение, предотвращать проблемы с нехваткой материалов и сокращают время простоя строительных работ. В условиях нестабильного рынка и колебаний цен на строительные материалы проблема управления запасами становится особенно актуальной. Непредсказуемость поставок может привести к задержкам в строительстве и увеличению расходов. Кроме того, неэффективное управление запасами может сказаться на качестве строительных работ и, как следствие, на безопасности объектов строительства. Несоответствие в запасах и сроках поставок необходимого ресурса может привести к экономии строительных материалов, использованию ненадежных или некачественных материалов.

Таким образом, проблема управления запасами в строительной сфере России на сегодняшний день является важной и комплексной задачей, требующей внимания и необходимости разработки эффективных решений, приводящих к повышению качества и эффективности реализации строительного процесса.

Актуальность выбранной темы в контексте современных реалий в России обусловлена тем, что в условиях неопределенности, связанной с экономическими санкциями, колебаниями валютных курсов и изменениями в рыночной конъюнктуре, строительная отрасль России сталкивается с необходимостью более эффективного управления затратами, в том числе в сфере запасов. Оптимизация управления запасами может существенно снизить издержки и повысить конкурентоспособность компаний.

Также необходимо учитывать то, что в последние годы наблюдается увеличение объемов строительства, особенно в рамках государственной программы по развитию инфраструктуры. Это создает необходимость в более тщательном планировании и управлении запасами строительных материалов для обеспечения своевременного выполнения проектов [2].

Внедрение новых технологий и методов, таких как бережливое производство и цифровизация процессов, делает актуальным вопрос о пересмотре традиционных подходов к управлению запасами. Это включает в себя использование современных ИТ-решений и алгоритмов для прогнозирования потребностей и оптимизации запасов [3]. Также следует учитывать то, что в современных условиях строительные компании

сталкиваются с проблемами, связанными со срывами поставок и логистическими трудностями. Это подчеркивает необходимость разработки надежных моделей управления запасами, которые могут учитывать возможные риски и неопределенности.

### Цели и задачи

Ввиду вышесказанного, актуальной целью данной работы является описание и практическая апробация математической модели, которая позволит анализировать в вероятностном подходе возможности нивелирования рисков, связанных с дефицитом ресурсов при реализации строительных проектов. Для достижения поставленной цели будут решены следующие задачи:

- описание математической модели управления запасами при строительстве, основанной на марковских случайных процессах и теории массового обслуживания;
- разработка методики практической реализации математической модели в MS Excel;
- приведение результатов апробации модели в деятельности строительной организации.

Далее приведем описание математической модели, которая основана на теориях случайных процессов и массового обслуживания.

### Математические основы предлагаемой модели

Подробно теоретические основы модели управления запасами изложены в работах [1–5], поэтому приведем кратко теоретические основы предлагаемой модели.

Рассмотрим некоторый ресурс, который регулярно расходуется и пополняется в процессе реализации строительного проекта. Предположим, что имеется средний план расходования ресурса на несколько будущих периодов времени, однако реальные расходы являются случайной величиной, распределенной по закону, близкому к нормальному. Необходимо в вероятностном подходе спланировать средний объем поставок ресурсов так, чтобы с заданной вероятностью обеспечить постоянный необходимый уровень запаса на рассматриваемый интервал времени. Будем использовать марковские процессы с дискретным состоянием и непрерывным временем [6, 7].

Для построения модели следует определить, на какой период времени будут планироваться запасы ресурсов. Взяв в качестве единицы измерений сутки (или дни), обозначим максимальный интервал планирования через параметр  $N$ .

Применяя методы марковских случайных процессов, описание которых для решения данной задачи приведено в работах [6, 7], введем два вектора параметров, управляющих процессом пополнения и расходования запасов:

- $\lambda_i$ , где  $i=0, 1, \dots, N-1$  – вектор поставок запасов на будущие периоды времени, каждый элемент которого равен среднему объему запасов для пополнения на  $i$ -е сутки планируемого периода;
- $\mu_j$ , где  $j=1, 2, \dots, N$  – вектор среднего расхода запасов за  $j$ -й период времени.

Определим состояния случайного процесса  $S_i$ ,  $i=0, 1, \dots, N-1$ , каждое из которых означает то, что объем запаса ресурса при реализации строительного проекта, достаточно на  $i$  суток, но недостаточно на  $i+1$  суток. В итоге получаем марковский случайный процесс гибели и размножения, граф состояний которого приведен на Рисунке 1.



Таким образом, данная модель позволит оценить вероятности поддержания необходимого запаса ресурсов при реализации строительных проектов в ближайшие периоды времени.

### Методика практической реализации задачи в MS Excel

Для практической реализации методики управления запасами необходимого ресурса, а именно, с целью автоматизации расчетов по моделям, был разработан вычислительный лист на базе MS Excel, который позволял выполнять все необходимые расчеты.

Расчет по вычислительному листу предполагает ввод необходимого ресурса, для которого необходимо управление запасами по каждому периоду времени, а также диапазон потребления данного ресурса при проведении строительных работ. Рассмотрим более детально процесс расчета приведенной интенсивности расхода ресурса в рамках реализации проекта. Оценка вероятностей наличия ресурса и его расхода осуществляется с учетом времени и имеющегося запаса ресурса. Применение информационных технологий позволит оперативно прогнозировать вероятности наличия ресурса на несколько временных периодов, чтобы снизить риски, связанные с его нехваткой. Далее производится анализ данных для минимизации возможных рисков, что позволяет эффективно управлять запасами ресурса в процессе выполнения проекта. [10]. Структурная схема алгоритма расчетов по вычислительному листу Excel приведена на Рисунке 2.

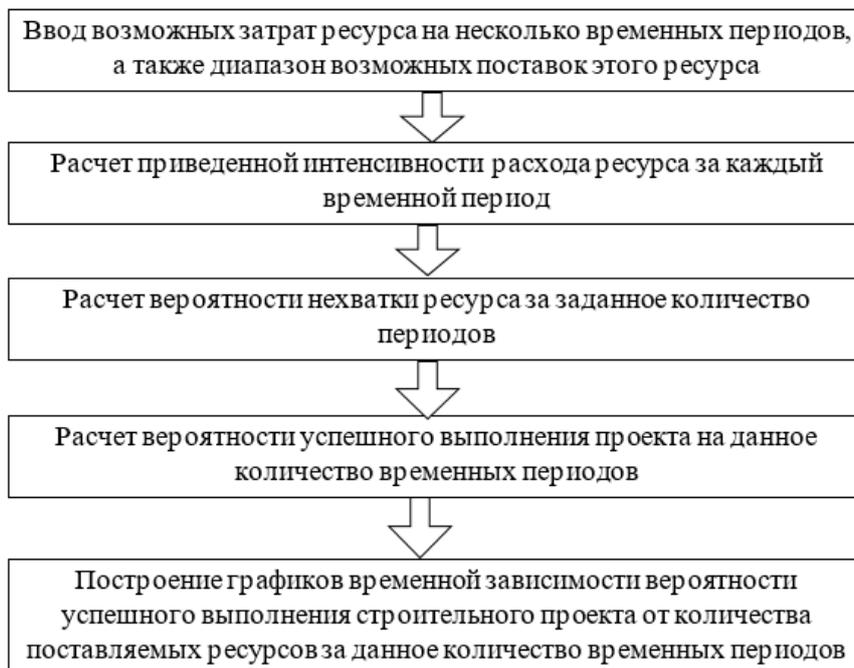


Рисунок 2 – Структурная схема методики управления запасами при реализации строительных проектов

Figure 2 – Structural diagram of the inventory management methodology for the implementation of construction projects

Данная методика была апробирована на практике и успешно реализована в действующей строительной организации. Рассмотрим методику вычислений по расчетному листу Excel, структурная схема которого приведена на Рисунке 2. Приведем конкретный пример, который был реализован на практике в действующей строительной

компании.

Основное направление деятельности строительной компании, на основе которой проводилась апробация представленной модели – строительство зданий и сооружений различной степени сложности и функционального назначения, архитектурно-строительное проектирование, в том числе проектирование автомобильных дорог и дорожной инфраструктуры, а также инженерные изыскания. На все указанные виды деятельности организация имеет необходимые свидетельства о допуске, выданные соответствующими СРО.

Так как строительная компания занимается проведением строительных работ, одним из основных ресурсов для выполнения которых является силикатный кирпич, производится планирование поставок кирпича на 6 дней с учетом его затрат (согласно проектному плану) на период до шести суток. Поставки кирпича каждые сутки возможны в диапазоне от 7 до 13,5 тыс. шт.

Затраты кирпича (в тыс. шт.) посуточно приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Нормы потребления кирпича в течение 6 суток

Table 1 – Brick consumption rates for 6 days

Сутки	1	2	3	4	5	6
Потребление кирпича за каждые сутки в течение 6 суток, тыс. шт.	9	8	10,5	11	8,5	10

В соответствии со структурной схемой, изображенной на Рисунке 2, область ввода данных изображена на Рисунке 3.

	A	B	C	D	E	F	G
1	<b>Приведенная интенсивность снабжения кирпичом, по суткам</b>						
2	Сутки	1	2	3	4	5	6
3	Потребление кирпича за 6 суток, тыс.	9	8	10,5	11	8,5	10
4	Поставки кирпича за 6 суток, тыс.	Приведенная интенсивность					
5	7	0,777778	0,875	0,666667	0,636364	0,823529	0,7
6	7,1	0,788889	0,8875	0,67619	0,645455	0,835294	0,71
7	7,2	0,8	0,9	0,685714	0,654545	0,847059	0,72
8	7,3	0,811111	0,9125	0,695238	0,663636	0,858824	0,73
68	13,3	1,477778	1,6625	1,266667	1,209091	1,564706	1,33
69	13,4	1,488889	1,675	1,27619	1,218182	1,576471	1,34
70	13,5	1,5	1,6875	1,285714	1,227273	1,588235	1,35

Рисунок 3 – Ввод данных и расчет приведенных интенсивностей

Figure 3 – Data entry and calculation of reduced intensities

На расчетный лист, приведенный на Рисунке 3, в ячейки B3-G3 вводятся данные о потреблении кирпича из Таблицы 1. В ячейки B5-B70 вводятся протабулированные с шагом 5 значения возможных поставок кирпича от 7 до 13,5 тыс. шт. с шагом 0,1. Серые ячейки от A9 до G67 являются скрытыми, и они построены по логике построения окружающих их ячеек. В ячейку B5 внесена формула « $=A5/B3$ », которая с помощью автозаполнения перенесена на массив ячеек B5 – G70.

Следующая область расчетного листа посвящена вычислению промежуточных параметров для решения поставленной задачи, расчет производится по формулам (4). Область расчета промежуточных параметров задачи приведена на Рисунке 4.

	I	J	K	L	M	N	O	P
1	<b>Вероятность нехватки кирпича за данное количество суток</b>							
2	Сутки	P0	1	2	3	4	5	6
3	Потребление кирпича за 6 суток, тыс. шт.		9	8	10,5	11	8,5	10
4	Поставки кирпича за 6 суток, тыс.							
5	7	0,277395	0,215752	0,188783	0,125855	0,08009	0,065956	0,046169
6	7,1	0,269942	0,212954	0,188997	0,127798	0,082488	0,068901	0,04892
7	7,2	0,262626	0,210101	0,189091	0,129662	0,08487	0,07189	0,051761
8	7,3	0,255448	0,207197	0,189067	0,131447	0,087233	0,074918	0,05469
68	13,3	0,039174	0,057891	0,096244	0,121909	0,147399	0,230636	0,306746
69	13,4	0,037958	0,056515	0,094663	0,120808	0,147166	0,232004	0,310885
70	13,5	0,036782	0,055173	0,093104	0,119705	0,146911	0,23333	0,314995

Рисунок 4 – Расчет промежуточных параметров  
Figure 4 – Calculation of intermediate parameters

На Рисунках 3 и 4 также скрыты данные из автозаполняемых ячеек, в ячейку J5 задана формула следующего вида:  

$$=1/(1+B5+B5*C5+B5*C5*D5+B5*C5*D5*E5+B5*C5*D5*E5*F5+B5*C5*D5*E5*F5*G5)$$
с переносом ее на диапазон ячеек J5-J70. В ячейку K5 задана формула «=J5\*B5», которая копируется на диапазон ячеек K5-P70.

Следующая часть вычислительного листа посвящена вычислению непосредственно вероятности успешного выполнения проекта, которая связана с наличием необходимого ресурса на указанное количество суток. Интерфейс данной части расчетного листа приведен на Рисунке 5.

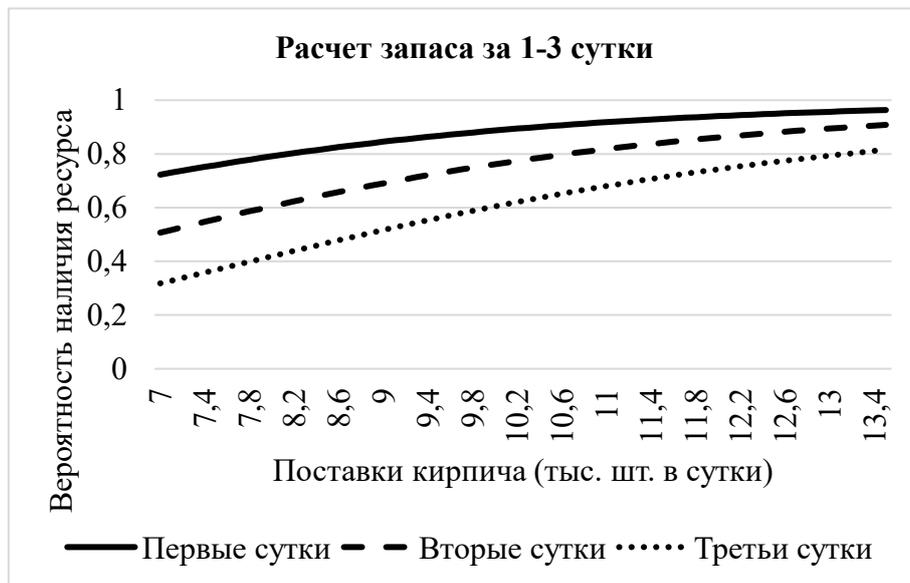
	R	S	T	U	V	W	X
1	<b>Вероятность достаточности запасов кирпича на данное количество суток</b>						
2	Сутки	1	2	3	4	5	6
3	Потребление кирпича за 6 суток, тыс. шт.	9	8	10,5	11	8,5	10
4	Поставки кирпича за 6 суток, тыс.						
5	7	0,722605	0,506853	0,31807	0,192215	0,112126	0,046169
6	7,1	0,730058	0,517104	0,328107	0,200309	0,117822	0,04892
7	7,2	0,737374	0,527273	0,338182	0,20852	0,12365	0,051761
8	7,3	0,744552	0,537355	0,348287	0,21684	0,129608	0,05469
68	13,3	0,960826	0,902934	0,80669	0,684781	0,537382	0,306746
69	13,4	0,962042	0,905527	0,810863	0,690055	0,542889	0,310885
70	13,5	0,963218	0,908045	0,814941	0,695236	0,548324	0,314995

Рисунок 5 – Итоговый расчет вероятности успешного выполнения проекта  
Figure 5 – Final calculation of the probability of successful project completion

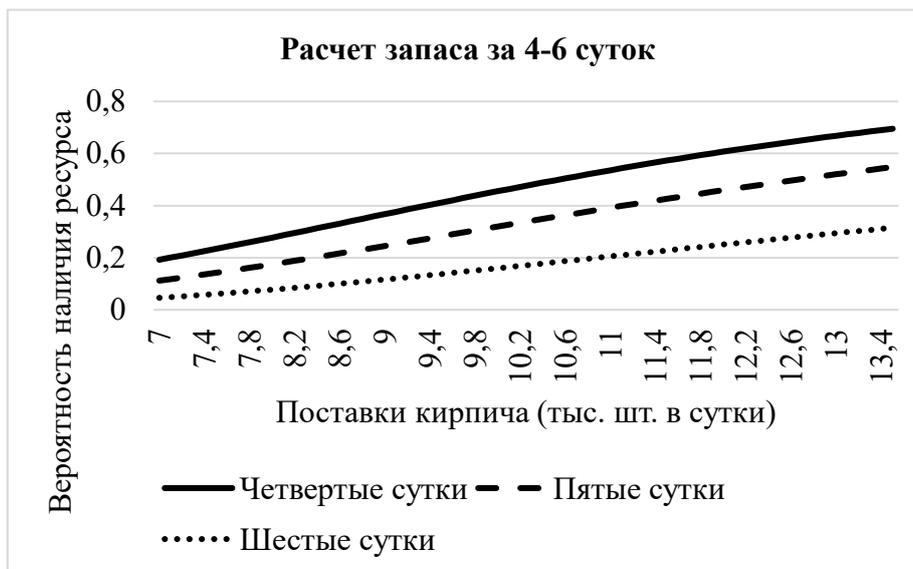
В ячейку расчетной таблицы X5 задана формула «=P5», которая переносится на диапазон ячеек от X5 до X70, а в ячейку W5 определена формула «=X5+O5», которая переносится на диапазон от W5 до S70.

Окончательные выводы об успешности выполнения строительного проекта и вероятностях его срыва из-за отсутствия необходимого ресурса дают графики, которые также предоставляет вычислительный лист.

Не будем приводить копии с вычислений по вычислительному листу Excel, они получены на основании данных, приведенных на Рисунке 5, просто приведем результаты полученных вычислений, выраженные в графиках зависимостей вероятностей нехватки ресурса как функции от объема его поставки при планируемых его расходах на первые три временных периода: на первые трое суток (Рисунок 6 а) и на последующие трое суток (Рисунок 6 б).



а)



б)

Рисунок 6 – Результаты вычислений по модели  
 Figure 6 – Results of calculations according to the model

Как видно из Рисунка 6, вычислительный лист Excel позволяет гибко реагировать на потребление и возможные поставки необходимого ресурса и осуществлять его необходимое планирование.

### Заключение

Таким образом, разработана и описана математическая модель, позволяющая на основе вероятностных методов в динамике оценивать возможности рисков, связанных с дефицитом ресурсов при реализации строительных проектов. Предлагаемая модель дает возможности осуществлять мониторинг запасов дефицитных ресурсов при реализации строительных проектов, учитывая стохастический характер их пополнения и расходования, что позволит осуществлять профилактические мероприятия, направленные на поддержку имеющихся запасов на необходимом уровне. Это, в свою очередь, способствует нивелировать риски срыва реализации строительных проектов, связанные с нехваткой ресурсов.

Применение данной модели в реальной практике строительной компании показало, что модель управления запасами действительно эффективна, и по экспертным оценкам менеджеров в сфере строительства позволяет экономить от 5 до 10 % денежных средств, связанных с издержками от приостановки строительных работ из-за нехватки необходимых ресурсов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Линдерс М.Р., Фирон Х.Е. *Управление снабжением и запасами. Логистика*. Санкт-Петербург: Полигон; 1999. 757 с.  
Leenders M.R., Fearon H.E. *Purchasing and supply management*. Saint Petersburg: Poligon; 1999. 757 p. (In Russ.).
2. Шрайбфедер Дж. *Эффективное управление запасами*. Москва: Альпина Бизнес Букс; 2006. 304 с.  
Schreibfeder J. *Achieving Effective Inventory Management*. Moscow: Al'pina Biznes Buks; 2006. 304 p. (In Russ.).
3. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Порядина В.Л. *Модели и методы в управлении и экономике с применением информационных технологий*. Санкт-Петербург: Интермедия; 2017. 264 с.
4. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Серебрякова Е.А. Модель управления запасами в строительной сфере, основанная на марковских случайных процессах. *Инженерный вестник Дона*. 2023;(2):211–223.  
Barkalov S.A., Moiseev S.I., Serebryakova E.A. Inventory Management Model in the Construction Industry Based on Markov Stochastic Processes. *Engineering Journal of Don*. 2023;(2):211–223. (In Russ.).
5. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Серебрякова Е.А. Динамическая модель управления инновационными проектами в строительстве. *Системы управления и информационные технологии*. 2024;(2):30–34.  
Barkalov S.A., Moiseev S.I., Serebryakova E.A. Dynamic model of management of innovation projects in construction. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2024;(2):30–34. (In Russ.).
6. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. *Теория случайных процессов и ее инженерные приложения*. Москва: Высшая школа; 1998. 354 с.
7. Миллер Б.М., Панков А.Р. *Теория случайных процессов в примерах и задачах*. Москва: Физматлит; 2002. 320 с.

8. Моисеев С.И., Обуховский А.В. *Математические методы и модели в экономике*. Воронеж: Институт менеджмента, маркетинга и финансов; 2009. 160 с.
9. Баркалов С.А., Морозов В.П., Моисеев С.И. Моделирование процесса принятия решений на основе марковских случайных процессов. В сборнике: *Математические методы и информационные технологии в моделировании систем: Материалы V Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, 29 апреля 2021 года, Воронеж, Россия*. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга»; 2021. С. 52–59.  
Barkalov S.A., Morozov V.P., Moiseev S.I. Modeling the decision-making process based on Markov random processes. In: *Matematicheskie metody i informatsionnye tekhnologii v modelirovanii sistem: Materialy V Vserossiiskoi (natsional'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii, 29 April 2021, Voronezh, Russia*. Voronezh: Publishing and Printing Center "Nauchnaya Kniga"; 2021. pp. 52–59. (In Russ.).
10. Моисеев С.И., Порядина В.Л., Лихачева Т.Г. Применение марковских случайных процессов для моделирования процесса принятия решений. В сборнике: *Пути активизации регионального потенциала реиндустриализации: Материалы региональной научно-практической конференции, 17 мая 2024 года, Воронеж, Россия*. Курск: ЗАО «Университетская книга»; 2024. С. 40–44.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Серебрякова Елена Анатольевна, Elena A. Serebryakova**, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация. Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

e-mail: [sea-parish@mail.ru](mailto:sea-parish@mail.ru)

ORCID: [0000-0001-5129-2460](https://orcid.org/0000-0001-5129-2460)

*Статья поступила в редакцию 31.10.2024; одобрена после рецензирования 20.11.2024; принята к публикации 27.11.2024.*

*The article was submitted 31.10.2024; approved after reviewing 20.11.2024; accepted for publication 27.11.2024.*