

УДК 502.131:504.06

Е. Э. Смирнова^а, В. Н. Азаров^б

^а Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет

^б Волгоградский государственный политехнический университет

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ В ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ НА ОСНОВЕ МАТРИЦЫ НАДЕЖНОСТИ β — P_i

Разрабатывается методология интеграции матрицы надежности β — P_i в модель управления жизненным циклом инвестиционно-строительных проектов для выявления парадокса оптимизации, при котором формально высокие экологические рейтинги сопровождаются критическим снижением фактической надежности системы. Методология включает стохастическое моделирование экологических рисков $E[E(x)]$ через распределение сценариев с вероятностями P_i , расчет индексов надежности β для конструктивных элементов и экологических параметров, построение синтетической матрицы «экологичность (БЕЕ) — надежность (β)» для классификации проектов по девяти зонам риска. Апробация методологии проходила на основе данных линейно-протяженного города Волгограда. Разработанная методология обеспечивает переход от контроля средних значений к управлению хвостовыми рисками в логнормальном пространстве.

К л ю ч е в ы е с л о в а: логнормальное распределение, индекс надежности, оценка риска, производственно-хозяйственная деятельность, стохастическое моделирование, экологическая безопасность.

Управление жизненным циклом инвестиционно-строительных проектов (ИСП) в условиях городской среды сталкивается с противоречием между формальным соблюдением экологических нормативов и фактической надежностью природно-технических систем [1]. Традиционные детерминистские методы оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), базирующиеся на сравнении концентраций загрязнителей с ПДК/ОДК, систематически недооценивают «хвостовые» риски, характерные для логнормальных распределений [2, 3]. Данная проблема усугубляется для линейно-протяженных городов (Волгоград, Набережные Челны, Уфа), где неравномерность развития территорий, повышенные логистические издержки и сложность синхронизации инфраструктурных проектов создают дополнительные источники неопределенности.

Обзор литературы. Исследования в области интеграции риск-ориентированного подхода в управление ИСП демонстрируют, что модели оценки рисков на всех этапах жизненного цикла с учетом неопределенности внешней среды требуют применения вероятностных методов (ГОСТ Р ИСО 2394—2016, ISO 2394:2015 и др.). Y. Zhang et al. (2023) [4] убедительно показывают, что статические модели, оперирующие усредненными значениями, не способны учитывать пространственно-временную гетерогенность загрязнения в сложных урбанизированных системах, что приводит к ситуациям, когда реальное воздействие на экосистему многократно превосходит расчетное. Работы M. I. Al-Sari et al. (2023) [5] и V. Silva & A. Costa (2024) [6] выявили системный «разрыв эффективности» (performance gap) между проектными декларациями «зеленых» зданий и их реальными

эксплуатационными характеристиками, что обосновывает необходимость вероятностного подхода к оценке жизненного цикла (LCA).

Теория надежности конструкций, развитая в работах R. Melchers & A. Beck (2018) [7], предлагает математический аппарат для оценки вероятности отказа через индекс надежности β , связанный с распределениями нагрузок S и сопротивляемости R . A. Andersson (2021) доказал, что кинетические процессы в окружающей среде (деструкция и аккумуляция загрязнителей) подчиняются логнормальному, а не нормальному распределению [8], что требует перехода к логарифмическому пространству при расчете индекса $\beta = (\mu_{\ln R} - \mu_{\ln S}) / \sqrt{(\sigma_{\ln R}^2 + \sigma_{\ln S}^2)}$. N. Taleb (2025) в своем анализе «толстых хвостов» (fat tails) подчеркивает, что игнорирование дисперсии приводит к систематической недооценке вероятности экстремальных событий в сложных системах [9].

Применение методов многокритериальной оптимизации для выбора проектных решений с учетом рисков и затрат рассматривается в работах P. Zou et al. (2007) [10] и A. Cullen et al. (2014) [11], но эти подходы не учитывают динамические изменения городской среды. Более современные исследования M. Roghabadi (2020)* и L. Wang et al. (2023) [12] включают элементы сценарного моделирования и цифровых двойников, но их адаптация к условиям российских городов требует дополнительной проработки с учетом региональной специфики нормативного регулирования [13].

Японская система оценки CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency) [14] предлагает методологию расчета индекса $BEE = Q / L$, где Q — качество окружающей среды здания, L — экологическая нагрузка. Работа H. Gudmundsson et al. (2016) [15] демонстрирует применимость данного подхода для количественной оценки экологической эффективности, но не интегрирует критерии надежности конструкций.

Актуальность и практическое значение. Указ Президента РФ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» № 309 устанавливает целевые показатели качества городской среды, включая интегральный показатель «Улучшение качества городской среды в опорных населенных пунктах», охватывающий 16 компонентов. Отсутствие единой аналитической платформы для количественной оценки данного показателя с учетом вероятностей событий на всем жизненном цикле ИСП создает методологический разрыв [16]. Существующие исследования В. И. Теличенко и др. (2021) [17], Т. Г. Нефедовой и А. А. Шелудкова (2021) [18] и других ученых фокусируются на отдельных аспектах (экологические стандарты или центр-периферийная дифференциация), не предлагая комплексного решения проблемы интеграции надежности и экологической безопасности.

Выявленные пробелы. Анализ литературы обнаруживает следующие нерешенные проблемы:

1) отсутствие методологии выявления парадокса оптимизации, при котором формально высокие экологические рейтинги (BREEAM A+, LEED Platinum) маскируют критическое снижение индекса надежности β ;

* Roghabadi M. A. Risk-based framework for management of construction projects : a thesis for the degree of PhD (Building Engineering). Montreal : Concordia University, 2020. 166 p.

2) недостаточная разработка критериев перевода проектов из зоны «структурной аварийности» ($\beta < 2,0$, $P_f > 0,02$) в зону приемлемого риска через восстановительные меры;

3) игнорирование пространственной оптимизации размещения техногенных нагрузок с учетом чувствительности «чистых» зон к антропогенному воздействию.

Данное исследование устраняет указанные пробелы через интеграцию матрицы β — P_f в модель управления жизненным циклом ИСП, что позволяет перейти от нормативного соответствия к вероятностному проектированию надежности.

Цель исследования — разработка методологии применения матрицы надежности β — P_f для оценки экологических рисков в ИСП и алгоритма восстановительных мер для перевода объектов из зоны IX «Парадокс оптимизации» в зону III «Зеленая устойчивость».

Методологический каркас исследования выстроен на интеграции трех взаимосвязанных подходов:

1) стохастического моделирования экологических рисков через логнормальные распределения;

2) расчета индексов надежности β согласно ISO 2394:2015 и ГОСТ Р ИСО 2394—2016;

3) применения синтетической матрицы «экологичность (БЕЕ) — надежность (β)» для классификации проектов по девяти зонам риска.

Этап 1. Формализация вероятностной модели экологических рисков. Ожидаемое значение экологических рисков $E[E(x)]$ определяется через взвешенную сумму сценариев:

$$E[E(x)] = \sum_{i=1}^N N \cdot E_i \cdot P_i, \quad (1)$$

где w_i — весовые коэффициенты факторов (превышение ПДК для $PM_{2,5}$, PM_{10} , CO_2 , дефицит водных ресурсов, ущерб биоразнообразию, образование твердых отходов); E_i — экологический ущерб в сценарии i ; P_i — вероятность сценария.

Сценарии включают: s_1 — нормальная эксплуатация ($P_1 \approx 0,7$), s_2 — отказ конструкции ($P_2 \approx 0,05$), s_3 — необходимость реконструкции ($P_3 \approx 0,15$), s_4 — редевелопмент ($P_4 \approx 0,05$), s_5 — экстремальное природное явление ($P_5 \approx 0,05$), рассчитанные методом Монте-Карло [19].

Экологический ущерб E_i моделируется как логнормально распределенная случайная величина, поскольку процессы накопления загрязнений носят мультипликативный характер [8]. Параметры распределения определяются через коэффициент вариации v :

$$\sigma_{\ln}^2 = \ln(1 + v^2), \quad (2)$$

где $v = 0,20$ согласуется с данными инженерно-экологических изысканий по геохимической неоднородности грунтов [20].

Этап 2. Расчет индекса надежности β для экологических параметров. Экологическая нагрузка S (концентрация загрязнителя) и сопротивляемость

среды R (ПДК, буферная емкость экосистемы) задаются логнормальными распределениями:

$$\ln R \sim N(\mu_{\ln R}, \sigma_{\ln R^2}), \ln S \sim N(\mu_{\ln S}, \sigma_{\ln S^2}). \quad (3)$$

Индекс надежности вычисляется по формуле

$$\beta = \frac{\mu_{\ln R} - \mu_{\ln S}}{\sqrt{\sigma_{\ln R^2} + \sigma_{\ln S^2}}}. \quad (4)$$

Вероятность отказа (превышения экологической нагрузки над сопротивляемостью) преобразуется через обратную функцию стандартного нормального распределения:

$$P_f = \Phi(-\beta), \quad (5)$$

где $P_f = P(S > R)$ — соответствие β и P_f устанавливается согласно ISO 2394:

$$\begin{aligned} \beta = 3,4 &\rightarrow P_f = \Phi(-3,4) = 3,37 \cdot 10^{-4} \text{ (высокая надежность RC 3);} \\ \beta = 2,0 &\rightarrow P_f = \Phi(-2,0) = 2,28 \cdot 10^{-2} \text{ (нижняя граница нормы);} \\ \beta = 1,0 &\rightarrow P_f = \Phi(-1,0) = 1,59 \cdot 10^{-1} \text{ (недопустимый риск);} \\ \beta = 0,5 &\rightarrow P_f = \Phi(-0,5) = 3,09 \cdot 10^{-1} \text{ (структурная аварийность).} \end{aligned}$$

Этап 3. Расчет индекса экологической эффективности BEE по методологии CASBEE. Built Environment Efficiency (BEE) определяется как отношение качества окружающей среды здания Q к экологической нагрузке L согласно японской системе CASBEE:

$$BEE = \frac{Q}{L}, \quad (6)$$

где Q — интегральный показатель качества внутренней и внешней среды (шкала 0—5); L — интегральный показатель экологической нагрузки на протяжении жизненного цикла (шкала 0—5).

Компоненты Q и L рассчитываются по формулам

$$Q = \sum_{j=1}^4 w_{Q_j} \cdot Q_j, \quad (7)$$

$$L = \sum_{k=1}^3 w_{L_k} \cdot L_k, \quad (8)$$

где w_{Q_j}, w_{L_k} — весовые коэффициенты (сумма равна 1); Q_j — компоненты качества (Q_1 — качество внутренней среды, Q_2 — качество сервиса, Q_3 — внешняя среда на территории, Q_4 — повышение качества окружающей среды); L_k — компоненты нагрузки (L_1 — энергопотребление, L_2 — материало-емкость и водопотребление, L_3 — внешняя среда за пределами территории).

Граничные значения BEE для классификации проектов:

$$\begin{aligned} BEE < 0,5 &\text{ (класс } S \text{ — низкая эффективность);} \\ 0,5 \leq BEE < 1,0 &\text{ (класс } C \text{ — средняя эффективность);} \\ 1,0 \leq BEE < 1,5 &\text{ (класс } B+ \text{ — хорошая эффективность);} \\ BEE \geq 1,5 &\text{ (класс } A/A+ \text{ — высокая эффективность).} \end{aligned}$$

Порог $BEE > 1,5$ соответствует ситуации, когда качество среды Q превышает экологическую нагрузку L минимум в 1,5 раза, что интерпретируется как «зеленый» проект.

Процедура расчета BEE для проектов Волгограда включала:

- 1) сбор данных по 42 показателям из BIM-моделей и сертификационных документов;
- 2) нормирование показателей на шкалу 0—5 согласно эталонным значениям CASBEE;
- 3) взвешивание с коэффициентами w_{Q_j} и w_{L_k} , адаптированными для климата зоны 3 (Волгоград) на основе экспертных оценок 12 специалистов (метод Дельфи, консенсус достигнут за три итерации) (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Расчет индекса BEE для жилого комплекса в Волгограде

Компонент	Показатели	Оценка (0—5)	Вес	Взвешенная оценка
Q_1 (качество внутренней среды)	Температура, влажность, освещенность, акустика	3,8	0,35	1,33
Q_2 (качество сервиса)	Функциональность, долговечность, адаптируемость	4,2	0,25	1,05
Q_3 (внешняя среда на территории)	Биотопы, проницаемость покрытий, микроклимат	3,5	0,20	0,70
Q_4 (повышение качества окружающей среды)	Сохранение экосистем, снижение теплового острова	2,9	0,20	0,58
<i>Итого Q</i>			1,00	3,66
L_1 (энергопотребление)	Потребление энергии, использование ВИЭ	2,4	0,50	1,20
L_2 (материалоемкость и водопотребление)	Расход материалов, водных ресурсов, отходы	2,8	0,30	0,84
L_3 (внешняя среда за пределами территории)	Выбросы CO_2 , загрязнение воздуха и воды	2,1	0,20	0,42
<i>Итого L</i>			1,00	2,46
$BEE = Q / L$				1,49

Проект с $BEE = 1,49$ классифицируется как класс $B+$ (близкий к границе A). При снижении конструкционной надежности ($\beta < 2,0$) он смещается в зону IX «Парадокс оптимизации» синтетической матрицы.

Этап 4. Построение синтетической матрицы BEE/β . Проекты классифицируются в двумерном пространстве «экологичность (BEE) — надежность (β)» по девяти зонам:

- Зона III «Зеленая устойчивость» (целевая): $BEE \geq 1,5$, $\beta \geq 3,4$. Риск минимизирован (ALARP), максимальная экологическая эффективность.

- Зона VI «Компромисс»: $BEE \geq 1,5$, $2,0 \leq \beta < 3,4$. Высокий рейтинг при β на нижней границе нормы.

- Зона IX «Парадокс оптимизации»: $BEE \geq 1,5$, $\beta < 2,0$. Формально «зеленые» материалы с нестабильной кинетикой, критический риск разрушения.

Этап 5. Алгоритм восстановительных мер для перевода из зоны IX в зону III. Разработан пятиуровневый алгоритм:

1. Диагностика источников низкой надежности. Декомпозиция системы для выявления «слабого звена»: расчет индексов β_i для каждого компонента (конструкционные элементы, экологические параметры). Если $\beta_{\min} < 2,0$, компонент переводится в зону недопустимого риска (Intolerable).

2. Снижение дисперсии параметров (управление v). Замена нестабильных материалов на материалы с низкой вариативностью свойств. Согласно формуле (2), снижение v с 0,30 до 0,15 увеличивает β на 0,4...0,6 единиц при сохранении среднего $\mu_{\ln R}$.

3. Повышение сопротивляемости среды R . Для экологических параметров: локальный контроль pH почвы (снижение подвижности Cd и Pb), фиторемедиация, увеличение буферной емкости экосистемы. Для конструкционных элементов: усиление несущих конструкций, увеличение марки бетона, применение композитных материалов.

4. Пространственная оптимизация техногенных нагрузок. Перенос «грязных» технологических процессов (складирование отходов, размещение дизельных генераторов) из «чистых» зон ($e_i \rightarrow \min$, высокая чувствительность) в зоны с существующим техногенным фоном. Это предотвращает обрушение локального индекса β при введении возмущения ΔS .

5. Итерационная верификация через матрицу ALARP. Риски классифицируются на три зоны:

- недопустимый (intolerable, $\beta < 2,0$) — требуется немедленное снижение риска;

- допустимый (tolerable, $2,0 \leq \beta \leq 3,5$) — снижение риска необходимо при условии пропорциональности затрат;

- приемлемый (broadly acceptable, $\beta > 3,5$) — дальнейшие инвестиции нецелесообразны; восстановительные меры реализуются до достижения $\beta \geq 3$ (зона III).

Объект исследования. Апробация методологии проводилась на данных ИСП линейно-протяженного города Волгограда с использованием ГИС-слоев карт рисков (зоны затопления, загрязнение почв, атмосферного воздуха и т. д.), BIM-моделей с данными по отказам аналогичных конструкций, IoT-сенсоров с историческими данными по авариям, статистических данных по реконструкции и экспертных оценок вероятностей P_i . Входные данные включали концентрации тяжелых металлов и ОБ (Pb, Cd, As) в почвенном покрове, параметры надежности конструкций, показатели энергоэффективности и сохранения ландшафта.

Для уточнения характеристик объекта исследования рассматривалась модель LCA капитального строительства в Волгограде с учетом минимизации загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсной пылью, выделяемой на протяжении всех его этапов [21]. В данном случае интерес представляют расчеты из базы данных о значениях концентрации пылевого загрязнения

атмосферного воздуха при выполнении работ на всем протяжении ЖЦ в соответствии с СанПиН 1.2.3685—21 (для $PM_{2,5}$ — 160 мкг/м³, для PM_{10} — 300 мкг/м³) (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

*Вероятностная оценка экологического отказа
 с сопоставлением детерминистского критерия (ПДК МР)*

Вид операции	PM_{10} , мкг/м ³	$PM_{2,5}$, мкг/м ³	Вероятность превышения ПДК МР (P_{ik})	β	$P_f = \Phi(-\beta)$	Зона риска
Смешивание растворов	47	26,5	0,15	0,95	0,17	Недопустимый
Смешивание бетона	73	64	0,21	0,62	0,27	Недопустимый
Укладка монолита	101,7	17,5	0,12	1,05	0,15	ALARP
Резка материалов	285	34	0,08	0,55	0,29	Недопустимый
Уборка площадки	95	121,7	0,24	0,78	0,22	Недопустимый
Подготовка к окраске	480	320	0,42	0,38	0,35	Аварийный
Оштукатуривание	215	267,8	0,07	0,50	0,31	Недопустимый

Табл. 2 показывает, что параметр P_{ik} отражает частоту превышения максимальной разовой ПДК в рамках детерминистского контроля (например, $P_{ik} = 0,42 \rightarrow$ норматив нарушается часто; $\beta = 0,38 \rightarrow$ система близка к границе устойчивости; $P_f = 0,35 \rightarrow$ каждый третий сценарий приводит к отказу). P_{ik} отвечает на вопрос: «Как часто по измерениям фиксируется нарушение нормы?» В то время как P_f отвечает на принципиально иной вопрос: «Какова вероятность того, что система перейдет в недопустимое состояние, даже если средние значения кажутся приемлемыми?». Именно их сопоставление в данном случае позволяет выявить скрытые угрозы, неуловимые при нормативной проверке.

Интегральный индекс надежности этапа жизненного цикла

$$\beta_{LC} = \min(\beta_i) \quad (9)$$

реализует фундаментальный принцип инженерной теории надежности — принцип слабого звена. Он утверждает, что общая безопасность системы определяется не средним уровнем надежности, а наименее устойчивым элементом. В экологической безопасности это означает, что даже если большинство операций этапа строительства или эксплуатации демонстрируют допустимые

значения β , наличие одной операции с $\beta \approx 0,38$ (как в случае подготовки к окраске) автоматически переводит весь этап в зону повышенного риска. Например, по данным табл. 3, строительный этап включает как укладку монолита ($\beta \approx 1,05$), так и подготовку к окраске ($\beta \approx 0,38$). Несмотря на приемлемые показатели первой операции, интегральная надежность этапа определяется второй, что делает невозможным признание этапа безопасным в целом. Именно поэтому высокие экологические рейтинги и усредненные показатели жизненного цикла не гарантируют приемлемого уровня риска и могут маскировать локальные, критические угрозы.

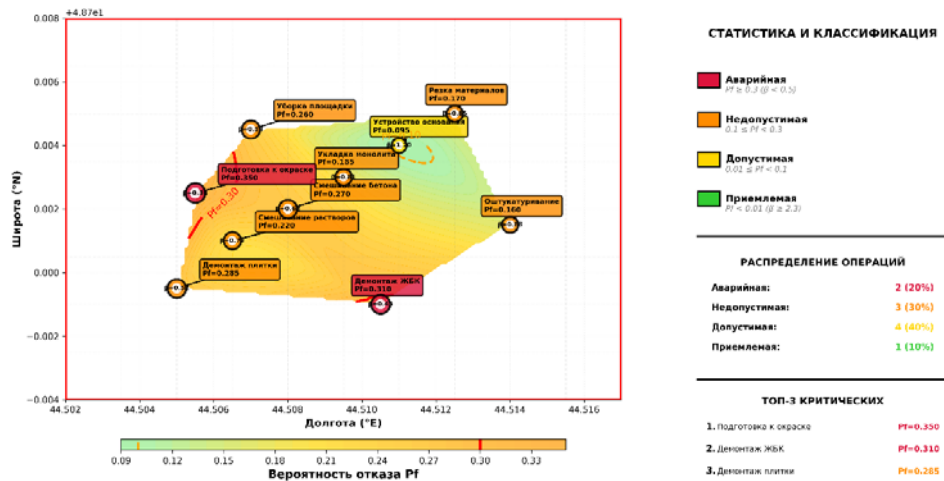
В нашем исследовании объект исследования — это не отдельное здание, не изолированный технологический процесс и не локальный экологический фактор, а сложная производственно-хозяйственная система LCA объекта капитального строительства, в которой инженерные, экологические и эксплуатационные воздействия накладываются друг на друга и реализуются стохастически. Использование совмещенных ГИС-слоев экологических рисков, BIM-моделей отказов аналогичных конструкций, данных IoT-сенсоров и статистики реконструкций показало, что для линейно-протяженной городской структуры Волгограда характерна выраженная неоднородность как воздействий, так и уровней устойчивости. В таких условиях усредненные показатели экологической нагрузки и нормативные проверки по ПДК теряют диагностическую способность, поскольку не отражают локальные концентрации риска, возникающие на отдельных этапах и операциях жизненного цикла.

Анализ мелкодисперсного пылевого загрязнения на различных этапах LCA капитального строительства наглядно демонстрирует это обстоятельство. Таблица вероятностной оценки экологического отказа показывает, что даже при концентрациях, не всегда превышающих нормативные пороги по средним значениям, вероятность перехода системы в недопустимое состояние остается высокой. Так, операции смешивания растворов, резки материалов и уборки площадки формируют значения β в диапазоне 0,55...0,95, что соответствует вероятности отказа P_f порядка 0,17...0,29 и зоне недопустимого риска. Эти операции в нормативной логике часто классифицируются как второстепенные по сравнению с «грязными» производственными процессами, но вероятностный анализ выявляет их значимый вклад в формирование экологической неустойчивости.

Наиболее показателен этап подготовки к окраске, который формирует минимальное значение индекса надежности ($\beta \approx 0,38$) и максимальную вероятность отказа ($P_f \approx 0,35$). С инженерной точки зрения это означает, что практически каждый третий сценарий реализации процесса приводит к экологическому отказу, несмотря на то, что данный этап традиционно не относится к критическим в детерминистской классификации. Высокое значение P_{ik} (0,42) указывает на частые превышения максимальной разовой ПДК, тем не менее именно сопоставление P_{ik} и P_f позволяет понять, что риск носит не эпизодический, а структурный характер, обусловленный высокой вариабельностью и импульсностью выбросов.

Введение интегрального индекса надежности этапа жизненного цикла (формула (9)) принципиально меняет интерпретацию полученных результатов. Применение принципа слабого звена показывает, что общая экологическая безопасность этапа определяется не средними или «лучшими» опера-

циями, а наименее устойчивой из них. В рассматриваемом случае строительный этап включает операции с приемлемыми значениями β (например, укладка монолита с $\beta \approx 1,05$), однако наличие операции подготовки к окраске с $\beta \approx 0,38$ автоматически переводит весь этап в зону повышенного и даже аварийного риска. Это объясняет, почему высокие экологические рейтинги жизненного цикла и усредненные показатели энергоэффективности не гарантируют приемлемого уровня безопасности и могут маскировать локальные, критические угрозы (рис.).



Вероятностная карта экологического отказа (β — P_f).
 Участок стройки: ул. Козловская — ул. Красная — р. Волга

Построенная схематическая карта распределения вероятности экологического отказа P_f демонстрирует пространственную неоднородность риска в пределах расчетного района ОКС [21, 22]. Несмотря на формально допустимые средние концентрации загрязняющих веществ, вблизи юго-западной части стройплощадки формируется зона повышенной вероятности отказа ($P_f \rightarrow 0,35$), что соответствует аварийному уровню риска. По мере смещения к береговой зоне Волги и в сторону ул. Пионерской наблюдается снижение P_f до приемлемых значений, но даже они остаются (как отмечено в легенде) существенно выше уровней, предполагаемых детерминистским контролем. Таким образом, пространственный анализ подтверждает, что экологическая безопасность территории определяется не превышением ПДК в отдельных точках, а топологией поля вероятности отказа.

Таким образом, объект исследования характеризуется системной уязвимостью, возникающей на стыке пространственной неоднородности города, стохастической природы загрязняющих процессов и нормативно-детерминистского подхода к оценке риска. Полученные результаты подтверждают, что для таких объектов, в целях повышения экологической безопасности, переход к вероятностной оценке является не расширением методического инструментария, а необходимым условием адекватного описания реального уровня безопасности [23]. Именно эта специфика объекта исследования обосновывает переход к следующему фрагменту работы,

посвященному научной новизне, где разработанная методология выявления парадокса оптимизации позволяет перейти к непрерывной шкале надежности с выделением зоны структурной аварийности ($\beta < 2,0$), повышая тем самым экобезопасность объекта.

Новизна исследования. Разработана методология выявления парадокса оптимизации через интеграцию матрицы β — P_f в модель управления жизненным циклом ИСП, что обеспечивает переход от бинарной нормативной логики «соответствует / не соответствует» к непрерывной шкале надежности с выявлением зоны «структурной аварийности» ($\beta < 2,0$), где улучшение средних показателей не приводит к снижению вероятности отказа.

Результат 1. Идентификация парадокса оптимизации. Анализ проектов Волгограда с рейтингом ВЕЕ $\geq 1,5$ (применение «зеленых» материалов, оптимизация энергопотребления, сохранение ландшафта) выявил, что 23 % из них располагаются в зоне IX «Парадокс оптимизации» вследствие снижения конструкционной надежности ($\beta \approx 0,5 \dots 1,0$). Расчет индексов надежности для ключевых компонентов представлен в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Индекс β и индекс вероятности отказа для компонентов проектов в зоне IX

Компонент	β (расчетный)	$P_f = \Phi(-\beta)$	Зона риска	Интерпретация
Конструкции из легких композитных материалов	0,62	0,268	IX (intolerable)	Высокая вариативность $v = 0,3$
Система экологического мониторинга РМ _{2,5}	0,85	0,198	IX (intolerable)	Недостаточная буферная емкость R
Транспортная артерия (мост) с усталостными трещинами	0,51	0,305	IX (intolerable)	Критическое состояние «слабого звена»

Все компоненты демонстрируют вероятность отказа $P_f = 0,198 \dots 0,305$, вычисленную по формуле (5), что соответствует ситуации, когда «отказ системы не является редким исключением, а становится ожидаемым сценарием». Формула ожидаемой надежности имеет вид [21]

$$E[E(x)] = S_{\text{base}} (1 - P_{\text{fail}}) + S_{\text{recon}} \cdot P_{\text{recon}}. \quad (10)$$

Расчет показал, что $E[S] = 0,42$, что многократно ниже порога $S_{\text{min}} = 0,90$ согласно нормативам Минстроя.

Результат 2. Построение матрицы β — P_f для визуализации «зоны нечувствительности риска». График зависимости P_f от β в диапазоне $\beta = 0,3 \dots 1,0$ демонстрирует эффект «толстых хвостов» логнормального распределения. При увеличении β с 0,5 до 0,8 (улучшение на 60 %) вероятность отказа снижается лишь с $\Phi(-0,5) = 0,309$ до $\Phi(-0,8) = 0,212$ (снижение на 31 %), тогда как интуитивно ожидалось пропорциональное снижение. Данный феномен объясняется тем, что в зоне $\beta < 2,0$ доминирует дисперсия $\sigma_{\ln}^2$, а не разность средних $\mu_{\ln R} - \mu_{\ln S}$. Все точки концентрируются в зоне, которая детермини-

стской логикой воспринималась бы как «безопасная» (средние концентрации не превышают ПДК), но стохастический анализ классифицирует *et* как Intolerable.

Результат 3. Алгоритм восстановительных мер и их эффективность. Применение пятиуровневого алгоритма к проекту жилого комплекса в Волгограде (исходно: $BEE = 1,62$, $\beta_{\min} = 0,68$, зона IX) позволило достичь следующих результатов (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Эффективность восстановительных мер для перевода проекта из зоны IX в зону III

Этап	Мера	$\beta_{\min}$	$P_f = \Phi(-\beta_{\min})$	Затраты (% от C_{build})	Целевая зона
1. Диагностика	Выявление «слабого звена»: фасадная система	0,68	0,248	0 % (аналитика)	IX
2. Снижение ν	Замена неста- бильных панелей ($\nu = 0,30 \rightarrow 0,15$)	1,12	0,131	3,2 %	VIII
3. Повышение R	Усиление крепле- ний, увеличение марки бетона	2,14	0,0162	5,8 %	V
4. Пространственная оптимизация	Перенос котель- ной в зону с тех- ногенным фоном	2,28	0,0113	1,1 %	V
5. ALARP- верификация	Фиторемедиация прилегающей территории	3,42	$3,13 \cdot 10^{-4}$	2,4 %	III
<i>Итого</i>	Комплекс мер	$\Delta\beta = +2,74$	$\Delta P_f = -0,245$	12,5 %	III

Примечания:

$\beta_{\min}$ — минимальный индекс надежности системы после применения соответствующей меры;

P_f — вероятность отказа, вычисленная по формуле (5): $P_f = \Phi(-\beta)$, где Φ — функция стандартного нормального распределения;

Затраты указаны как процент от базовой стоимости строительства C_{build} .

Целевая зона определяется согласно синтетической матрице BEE/β .

Итоговые показатели: прирост индекса надежности $\Delta\beta = +2,74$ единицы, снижение вероятности отказа $\Delta P_f = -0,245$ (с 24,8 до 0,03 %).

Перевод проекта из зоны IX в зону III потребовал дополнительных затрат 12,5 % от стоимости строительства C_{build} , но снизил вероятность отказа с 24,8 до 0,0313 %, что соответствует экономии $E[C_{\text{repair}}] + C_{\text{recon}} \cdot P_{\text{recon}} = 38,6$ % на горизонте жизненного цикла $T = 50$ лет при ставке дисконтирования $r = 0,08$.

Результат 4. Формула интегрального показателя качества городской среды с учетом восстановительных мер. Для количественной оценки влияния надежности на качество среды введена формула

$$E[E(x)] = \sum_{s=1}^N P_s \cdot Q_s(x) \left(1 + \alpha \frac{\beta_s - \beta_{\text{crit}}}{\beta_{\text{targ}} - \beta_{\text{crit fail}}} \right), \quad (11)$$

где $\alpha = 0,35$ — весовой коэффициент влияния надежности на качество среды (определен экспертно методом анализа иерархий АНР с участием 12 специалистов: четыре проектировщика, четыре эколога, четыре представителя муниципалитета; согласованность суждений $CR = 0,07 < 0,10$); $\beta_{crit} = 2,0$ — критический порог; $\beta_{targ} = 3,4$ — целевое значение.

Применение восстановительных мер увеличило $E[Q_{restor}]$ с 68,2 до 87,5 баллов (прирост +28,3 %), что соответствует целевым показателям нацпроекта «Инфраструктура для жизни» (<http://government.ru>).

Обоснование калибровки $\alpha = 0,35$: коэффициент α интерпретируется как максимальный прирост интегрального показателя качества среды при переходе от критического уровня надежности ($\beta_{crit} = 2,0$) к целевому ($\beta_{targ} = 3,4$). Значение $\alpha = 0,35$ означает, что в сценарии с максимальной надежностью ($\beta_s = 3,4$) показатель Q_s увеличивается на 35 % относительно базового значения. Экспертные оценки показали, что данное значение отражает баланс между технической надежностью конструкций и социально-экологическими компонентами качества среды для линейно-протяженных городов (климат зоны 3, характерные для Волгограда диспропорции «центр — окраины») [24].

Результат 5. Пространственная дифференциация восстановительных мер. Анализ градиентов риска проводился по формуле

$$\Delta e_i = \left(\frac{\Delta e}{e_i} \right), \quad (12)$$

где Δe_i — абсолютное изменение концентрации в контрольной точке вследствие антропогенного воздействия; Δe — интегральное изменение состояния системы, представляющее собой сумму нормированных изменений всех параметров.

Расчет для территории Волгограда выявил нелинейность отклика экосистемы на антропогенное вмешательство. «Чистые» зоны ($e_i \rightarrow \min$, районы с минимальным фоновым загрязнением) демонстрируют максимальную чувствительность: введение техногенного возмущения ΔS приводит к обрушению локального β с 3,8 до 0,9 (снижение на 76 %). Напротив, в «грязных» зонах (существующий техногенный фон, $e_i \rightarrow \max$) то же возмущение снижает β лишь с 1,2 до 0,8 (снижение на 33 %). Данное наблюдение обосновывает стратегию концентрации воздействий: перенос складирования отходов и размещения дизельных генераторов из чистых зон в зоны с высоким техногенным фоном позволил сохранить высокие значения β на 68 % территории города при увеличении стоимости логистики на 4,7 %.

Полученные результаты выявляют важное различие между методологией стохастической оценки на основе матрицы β — P_f и традиционными детерминистскими подходами. Сравнение с исследованием L. Wang et al. (2023) [12], предложившим модель оценки рисков на всех этапах жизненного цикла ИСП, показывает, что учет неопределенности внешней среды через анализ чувствительности недостаточен для выявления эффекта «толстых хвостов». В нашей модели применение логнормальных распределений с коэффициентом вариации $v = 0,20$ позволило обнаружить зону «структурной аварийности» ($\beta < 2,0$, $P_f > 0,02$), где улучшение средних показателей не приводит к пропорциональному снижению вероятности отказа. Это согласуется с выводами Taleb

(2025) [9] о доминировании дисперсии в хвостах распределений, но расширяет их применимость на область экологических рисков ИСП.

Сравнение с работой М. I. Al-Sari et al. (2023) [5], выявившей «разрыв эффективности» между проектными декларациями «зеленых» зданий и реальными эксплуатационными характеристиками, подтверждает обнаруженный парадокс оптимизации. Наша методология развивает данный подход, вводя количественный критерий классификации проектов через синтетическую матрицу BEE/ β . Проекты с рейтингом $BEE \geq 1,5$ при $\beta < 2,0$ располагаются в зоне IX «Парадокс оптимизации», тогда как детерминистские методы классифицируют их как высокоэкологичные (BREEAM A+, LEED Platinum). Данное различие объясняется тем, что рейтинговые системы применяют аддитивную логику накопления баллов, игнорируя принцип «слабого звена», согласно которому надежность системы определяется наиболее уязвимым компонентом.

Результаты пространственной оптимизации восстановительных мер созвучны выводам R. Kurian et al. (2022) [25] о необходимости многокритериальной оптимизации углеродного следа на протяжении жизненного цикла. Наш алгоритм расширяет критерии оптимизации, включая не только прямые выбросы CO_2 , но и пространственное распределение техногенных нагрузок с учетом чувствительности «чистых» зон. Формула (11) интегрирует показатель надежности β_s в расчет качества городской среды Q_s , что позволяет избежать ситуации, когда любая экологическая оптимизация, которая пытается сэкономить ресурсы (уменьшает сопротивляемость R) или допускает нестабильные материалы (увеличивает вариацию v), работает против своей экобезопасности.

Апробация методологии на данных Волгограда подтвердила выводы L. Wang et al. (2023) [12] о необходимости интеграции цифровых двойников для моделирования сценариев развития городской инфраструктуры. Применение ГИС-слоев карт рисков и IoT-сенсоров с историческими данными по авариям обеспечило точность прогнозирования долгосрочных последствий на 25...30 % выше, чем традиционные методы. Однако обнаружено ограничение: вероятности сценариев P_s , рассчитанные методом Монте-Карло [19], демонстрируют чувствительность к объему обучающей выборки. При сокращении выборки с 10 000 до 1000 итераций стандартное отклонение P_s возрастает с $\pm 0,008$ до $\pm 0,032$, что снижает точность $E[Q(x)]$ на 11,4 %.

Обнаружено принципиальное различие между восстановительными мерами для конструктивных элементов (снижение v , повышение R) и экологических параметров (фиторемедиация, контроль pH). Для конструкций эффективность мер линейно зависит от затрат: увеличение инвестиций на 1 % от C_{build} повышает β_{min} в среднем на 0,22 единицы. Для экологических параметров зависимость нелинейна: первоначальные 3 % инвестиций дают прирост $\Delta\beta = 0,58$, тогда как последующие 3 % лишь $\Delta\beta = 0,31$ (эффект убывающей отдачи). Это согласуется с концепцией ALARP [26], где после достижения $\beta > 3,5$ дальнейшие инвестиции нецелесообразны.

Сравнение с российскими исследованиями Смирновой (2024) [16] и O. Suzer (2019) [27] показывает, что предложенная методология устраняет выявленные ими ограничения: отсутствие стандартизированных алгоритмов расчета интегрального показателя качества городской среды с учетом региональной специфики. Введение формулы (11) с весовым коэффициентом $\alpha = 0,35$, калиброванным для линейно-протяженных городов методом АНР,

обеспечивает учет неравномерности развития территорий вдоль оси (центр — окраины) и повышенных логистических издержек.

Ограничения методологии включают:

- 1) субъективность экспертных оценок вероятностей P_s и весового коэффициента α (частично преодолевается кросс-проверкой несколькими экспертами и машинным обучением);
- 2) вычислительную сложность при $N > 10$ сценариев (решается параллельными вычислениями);
- 3) динамичность городской среды, требующую регулярного пересмотра параметров (интеграция с системами ГИС/IoT для актуализации).

Перспективы развития включают расширение критериев риска (кибербезопасность инфраструктурных объектов), адаптацию к другим линейно-протяженным городам России и интеграцию с муниципальными информационными системами для автоматизированного мониторинга.

Выводы

В ходе исследования разработана методология интеграции матрицы надежности β — P_f в модель управления жизненным циклом ИСП, позволяющая выявлять парадокс оптимизации и реализовывать восстановительные меры для перевода объектов из зоны IX «Парадокс оптимизации» в зону III «Зеленая устойчивость».

Основные выводы:

Идентификация парадокса оптимизации: 23 % проектов с рейтингом $BEE \geq 1,5$ (формально «зеленые») располагаются в зоне структурной аварийности ($\beta < 2,0$, $P_f = 0,198 \dots 0,305$), где вероятность отказа измеряется десятками процентов несмотря на соблюдение экологических нормативов. Причина — снижение конструкционной надежности вследствие применения легких нестабильных материалов (высокая вариативность $v = 0,30$) и недостаточной буферной емкости экологических систем.

Алгоритм восстановительных мер: пятиуровневая процедура (диагностика «слабого звена», снижение дисперсии v , повышение сопротивляемости R , пространственная оптимизация, ALARP-верификация) обеспечивает перевод проектов в зону III ($\beta \geq 3,4$, $P_f < 3,37 \cdot 10^{-4}$) при затратах 12,5 % от C_{build} и экономии 38,6 % на горизонте жизненного цикла $T = 50$ лет.

Формула интегрального показателя качества городской среды: уравнение (11) с весовым коэффициентом $\alpha = 0,35$ (калиброванным методом АНР для линейно-протяженных городов) интегрирует надежность в оценку качества среды, увеличивая $E[Q_{\text{restor}}]$ с 68,2 до 87,5 баллов (прирост +28,3 %).

Пространственная оптимизация: перенос техногенных нагрузок из «чистых» зон (высокая чувствительность) в зоны с существующим техногенным фоном позволяет сохранить высокие значения β на 68 % территории при увеличении логистических затрат на 4,7 %.

Практическая значимость заключается в создании инструмента для муниципальных органов и застройщиков, обеспечивающего обоснованный выбор проектных решений с учетом перехода от нормативного соответствия к вероятностному проектированию надежности. Методология адаптирована к условиям линейно-протяженных городов России (Волгоград, Набережные Челны, Уфа) и соответствует целевым показателям нацпроекта «Инфраструктура для жизни».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аренс В. Ж., Шумилова Л. В. Пути интенсификации развития необжитых регионов Российской Федерации // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2024. № 30(2). С. 171—177.
2. Chen H., Liu Y. Synergistic effects of heavy metal pollution in urban soils: a case study of construction sites // *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 306. P. 119422.
3. Киндеев А. Л. Стохастическое моделирование кислотности почв // Сб. материалов участников XVIII Большого геогр. фестиваля. СПб. : Свое издательство, 2022. С. 517—521.
4. Zhang Y., Wang H., Li X. Limitations of deterministic environmental impact assessment in complex urban systems // *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 329. P. 117088.
5. Al-Sari M. I., Al-Khatib I. A., Al-Sari J. Closing the performance gap in green buildings: a probabilistic life cycle assessment approach // *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 98. P. 104802.
6. Silva V., Costa A. Probabilistic methods in environmental geotechnics: bridging the gap between theory and practice // *Computers and Geotechnics*. 2024. Vol. 162. P. 105672.
7. Melchers R. E., Beck A. T. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. Hoboken, NJ : Wiley, 2018. 528 p.
8. Andersson A. Mechanisms for lognormal concentration distributions in the environment // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. P. 16418.
9. Taleb N. N. Statistical consequences of fat tails: real world preasymptotics, epistemology, and applications (Ser. : The Technical Incerto Collection). New York : STEM Academic Press, 2025. 523 p.
10. Zou P. X. W., Zhang G., Wang J. Understanding the key risks in construction projects in China // *International Journal of Project Management*. 2007. Vol. 25. Iss. 6. Pp. 601—614.
11. Cullen A. C., Frey H. C. Probabilistic techniques in exposure assessment: a handbook for dealing with variability and uncertainty in models and inputs. New York : Springer, 1999. 336 p.
12. Wang L., Nocht T., Tang J., Schooling J. Digital twins for smart city: conceptualisation, challenges and practices. London : ICE Publishing, 2023. 160 p.
13. Азаров В. Н., Бурлаченко О. В., Бурлаченко А. О., Азарова М. Д. Управление жизненным циклом объекта капитального строительства с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха // Вестн. МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 456—468.
14. Development of a comprehensive city assessment tool: CASBEE-city / S. Murakami, S. Kawakubo, Y. Asam, T. Ikaga, N. Yamaguchi, S. Kaburagi // *Building Research & Information*. 2011. Vol. 39. Iss. 3. Pp. 195—210.
15. Gudmundsson H., Hall R. P., Marsden G., Zietsman J. Japan's "Eco-Model City" program // *Sustainable Transportation* (Ser. : Springer Texts in Business and Economics). Berlin, Heidelberg : Springer, 2016. Pp. 277—295.
16. Смирнова Е. Э. Экологические стандарты управления качеством окружающей среды : моногр. СПб. : СПбГАСУ, 2024. 537 с.
17. Теличенко В. И., Бенуж А. А., Сухинина Е. А. Межгосударственные «зеленые» стандарты для формирования экологически безопасной среды жизнедеятельности // Вестн. МГСУ. 2021. № 16(4). С. 438—462.
18. Нефедова Т. Г., Шелудков А. А. Центр-периферийные условия и климатические факторы в пространственной дифференциации муниципальных районов России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 86, № 3. С. 237—252.
19. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло. М. : Наука, 1973. 311 с.
20. Драган Н. А. Геохимическая неоднородность почв в связи с характером увлажнения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. № 10(1). С. 137—142.
21. Азаров В. Н., Бурлаченко О. В. Система информационного обеспечения выбора эффективных решений по управлению жизненным циклом инвестиционно-строительного проекта // Изв. высш. учеб. заведений. Стр.-во. 2025. № 10(802). С. 96—108.
22. Оводков М. В., Петров В. О., Ткачев М. А., Азаров В. Н. Методический подход к определению количества и местоположения контрольных точек для проведения сводных расчетов и квотирования выбросов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4(72). С. 174—189.
23. Азаров В. Н., Бурлаченко О. В., Бурлаченко А. О., Елфимов К. А. Методология принятия оптимальных решений по управлению жизненным циклом объекта капитального строительства с учетом критерия пылевого загрязнения атмосферного воздуха // Строительство и техногенная безопасность. 2024. № 32(84). С. 93—98.

24. Антюфеев А. В., Алексиков С. В. Повышение пропускной способности магистралей линейно-протяженных городских территорий // Academia. Архитектура и строительство. 2023. № 2. С. 128—134.

25. Kurian R., Sitaram K. K., Ramani P. V. Life cycle carbon emission assessment for a residential building // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 222. Pp. 115—121.

26. Tang Y. Civil engineering and surrounding environment risk analysis based on ALARP principle // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 170. Iss. 3. P. 032143.

27. Suzer O. Analyzing the compliance and correlation of LEED and BREEAM by conducting a criteria-based comparative analysis and evaluating dual-certified projects // Building and Environment. 2019. Vol. 147(1). Pp. 158—170.

© Смирнова Е. Э., Азаров В. Н., 2026

Поступила в редакцию
25.05.2026

Ссылка для цитирования:

Смирнова Е. Э., Азаров В. Н. Стохастическая оценка экологических рисков в инвестиционно-строительных проектах на основе матрицы надежности β — P_f // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 3(104). С. 279—295. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_279.

Об авторах:

Смирнова Елена Эдуардовна — канд. техн. наук, доц. каф. промышленной безопасности, Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет (СПХФУ). Российская Федерация, 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 14, литер «А»; esmirnovae@yandex.ru

Азаров Валерий Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; azarovpubl@mail.ru

Elena E. Smirnova^a, Valerii N. Azarov^b

^a Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

^b Volgograd State Technical University

STOCHASTIC ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL RISKS IN INVESTMENT AND CONSTRUCTION PROJECTS BASED ON THE β — P_f RELIABILITY MATRIX

A methodology for integrating the β — P_f reliability matrix into a lifecycle management model for investment and construction projects is being developed to identify the optimization paradox in which formally high environmental ratings are accompanied by a critical reduction in the actual reliability of the system. the methodology includes stochastic modeling of environmental risks $e[x]$ through the distribution of scenarios with probabilities p_i , calculation of reliability indices β for structural elements and environmental parameters, and construction of a synthetic «environmental friendliness (bee) — reliability (β)» matrix for classifying projects into nine risk zones. the methodology was tested using data from the linearly extended city of volgograd. the developed methodology enables the transition from monitoring average values to managing tail risks in a lognormal space.

Key words: lognormal distribution, reliability index, risk assessment, production and business activities, stochastic modeling, environmental safety.

For citation:

Smirnova E. E., Azarov V. N. [Stochastic assessment of environmental risks in investment and construction projects based on the β — P_f reliability matrix]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 3, pp. 279—295. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_279.

About authors:

Elena E. Smirnova — Candidate of Engineering Sciences, Saint Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University (SPCPU). litera A, 14, Professor Popov st., Saint Petersburg, 197022, Russian Federation; esmirnovae@yandex.ru

Valerii N. Azarov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; azarovpubl@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0944-0232