

УДК 504.06:504.61:69.003

Е. Э. Смирнова

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: МОДЕЛЬ ОТКАЗОВ

В связи с интенсивным промышленным развитием возросли экологические риски. Разработана модель их оценки, учитывающая локальные и общие изменения параметров с использованием нормированных показателей и пороговых значений для оценки вероятности экологических отказов. Предложенный подход позволяет проводить предварительную оценку риска на стадии проектирования и строительства для минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

К л ю ч е в ы е с л о в а: модель оценки, строительство, экологические отказы, экологический риск, антропогенное воздействие.

Современное строительство, являясь одним из основных драйверов экономического развития, неизбежно оказывает воздействие на окружающую среду. Оценка и минимизация экологических рисков, связанных со строительной деятельностью, становятся критически важными для обеспечения устойчивого развития. Экологические отказы представляют собой феномен, который недостаточно изучен в академическом сообществе. Такой недостаток публикаций обусловлен, в первую очередь, тем фактом, что время возникновения таких отказов зависит от множества случайных факторов, и это усложняет их анализ и количественную оценку [1]. Стохастический характер времени отказов неразрывно связан с колебаниями условий поддержания и сохранения природного процесса [2, 3]. Как правило, нарушенная экосистема может быть восстановлена, поскольку отказы возникают из-за превышения различных типов предельно допустимых норм [4, 5]. Продолжительность ее восстановления также характеризуется как случайная переменная [6—8]. Наиболее значительный научный интерес к изучению закономерностей отказов связан с конкретными местами возникновения и интервалами между отказами, которые имеют решающее значение для восстановления и функционирования экосистемы [9—11].

Актуальность данной проблемы обусловлена возрастающей интенсивностью строительства, освоением новых территорий и усилением антропогенной нагрузки на экосистемы. В связи с этим исследование направлено на разработку и тестирование модели оценки экологического риска, основанной на анализе изменений ключевых параметров экосистем.

Теоретическая новизна работы заключается в предложенном подходе к количественной оценке рисков, учитывающем как локальные, так и общие изменения в экосистеме, что повышает точность прогнозирования.

Практическая значимость исследования определяется возможностью применения разработанной модели на стадии проектирования и строительства для своевременного принятия мер по минимизации негативного воздействия. Применение нормированных показателей и пороговых значений позволяет адаптировать модель к специфике различных экосистем и видов антропогенного воздействия.

Целью исследования является разработка и тестирование модели оценки экологического риска при строительстве на основе анализа изменений ключевых параметров экосистем.

Для достижения этой цели поставлены следующие *задачи*:

- разработка модели внезапных и постепенных экологических отказов;
- определение ключевых параметров, чувствительных к воздействию строительства;
- установление пороговых значений для этих параметров;
- тестирование модели на реальных данных о содержании тяжелых металлов в почве;
- оценка эффективности модели для прогнозирования и предотвращения экологических отказов;
- разработка рекомендаций по применению модели в инженерно-экологических изысканиях.

Рассмотрим модель внезапных и постепенных экологических отказов. Если наблюдается превышение верхнего или достижение нижнего порога для любого из параметров e_i , то экологический отказ по отношению ко всей природно-технической системе будет частичным. В случае если одновременное превышение верхних или достижение нижних порогов касается нескольких ключевых параметров e_i , то такой отказ будет полным.

Количественная величина как частичного, так и полного отказа связана с превышением значений антропогенного изменения конкретного вида предела экологического допуска. Для частичного отказа верно:

- если для любого e_i -параметра $e_i > e_{i\text{верхняя}}$, то экосистема находится в состоянии превышения;
- если для более чем $X\%$ e_i -параметров $e_i < e_{i\text{нижняя}}$, то экосистема находится в состоянии, не соответствующем заданным условиям (например, имеет место дефицит природного элемента);
- для $|\Delta e_i| > \Delta e_{\text{допустимое}}$, то наблюдается значительное изменение концентрации, которое может привести к нежелательным последствиям. То есть для частичного отказа верно:

$$\left| \frac{\Delta e_i}{\Delta e / e_i} \right| \leq \begin{cases} e_{i\text{верхняя}}, & \text{если } e_i > e_{i\text{верхняя}} \\ e_{i\text{нижняя}}, & \text{если } e_i < e_{i\text{нижняя}} \end{cases}, \quad (1)$$

Для полного отказа верно:

- если для нескольких e_j -параметров одновременно $e_j > e_{j\text{верхняя}}$, то система находится в состоянии превышения;
- если для более чем $X\%$ e_j -параметров одновременно $e_j < e_{j\text{нижняя}}$, то система находится в состоянии, не соответствующем заданным условиям (например, имеет место дефицит элемента);
- для $|\Delta e_j| > \Delta e_{\text{допустимое}}$, то наблюдается значительное изменение концентрации, которое может привести к нежелательным последствиям. Значит для полного отказа:

$$\left| \frac{\Delta e_j}{\Delta e / e_j} \right| \leq \begin{cases} e_{j\text{верхняя}}, & \text{если } e_j > e_{j\text{верхняя}} \\ e_{j\text{нижняя}}, & \text{если } e_j < e_{j\text{нижняя}} \end{cases}, \quad (2)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ (общее число параметров, характеризующих отдельный природный объект); $j = 1, 2, \dots, 6$; $X\%$ — заданное пороговое значение, определяемое экспертным путем ($X\%$ — это процентное значение, которое определяет долю параметров e_j из общего числа параметров, рассматриваемых в анализе. Например, если $X = 30\%$, это означает, что при 30% или более параметров e_j , находящихся ниже своих нижних порогов $e_{j\text{нижняя}}$, система считается в неблагоприятном состоянии); Δe_i и Δe_j — изменения значений параметров e_i и e_j соответственно, вызванные антропогенным воздействием; $e_{i\text{верхняя}}$ и $e_{j\text{верхняя}}$ — верхние пороговые значения для параметров e_i и e_j соответственно; $e_{i\text{нижняя}}$ и $e_{j\text{нижняя}}$ — нижние пороговые значения для параметров e_i и e_j соответственно; $|\Delta e_i|$ и $|\Delta e_j|$ — абсолютные значения изменения факторов i и j , показывают, насколько сильно изменилось значения факторов i и j , независимо от направления изменения (увеличения или уменьшения). Если для параметров e_i и e_j выполняются условие $|\Delta e_i| > \Delta e_{\text{допустимое}}$ и $|\Delta e_j| > \Delta e_{\text{допустимое}}$ соответственно в течение длительного периода времени, то это, скорее всего, свидетельствует о развитии нежелательных процессов; $\Delta e_{\text{допустимое}}$ — допустимый предел, отклонение от которого негативно сказывается на экосистеме.

Частичный отказ происходит, если изменение состояния (параметра) e_i превышает его верхний допустимый порог $e_{i\text{верхняя}}$ или становится ниже нижнего порога $e_{i\text{нижняя}}$. Это означает, что для каждого отдельного параметра системы, если величина этого параметра превышает допустимый верхний уровень или падает ниже допустимого нижнего уровня, возникает частичный отказ, т. е. негативное воздействие ограничивается только этим параметром.

Полный отказ наступает, когда суммарное воздействие на систему (параметр e_j) превышает допустимые пределы $e_{j\text{верхняя}}$ или $e_{j\text{нижняя}}$, что ведет к отказу всей системы. Полный отказ описывает ситуацию, когда несколько параметров превышают свои критические пороги, что вызывает серьезные и необратимые изменения в состоянии всей экосистемы.

Принятые выше условия помогают количественно оценить риск возникновения отказов на основе сравнения фактических значений параметров с их критическими пороговыми значениями. Если изменение параметра Δe превышает критическое значение $e_{\text{крит}}$, это означает, что система вышла за пределы допустимого состояния, произошел отказ или нежелательное событие:

$$\Delta e > e_{\text{крит}}, \quad (3)$$

где Δe — изменение параметра e относительно некоторого начального значения; $e_{\text{крит}}$ — критическое значение параметра, при превышении которого происходит отказ или нежелательное событие (например, ПДК для загрязняющего вещества и т. д.).

Конкретизация пороговых значений

Для каждой экосистемы необходимо определить пороговые значения $e_{\text{верхняя}}$ и $e_{\text{нижняя}}$ для каждого параметра e_i (для частичного отказа) и e_j (для полного). Эти значения зависят от множества факторов, включая:

- *тип экосистемы* — лесные, водные, степные и т. д. имеют разную устойчивость к антропогенным воздействиям;

- *устойчивость экосистемы* — в пределах одного типа экосистем могут существовать более и менее устойчивые сообщества, в зависимости от их биоразнообразия, истории воздействий, климатических условий и др.;

- *характер воздействия* — одни воздействия могут быть более опасными для экосистемы, чем другие. Например, загрязнение токсичными веществами будет иметь более серьезные последствия, чем шумовое;

- *социально-экономические факторы* — в некоторых случаях допустимый уровень воздействия определяется исходя из социальных или экономических соображений, например, для защиты здоровья населения.

Рассмотрим ситуацию для лесной экосистемы и параметра e_1 — концентрация загрязняющего вещества в почве:

$e_{\text{нижняя}}$ — этот уровень можно определить исходя из фоновых концентраций загрязнителя в почвах данного региона. Например, если фоновая концентрация свинца в почве составляет 10 мг/кг, то $e_{\text{нижняя}}$ для свинца может быть установлена на уровне 15 мг/кг;

$e_{\text{верхняя}}$ — данный показатель должен быть установлен таким образом, чтобы не допустить негативного влияния на здоровье леса и его обитателей. Для этого необходимо провести экотоксикологические исследования и определить ПДК свинца. Например, если ПДК свинца для лесной экосистемы составляет 50 мг/кг, то $e_{\text{верхняя}}$ может быть установлена на уровне 40 мг/кг. Таким образом, для параметра e_1 — концентрация свинца в почве лесной экосистемы:

$$\left| \frac{\Delta e_1}{\Delta e / e_1} \right| > 40 \text{ мг/кг}, e_1 < 15 \text{ мг/кг} . \quad (4)$$

Если $\left| \frac{\Delta e_i}{\Delta e / e_i} \right| > e_{\text{верхняя}}$, происходит частичный экологический отказ, если

$\left| \frac{\Delta e_i}{\Delta e / e_i} \right| < e_{\text{нижняя}}$, то его нет.

Формулы (5) и (6) отражают тот факт, что превышение допустимого уровня загрязнения происходит, когда:

- прирост концентрации превышает пороговое значение, т. е. прирост концентрации (Δe_i) должен быть больше разницы между максимальной допустимой концентрацией ($e_{\text{верхняя}}$) и текущей концентрацией (e_i),

- относительное изменение концентрации превышает допустимое относительное изменение,

$$\Delta e_i > (e_{\text{верхняя}} - e_i), \quad (5)$$

$$(\Delta e_i / e_i) > (e_{\text{верхняя}} - e_i) / e_i. \quad (6)$$

Обе формулы напрямую используют пороговые значения ($e_{\text{нижняя}}$, $e_{\text{верхняя}}$), что позволяет корректно оценить риск загрязнения. Их можно адаптировать для различных экологических систем и загрязнителей путем изменения значений пороговых концентраций. Аналогичным образом определяем пороговые

значения (частичный и полный отказ) для всех параметров e_j , учитывая специфику каждой экосистемы.

Модель постепенных и локальных экологических отказов

Смоделируем условия наступления экологического отказа, т. е. ситуации, когда антропогенное воздействие в статике внезапно превышает допустимый предел, приводя к необратимым изменениям в экосистеме. Для расчетов необходимо знать сумму нормированных изменений изучаемых показателей или средневзвешенное изменение, если параметры имеют разную значимость. Это позволяет учитывать не только абсолютные изменения концентрации загрязняющих веществ, но и их относительную значимость в контексте исходного состояния окружающей среды.

Формула (1) описывает частичный отказ, когда затронут только один параметр экосистемы, обозначенный как e_i (например, загрязнение свинцом). Рассмотрим ее поподробнее. Здесь: e_i — начальная концентрация загрязняющего вещества в конкретной точке или области; Δe_i — изменение концентрации свинца в том же месте; $(\Delta e/e_i)$ — отношение общего изменения концентрации загрязняющего вещества к начальной концентрации. Это нормированное значение, которое показывает, насколько сильно изменяется концентрация свинца относительно начальной концентрации. В выражении $|\Delta e_i/(\Delta e/e_i)|$ — деление (Δe_i) на $(\Delta e/e_i)$ нормирует локальное изменение относительно общего изменения, что может быть полезно для выявления аномалий или значительных отклонений в конкретных точках. Если начальная концентрация (e_i) выше верхнего порога ($e_{\text{верхняя}}$), то проверяется, превышает ли его нормированное изменение $(\Delta e_i/(\Delta e/e_i))$. Если да, то это указывает на частичный отказ. Отсюда:

$$\left| \frac{\Delta e_i}{\Delta e / e_i} \right| = \left| \Delta e_i \cdot \frac{e_i}{\Delta e} \right| = \left| \frac{\Delta e_i \cdot e_i}{\Delta e} \right|. \quad (7)$$

Данная запись выражает нормированное изменение концентрации загрязняющего вещества (свинца) в конкретной точке или области относительно общего изменения его концентрации в экосистеме. Таким образом, при частичном отказе данный количественный подход применим к оценке локальных изменений параметров экосистемы по отношению к общим природным трансформациям, включая:

- *фокус на локальных изменениях* — формула (1) акцентирует внимание на относительных изменениях концентрации загрязнителя (свинца) в конкретной точке по сравнению с общим изменением концентрации этого загрязнителя в экосистеме в целом;
- *нормализация для сравнения* — деление локального изменения концентрации (Δe_i) на отношение общего изменения к начальной концентрации $(\Delta e/e_i)$ позволяет нормализовать локальные изменения и сравнивать их между собой, даже если начальные концентрации в разных точках различаются;
- *идентификация аномалий* — нормированное изменение $(\Delta e_i/(\Delta e/e_i))$ помогает выявить аномалии — точки, где локальное изменение концентрации загрязнителя значительно отличается от общего тренда изменения в экосистеме;

- *пороги для частичного отказа* — формула (1) вводит понятие верхнего и нижнего порогов для начальной концентрации ($e_{\text{верхняя}}$, $e_{\text{нижняя}}$). Превышение нормированного изменения этих порогов сигнализирует о частичном отказе — ситуации, когда локальное изменение концентрации выходит за допустимые пределы;

- *акцентирование на роли e_i* — формула (7) подчеркивает влияние начальной концентрации (e_i) на нормированное изменение. При записи формулы как

$$\left| \frac{\Delta e_i}{\Delta e / e_i} \right| = \left| \Delta e_i \cdot \frac{e_i}{\Delta e} \right| = \left| \frac{\Delta e_i \cdot e_i}{\Delta e} \right|,$$

e_i как бы «выносятся» вперед, становясь более заметным. Это полезно для интерпретации результатов, поскольку сразу становится ясно, что e_i играет роль «взвешивающего» фактора при оценке нормированного изменения;

- *применение к загрязнению* — формулы могут быть применены для анализа любого параметра экосистемы, подверженного изменениям, например, концентрации других загрязнителей, численности популяций, биоразнообразия и т. д.

Аналогичным образом в формуле (2) представлен полный отказ.

Стоит сказать несколько слов об e_i как «взвешивающем» факторе при оценке нормированного изменения. Формула (7), описывающая нормированное изменение концентрации загрязнителя, позволяет учесть влияние начальной концентрации (e_i) на оценку риска. Рассмотрим две строительные площадки (А и Б), расположенные вблизи лесных массивов. На обеих площадках ведется мониторинг ПДК взвешенных частиц в воздухе. Нас интересует относительное изменение концентрации взвешенных частиц после начала строительных работ с использованием формулы (7). Данные и расчеты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Нормированное изменение ПДК загрязняющего вещества при строительстве

Параметр	Площадка А	Площадка Б
Начальная концентрация взвешенных частиц e_i , мкг/м ³	20 (чистый район)	80 (загрязненный район)
Изменение концентрации после начала строительства Δe_i , мкг/м ³	+10	+10
Общее изменение концентрации в регионе Δe , мкг/м ³	+20	+20
Нормированное изменение концентрации	10	40

Проанализируем табличные значения:

1. Абсолютное изменение концентрации одинаково для обеих площадок (+10 мкг/м³).
2. Нормированное изменение значительно различается (10 для площадки А и 40 для площадки Б) из-за разницы в начальной концентрации (e_i).

3. Площадка B с изначально высокой концентрацией загрязнителя демонстрирует более высокое нормированное изменение, что указывает на более высокий экологический риск при одинаковом абсолютном увеличении концентрации.

4. Формула (7) учитывает e_i как «взвешивающий» фактор, что позволяет оценить относительную значимость изменения концентрации загрязняющего вещества в зависимости от исходного состояния окружающей среды.

5. В контексте строительства этот подход (учет начальной концентрации e_i , выделение локальных аномалий, гибкость применения к различным параметрам экосистемы) позволяет принимать более обоснованные решения по минимизации экологического риска с учетом специфики конкретной местности.

Тестирование формул для нормированных расчетов

Протестируем формулы (1) и (7) на реальных данных. Для этого потребуются:

- значения концентрации загрязняющего вещества в разных точках экосистемы в разные моменты времени (до, во время и после антропогенного воздействия);
- информация о пороговых значениях концентрации ($e_{i\text{верхняя}}$ и $e_{i\text{нижняя}}$ (соответственно, $e_{j\text{верхняя}}$ и $e_{j\text{нижняя}}$) для анализируемого загрязнителя.

Чтобы методика расчета $\Delta e / e_i$ была понятна, следует однозначно определить, как именно рассчитывается это отношение, и выбрать критерии оценки. Необходимо определить, какие показатели будут использоваться для оценки чувствительности формул к выбору пороговых значений (например, доля ложноположительных и ложноотрицательных результатов при разных порогах).

1. Определение параметров e_i и e_j

Для оценки экологического отказа будем использовать следующие параметры (e_j) из данных о содержании тяжелых металлов в почве¹

- e_1 — концентрация свинца (Pb),
- e_2 — концентрация кадмия (Cd),
- e_3 — концентрация мышьяка (As).

Эти металлы выбраны, т. к. они являются наиболее распространенными загрязнителями, связанными со строительной деятельностью, и имеют высокую токсичность [12].

Параметры e_j будут соответствовать тем же элементам, но рассматриваться с точки зрения совокупного воздействия на всю экосистему:

- e_1 — суммарное воздействие Pb на экосистему,
- e_2 — суммарное воздействие Cd,
- e_3 — суммарное воздействие As.

2. Установка пороговых значений

Используем фоновые значения таблицы 4.1 из СП 11-102—97, например для бурых лесных почв, как основу для определения пороговых значений² (табл. 2).

¹ Перечень предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно-допустимых количеств (ОДК) химических веществ в почве. М. : Госкомсанэпиднадзор России, 1991. 18 с.

² СП 11-102—97. Инженерно-экологические изыскания для строительства. М. : Госстрой, 1997. 42 с.

Для нашего примера $e_{\text{нижняя}}$ установлена на уровне 80 % от фонового значения, предполагая небольшое естественное колебание; $e_{\text{верхняя}}$ установлена на основе ПДК. В данном случае возьмем удвоенное фоновое значение, предполагая, что такое превышение может привести к негативным последствиям. Например, согласно Ю. А. Мажайскому и др. (2009) в пределах искусственных систем почвенные концентрации свинца превышают 40 мг/кг, (в соответствии с правилом «фон + 20» [13]; $e_{\text{нижняя}}$ и $e_{\text{верхняя}}$ установлены экспертным путем, исходя из значимости каждого параметра для экосистемы и возможных последствий превышения пороговых значений.

Таблица 2

Фоновые содержания тяжелых металлов и мышьяка в почвах

Параметр	Фоновое значение, мг/кг	$e_{\text{нижняя}}$, мг/кг	$e_{\text{верхняя}}$, мг/кг	$e_{\text{нижняя}}$, усл. ед.	$e_{\text{верхняя}}$, усл. ед.
Pb	20	15	40	10	50
Cd	0,5	0,4	1	5	25
As	10	8	20	10	50

Коэффициент концентрации (отношение концентрации тяжелых металлов в загрязненной почве к их фоновым показателям) в качестве суммарного показателя (Z_c) помогает оценить степень загрязнения почвы. Следуя документу Госкомгидромета СССР N 02-10 51-233 от 10.12.90 г., ПДК- Z_c тяжелых металлов имеет значение 16 мг/кг. ПДК свинца с учетом фона установлена на уровне 30 мг/кг. Л. К. Садовникова характеризует данный показатель валового содержания как умеренно-опасный. Однако при определенных расчетах оценка загрязнения токсикантами может превышать ПДК- Z_c в несколько раз и достигать значения 128 мг/кг [14]

3. Расчет Δe_i и Δe

Для расчета Δe_i и Δe воспользуемся методом суммы нормированных изменений, т. к. он проще в применении и дает хорошую общую оценку воздействия. Необходимо получить данные о текущих концентрациях тяжелых металлов в почве на территории строительства. Предположим, что измерения показали следующие значения (табл. 3).

Таблица 3

*Текущие концентрации тяжелых металлов в почве
на момент начала строительства*

Параметр	Текущее значение, мг/кг
Pb	35
Cd	0,8
As	18

Расчет Δe_i :

$$\Delta e_1 = (|35 - 20| / 20) = 0,75.$$

$$\Delta e_1 = (|0,8 - 0,5| / 0,5) = 0,6.$$

$$\Delta e_1 = (|18 - 10| / 10) = 0,8.$$

Расчет Δe :

$$\Delta e = 0,75 + 0,6 + 0,8 = 2,15.$$

4. Оценка частичного отказа, формула (1):

Pb — $(|\Delta e_1| / e_1) = (0,75 / 35) = 0,021 < e_{\text{верхняя}} = 0,8$, частичный отказ не обнаружен;

Cd — $(|\Delta e_2| / e_2) = (0,6 / 0,8) = 0,75 > e_{\text{верхняя}} = 1$, частичный отказ обнаружен;

As — $(|\Delta e_3| / e_3) = (0,8 / 18) = 0,044 < e_{\text{верхняя}} = 0,2$, частичный отказ не обнаружен.

5. Оценка полного отказа, формула (2):

$\Delta e = 2,15 < 16,0$ (коэффициент концентрации тяжелых металлов Z_c как пороговое значение для полного отказа). Полный отказ не обнаружен.

6. Интерпретация результатов

Результаты анализа показывают, что уровни содержания тяжелых металлов в почве на территории строительства не превышают установленных пороговых значений ($e_{\text{верхняя}}$), рассчитанных с учетом фоновых концентраций и потенциального воздействия строительных работ. Суммарный показатель воздействия ($\Delta e = 2,15$) ниже установленного критического значения.

Очевидно, что в контексте строительства преимущества протестированной методологии позволяют оценить риски для экосистемы более точно и принять адекватные меры по их снижению. Тем не менее, остаются вопросы относительно данных об общем изменении концентрации (Δe). Не всегда ясно, что имеется в виду под этим понятием: среднее изменение по всей экосистеме (сумма изменений концентрации во всех точках (областях) экосистемы, N — количество этих точек) или изменение в контрольной точке (области) (т. е. Δe рассчитывается для некоторой референтной точки с минимальным антропогенным воздействием), или требуется дополнительная информация. Сложно определить не только общее, но и пороговые значения. Выбор $e_{\text{верхняя}}$ и $e_{\text{нижняя}}$ (соответственно, $e_{\text{верхняя}}$ и $e_{\text{нижняя}}$) оказывает существенное влияние на результаты анализа и требует экспертной оценки. Упрощенная модель не учитывает множество факторов, влияющих на экологический риск (миграция загрязнителей, синергетические эффекты, долгосрочные последствия и т. д.). Приведем табл. 4—6, содержащие многие ключевые факторы.

Таблица 4

Оценка экологического риска загрязнения почвы свинцом (Pb)
 на территории строительства

Параметр	Фон, мг/кг	Текущ. значение, мг/кг	$e_{\text{нижняя}}$, мг/кг	$e_{\text{верхняя}}$, мг/кг	Δe_i	$ \Delta e_i / e_i$	Частичный отказ	Доп. факторы риска
Pb	20	35	15	80	0,75	0,021	Нет	*Глубина залегания грунтовых вод

* Кислотность почвы (pH) влияет на подвижность и доступность тяжелых металлов для растений. Более кислые почвы (низкий pH) способствуют высвобождению металлов и увеличению их поглощения растениями, что может усилить негативное воздействие. Поэтому этот параметр важен именно для оценки риска, связанного со свинцом.

Т а б л и ц а 5

*Оценка экологического риска загрязнения почвы кадмием (Cd)
на территории строительства*

Параметр	Фон, мг/кг	Текущ. значение, мг/кг	$e_{\text{нижняя}}$, мг/кг	$e_{\text{верхняя}}$, мг/кг	Δe_i	$ \Delta e_i / e_i$	Частичный отказ	Доп. факторы риска
Cd	0,5	0,8	0,4	1	0,6	0,75	Нет	* Тип почвы (песчаная, глинистая)

* Наличие сельскохозяйственных угодий вблизи.

Т а б л и ц а 6

*Оценка экологического риска загрязнения почвы мышьяком (As)
на территории строительства*

Параметр	Фон, мг/кг	Текущ. значение, мг/кг	$e_{\text{нижняя}}$, мг/кг	$e_{\text{верхняя}}$, мг/кг	Δe_i	$ \Delta e_i / e_i$	Частичный отказ	Доп. факторы риска
As	10	18	8	20	0,8	0,044	Нет	* Характер растительности

* Близость водоемов.

Проанализируем распределение $(|\Delta e_i| / e_i)$ для каждого параметра и определим вероятность превышения $e_{\text{верхняя}}$ и вероятность частичного отказа. Для Pb значение Δe_i равно 0,75, что свидетельствует о высоком уровне изменения по сравнению с начальным показателем. При этом относительное изменение равно 0,021, что меньше верхнего предела $e_{\text{верхняя}}$ (80 мг/кг) и означает отсутствие частичного отказа. Однако, учитывая другие факторы, такие как глубина залегания грунтовых вод и кислотность почвы, полученная информация может помочь в оценке риска. В случае As Δe_i равно 0,8 и дает основание полагать, что данный подход полезен для оценки его концентрации. В отличие от Pb и As, у Cd наблюдается меньшее изменение Δe_i (0,6) а также обратная корреляция. Хотя его относительное изменение $|\Delta e_i|/e_i = 0,75$ велико, оно не приводит к частичному отказу, т. к. не превышает допустимый предел. Возможно, для Cd требуется другая модель, т. к. связь между концентрацией кадмия и экологическим риском нелинейная.

Данный анализ является предварительным и основан на ограниченном наборе данных. Для более точной оценки риска экологического отказа и учета неопределенности необходимо провести детальное исследование, например, с помощью метода МС.

Заключение

В ходе исследования разработана и протестирована модель, основанная на анализе изменений ключевых параметров экосистем, таких как концентрация тяжелых металлов в почве. Тестирование на реальных данных показало ее применимость для предварительной оценки риска загрязнения.

Использование нормированных показателей и пороговых значений позволяет учитывать специфику каждой экосистемы. Однако необходимо признать, что модель является упрощенной и не учитывает ряд факторов,

влияющих на долгосрочные экологические риски, например, миграцию загрязнителей и синергетические эффекты.

Для более точной оценки необходимы дальнейшие исследования с применением более сложных методов, таких как Монте-Карло, и расширение набора анализируемых параметров. Тем не менее, разработанная модель может служить эффективным инструментом предварительной оценки риска на стадии проектирования и строительства, позволяя своевременно принимать меры по его минимизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алексеев А. В.* Диагностика и надежность автоматизированных систем. Самара : Самарский государственный аэрокосмический ун-т, 2013. 116 с.
2. *Ma C., Korniss G., Szymanski B.K., Gao J.* Universality of noise-induced resilience restoration in spatially-extended ecological systems // *Communications Physics*. 2021. Vol. 4. P. 262.
3. *Scheffer M., Carpenter S., Foley J. A., Folke C.* Catastrophic shifts in ecosystems // *Nature*. 2001. Vol. 413. Pp. 591—596.
4. *White J. M., Stromberg J. C.* Resilience, restoration, and riparian ecosystems: case study of a dryland, urban river // *Restoration Ecology*. 2009. Vol. 19(1). Pp. 101—111.
5. *Michaels T. K., Eppinga M. B., Bever J. D.* A nucleation framework for transition between alternate states: short-circuiting barriers to ecosystem recovery // *Ecology*. 2020. Vol. 101. Art. e03099.
6. *D'Odorico P., Laio F., Ridolfi L.* Noise-induced stability in dryland plant ecosystems // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2005. Vol. 102. Pp. 10819—10822.
7. Noises-induced regime shifts and -enhanced stability under a model of lake approaching eutrophication / *C. Zeng, C. Zhang, J. Zeng, H. Luo, D. Tian, H. Zhang, F. Long, Y. Xu* // *Ecological Complexity*. 2015. Vol. 22. Pp. 102—108.
8. *Lake P. S.* Resistance, resilience and restoration // *Ecological Management & Restoration*. 2013. Vol. 14. Pp. 20—24.
9. *Buisson E., Stradic S., Silveira F., Veldman J.* Resilience and restoration of tropical and subtropical grasslands, savannas, and grassy woodlands // *Biological Reviews*. 2019. Vol. 94. Pp. 590—609.
10. Spatial correlation as leading indicator of catastrophic shifts / *V. Dakos, E. H. van Nes, R. Donangelo, H. Fort, M. Scheffer* // *Theoretical Ecology*, 2010. Vol. 3. Iss. 3. Pp. 163—174.
11. *Zeng C., Han Q., Yang T., Wang H.* Noise- and delay-induced regime shifts in an ecological system of vegetation // *Journal of Statistical Mechanics Theory and Experiment*. 2013. Vol. 10. P. 10017.
12. Effect of vehicular pollution on physicochemical parameters and accumulation of heavy metals along roadside soils in Sonamarg forest ecosystem / *T. A. Bhat, J. I. A. Bhat, F. A. Lone, T. Ali, N. Nazir, S. H. Khan, M. Y. Wani* // *International Journal of Chemical Studies*. 2020. Vol. 8. Iss. 5. Pp. 184—188.
13. *Мажайский Ю. А., Тобратов С. А., Кондрашова Ю. А.* Особенности распределения тяжелых металлов в почвах лесных экосистем // *Плодородие*. 2009. № 1. С. 51—52.
14. *Садовникова Л. К.* Экология и окружающая среда при химическом загрязнении. М. : Высшая школа, 2006. 334 с.

© Смирнова Е. Э., 2025

Поступила в редакцию
20.06.2025

Ссылка для цитирования:

Смирнова Е. Э. Экологические риски в строительстве: модель отказов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 3(100). С. 145—156. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_145.

Об авторе:

Смирнова Елена Эдуардовна — канд. техн. наук, доц. каф. техносферной безопасности, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ). Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, 3-я Красноармейская ул., 3/6; esmirnovae@yandex.ru

Elena E. Smirnova

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

ENVIRONMENTAL RISKS IN CONSTRUCTION: FAILURE MODEL

Currently, due to intensive industrial development, environmental risks have increased. A model for their assessment has been developed. The model takes into account local and general changes in parameters, using standardized indicators and threshold values for assessing the probability of environmental failures. The proposed approach allows for preliminary risk assessment at the design and construction stages to minimize negative impact on the environment.

Key words: assessment model, construction, environmental failures, environmental risk, anthropogenic impact.

For citation:

Smirnova E. E. [Environmental risks in construction: failure model]. *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], 2025, iss. 3, pp. 145—156. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_145.

About author:

Elena E. Smirnova — Candidate of Engineering Sciences, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 3/6, 3-ya Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; esmirnovae@yandex.ru