

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 1. С. 271–287.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (1): 271–287.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.344.56

DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-271-287

EDN: TTNFFE

КОНЦЕПЦИЯ НЕСИНХРОННОГО МНОГОТОЧЕЧНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КАК ЭКВИВАЛЕНТА ПРИХОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЭЛЕЕВСКОЙ ВОЛНЫ

Сергей Гургенович Саиян

Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет,

г. Москва, Россия

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского

Российской академии наук, г. Москва, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Поверхностные волны Рэлея играют значительную роль в сейсмическом воздействии на протяженные и высотные сооружения, вызывая существенные инерционные эффекты и внутренние усилия. Однако современные подходы к моделированию сейсмостойкости зданий часто не учитывают волновую природу распространения поверхностных волн, что может приводить к недооценке динамического отклика конструкций. Актуальным является разработка инженерных методов, позволяющих корректно воспроизводить пространственно-временную структуру поля рэлеевских волн в расчетных моделях.

Цель. Разработать и теоретически обосновать концепцию замены поля перемещений приходящей поверхностной рэлеевской волны эквивалентным несинхронным многоточечным (многоопорным) кинематическим воздействием на опоры здания. Цель включает формализацию постановки задачи, вывод управляющих параметров и создание алгоритма для практической реализации в стандартных программных комплексах.

Материалы и методы. В основе исследования лежит решение уравнений Навье для линейно-упругого изотропного полупространства. Используется свойство чистого временного сдвига поля рэлеевской волны на свободной поверхности. Вводится безразмерный параметр несинхронности, связывающий геометрические характеристики здания, фазовую скорость волны и направление ее прихода. Для оценки границ применимости

подхода проводится анализ погрешности плосковолнового приближения и влияния кривизны волнового фронта.

Результаты. Предложена и строго обоснована инженерная постановка, позволяющая заменить непрерывное поле поверхностной волны Рэлея набором кинематических воздействий на опоры сооружения с детерминированными временными сдвигами. Ключевым результатом является введение параметра несинхронности, который служит критерием для различения синхронного и существенно несинхронного воздействия. Получена верхняя оценка влияния кривизны волнового фронта, определяющая границы применимости эквивалентной замены. Разработанный подход обеспечивает корректный учет направления прихода волны и габаритов здания, а также вычислительную эффективность за счет генерации воздействий на все опоры на основе одной базовой записи.

Ключевые слова: поверхностные волны, сейсмические волны, волна Рэлея, многоточечное сейсмическое воздействие, несинхронность сейсмических волн

Финансирование: работа выполнена за счет гранта РФФ № 24-49-02002.

Для цитирования: Саиян С.Г. Концепция несинхронного многоточечного сейсмического воздействия как эквивалента приходящей поверхностной рэлеевской волны // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 1. С. 271–287. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-271-287. EDN: TTNFFE

ORIGINAL ARTICLE

CONCEPT OF ASYNCHRONOUS MULTI-POINT SEISMIC EXCITATION AS AN EQUIVALENT OF INCIDENT SURFACE RAYLEIGH WAVE

Sergey G. Saiyan

*The National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia*

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics

of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Rayleigh surface waves play a significant role in the seismic impact on extended and high-rise buildings, inducing substantial inertial effects and internal forces. However, modern approaches to modeling the seismic performance of buildings often neglect the wave nature of the surface-wave propagation, which may lead to underestimation of the dynamic response of structures. Therefore, it is relevant to develop engineering methods that can correctly reproduce the spatiotemporal structure of the Rayleigh-wave field in computational models.

Purpose: The aim is to develop and theoretically substantiate the concept of replacing the displacement field of incoming Rayleigh surface wave with an equivalent asynchronous multipoint (multi-support) kinematic excitation applied to the building supports. Measurement of the main parameters and design of algorithm for practical implementation in standard software.

Methodology: The study is based on solving Navier equations for a linear-elastic isotropic half-space. The pure temporal-shift property of the Rayleigh-wave field is utilized for the free surface. A dimensionless asynchrony parameter is introduced, relating the building geometry, the wave phase velocity, and the direction of the wave incidence. The applicability of this approach is evaluated as well as the error of the plane-wave approximation, and the influence of wavefront curvature are analyzed.

Research findings: An engineering formulation is proposed and rigorously justified that allows to replace the continuous Rayleigh surface-wave field by a set of kinematic excitations at the building supports with deterministic time shifts. The key result is the introduction of the asynchrony parameter, which serves as a criterion for distinguishing between the synchronous

and substantially asynchronous excitation. An upper bound for the influence of wavefront curvature is obtained, defining the applicability limits of the equivalent replacement.

Practical implication: The developed approach provides a correct account for the wave incidence direction and building dimensions, as well as the computational efficiency by generating excitations at all supports from a single baseline record.

Keywords: surface wave, seismic wave, Rayleigh wave, multi-point seismic excitation, wave asynchrony

Funding: This work was supported by Grant No. 24-49-02002 from the Russian Science Foundation.

For citation: Saiyan S.G. Concept of Asynchronous Multi-Point Seismic Excitation as an Equivalent of Incident Surface Rayleigh Wave. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28 (1): 271–287. DOI: 10.31675/1607-1859-2026-28-1-271-287. EDN: TTNFFE

Введение

Городская застройка стремительно растет в высоту и протяженность [1], а уязвимость протяженных и конструктивно сложных сооружений для поверхностных сейсмических волн все чаще подтверждается наблюдениями и математическими моделями. Поверхностные волны Рэлея способны формировать длительные, энергоемкие колебания с выраженной эллиптической поляризацией частиц у свободной поверхности, что приводит к существенным инерционным эффектам и, как следствие, значимым внутренним усилиям.

Недавний анализ записей землетрясений, в том числе события Пуэбла-Морелос (Puebla-Morelos) [2], показывает, что вклад рэлеевских волн может приводить к медианным пиковым деформациям зданий, что делает их ключевым объектом моделирования и проектирования сейсмозащиты. В исследовании «Observations of Rayleigh waves in Mexico City Valley during the 19 September 2017 Puebla-Morelos, Mexico earthquake» [3] для того же землетрясения в Мексике было установлено, что вклад рэлеевских волн был особенно заметен в диапазоне частот от 0,2 до 0,9 Гц, что согласуется с диапазонами частот, описанными в литературе отечественных и зарубежных авторов [4, 5]. В работе «Comparative analysis of Rayleigh and Love waves detected propagating in the Nobi and Kanto basins during the 2004-, 2007-Chuetsu and 2011 Tohoku earthquakes» [6] были обнаружены поверхностные волны Рэлея и Лява в бассейнах рек Ноби (Nobi) и Канто (Kanto) во время землетрясений в Чуэцу (Chuetsu) в 2004 г., в 2007 г. и в Тохоку (Tohoku) в 2011 г., которые представляли собой интенсивные низкочастотные движения грунта, генерирующиеся локально по мере того, как сейсмическая энергия проходит через осадочные отложения. Анализ землетрясения в Турции, проведенный отечественными авторами [7], показал, что по записям поверхностных волн можно рассчитать их очаговые параметры в приближении мгновенного точечного источника.

За последние годы теория описания и моделирования поверхностных волн Рэлея получила значительное развитие. Основные направления исследований включают распространение рэлеевских волн в метаматериалах [8–10], многослойных (стратифицированных) средах [11–13], функционально-гради-

ентных материалах [14–16], а также применение этих волн в задачах неразрушающего контроля [17].

Что касается расчетных исследований воздействия поверхностных сейсмических волн, основное внимание уделяется следующим типам объектов: мостовым сооружениям [18, 19], высотным зданиям [20, 21], а также подземным и заглубленным конструкциям [22, 23]. Эти работы подтверждают важность учета поверхностных волн при проектировании. Для защиты от них применяются метаматериальные и барьерные концепции, направленные прежде всего на подавление волн Рэлея в низкочастотном диапазоне с целью защиты зданий, сооружений и инфраструктурных объектов.

Параллельно активно развивается направление учета пространственно-изменяющегося сейсмического воздействия [18] и многоточечного (многоопорного) возбуждения конструкций [24–26]. Для мостов и протяженных сооружений показано, что игнорирование несинхронности приводит к систематическому недоучету усилий и перемещений [27–30]. Международные и европейские нормы уточняют требования к учету волнового фронта, некогерентности и локальных эффектов, вызванных грунтовыми условиями [30]. Обновленные положения по несинхронному воздействию для мостов детально проанализированы и сопоставлены с практикой проектирования [31].

В современной отечественной и международной литературе по взаимодействию систем «грунт – здание» (Soil-Structure Interaction, SSI) за последнее десятилетие сформированы инженерные подходы и руководства к моделированию подобных систем [32–43]. Они показывают, что SSI определяющим образом влияет на период колебаний, эффективное демпфирование, распределение усилий и критерии предельных состояний [32]. Реализация задачи достигается либо прямым связанным моделированием грунта, фундамента и надземных конструкций, либо субмоделированием с частотно-зависимыми опорными податливостями и демпфированием. Систематизированные рекомендации для зданий приведены в руководствах NIST GCR 12-917-21 [32], FEMA P-2091, EN 1998-1/-2 и ASCE/SEI 7-22, тогда как обзорные публикации 2020–2025 гг. подчеркивают значимость учета нелинейных эффектов и валидации полученных результатов на натурных данных [40–43]. В стандарте ASCE/SEI 7-22 закреплены условия и ограничения SSI-подходов при расчете по спектральным и прямым динамическим подходам, а в Eurocode 8, Part 2, для мостов прямо регламентируется учет пространственной вариации движения основания и многоопорного (многоточечного) воздействия.

Важной составляющей сейсмического воздействия является пространственная изменчивость. Под ней понимаются три взаимосвязанных эффекта [44]: (i) конечная скорость распространения волнового фронта, которая вызывает детерминированные фазовые сдвиги между опорами; (ii) частотно-зависимое убывание когерентности откликов в разных точках площадки строительства из-за различий в грунтовых условиях; (iii) эффект некогерентности, возникающий из-за рассеяния волн в неоднородной среде земли. Для инженерных расчетов это удобно описывать через функцию когерентности $\gamma(\omega, \mathbf{r})$ и матрицу кросс-спектральной плотности в точках i и j в виде $S_{ij}(\omega) = \sqrt{S_i(\omega)S_j(\omega)}\gamma(\omega, r_{ij})$. Типовые модели γ в практике включают экспо-

ненциальную форму с калибровкой параметров по данным площадки [45]. Влияние пространственной изменчивости на усилия в протяженных сооружениях показано в работах [27–31]. Обзор моделей и методика инженерного учета приведены в ряде работ [45–47], нормативные указания содержатся в EN 1998-1/-2 и ASCE/SEI 7-22.

Ситуация с текущими международными и отечественными работами двоякая. С одной стороны, многоточечные (многоопорные) постановки в последние пять лет активно развиваются для мостов, тоннелей и линейных (протяженных) объектов, что подтверждает актуальность и степень разработанности данной темы [24–28]. С другой стороны, научные исследования, нормы и программные средства пока не предлагают унифицированного подхода для воспроизведения именно поверхностной сейсмической волны как набора опорных кинематических воздействий в виде несинхронных бегущих волн, согласованных по фазе в плане здания. Настоящая работа закрывает этот разрыв.

Таким образом, формулируется цель данного исследования – разработать и строго обосновать инженерную постановку, в которой поверхностная рэлеевская волна заменяется эквивалентным несинхронным многоточечным (многоопорным) кинематическим воздействием; вывести связанный набор уравнений движения и параметров управления несинхронностью, а также сформулировать алгоритм задания такого воздействия в стандартных программных комплексах, наиболее распространенных в строительной отрасли (ANSYS Mechanical APDL, ABAQUS, ANSYS LS-DYNA, NASTRAN, Лира-САПР, SCAD Office, Лира-Софт, СтаДиКон и т. д.), для прямого динамического анализа.

Постановка задачи, гипотезы и управляющие параметры

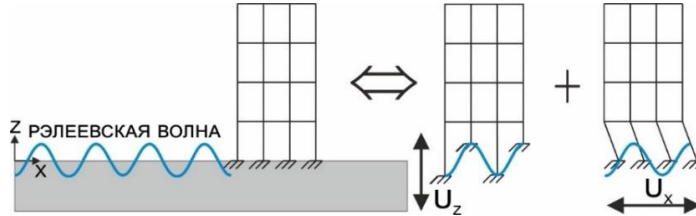
В рамках линейно-упругой континуальной модели основания рассматривается здание, опирающееся на поверхность однородного изотропного линейно-упругого полупространства. На поверхности основания распространяется рэлеевская волна, приходящая под углом θ к оси X . Пусть c_R – скорость рэлеевской волны, $\lambda_R = 2\pi c_R / \omega$ – длина волны для круговой частоты ω . Геометрия основания здания аппроксимируется многоопорной (многоточечной) схемой, при которой опоры (узлы контакта с грунтом) имеют координаты $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, 0)$, где $i = 1, 2, \dots, n_b$ (количество опор).

Ключевая идея данной работы – заменить непрерывное поле перемещений рэлеевской волны на поверхности эквивалентным несинхронным (многоопорным или многоточечным) кинематическим воздействием (рисунок), при котором на каждой опоре задается своя временная история перемещений/скоростей/ускорений с детерминированным фазовым сдвигом из-за конечной скорости распространения волн по поверхности.

Введем управляющий безразмерный параметр несинхронности, определяющий режим возбуждения, записанный в разных формах (терминах):

$$\kappa(\omega, \theta) = \frac{L_{\text{эф}}(\theta)}{\lambda_R} = \frac{\omega L_{\text{эф}}(\theta)}{2\pi c_R} = \frac{\Delta t_{\text{max}}(\theta)}{T}, \quad (1)$$

где $L_{\text{эф}}(\theta) = L_x |\cos(\theta)| + L_y |\sin(\theta)|$; L_x и L_y – габариты здания по осям плана, $T = 2\pi/\omega$; $\Delta t_{\text{max}} = L_{\text{эф}}(\theta)/c_R$ – максимальный сдвиг по времени между крайними опорами по направлению прихода поверхностной волны. Подстановка $\theta = 0^\circ$ дает $L_{\text{эф}} = L_x$, $\theta = 90^\circ$ дает $L_{\text{эф}} = L_y$, в то время как промежуточные величины угла θ дают плавное изменение между этими предельными значениями.



Эквивалентная замена рэлеевской волны на несинхронное многоточечное возбуждение опор зданий
Equivalent replacement of relay wave with asynchronous multipoint excitation of building supports

При $\kappa \ll 1$ воздействие близко к синхронному, а при $\kappa = O(1)$ и выше несинхронность существенна. Существенная несинхронность возникает, когда временной сдвиг сравним с доминирующим периодом отклика (обычно T_1).

Представление рэлеевской волны у свободной поверхности как бегущей волны

В линейно-упругом изотропном полупространстве ($z \leq 0$) справедливы уравнения Навье:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \mu \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \text{grad}(\text{div}(\mathbf{u})), \quad (2)$$

где ρ – плотность; \mathbf{u} – вектор перемещений; λ и μ – константы Ламе; Δ – оператор Лапласа. С граничным условием свободной поверхности на $z = 0$, при котором возникают нулевые поверхностные напряжения $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0$.

Ищем решение для поверхностной волны, бегущей в горизонтальном направлении $\mathbf{s} = (\cos(\theta), \sin(\theta), 0)$:

$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = \text{Re} \left\{ \left[\mathbf{A} e^{\gamma_s k z} + \mathbf{B} e^{\gamma_p k z} \right] e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \right\}, \quad (3)$$

где $k = \omega/c_R$; $\gamma_p = \sqrt{1 - (c_R/c_p)^2}$ и $\gamma_s = \sqrt{1 - (c_R/c_s)^2}$ – безразмерные затухающие по глубине показатели; $c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ и $c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ – скорости распространения продольных (p) и поперечных (s) волн.

Граничные условия на $z = 0$ приводят к уравнениям для фазовой скорости волны Рэлея [48]:

$$\left(\frac{c_R}{c_s}\right)^6 - 8\left(\frac{c_R}{c_s}\right)^4 + 8\left(3 - 2\frac{c_s^2}{c_p^2}\right)\left(\frac{c_R}{c_s}\right)^2 - 16\left(1 - \frac{c_s^2}{c_p^2}\right) = 0, \quad (4)$$

где вещественный корень $0 < \frac{c_R}{c_s} < 1$ определяет c_R . Для однородного полупространства c_R практически отсутствует дисперсия, что позволяет работать с фиксированной скоростью c_R , независимой от ω . Для практических целей возможно использование аппроксимации через коэффициент Пуассона [49]:

$$c_R \approx c_s \frac{0,862 + 1,14\nu}{1 + \nu}. \quad (5)$$

Свойство сдвига по времени на свободной поверхности

На свободной поверхности $z = 0$:

$$\mathbf{u}_S(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\left\{\mathbf{U}_0 e^{i(k\mathbf{s}\cdot\mathbf{r} - \omega t)}\right\}, \quad (6)$$

где $\mathbf{U}_0 = (U_x \mathbf{s} + U_z \mathbf{e}_z)$ – комплексная амплитуда с эллиптической поляризацией (горизонтальная вдоль \mathbf{s} , вертикальная U_z), \mathbf{e}_z – единичный вектор вдоль оси z . Отношение $|U_x|/|U_z|$ зависит только от соотношения c_s/c_p . Для двух точек \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_j на поверхности:

$$\mathbf{u}_S(\mathbf{r}_i, t) = \mathbf{u}_S\left(\mathbf{r}_j, t - \frac{\mathbf{s}(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)}{c_R}\right). \quad (7)$$

Поле на поверхности представляет собой бегущую волну, а значение в любых двух точках отличается чистым сдвигом по времени без изменения амплитуды (в пределах плоской волны), что подтверждает возможность данной постановки задачи.

Кинематическое задание на опорах (многоточечное воздействие)

Пусть базовая запись вдоль направления распространения – скалярная временная функция $u_x^0(t)$ – перемещение, а $\dot{u}_x^0(t)$ и $\ddot{u}_x^0(t)$ – ее производные (скорость и ускорение соответственно). Вертикальная составляющая $u_z^0(t)$ связана соотношением эллиптической поляризации. Для опоры с координатами \mathbf{r}_i вводим временной сдвиг:

$$\Delta t_i = \frac{x_i \cos(\theta) + y_i \sin(\theta)}{c_R} = \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}_i}{c_R}. \quad (8)$$

Тогда абсолютные перемещения, скорости и ускорения основания в опоре i равны:

$$\begin{aligned}
\mathbf{u}_b^{(i)}(t) &= u_x^0(t - \Delta t_i) \mathbf{s} + u_z^0(t - \Delta t_i) \mathbf{e}_z; \\
\dot{\mathbf{u}}_b^{(i)}(t) &= \dot{u}_x^0(t - \Delta t_i) \mathbf{s} + \dot{u}_z^0(t - \Delta t_i) \mathbf{e}_z; \\
\ddot{\mathbf{u}}_b^{(i)}(t) &= \ddot{u}_x^0(t - \Delta t_i) \mathbf{s} + \ddot{u}_z^0(t - \Delta t_i) \mathbf{e}_z.
\end{aligned} \tag{9}$$

В глобальных осях X, Y, Z горизонтальная часть автоматически раскладывается на

$$\begin{aligned}
a_{X_i} &= \ddot{u}_x^0(t - \Delta t_i) \cos(\theta); \\
a_{Y_i} &= \ddot{u}_x^0(t - \Delta t_i) \sin(\theta); \\
a_{Z_i} &= \ddot{u}_z^0(t - \Delta t_i).
\end{aligned} \tag{10}$$

Для одной компоненты запись формируется в следующем виде:

$$a_i(t) = a_0(t - \Delta t_i). \tag{11}$$

Данная запись может использоваться для задания любой компоненты как независимой компоненты (горизонтальной или вертикальной) в виде многогодового воздействия, воспроизводя бегущую волну по опорам зданий и сооружений.

Для учета пространственной изменчивости к детерминированному сдвигу Δt_i можно добавить некогерентность между опорными воздействиями. Для этого можно рассмотреть два практических варианта.

1. *Спектральный синтез*, при котором формируется целевая матрица когерентности $\Gamma_{ij}(\omega) = \gamma(\omega, r_{ij})$, после чего генерируются согласованные процессы с кросс-спектральной матрицей $\mathbf{S}(\omega) = \mathbf{H}(\omega) \mathbf{S}_0(\omega) \mathbf{H}^H(\omega)$, где \mathbf{H} выбирают по разложению Холецкого для Γ [50, 51].

2. *Временной синтез*, при котором запись $a_0(t)$ для опоры-эталона модифицируется сверткой $a_i(t) = a_0(t - \Delta t_i) h_i(t)$ так, чтобы взаимные функции корреляции воспроизводили заданную $\gamma(\omega, r_{ij})$.

Уравнения движения сооружения при заданных перемещениях опор

Пусть $\mathbf{q}(t) \in \mathbb{R}^n$ – абсолютные узловые перемещения модели (все степени свободы), матрицы M, C, K – массы, демпфирования и жесткости соответственно. Обозначим двоичную матрицу (0 и 1) опорных степеней свободы $E_b \in \mathbb{R}^{n \times n_b}$ и вектор опорных перемещений $\mathbf{u}_b(t) \in \mathbb{R}^{n_b}$, составленный из компонент $\mathbf{u}_b^{(i)}$. Введем разложение

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{v}(t) + E_b \mathbf{u}_b(t), \tag{12}$$

где $\mathbf{v}(t)$ – неизвестные относительные перемещения (нулевые на опорах). Подстановка в уравнения движения $M\ddot{\mathbf{q}} + C\dot{\mathbf{q}} + K\mathbf{q} = 0$ дает

$$M\ddot{\mathbf{v}} + C\dot{\mathbf{v}} + K\mathbf{v} = -(ME_b\ddot{\mathbf{u}}_b + CE_b\dot{\mathbf{u}}_b + KE_b\mathbf{u}_b). \quad (13)$$

Это обобщенная форма для любой комбинации несинхронных многоточечных опорных перемещений. Если программный комплекс позволяет задавать граничные перемещения непосредственно (условия Дирихле на опорах), то численно решается (13) без явного формирования правой части – через кинематические связи.

Выбор базовой формы записи и связь между горизонтальной и вертикальной компонентами рэлеевской волны

Для строгой эквивалентности используется одна и та же базовая форма записи в горизонтальном направлении распространения и вертикали, но с амплитудным отношением из эллиптической поляризации. В рамках полупространства отношение модулей амплитуд на поверхности есть функция $\xi = (c_s/c_p)^2$:

$$\frac{|U_z|}{|U_x|} = \chi(\xi), \quad \varphi = \arg\left(\frac{U_z}{U_x}\right), \quad (14)$$

где отношение χ и фазовый сдвиг φ определяют из решения краевых условий. Для большинства грунтовых массивов можно принять значение в диапазоне $1,2|U_x| \lesssim |U_z| \lesssim 1,6|U_x|$ и $\varphi \approx \pi/2$ [52–54]. В некотором инженерном приближении можно рассмотреть

$$u_z^0(t) \approx \eta u_x^0(t + \tau), \quad (15)$$

где $\eta \in [1, 2; 1, 6]$, $\tau \approx T/4$. Данное приближение воспроизводит эллиптическую траекторию частиц в вертикальной плоскости распространения. Уточнение η , τ делается по заданным c_p и c_s или по локальной дисперсионной кривой [55].

Оценка погрешности плосковолнового приближения

Пусть сейсмическая волна приходит со стороны единичного вектора $\mathbf{s} = (\cos(\theta), \sin(\theta), 0)$ и имеет радиус кривизны фронта R в окрестности здания (источник расположен на расстоянии R по направлению \mathbf{s}). Длина пути от центра кривизны до точки \mathbf{r} равна $d(\mathbf{r}) = \|\mathbf{R}\mathbf{s} - \mathbf{r}\|$. Фаза гармонического поля с круговой частотой ω и волновым числом $k = \omega/c_R$ пропорциональна пути $\varphi(\mathbf{r}) = k d(\mathbf{r})$ и для идеальной плоской волны $\varphi_{pl}(\mathbf{r}) = k(R - \mathbf{s} \cdot \mathbf{r})$.

Проведем разложение точной фазы при $R \gg L_{\text{эф}}$. Вычислим $d(\mathbf{r})$ с точностью до порядка $1/R$, положив $\varepsilon = -2 \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}}{R} + \frac{\|\mathbf{r}\|^2}{R^2}$. Для малых $|\varepsilon|$ используем биномиальное разложение $\sqrt{1 + \varepsilon} \approx 1 + \frac{1}{2}\varepsilon - \frac{1}{8}\varepsilon^2$. Итоговое выражение для $d(\mathbf{r})$ выглядит следующим образом:

$$d(\mathbf{r}) \approx R \left(1 - \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}}{R} + \frac{1}{2} \frac{\|\mathbf{r}\|^2}{R^2} - \frac{1}{2} \frac{(\mathbf{s} \cdot \mathbf{r})^2}{R^2} \right) = R - \mathbf{s} \cdot \mathbf{r} + \frac{1}{2R} (\|\mathbf{r}\|^2 - (\mathbf{s} \cdot \mathbf{r})^2). \quad (16)$$

Заметим, что $\|\mathbf{r}\|^2 - (\mathbf{s} \cdot \mathbf{r})^2 = \|\mathbf{r}_\perp\|^2 = r_\perp^2$, где \mathbf{r}_\perp – проекция точки на направление, перпендикулярное приходу волны (поперечное расстояние до оси пространства). Значит, $d(\mathbf{r}) \approx R - \mathbf{s} \cdot \mathbf{r} + \frac{r_\perp^2}{2R}$.

Точная фаза плоской волны отличается на $\delta\varphi(\mathbf{r}) = \varphi(\mathbf{r}) - \varphi_{pl}(\mathbf{r}) = k \frac{r_\perp^2}{2R}$.

Это добавка в фазе, возникающая из-за кривизны фронта волны. Она квадратична к поперечному расстоянию r_\perp , что приводит к тому, что точки, лежащие дальше от оси фронта волны, отстают/опережают по фазе чуть сильнее.

Фаза и время связаны через $\varphi = \omega t$. Малое добавление фазы эквивалентно временному сдвигу:

$$\delta t(\mathbf{r}) = \frac{\delta\varphi(\mathbf{r})}{\omega} = \frac{k r_\perp^2}{2R\omega} = \frac{r_\perp^2}{2Rc_R}. \quad (17)$$

Формула (17) показывает, насколько многоточечная модель (с чистым линейным сдвигом по $\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}$) может сдвинуться по времени из-за неплоского волнового фронта.

Для любой точки здания $r_\perp \leq \frac{L_\perp(\theta)}{2}$, где $L_\perp(\theta) = L_x |\sin(\theta)| + L_y |\cos(\theta)|$.

Подставляя в формулу для δt , получим верхнюю оценку

$$\delta t \lesssim \frac{L_\perp^2(\theta)}{8Rc_R}, \quad (18)$$

что указывает на влияние кривизны на поперечный размер здания. Отсюда формулируется критерий малости кривизны $\frac{\delta t}{T} \ll 1$, при котором $L_\perp^2 \ll 8R\lambda_R$. Эта оценка задает границу применимости эквивалентной замены.

Заключение

В работе была предложена концепция несинхронного многоточечного сейсмического воздействия как эквивалента приходящей поверхностной рэлеевской волны. На основе проведенного исследования можно сформулировать конкретные выводы.

1. В работе предложена и обоснована инженерная постановка, в которой поле перемещений поверхностной рэлеевской волны у свободной поверхности заменяется эквивалентным несинхронным многоточечным (многоопорным) кинематическим воздействием на опоры здания. Ключевая идея данной работы заключается в том, чтобы представить зарегистрированную или синтезированную временную историю в одной опорной точке как базовую запись и воспро-

извести приход бегущей волны посредством детерминированных сдвигов по времени, зависящих от направления фронта, фазовой скорости c_R и геометрии сооружения в плане. Эта эквивалентность доказана через представление решения уравнений Навье для полупространства и свойство «чистого» временного сдвига поля Рэлея при $z = 0$ между любыми двумя точками поверхности.

2. Центральным результатом является введение безразмерного параметра несинхронности $\kappa(\omega, \theta) = \frac{L_{\text{эф}}(\theta)}{\lambda_R} = \frac{\omega L_{\text{эф}}(\theta)}{2\pi c_R} = \frac{\Delta t_{\text{max}}(\theta)}{T}$, который связывает

длину здания по направлению волнового фронта, ее скорость и частоту возбуждения. Было показано, что в пределе при $\kappa \ll 1$ воздействие близко к синхронному, а при $\kappa = O(1)$ и выше несинхронность существенна, что указывает на доминирующую роль пространственно-временной несогласованности кинематических опорных воздействий. Такой параметр выступает удобным критерием применимости классических моделей и одновременно индикатором необходимости задания многоточечного воздействия для поверхностных сейсмических волн.

3. Проведена оценка ошибки плосковолнового приближения и показано, что влияние кривизны фронта можно ограничить сверху через дополнительный временной сдвиг $\delta t \lesssim \frac{L_{\perp}^2(\theta)}{8Rc_R}$. Отсюда вытекает критерий малости кривизны

$\frac{\delta t}{T} \ll 1$, при котором $L_{\perp}^2 \ll 8R\lambda_R$. Эта оценка задает границу применимости эквивалентной замены.

4. С инженерной точки зрения предложенная концепция дает три прямых следствия. Во-первых, она позволяет корректно учесть влияние угла прихода фронта волны θ и габаритов здания в плане, что важно для оценки неблагоприятных направлений воздействия. Во-вторых, она естественным образом объединяет расчеты зданий и сооружений с уже устоявшейся практикой расчетов мостовых конструкций по многоопорным представлениям, но уточняет именно «волновую» природу фазовой связи между опорами для поверхностных волн (а не произвольную некогерентность). В-третьих, она обеспечивает воспроизводимый и не затратный по вычислительным ресурсам подход к моделированию, при котором кинематические воздействия для одной опоры $a_0(t)$ формируют возбуждения на других опорах по направлению распространения волны как $a_i(t) = a_0(t - \Delta t_i)$ с вычислением временного сдвига $\Delta t_i = \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}_i}{c_R}$.

Данная работа будет продолжена в виде расчетных численных исследований влияния параметров поверхностного сейсмического воздействия на динамический отклик зданий различных конфигураций (протяженные и высотные). Планируется сформировать набор расчетных сценариев с вариацией волновых характеристик ($c_R(\omega)$, θ , амплитудно-частотного состава и эллиптической поляризации), безразмерного параметра несинхронности $\kappa(\omega, \theta)$, габаритных соот-

ношений зданий (протяженности и высоты) в постановке многоточечного сейсмического воздействия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Щукина М.Н. Современное высотное строительство. Москва: ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2007. 440 с.
2. Ruiz-García J., Miranda E. Influence of Surface Rayleigh Waves on the Seismic Response of RC Buildings with Weak First-Story During the 2017 MW7. 1 Puebla–Morelos Earthquake in Mexico City // Journal of Earthquake and Tsunami. 2025. V. 19. № 3. P. 2450041. DOI: 10.1142/S1793431124500416
3. Heresi P., Ruiz-García J., Payán-Serrano O., Miranda E. Observations of Rayleigh waves in Mexico City Valley during the 19 September 2017 Puebla–Morelos, Mexico earthquake // Earthquake Spectra. 2020. V. 36. № 2. P. 62–82. DOI: 10.1177/8755293020942
4. Brissaud Q., Bowden D.C., Tsai V.C. Extension of the basin Rayleigh-wave amplification theory to include basin-edge effects // Bulletin of the Seismological Society of America. 2020. V. 110. № 3. P. 1305–1322. DOI: 10.1785/0120190161
5. Лебедев А.В., Манаков С.А. Точность оценки параметров слоистой среды при использовании когерентного векторного приема поверхностной волны Рэлея // Акустический журнал. 2022. Т. 68. № 1. С. 68–82.
6. Meza-Fajardo K.C., Aochi H., Papageorgiou A.S. Comparative analysis of Rayleigh and Love waves detected propagating in the Nobi and Kanto basins during the 2004-, 2007-Chuetsu and 2011 Tohoku earthquakes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2021. V. 143. P. 106606. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106606
7. Филиппова А.И., Фомочкина А.С. Очаговые параметры сильных турецких землетрясений 06.02.2023 г. ($M_w = 7,8$ и $M_w = 7,7$) по данным поверхностных волн // Физика земли. 2023. № 6. С. 89–102.
8. Wu X., Wen Z., Jin Y., Rabczuk T., Zhuang X., Djafari-Rouhani B. Broadband Rayleigh wave attenuation by gradient metamaterials // International Journal of Mechanical Sciences. 2021. V. 205. P. 106592. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106592
9. Palermo A., Yousefzadeh B., Daraio C., Marzani A. Rayleigh wave propagation in nonlinear metasurfaces // Journal of Sound and Vibration. 2022. V. 520. P. 116599. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116599
10. Zhou L., Wan S. Rayleigh waves isolation based on metamaterials surface // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2023. V. 30. № 21. P. 4361–4371. DOI: 10.1080/15376494.2022.2092800
11. Kuznetsov S.V. Guided waves in stratified media: Observing multiple Sezawa modes // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2023. V. 30. № 2. P. 382–387. DOI: 10.1080/15376494.2021.2014607
12. Bhat M., Manna S., Alkinidri M. Rayleigh wave fields in a multilayered micropolar media // International Journal of Geomechanics. 2024. V. 24. № 4. P. 04024026. DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-872
13. Mubarak A.M., Helmi M.M., Nuruddeen R.I., Areshi M. Propagation of Rayleigh-type waves on an elastic half-space covered by a thin multi-layered coating // Mechanics of Solids. 2024. V. 59. № 5. P. 2906–2920. DOI: 10.1134/S0025654424604671
14. Кузнецов С.В., Саиян С.Г. Нелинейные акустические волны в гиперупругих стержнях // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2025. № 2. С. 210–225.
15. Pradhan N., Saha S., Samal S., Pramanik S. Nonlocal analysis of Rayleigh-type wave propagating in a gradient layered structure with distinct interfacial imperfections // The European Physical Journal Plus. 2024. V. 139. № 8. P. 763. DOI: 10.1140/epjp/s13360-024-05554-9
16. Kuznetsov S.V. Harmonic acoustic waves in FG rods with exponential inhomogeneity // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik. 2023. V. 74. № 2. P. 63. DOI: 10.1007/s00033-023-01955-5
17. Kumar J., Gohil R. R. Non-destructive testing of slab-like structures including pavements using Lamb and Rayleigh waves-based dispersion analysis // International Journal of Pavement Engineering. 2023. V. 24. № 1. P. 2180147. DOI: 10.1080/10298436.2023.2180147

18. Papadopoulos S.P., Sextos A.G. Simplified design of bridges for multiple-support earthquake excitation // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020. P. 106013. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.106013
19. Perraud Y., Chatzigogos C.T., Meza-Fajardo K.C., Labbé P. Effect of Rayleigh waves on seismic response of bridge pylons via Incremental Dynamic Analyses // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2022. V. 152. P. 107043. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.107043
20. Саиян С.Г., Шитикова М.В. Сравнительный анализ динамического отклика зданий и сооружений различной высотности на ветровые и сейсмические воздействия // *Строительная механика и конструкции*. 2025. Т. 1. № 44. С. 16–30.
21. Никитин И.С., Филимонов А.В., Якушев В.Л. Распространение волн Рэлея при косом ударе метеорита о поверхность Земли и их воздействие на здания и сооружения // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2013. Т. 5. № 6. С. 981–992.
22. Bao X., Liu J., Tan H., Li S., Wang F. A comparative analysis of seismic response of shallow buried underground structure under incident P, SV and Rayleigh waves // *Earthquake Research Advances*. 2022. V. 2. № 4. P. 100179. DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100179
23. Alielahi H., Nadernia Z., Entezari M.M. A numerical study on effect of underground cavities on seismic ground response due to Rayleigh wave propagation // *SN Applied Sciences*. 2023. V. 5. № 2. P. 64. DOI: 10.1007/s42452-023-05283-1
24. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Никонова Н.В., Смирнова Л.Н., Уздин А.М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности // *Геология и геофизика Юга России*. 2022. Т. 12. № 1. С. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006
25. Гиман Л.Н., Уздин А.М. К вопросу расчета на сейсмические воздействия протяженных сооружений с дискретными опорами // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2002. № 2. С. 18–23.
26. Гиман Л.Н., Уздин А.М. Об одной форме представления сейсмического воздействия для оценки корреляции колебаний точек дневной поверхности при расчете многоопорных конструкций // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2006. № 2. С. 22–29.
27. Savor Novak M., Lazarevic D., Atalic J., Uros M. Influence of multiple-support excitation on seismic response of reinforced concrete arch bridges // *Applied Sciences*. 2019. V. 10. № 1. P. 17. DOI: 10.3390/app10010017
28. Уздин А.М. Особенности задания воздействия для оценки сейсмостойкости вантовых мостов больших пролетов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2008. № 4. С. 53–64.
29. Mwafy A.M., Kwon O.S., Elnashai A., Hashash Y.M. Wave passage and ground motion incoherency effects on seismic response of an extended bridge // *Journal of Bridge Engineering*. 2011. V. 16. № 3. P. 364–374. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.000015
30. Sextos A.G., Kappos A.J. Evaluation of seismic response of bridges under asynchronous excitation and comparisons with Eurocode 8-2 provisions // *Bull Earthquake Eng.* 2009. V. 7. P. 519–545. DOI: 10.1007/s10518-008-9090-5
31. Sextos A.G., Pitilakis D., Kappos A. Evaluation of the new Eurocode 8-part 2 provisions regarding asynchronous excitation of irregular bridges // 4th European workshop on the seismic behaviour of irregular and complex structures, Thessaloniki. 2012. Paper № 04.
32. Stewart J., Crouse C.B., Hutchinson T., Lizundia B., Naeim F., Ostadan F. Soil-Structure Interaction for Building Structures // Grant/Contract Reports (NISTGCR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Report Number: 12-917-21. 2012. 292 p. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=915495 (дата обращения: 07.10.2025).
33. Мкртычев О.В., Дударева М.С. Учет совместной работы железобетонного здания с грунтом основания при интенсивном сейсмическом воздействии // *Строительство: наука и образование*. 2018. № 2. С. 28–42.
34. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А., Бусалова М.С. Моделирование взаимодействия сооружения с основанием при расчете на землетрясение // *Вестник МГСУ*. 2013. № 12. С. 34–40.
35. Мкртычев О.В., Лохова Е.М. Проектирование сейсмостойких зданий. Нормы нового поколения // *Жилищное строительство*. 2024. № 4. С. 42–46. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-4-42-46
36. Тягин А.Г. Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. Москва : Изд-во АСВ, 2016. 399 с.

37. Пиеничкина В.А., Дроздов В.В., Строк С.И. Влияние жесткости основания на динамические характеристики здания как многомассового консольного стержня // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 4. С. 298–310.
38. Тер-Мартirosян А.З., Соболев Е.С. Безопасность эксплуатации оснований зданий и сооружений при динамическом воздействии // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 5 (104). С. 537–544.
39. Сенькин Н.А., Васильев В.С. Действительная работа сооружений: взаимодействие конструкций и грунтового основания решетчатых опор воздушных линий электропередачи // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 5. С. 637–654. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.637-654
40. Vapir B., Abrahamczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures // *Frontiers in Built Environment*. 2023. V. 9. P. 1120351. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1120351
41. Zhan P., Xue S., Li X., Sun G., Ma R. Seismic assessment of large-span spatial structures considering soil–structure interaction (SSI): A State-of-the-Art Review // *Buildings*. 2024. V. 14. № 4. P. 1174. DOI: 10.3390/buildings14041174
42. Ngoc Nguyen T., Ngo V.L. A review of soil–foundation–structure interaction and structure–soil–structure interaction effects based on numerical simulations // *Journal of Water and Land Development*. 2025. P. 1–12. DOI: 10.24425/jwld.2025.155295
43. Riaz M.R., Motoyama H., Hori M. Review of soil-structure interaction based on continuum mechanics theory and use of high performance computing // *Geosciences*. 2021. V. 11. № 2. P. 72. DOI: 10.3390/geosciences11020072
44. Kiureghian A.D. A coherency model for spatially varying ground motions // *Earthquake engineering & structural dynamics*. 1996. V. 25. № 1. P. 99–111. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199601)25:1<99::AID-EQE540>3.0.CO;2-C
45. Zerva A. Spatial variation of seismic ground motions: modeling and engineering applications. Boca Raton. Crc Press, 2016. 486 p. DOI: 10.1201/9781420009910
46. Kramer S.L., Stewart J.P. Geotechnical earthquake engineering. CRC Press, 2024. 1060 p.
47. Shi J.Y., Chen S.S., Chen K.Y. A simplified model of layered soil for analyzing vertical vibration of loaded foundations // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2022. V. 19. № 1. P. 21–38. DOI: 10.1080/15732479.2021.1919152
48. Викторoв И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. Москва : Наука, 1981. 287 с.
49. Freund L.B. Dynamic fracture mechanics. Cambridge University Press, 1998. 83 p.
50. Менoрий Я.В., Тяпкин Ю.К. Развитие технологии расчета когерентности на основе усовершенствованных моделей сейсмической записи // *Геофизический журнал*. 2012. Т. 34. № 3. С. 102–115.
51. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. Москва : Высшая школа, 2009. 840 с.
52. Викторoв И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. Москва : Наука, 1966. 168 с.
53. Graff K.P. Wave Motion in Elastic Solids. Oxford : Clarendon, 1975. 682 p.
54. Frederick J.R. Ultrasonic Engineering. New York : Wiley, 1965. 382 p.
55. Вопросы геофизики. Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2013. 177 с.

REFERENCES

1. Shchukina M.N. Modern High-Rise Construction. Moscow: Moskomarkhitektur', 2007. 440 p. (In Russian)
2. Ruiz-García J., Miranda E. Influence of Surface Rayleigh Waves on the Seismic Response of RC Buildings with Weak First-Story during the 2017 MW7.1 Puebla–Morelos earthquake in Mexico City. *Journal of Earthquake and Tsunami*. 2025; 19 (3): 2450041. DOI: 10.1142/S1793431124500416
3. Heresi P., Ruiz-García J., Payán-Serrano O., Miranda E. Observations of Rayleigh Waves in Mexico City Valley during the 19 September 2017 Puebla–Morelos, Mexico Earthquake. *Earthquake Spectra*. 2020; 36 (2_suppl): 62–82. DOI: 10.1177/8755293020942
4. Brissaud Q., Bowden D.C., Tsai V.C. Extension of the basin Rayleigh-wave amplification theory to include basin-edge effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2020; 110 (3): 1305–1322. DOI: 10.1785/0120190161

5. Lebedev A.V., Manakov S.A. Accuracy of Estimating Layered-Medium Parameters using Coherent Vector Reception of Rayleigh Surface Wave. *Akusticheskii Zhurnal*. 2022; 68 (1): 68–82. (In Russian)
6. Meza-Fajardo K.C., Aochi H., Papageorgiou A.S. Comparative Analysis of Rayleigh and Love Waves Detected Propagating in the Nobi and Kanto Basins during the 2004-, 2007-Chuetsu and 2011 Tohoku Earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021; 143: 106606. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106606
7. Filippova A.I., Fomochkina A.S. Source Parameters of Strong Turkish Earthquakes on 06.02.2023 (Mw = 7.8 and Mw = 7.7) based on surface waves. *Fizika Zemli*. 2023; (6): 89–102. DOI: 10.31857/S0002333723060078 (In Russian)
8. Wu X., Wen Z., Jin Y., Rabczuk T., Zhuang X., Djafari-Rouhani B. Broadband Rayleigh Wave Attenuation by Gradient Metamaterials. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021; 205: 106592. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106592
9. Palermo A., Yousefzadeh B., Daraio C., Marzani A. Rayleigh Wave Propagation in Nonlinear Metasurfaces. *Journal of Sound and Vibration*. 2022; 520: 116599. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116599
10. Zhou L., Wan S. Rayleigh Waves Isolation based on Metamaterials Surface. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2023; 30 (21): 4361–4371. DOI: 10.1080/15376494.2022.2092800
11. Kuznetsov S.V. Guided Waves in Stratified Media: Observing Multiple Sezawa Modes. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2023; 30 (2): 382–387. DOI: 10.1080/15376494.2021.2014607
12. Bhat M., Manna S., Alkinidri M. Rayleigh Wave Fields in a Multilayered Micropolar Media. *International Journal of Geomechanics*. 2024; 24 (4): 04024026. DOI: 10.1061/IJGNALGMENG-872
13. Mubaraki A.M., Helmi M.M., Nuruddeen R.I., Areshi M. Propagation of Rayleigh-Type Waves on an Elastic Half-Space Covered by a Thin Multi-Layered Coating. *Mechanics of Solids*. 2024; 59 (5): 2906–2920. DOI: 10.1134/S0025654424604671
14. Kuznetsov S.V., Saiyan S.G. Nonlinear Acoustic Waves in Hyperelastic Rods *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela*. 2025; (2): 210–225. (In Russian)
15. Pradhan N., Saha S., Samal S., Pramanik S. Nonlocal analysis of Rayleigh-Type Wave Propagating in a Gradient Layered Structure with Distinct Interfacial Imperfections. *The European Physical Journal Plus*. 2024; 139 (8): 763. DOI: 10.1140/epjp/s13360-024-05554-9
16. Kuznetsov S.V. Harmonic Acoustic Waves in FG Rods with Exponential Inhomogeneity. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2023; 74 (2): 63. DOI: 10.1007/s00033-023-01955-5
17. Kumar J., Gohil R.R. Non-Destructive Testing of Slab-Like Structures Including Pavements using Lamb- and Rayleigh-Waves-based Dispersion Analysis. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023; 24 (1): 2180147. DOI: 10.1080/10298436.2023.2180147
18. Papadopoulos S.P., Sextos A.G. Simplified Design of Bridges for Multiple-Support Earthquake Excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020; 131: 106013. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.106013
19. Perraud Y., Chatzigogos C.T., Meza-Fajardo K.C., Labbé P. Effect of Rayleigh Waves on Seismic Response of Bridge Pylons via Incremental Dynamic Analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2022; 152: 107043. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.107043
20. Saiyan S.G., Shitikova M.V. Comparative Analysis of Dynamic Response of Different-Height Building to Wind and Seismic Actions. *Stroitel'naya mekhanika i konstruksii*. 2025; 1 (44): 16–30. (In Russian)
21. Nikitin I.S., Filimonov A.V., Yakushev V.L. Propagation of Rayleigh Waves from an Oblique Meteorite Impact on the Earth's Surface and their Effect on Buildings. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2013; 5 (6): 981–992. (In Russian)
22. Bao X., Liu J., Tan H., Li S., Wang F. A Comparative Analysis of Seismic Response of Shallow Buried Underground Structure under Incident P, SV and Rayleigh Waves. *Earthquake Research Advances*. 2022; 2 (4): 100179. DOI: 10.1016/j.eqrea.2022.100179
23. Alielahi H., Nadernia Z., Entezari M.M. A Numerical Study on Effect of Underground Cavities on Seismic Ground Response due to Rayleigh Wave Propagation. *SN Applied Sciences*. 2023; 5 (2): 64. DOI: 10.1007/s42452-023-05283-1
24. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Nikonova N.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Characteristics of spatial Heterogeneity of the Acceleration Field of the Daytime Surface. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 2022; 12 (1): 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006 (In Russian)

25. Gimán L.N., Uzđin A.M. On Calculating Elongated Structures with Discrete Supports under Seismic Actions. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2002; (2): 18–23. (In Russian)
26. Gimán L.N., Uzđin A.M. Representation of Seismic Action for Correlation Assessment of Daylight Surface Oscillation Points in Strength Analysis of Multi-Support Structures. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2006; (2): 22–25. (In Russian)
27. Savor Novak M., Lazarevic D., Atalic J., Uros M. Influence of Multiple-Support Excitation on Seismic Response of Reinforced Concrete Arch Bridges. *Applied Sciences*. 2019; 10 (1): 17. DOI: 10.3390/app10010017
28. Uzđin A.M. Specifics of Defining Seismic Action to Assess Earthquake Resistance of Long-Span Cable-Stayed Bridges. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya*. 2008; (4): 53–64. (In Russian)
29. Mwafy A.M., Kwon O.S., Elnashai A., Hashash Y.M. Wave Passage and Ground Motion Incoherency Effects on the Seismic Response of an Extended Bridge. *Journal of Bridge Engineering*. 2011; 16 (3): 364–374. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.000015
30. Sextos A.G., Kappos A.J. Evaluation of Seismic Response of Bridges under asynchronous Excitation and Comparisons with Eurocode 8-2 Provisions. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2009; 7 (2): 519–545. DOI: 10.1007/s10518-008-9090-5
31. Sextos A.G., Pitilakis D., Kappos A. Evaluation of the new Eurocode 8-Part 2 provisions regarding asynchronous excitation of irregular bridges. In: *Proc. 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures*, Thessaloniki, 2012. Paper ID 04.
32. Stewart J., Crouse C. B., Hutchinson T., Lizundia B., Naeim F., Ostadan F. Soil-Structure Interaction for Building Structures. Grant/Contract Reports (NISTGCR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Report Number: 12-917-21. 2012. 292 p. Available: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=915495
33. Mkrtychev O.V., Dudareva M.S. Joint Work of Reinforced Concrete Building and Foundation Soil under Intense Seismic Effects. *Stroitel'stvo: Nauka i Obrazovanie*. 2018; (2): 28–42. (In Russian)
34. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Modeling Structure-Foundation Interaction in Seismic Analysis. *Vestnik MGSU*. 2013; (12): 34–40. (In Russian)
35. Mkrtychev O.V., Lokhova E.M. Design of Earthquake-Resistant Buildings: New Generation Standards. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2024; (4): 42–46. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-4-42-46 (In Russian)
36. Tyapin A.G. Strength Analysis under Seismic Loads with Regard to Soil-Foundation Interaction. Moscow: ASV, 2016. 399 p. (In Russian)
37. Pshenichkina V.A., Drozdov V.V., Strok S.I. Influence of Foundation Stiffness on Dynamic Characteristics of Building Considered as Multi-Mass Cantilever Rod. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii*. 2020; 16 (4): 298–310. (In Russian)
38. Ter-Martirosyan A.Z., Sobolev E.S. Operational Safety of Building Foundations under Dynamic Impacts. *Vestnik MGSU*. 2017; 12 (5): 537–544. (In Russian)
39. Senkin N.A., Vasilev V.S. Actual Building Operation: Soil-Building Interaction and Lattice Supports of Overhead Power Lines. *Vestnik MGSU*. 2025; 20 (5): 637–654. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.637-654 (In Russian)
40. Bapir B., Abrahamczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-Structure Interaction: A State-of-the-Art Review of Modeling Techniques and Studies on Seismic Response of Building Structures. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 9: 1120351. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1120351
41. Zhan P., Xue S., Li X., Sun G., Ma R. Seismic Assessment of Large-Span Spatial Structures Considering Soil-Structure Interaction (SSI): A State-of-the-Art Review. *Buildings*. 2024; 14 (4): 1174. DOI: 10.3390/buildings14041174
42. Ngoc Nguyen T., Ngo V.L. A review of Soil-Foundation-Structure Interaction and Structure-Soil-Structure Interaction Effects based on Numerical Simulations. *Journal of Water and Land Development*. 2025; 1–12. DOI: 10.24425/jwld.2025.155295
43. Riaz M.R., Motoyama H., Hori M. Review of Soil-Structure Interaction based on Continuum Mechanics Theory and Use of High Performance Computing. *Geosciences*. 2021; 11 (2): 72. DOI: 10.3390/geosciences11020072

44. *Kiureghian A.D.* A Coherency Model for Spatially Varying Ground Motions. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 1996; 25 (1): 99–111. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199601)25:1<99::AID-EQE540>3.0.CO;2-C
45. *Zerva A.* Spatial Variation of Seismic Ground Motions: Modeling and Engineering Applications. Boca Raton. CRC Press, 2016. 486 p. DOI: 10.1201/9781420009910
46. *Kramer S.L., Stewart J.P.* Geotechnical Earthquake Engineering. CRC Press, 2024. 1060 p.
47. *Shi J.Y., Chen S.S., Chen K.Y.* A Simplified Model of Layered Soil for Analyzing Vertical Vibration of Loaded Foundations. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2022; 19 (1): 21–38. DOI: 10.1080/15732479.2021.1919152
48. *Viktorov I.A.* Surface Acoustic Waves in Solids. Moscow: Nauka, 1981. 287 p. (In Russian)
49. *Freund L.B.* Dynamic Fracture Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 83 p.
50. *Mendriy Ya.V., Tyapkin Yu.K.* Development of Coherence Calculation Technology based on Improved models of Seismic Recording. *Geofizicheskiy zhurnal*. 2012; 34 (3): 102–115. (In Russian)
51. *Verzhbitskiy V.M.* Fundamentals of Numerical Methods. Moscow: Vysshaya Shkola, 2009. 840 p. (In Russian)
52. *Viktorov I.A.* Physical Foundations of the Application of Ultrasonic Rayleigh and Lamb Waves in Engineering. Moscow: Nauka, 1966. 168 p. (In Russian)
53. *Graff K.P.* Wave Motion in Elastic Solids. Oxford: Clarendon Press, 1975. 682 p.
54. *Frederick J.R.* Ultrasonic Engineering. New York: Wiley, 1965. 382 p.
55. *Troyan V.N., Uspenskii N.I., Saraev A.K. (Eds.)*. Problems of Geophysics. Saint-Petersburg, 2013. 177 p. (In Russian)

Сведения об авторе

Сайян Сергей Гургенович, научный сотрудник, ст. преподаватель, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; мл. научный сотрудник, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, 119526, г. Москва, пр. Вернадского, 101, корп. 1, Berformert@gmail.com

Author Details

Sergey G. Saiyan, Research Scientist, Senior Lecturer, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavl Road, 129337, Moscow, Russia, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 101-1, Vernadsky Ave., 119526, Moscow, Russia, Berformert@gmail.com

Статья поступила в редакцию 01.10.2025
Одобрена после рецензирования 23.10.2025
Принята к публикации 28.10.2025

Submitted for publication 01.10.2025
Approved after review 23.10.2025
Accepted for publication 28.10.2025