

Динамические воздействия от железнодорожного транспорта на скальные объекты культурного наследия

Смирнов Владимир Александрович (Москва). Кандидат технических наук. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук. Эл. почта: belohvost@list.ru

Аннотация. В статье рассмотрена задача оценки динамических воздействий при строительстве и эксплуатации железнодорожного тоннеля вблизи скального объекта культурного наследия. Объект исследования – церковные пещеры Свято-Климентовского мужского монастыря в толще Загайтанской скалы. Обоснована необходимость специальной оценки вибрации для памятников, высеченных в скальном массиве, где малое затухание, трещиноватость и прямой контакт конструкции с породой могут усиливать действие повторных колебаний. Выполнен обзор нормативных подходов и сопоставимых случаев воздействия рельсового транспорта и строительной техники на исторические сооружения. Предложен расчётно-экспериментальный подход, основанный на частотно-зависимых передаточных функциях между источником воздействия, скальным массивом и контрольными точками объекта культурного наследия. Рассмотрены воздействия от проходческого комбайна, тоннельного экскаватора и движения поездов. Показано, что на стадии проходки расчётные уровни пиковых скоростей колебаний не превышают принятого комплексного критерия. На стадии эксплуатации выявлены критические полосы 4 и 8 Гц, для которых в одном из сечений требуется снижение воздействия. Предложены ограничение скорости поездов, применение подбалластных матов и вибродинамический мониторинг.

Ключевые слова: железнодорожная вибрация, скальный массив, объект культурного наследия, Свято-Климентовский мужской монастырь, проходческий комбайн, тоннель, передаточная функция, пиковая скорость колебаний, подбалластный мат

Для цитирования. Смирнов В.А. Динамические воздействия от железнодорожного транспорта на скальные объекты культурного наследия // Academia. Архитектура и строительство. 2026. № 3. С. 112–120. DOI: 10.22337/2077-9038-2026-3-112-120.

Dynamic Effects from Railway Transport and Tunnel Excavation on Rock-Hewn Cultural Heritage Sites

Smirnov Vladimir A. (Moscow). Candidate of Sciences in Technology. National Research Moscow State University of Civil Engineering; Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. E-mail: belohvost@list.ru

Abstract. The article considers the assessment of dynamic effects during construction and operation of a railway tunnel near a rock-hewn cultural heritage site. The object is the cave-church complex of the St. Clement Monastery in the Zagaitan rock mass. A special vibration assessment is required because low damping, jointing and direct coupling between rock and monument may increase the effect of repeated vibrations. Regulatory approaches and comparable cases are reviewed. A calculation-and-experimental approach based on frequency-dependent transfer functions between the source, rock mass and heritage control points is proposed. The effects of a roadheader, tunnel excavator and train traffic are analysed. Predicted peak particle velocities

during tunnel excavation do not exceed the adopted integral criterion. For operation, the critical octave bands of 4 and 8 Hz are identified; additional mitigation is required in one design section. The proposed measures include train speed reduction, under-ballast mats and vibration monitoring.

Keywords: railway vibration, rock mass, cultural heritage site, Inkerman Monastery, roadheader, tunnel, transfer function, peak particle velocity, under-ballast mat

For citation. Smirnov V.A. Dynamic Effects from Railway Transport and Tunnel Excavation on Rock-Hewn Cultural Heritage Sites. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2026, no. 3, pp. 112–120, doi: 10.22337/2077-9038-2026-3-112-120.

Введение

Влияние вибраций, вызываемых движением железнодорожного транспорта, на объекты культурного наследия представляет собой признанную проблему в области охраны памятников. Железнодорожная вибрация имеет многократно повторяющийся характер: она редко вызывает мгновенное разрушение, но может ускорять раскрытие трещин, отслоение штукатурных и красочных слоев, нарушение контакта между кладкой, основанием и декоративными элементами.

С расширением железнодорожной инфраструктуры в горных районах, богатых археологическими и архитектурными памятниками – зачастую встроенными в скальные массивы – возрастает риск структурных повреждений. Скальный массив обычно обладает меньшим затуханием, чем рыхлые грунты, а полости, трещины и границы слоев могут вызывать отражение и локальное усиление волн. Хотя амплитуда колебаний, создаваемых движением железнодорожных составов, редко достигает уровней, вызывающих мгновенное разрушение, многократное воздействие даже малых колебаний может приводить к прогрессирующему разрушению кладки, декоративной отделки (фресок, мозаик) и древних конструкций [1].

Особую уязвимость проявляют памятники, лишённые избыточной прочности и содержащие трещиноватые или деградировавшие материалы. В условиях скальных массивов вибрации распространяются особенно эффективно, слабо затухают, что усиливает потенциальный ущерб для объектов культурного наследия [2].



Свято-Климентовский мужской монастырь г. Севастополя¹

Цель данной статьи – продемонстрировать расчётно-экспериментальный подход к оценке динамических воздействий от строительства и эксплуатации железнодорожного тоннеля в скальном массиве вблизи ОКН. Рассматриваются Свято-Климентовский мужской монастырь г. Севастополя и церковные пещеры Загайтанской скалы (рис. 1). Задачи исследования: анализ нормативной базы; описание объекта и источников вибрации; прогноз виброскорости в контрольных точках; выбор и расчёт компенсирующих мероприятий.

Анализ нормативных требований и сопоставимых ситуаций

Растущий объём литературы предлагает эмпирические подтверждения и примеры вибрационных воздействий, вызванных динамическим воздействием железной дороги, которые вызывают или ускоряют повреждение объектов культурного наследия. Современные исследования показывают, что объектно-ориентированная оценка транспортной вибрации необходима для исторических сооружений, к примеру:

- мечеть Малая Айя-София в Константинополе (VI век, совр. Стамбул): при скорости поездов 70–90 км/ч и расстоянии 5 м от рельсов зафиксированы внутренние вибрации до 2,65 мм/с [3];
- церковь святого Николая, Краков: трамвайные и железнодорожные вибрации (~0,5 мм/с) способствовали развитию трещин в стенах [4];
- музей «Вилла Джулия» (Рим): ускорения 20–30 mg (~1–2 мм/с) потребовали установки изоляции для защиты этрусского саркофага [5–7];
- башня Сянь (Сиань, Китай): вибрации от метро снижены с 0,5 до 0,1 мм/с за счёт плавающей плиты, что обеспечило сохранность глинобитного основания [8; 9];
- наскальные гробницы Накше-Ростам (Иран): проект прокладки ж/д линии на расстоянии 350 м остановлен из-за потенциального риска микротрещинообразования и резонанса [10; 11].

В отечественной нормативной системе оценка влияния вибрации на конструкции зданий связана с ГОСТ Р 52892-2007². Для железнодорожного транспорта используют СП

¹ Все иллюстрации в статье, кроме особо оговорённых, взяты из открытого доступа сети Интернет.

² ГОСТ Р 52892-2007 «Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка её воздействия на конструкцию» (<https://docs.cntd.ru/document/1200064161>).

441.1325800.2019³, регламентирующий защиту зданий от вибрации и структурного шума. Скальные ОКН не образуют в этих документах самостоятельного класса объектов, поэтому нормативный аппарат требует инженерной адаптации.

Как показывают исследования [8–11] в зарубежных нормах DIN 4150-3 [8], BS 7385-2 [9] и ISO 4866 [10] используют пиковую скорость колебаний как показатель риска повреждения конструкций. Для исторических и ослабленных сооружений допустимые уровни принимаются более консервативно. В настоящей работе эти документы используются как основа выбора контролируемых величин и логики сопоставления результатов. В таблице 1 приведены общепринятые пределы.

Пределы по таблице 1 не являются жёсткими пороговыми показателями, а отражают диапазоны риска. Например, значения виброскоростей выше 1 мм/с в диапазоне частот 10–30 Гц, что соответствует многим собственным частотам стен/полов, всё чаще ассоциируются с эстетическим ущербом (например, трещинами в штукатурке, отслоением фресок) [12]. В контексте сохранения объектов культурного наследия, особенно когда присутствуют чувствительные элементы, такие как мозаики, фрески или надписи, многие исследователи принимают ещё более консервативные пороги виброскоростей ~0,3–0,5 мм/с, особенно для непрерывного воздействия [13].

Одним из уникальных аспектов памятников, встроенных в горные скальные массивы или прилегающих к ним, является эффективное распространение колебаний через скалу. В отличие от мягких почв, которые естественным образом ослабляют высокочастотные колебания, твёрдая скала передаёт как низкочастотные, так и высокочастотные компоненты на большие расстояния с минимальными потерями энергии [14]. Это делает памятники на скале или внутри неё особенно восприимчивыми к воздействиям такого вида.

Ключевые особенности поведения волн в скальных массивах включают:

- низкое затухание материала: твёрдая скала (например, гранит, базальт) имеет низкий коэффициент затухания (~0,5–1%), что означает, что вибрации теряют мало энергии при распространении. В результате конструкции, высеченные в скале или расположенные на ней, могут испытывать почти такую же амплитуду колебаний, как и измеренная вблизи пути, даже на значительных расстояниях [15];

- отражение и усиление волн: неровности в скальном массиве (например, полости, стыки, карсты, плоскости напластования) могут вызывать отражение и локальное усиление волн. Например, тонкие каменные стены или шпили могут вибрировать более интенсивно из-за интерференции волн и резонанса, особенно на частотах от 5 до 20 Гц, типичных для грузовых поездов [16];

- прямую связь конструкции и грунта: памятники, высеченные непосредственно в скале, например, скальные монастыри

или гробницы, фактически являются частью геологической среды. Это означает, что на фундаменте не происходит затухания, а конструкция поглощает всю энергию колебаний [17];

- риск роста трещин: недавнее исследование показало, что циклические колебания в диапазоне от 5 до 50 Гц способствуют ускоренному росту трещин в естественных скальных арках, что позволяет предположить, что повторяющиеся колебания рельсов могут постепенно повреждать трещиноватые скальные памятники в течение десятилетий [18].

Эти результаты подтверждают необходимость тщательного моделирования характеристик передачи вибрации в горных породах при прокладке железной дороги вблизи исторических скальных массивов, поскольку стандартные модели затухания могут недостаточно точно воспроизвести указанные условия затухания.

Изученная литература и тематические исследования показывают, что колебания грунта, вызванные движением поездов по железной дороге, представляют собой достоверный и измеримый риск для памятников в горных скальных массивах, особенно тех, которые включают:

- древнюю каменную кладку и потрескавшуюся каменную кладку;
- настенные украшения (фрески, штукатурка, мозаика);
- высеченные в скалах пространства с трещиноватой или резонансной геометрией.

Механизмы повреждения редко бывают мгновенными, а вместо этого включают долгосрочные кумулятивные эффекты, в том числе усталость материала, отслоение штукатурки и распространение трещин. Мероприятия по снижению динамического воздействия, такие как виброизоляция путей, регулирование скорости и мониторинг вибрации показали свою эффективность в снижении пиковых значений виброскорости колебаний ниже порогов повреждения [6; 13]. Для обеспечения точной оценки риска необходимы исследования, связанные с конкретными участками, включающие измерения вибрации, модальный анализ и моделирование методом конечных элементов. В горных реги-

Таблица 1. Существующие стандарты и установленные уровни вибрации

Стандарт	Целевое назначение	Пиковое значение виброскорости	Среднее значение виброскорости
DIN 4150-3	Древняя/историческая каменная кладка	3-5 мм/с (частото-зависимое)	~1,5-2,5 мм/с
BS 7385	Здания в плохом состоянии	2-5 мм/с	~2 мм/с
ISO 4866	Объекты культурного наследия (руководящие принципы)	Переменная, зависящая от риска резонанса	Рекомендуются консервативные пороговые значения
NS 8141 [11]	Деревянные/богатые артефактами здания	<1 мм/с	<0,5 мм/с

³ СП 441.1325800.2019 «Защита зданий от вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом. Правила проектирования» (<https://docs.cntd.ru/document/554818817>).

онах эти исследования должны учитывать уникальную механику распространения скальных массивов.

Рассмотрим эту проблему на примере Крымской железной дороги Севастополь – Симферополь, проходящей рядом со Свято-Климентовским мужским монастырём.

Первая железная дорога в Крыму протяжённостью в один километр была построена в 1843 году отставным мичманом Дмитрием Волковым у подошвы Инкерманского горного массива. По ней из каменоломни, расположенной в Каменном овраге (современное название Советская балка), на конной тяге вывозили до пристани горные камни [19].

В начале XIX века в горных районах Крыма происходит строительство желез-

ной дороги Лозовое – Севастополь. При прокладке пути на участках Мекензиевых гор было построено шесть тоннелей: Сухарный – длиной 331 м, Графский – 125 м, Белый – 437 м, Цыганский – 507 м, Троицкий – 294 м и Городской – 228 м. Эти работы продолжались с 1871 по 1875 год, и стоимость одной версты составила 54 тыс. руб. Непосредственным руководителем был купец первой гильдии русский миллионер Петр Губонин. 15 сентября 1875 года первый товарный поезд пришёл в Севастополь, и через несколько дней открылось пассажирское движение, в частности, из Москвы в Севастополь.

В настоящее время Крымская железная дорога на протяжении полутора столетий проходит рядом с Свято-Климентовским мужским монастырём. При движении по ней железнодорожного транспорта возникают вибрационные волны, которые негативно влияют на сохранность церковного пещерного комплекса монастыря, расположенного на юго-западе Загайтанской скалы. В связи с этим в обход существующей железнодорожной трассы со стороны северо-восточной Загайтанской скалы разработан проект прокладки тоннеля протяжённостью около 1 км. Это позволит исключить разрушения от вибрации существующих церковных строений пещерного комплекса, которые являются объектом культурного наследия. Одним из вариантов решения этой проблемы может быть устройство в нижнем основании Загайтанского склона железнодорожного тоннеля.

Надо отметить, что первые культовые скальные сооружения в этом регионе, по-видимому, возвели не ранее X–XI веков. Можно предположить, что в XIII–XIV веках в толще Загайтанской скалы располагалось несколько церковных пещерных комплексов. Наивысший расцвет монастыря в Инкерманской долине, как считает ряд авторов, можно отнести к XV веку. После османского завоевания в 1475 году пещерные монастыри и храмы приходят в упадок и используются как хозяйственные помещения вплоть до XVIII века.

Как следует из научных исследований средневековых скальных христианских памятников Инкерманской долины, археологические раскопки начали проводить в XIX веке. Установлено, что во время Крымской войны 1853–1855 годов какая-то часть пещерных храмов была разрушена. Также они пострадали от землетрясений. В Великую Отечественную войну при защите Севастополя какая-то часть их также была разрушена.

Тем не менее в результате археологических раскопок раскрыты пещеры нижнего яруса, в которых обнаружили находки IX–X веков. Так, в одном из ныне труднодоступных пещерных храмов сохранились фрагменты фресковой росписи, площадь которых достигает 15 м², датирующиеся первой половиной XIV века. Одна из достопримечательностей храмовой живописи – голова ангела из фресковой композиции «Рождество Христово» (рис. 1), относящейся ко второй половине XIII века. Этот храм был обнаружен только в 2005 году исследователями Т.А. Бабровским и Е.Е. Чуевой.

Кроме того, в Инкерманской Загайтанской скале обнаружен ряд пещерных церквей, получивших цифровую нумерацию. На рисунке 2 показан общий вид церкви № 3, на

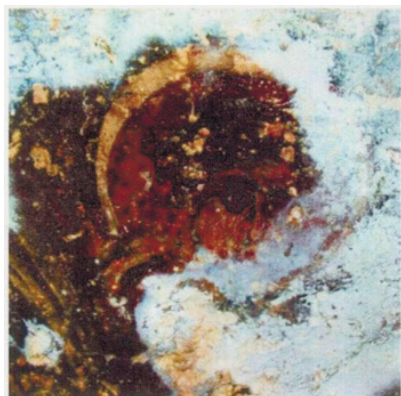


Рис. 1. Фигура ангела. Фрагмент фасадной композиции «Рождество Христово» в пещере Загайтанской скалы

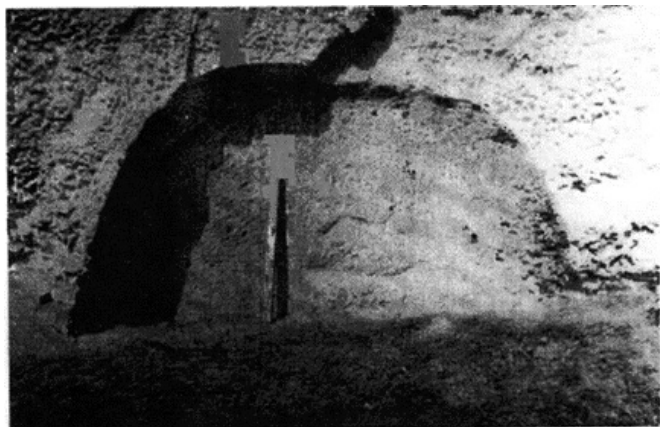


Рис. 2. Церковь № 3. Общий вид. Инкерман, Загайтанская скала

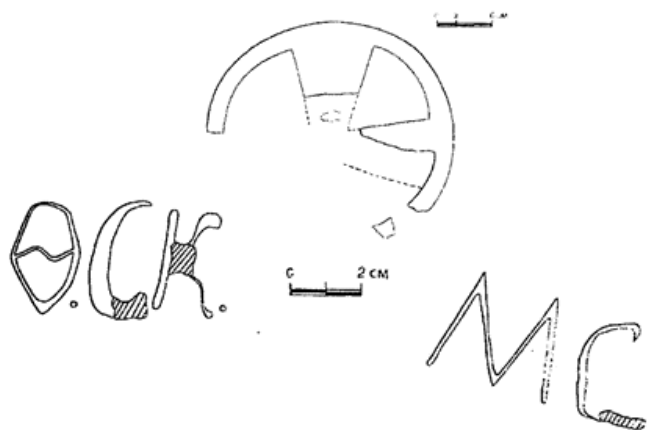


Рис. 3. Фрагменты креста и греческой надписи. Церковь № 5. Инкерман, Загайтанская скала

рисунке 3 видны фрагменты креста и греческие надписи в церкви № 5, а на стене церкви №7 отчётливо видны четыре сохранившиеся креста (рис. 4).

Методика оценки динамических воздействий

Методическая схема основана на разделении источника воздействия и среды распространения. На строительной стадии источником является рабочий орган проходческого комбайна или тоннельного экскаватора; на эксплуатационной – движение поездов. Для каждого сечения определялись передаточные функции между источником и контрольными точками ОКН.

Расчёт выполнялся в прямой динамической постановке. Для проходческой техники приняты частоты 4, 8 и 16 Гц; для эксплуатации – октавные полосы 4, 8, 16, 31,5 и 63 Гц. Итоговая пиковая скорость в контрольной точке определялась как произведение опорного уровня источника на расчётный коэффициент передачи.

Идеология расчёта соответствует подходу СП 441.1325800.2019, где скорость колебаний конструкций может определяться с учётом исходного спектра вибрации и набора частотно-зависимых функций передачи. В обобщённом виде расчётная зависимость записывается следующим образом:

$$v = v_{u(p)} \cdot k_{trains} \cdot k_{speed} \cdot k_{rail} \cdot k_{edge} \cdot k_{fund} \cdot k_{rez} \cdot k_h, \quad (1)$$

где $v_{u(p)}$ – исходный измеренный (расчётный) октавный спектр скорости колебаний; k_{trains} , k_{speed} , k_{rail} – коэффициенты движения по параллельным путям, скорости и состояния пути; k_{edge} – функция эффективности виброзащиты; k_{fund} , k_{rez} , k_h – функции передачи вибрации на фундамент, резонансного увеличения и изменения её по высоте. Для скального ОКН главным является блок «источник – скальный массив – пешерная конструкция».

Рассмотрим влияние динамических воздействий при проходке калотты тоннеля проходческим комбайном избирательного действия с учётом строительного подъёма не менее 100 мм, заходками не более 1,0 м. Схема проходческого комбайна и направления создаваемых им усилий в скальном массиве приведены на рисунке 5.

Динамические нагрузки, создаваемые при работе комбайна, представлены в виде спектра виброускорений на рисунке 6, полученных в работе [17; 20] и представляют собой широкополосный стационарный процесс с наличием тональных составляющих (на частотах 4, 8, 14–18 Гц и т.д.). Принято считать, что наибольшая часть колебательной энергии, вызванной работой рабочего органа тоннелепроходческого комбайна, сосредоточена в области частот от 4 до 80 Гц. Наибольшие уровни динамической нагрузки приходятся на область 4–10 Гц в вертикальном направлении.

На рисунке 7 представлены пиковые значения скорости колебаний комбайна для различных грунтовых условий (по

данным производителя). На основании этих данных можно утверждать, что исходные пиковые значения амплитуд колебаний составляют не более 4 мм/с на расстоянии 4 м от точки измерений.

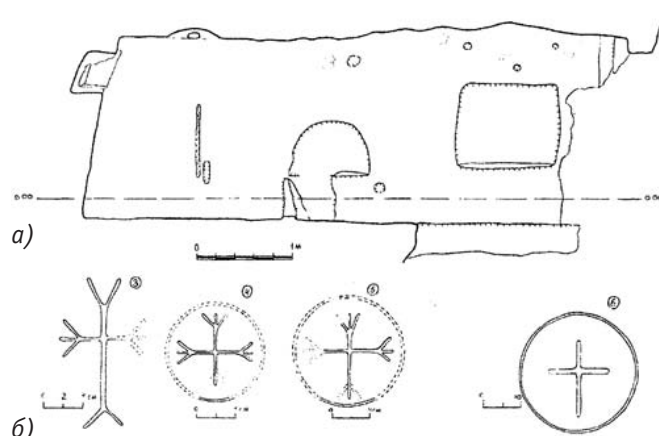


Рис. 4. Инкерман. Загайтанская скала: а) церковь № 7. Разрез; б) кресты на стенах церквей 3, 4, 5 и 6

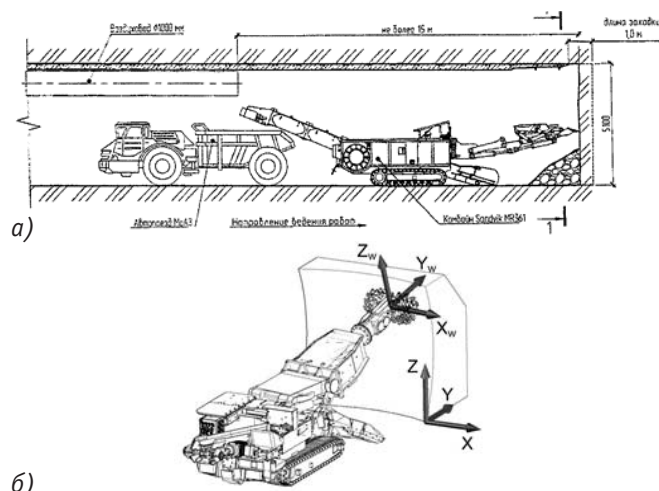


Рис. 5. Схема работы проходческого комбайна: а) технологическая схема разработки грунта калотты; б) схема комбайна (источник: техническая документация на комбайн)

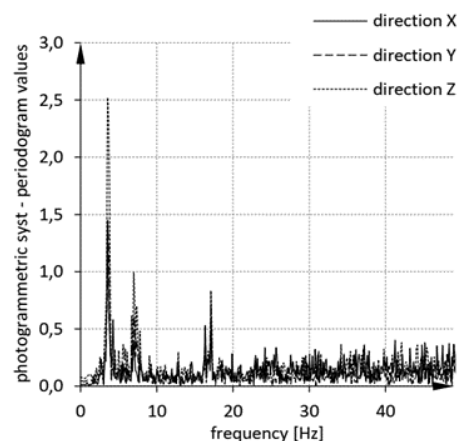


Рис. 6. Спектр виброускорений свода тоннеля при его разработке тоннелепроходческим комбайном (источник: [17; 20])

Прогноз вибрации при проходке тоннеля

Для стадии проходки тоннеля были рассмотрены два расчётных сечения в местах наиболее близкого взаимного расположения трассы и ОКН. В каждом сечении анализировалась передача колебаний от зоны разработки к двум характерным контрольным позициям: на поверхности и в толще массива. Для целей статьи результаты детализированного расчёта сведены в таблицу 2, отражающую инженерно-значимые интервалы пиковых скоростей колебаний оснований ОКН.

На основании экспериментально вычисленных коэффициентов передачи пиковые значения скорости колебаний оснований ОКН в сечении № 2 при разработке тоннеля могут составлять от 0,45 до 3,08 мм/с при работе тоннелепроходческого комбайна и от 0,78 до 5,4 мм/с при работе тоннельного экскаватора. Указанные значения не превышают предельных значений по комплексному критерию оценки, равному 20 мм/с. Однако вывод требует натурной верификации: фактическая трещиноватость массива, локальная геометрия пещер и режим работы оборудования могут отличаться от расчётных. Поэтому проходку следует сопровождать синхронным вибромониторингом источника и контрольных точек ОКН.

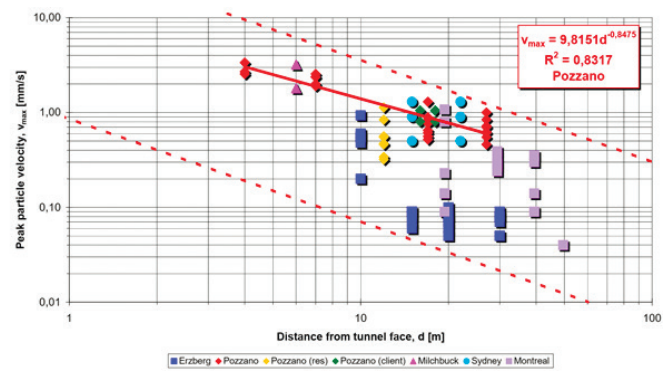
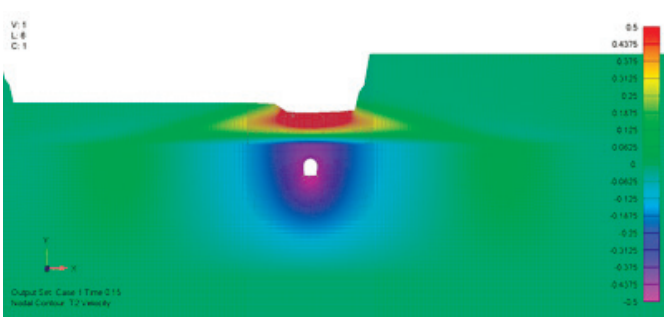


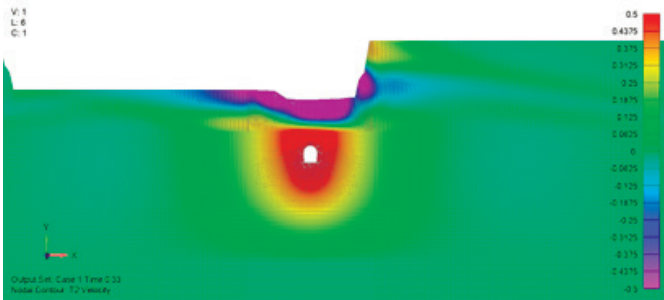
Рис. 7. Пиковые значения скорости колебаний тоннельного свода в зависимости от типа грунта (источник: [17; 20])

Таблица 2. Прогноз пиковых скоростей колебаний оснований ОКН на стадии проходки тоннеля

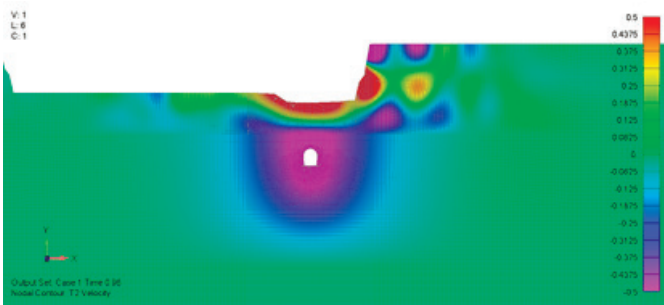
Расчётное сечение	Источник воздействия	Частоты расчета, Гц	Прогнозируемая пиковая виброскорость, мм/с	Инженерная оценка
№ 1	Проходческий комбайн	4; 8; 16	0,14-1,76	Ниже критерия 20 мм/с
№ 1	Тоннельный экскаватор		0,25-3,08	Ниже критерия 20 мм/с
№ 2	Проходческий комбайн		0,45-3,08	Ниже критерия 20 мм/с
№ 2	Тоннельный экскаватор		0,78-5,40	Ниже критерия 20 мм/с



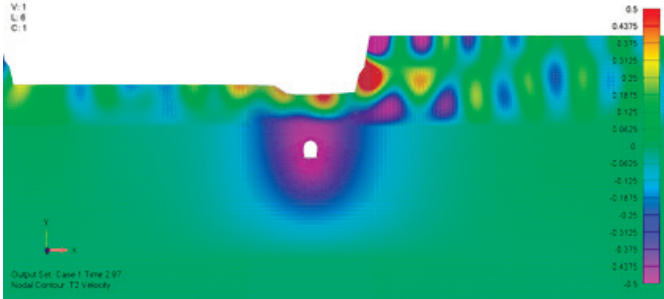
а)



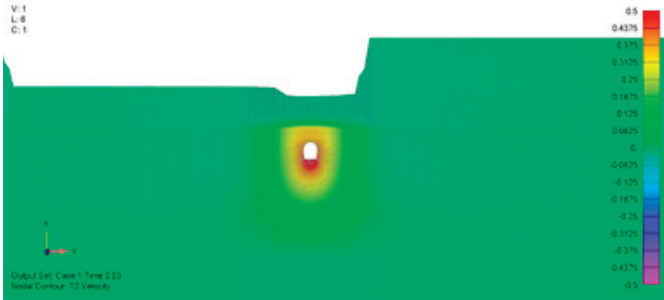
б)



в)



г)



д)

Рис. 8. Результаты решения прямой динамической задачи для октавных полос: а) 4 Гц; б) 8 Гц; в) 16 Гц; г) 31,5 Гц; д) 64 Гц

Прогноз вибрации при эксплуатации тоннеля

На эксплуатационной стадии расчётная модель использовалась для определения передаточных функций между тоннелем и контрольными точками у оснований церковных пещерных помещений. Расчёт выполнен для октавных полос со среднегеометрическими частотами 4–63 Гц. В отличие от строительной стадии, эксплуатационное воздействие имеет регулярный повторяющийся характер, поэтому даже умеренные значения виброскорости в диапазонах, близких к собственным частотам отдельных элементов скального комплекса, требуют повышенного внимания.

Этапы прямого динамического расчёта для сечения № 1 представлены на рисунке 8 для некоторых моментов времени.

Для сечения № 1 эксплуатационная стадия при принятых данных не приводит к превышению требований. Для сечения № 2 критическими являются полосы 4 и 8 Гц. В этом диапазоне формируется значительная часть вибрационной энергии движения поездов и возможны резонансные эффекты отдельных элементов скального комплекса. Получены пиковые спектральные значения скоростей колебаний фундаментов в церковных пещерных помещениях при эксплуатации тоннеля и движении пассажирских и грузовых поездов в сечении № 1. Они не превышают нормативные требования. В октавной полосе со среднегеометрической частотой составляют 4 Гц на 2,2 мм/с и на 8 Гц – 0,82 мм/с. Пиковые значения в сечении № 2 при движении пассажирских и грузовых поездов превышают соответственно нормативные требования среднегеометрической частоты 4 Гц на 0,83 мм/с и 8 Гц на 4,3 мм/с.

Инженерные мероприятия

Ключевой результат исследования состоит в том, что риск для ОКН определяется не только амплитудой у источника, но и частотно-зависимой передачей через скальный массив. На стадии проходки прогнозные уровни пиковой виброскорости ниже критерия 20 мм/с, но должны проверяться мониторингом. На стадии эксплуатации для сечения № 2 требуются проектные мероприятия.

Первым мероприятием является ограничение скорости движения поездов на рассматриваемом тоннельном участке до 20 км/ч. Для тоннеля протяжённостью около 1 км это приводит к увеличению времени прохождения до примерно 3 мин, что инженерно-приемлемо при условии обеспечения сохранности ОКН. Снижение скорости уменьшает динамические силы взаимодействия колёс и рельсов, особенно при наличии неровностей, стыков, дефектов колёс и переходных зон.

Вторым мероприятием является устройство виброзащитных элементов в конструкции верхнего строения пути. Для данной задачи наиболее рациональными являются подбалластные маты или иные упругие слои, обеспечивающие снижение передачи вибрационной энергии от балластной призмы к основанию тоннеля. При их выборе необходимо учитывать статическую нагрузку, динамическую жёсткость в рабочем диапазоне частот, долговечность, водостойкость, пожарно-технические ограничения тоннеля и возможность контроля состояния в эксплуатации.

Третьим элементом является вибродинамический мониторинг. На строительной стадии следует синхронно фиксировать режим техники, вибрацию обделки, поверхности скального массива и контрольных точек ОКН. На эксплуатации нужны контрольные измерения при проходе поездов до и после устройства виброзащиты.

Выводы

По результатам выполненного комплекса исследований получены следующие выводы.

- Железнодорожная вибрация и вибрация строительной техники представляют реальную инженерную опасность для скальных объектов культурного наследия, поскольку при малом затухании массива и наличии трещиноватости возможно накопление повреждений, локальное усиление колебаний и воздействие на фрески, надписи и иные чувствительные элементы.

- Для объектов, высеченных в скале, недостаточно использовать только общие нормативные предельные значения. Требуется объектно-ориентированный расчёт, учитывающий частотно-зависимые передаточные функции в системе «источник – скальный массив – пещерная конструкция».

- Для строительной стадии проходки тоннеля расчётные пиковые скорости колебаний оснований ОКН составляют 0,14–1,76 мм/с и 0,45–3,08 мм/с при работе проходческого комбайна, а также 0,25–3,08 мм/с и 0,78–5,40 мм/с при работе тоннельного экскаватора для сечений № 1 и № 2 соответственно. Эти значения не превышают принятый комплексный критерий 20 мм/с, но требуют мониторинговой верификации.

- Для эксплуатационной стадии движение поездов не приводит к превышению требований в сечении № 1. В сечении № 2 выявлены критические октавные полосы 4 и 8 Гц: превышение составляет соответственно 0,83 и 4,3 мм/с, что указывает на необходимость специальных мероприятий по снижению динамического воздействия.

Таблица 3. Обобщённая оценка эксплуатационного воздействия при движении пассажирских и грузовых поездов

Расчётное сечение	Наиболее значимые полосы	Результат прогноза	Требуемое решение
№ 1	4 и 8 Гц	Пиковые спектральные значения: 2,2 мм/с на 4 Гц и 0,82 мм/с на 8 Гц; нормативные требования не превышены	Специальные меры не являются определяющими, контроль сохраняется
№ 2	4 и 8 Гц	Выявлено превышение требований: на 0,83 мм/с в полосе 4 Гц и на 4,3 мм/с в полосе 8 Гц	Необходимо снижение динамического воздействия и виброзащитные мероприятия

- В качестве практических мероприятий предложены:
 - ограничение на тоннельном участке скорости движения поездов до 20 км/ч;
 - применение подбалластных матов или иных упругих элементов верхнего строения пути, а также организация строительного и эксплуатационного вибродинамического мониторинга ОКН.
- Предложенный подход может быть использован для предварительного обоснования проектных решений при строительстве и эксплуатации железнодорожных объектов вблизи скальных памятников, однако окончательные параметры виброзащиты должны уточняться по результатам натурных измерений динамических характеристик массива и фактической вибрации при контрольных режимах.

Список источников / References

1. Köksal, H.O. Vibration-Induced Damage in Historical Structures / H. Güllü, A. Kahriman, A. Kahriman // *Journal of Cultural Heritage*. 2011. № 12 (1). P. 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.03.004>
- Köksal H.O., Güllü H., Kahriman A. Vibration-Induced Damage in Historical Structures. In: *Journal of Cultural Heritage*, 2011, no. 12 (1), pp. 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.03.004>. (In Engl.)
2. Auersch, L. Ground Vibration due to Railway Traffic: The Calculation of the Effects of Moving Static Loads and Their Experimental Verification / L. Auersch // *Journal of Sound and Vibration*. 2010. Vol. 293, Iss. 3-5. P. 599–610. <https://doi.org/10.1016/J.JSV.2005.08.059>.
- Auersch L. Ground Vibration due to Railway Traffic – The Calculation of the Effects of Moving Static Loads and Their Experimental Verification. In: *Journal of Sound and Vibration*, 2010, Vol. 293, Iss. 3-5. P. 599–610. <https://doi.org/10.1016/J.JSV.2005.08.059>. (In Engl.)
3. Erkal, A. Response of Little Hagia Sophia (Church of SS Sergius and Bacchus) to adjacent Train-induced Vibrations / A. Erkal // *Journal on Computing and Cultural Heritage*. 2022. Vol. 15, Issue 3. 1–18. <https://doi.org/10.1145/3495224>
- Erkal A. Response of Little Hagia Sophia (Church of SS Sergius and Bacchus) to Adjacent Train-Induced Vibrations. In: *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 2022, Vol. 15, Issue 3. Pp.1–18. <https://doi.org/10.1145/3495224>. (In Engl.)
4. Koziol, K. Historical Church Diagnostic with Regards to Impact of Traffic Included Vibrations / K. Koziol // *MATEC Web Conf.* 2019. № 285. P. 00006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928500006>
- Koziol K. Historical Church Diagnostic with Regards to Impact of Traffic Included Vibrations. In: *MATEC Web Conf.*, 2019, 285, p. 00006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928500006>. (In Engl.)
5. Time and Frequency Domain Analyses in the Experimental Dynamic Behaviour of the Marcus Aurelius' Column / G. Bongiovanni, G. Buffarini, P. Clemente, F. Saitta // *International Journal of Architectural Heritage*. 2021. № 15 (1). P. 64–78. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1706785>
- Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Saitta F. Time and Frequency Domain Analyses in the Experimental Dynamic Behaviour of the Marcus Aurelius' Column. In: *International Journal of Architectural Heritage*, 2021, no. 15 (1), pp. 64–78. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1706785>. (In Engl.)
6. A Semi-Analytical Formulation for Estimating the Fundamental Vibration Frequency of Historical Masonry Towers / M.A. Najafgholipour, M.R. Maheri, H. Darvishi, S. M. Dehghan // *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2019. Vol. 17, no. 5. P. 2627–2645.
- Najafgholipour M.A., Maheri M.R., Darvishi H., Dehghan S.M. A Semi-Analytical Formulation for Estimating the Fundamental Vibration Frequency of Historical Masonry Towers. In: *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019, Vol. 17, no. 5, pp. 2627–2645. (In Engl.)
7. Tram- and Train-Induced Vibrations in the National Etruscan Museum of Villa Giulia in Rome / G. Bongiovanni, G. Buffarini, P. Clemente, A. Colucci // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2024. Vol. 15. P. 191–205. <https://doi.org/10.1007/s13349-024-00837-2>.
- Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Colucci A. Tram- and Train-Induced Vibrations in the National Etruscan Museum of Villa Giulia in Rome. In: *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2024, Vol. 15, pp. 191–205. <https://doi.org/10.1007/s13349-024-00837-2>. (In Engl.)
8. Dynamic Effect of Metro-Induced Vibration on the Rammed Earth Base of the Bell Tower / Lai Jinxing, Niu Fangyuan, Wang Ke // *SpringerPlus*. 2016. № 5. P. 935. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2627-1>.
- Lai Jinxing, Niu Fangyuan, Wang Ke et al. Dynamic Effect of Metro-Induced Vibration on the Rammed Earth Base of the Bell Tower. In: *SpringerPlus*, 2016, no. 5, p. 935. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2627-1>. (In Engl.)
9. Chen, R.C. Study on Effects on Bell Tower due to Train-Induced Vibrations on Metro in Xi'an : Ph.D. Thesis. Beijing Jiaotong University, 2008.
- Chen R.C. Study on Effects on Bell Tower due to Train-Induced Vibrations on Metro in Xi'an, Ph.D. Thesis. Beijing Jiaotong University, 2008. (In Engl.)
10. Azadeh, Ghobadi. Hydrogeological Survey for Interpretation of Damaging Process in Ancient Grave of Naqsh-e-Rostam / DOI:10.17265/2328-2193/2014.03.006 // *Iran. Journal of Geological Resource and Engineering*. 2014. № 3. P. 180–188.
- Azadeh Ghobadi, Emami Mohammadamin, Aslani Hesam. Hydrogeological Survey for Interpretation of Damaging Process in Ancient Grave of Naqsh-e-Rostam. In: *Iran. Journal of Geological Resource and Engineering*, 2014, no. № 3, pp. 180–188. DOI:10.17265/2328-2193/2014.03.006. (In Engl.)
11. Train Vibrations Threaten Tomb of Xerxes I // *Tehran Times*. URL: <https://clck.ru/3VMzha> (дата обращения 22.08.2026).
- Train Vibrations Threaten Tomb of Xerxes I. *Tehran Times*. URL: <https://clck.ru/3VMzha> (Accessed 08/22/2026). (In Engl.)
12. Sadeghi, J. Safe Distance of Cultural and Historical Buildings from Subway Lines / J. Sadeghi, M. Esmaeili // *Soil*

Dynamics and Earthquake Engineering. 2017. № 96. P. 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.02.008>

Sadeghi J., Esmaeili M. Safe Distance of Cultural and Historical Buildings from Subway Lines. In: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, no. 96, pp. 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.02.008>. (In Engl.)

13. Vogiatzis, K. Protection of the Cultural Heritage from Underground Metro Vibration and Ground-Borne Noise in Athens Centre: The Case of the Kerameikos Archaeological Museum and Gazi Cultural Centre. International / K. Vogiatzis. DOI: 10.20855/ijav.2012.17.2301 // *Journal of Acoustics and Vibrations*. 2012. № 17. P. 59–72. URL: <https://clck.ru/3VMzvm> (дата обращения 22.08.2026).

Vogiatzis, K. Protection of the Cultural Heritage from Underground Metro Vibration and Ground-Borne Noise in Athens Centre: The Case of the Kerameikos Archaeological Museum and Gazi Cultural Centre. International. In: *Journal of Acoustics and Vibrations*. 2012. № 17. P. 59–72. DOI: 10.20855/ijav.2012.17.2301. URL: <https://clck.ru/3VMzvm>

14. Hawley, C. UNESCO Looks into Subway Vibrations at Cologne Cathedral / C. Hawley // DER SPIEGEL. 2013, January 10. URL: <https://clck.ru/3VQj9W> (дата обращения 22.08.2026).

Hawley, C. UNESCO Looks into Subway Vibrations at Cologne Cathedral / C. Hawley // DER SPIEGEL. 2013, January 10. URL: <https://clck.ru/3VQj9W> (Accessed 08/22/2026). (In Engl.)

15. Effects of Ambient Vibrations on Heritage Buildings: Overview and Wireless Dynamic Monitoring Application / Fumagalli Fabio, Marano Giuseppe [и др.] // Материалы конференции «Dynamic interaction of soil and structure». 2013, Roma. URL: <https://clck.ru/3VN54J> (дата обращения 22.08.2026).

Fumagalli Fabio, Marano Giuseppe et al. Effects of Ambient Vibrations on Heritage Buildings: Overview and Wireless Dynamic Monitoring Application. In: *Proceedings of the conference "Dynamic interaction of soil and structure"*. Roma, 2013. URL: <https://clck.ru/3VN54J> (Accessed 08/22/2026). (In Engl.)

16. Railway Ground Vibrations Induced by Wheel and Rail Singular Defects / G. Kouroussis, D.P. Connolly, G. Alexandrou, K. Vogiatzis // *Vehicle System Dynamics*. 2015. № 53 (10). P. 1500–1519. URL: <https://clck.ru/3VN58p> (дата обращения 22.08.2026).

Kouroussis G., Connolly D.P., Alexandrou G., K. Vogiatzis. Ground Vibrations Induced by Wheel and Rail Singular Defects. In: *Vehicle System Dynamics*, 2015, no. 53 (10), pp. 1500–1519. URL: <https://clck.ru/3VN58p> (Accessed 08/22/2026). (In Engl.)

17. Blast Vibration and Seismology // *Proceedings of the 8th European Federation of Explosives Engineers World Conference on Explosives and Blasting*, 2016. P. 1–10.

Blast Vibration and Seismology. In: *Proceedings of the 8th European Federation of Explosives Engineers World Conference on Explosives and Blasting*, 2016, pp. 1–10. (In Engl.)

18. Contribution of Anthropogenic Vibration Sources to Crack Growth in Natural Rock Arches / DOI: 10.3389/feart.2022.1035652 // *Frontiers in Earth Science*. 2022. № 10. P. 1035652. URL: <https://clck.ru/3VN5ER> (дата обращения 22.08.2026).

Finnegan R., Moore J.R., Geimer P.R. Contribution of Anthropogenic Vibration Sources to Crack Growth in Natural Rock. In: *Frontiers in Earth Science*, 2022, no. 10, pp. 1035652. DOI: 10.3389/feart.2022.1035652 URL: <https://clck.ru/3VN5ER> (Accessed 08/22/2026). (In Engl.)

19. Дрёмова, Н. Ну, поехали! Как связали Крым с «материком» 145 лет назад / Н. Дрёмова // РИА. Новости Крыма. 15.09.2020 г. URL: <https://clck.ru/3VN5HF> (дата обращения 22.08.2026).

Dremova N. "Ну, поехали!" How Crimea was connected to the "mainland" 145 years ago. *RIA. Novosti Kryma*. URL: <https://clck.ru/3VN5HF> (Accessed 08/22/2026). (In Russ.)

20. Cheluszka, P. Vibration Identification of the Roadheader Cutting head Using High-Speed Cameras / Cheluszka P., Mann R. DOI: 10.1051/mateconf/201925203018 // *MATEC Web Conf*. 2019. № 252. P. 03018. URL: <https://clck.ru/3VN5NY> (дата обращения 22.08.2026).

Cheluszka P., Mann R. Vibration Identification of the Roadheader Cutting head Using High-Speed Cameras. In: *MATEC Web Conf.*, 2019, no. 252, pp. 03018. URL: <https://clck.ru/3VN5NY> (Accessed 08/22/2026). (In Engl.)

21. Amick, H. Frequency-Dependent Soil Propagation Model / H. Amick // *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 1999. № 9. P. 72–80. URL: <https://clck.ru/3VN5RZ> (дата обращения 22.08.2026).

Amick H. Frequency-Dependent Soil Propagation Model. In: *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 1999, no. 9, pp. 72–80. URL: <https://clck.ru/3VN5RZ> (Accessed 08/22/2026). (In Engl.)

22. Speakman, C. Tunnelling Induced Ground-Borne Noise Modelling / C. Speakman, S. Lyons // *Proceedings of ACOUSTICS*, Adelaide, Australia November 23–25. URL: <https://clck.ru/3VN5Tk> (дата обращения 22.08.2026).

Speakman C., Lyons S. Tunnelling Induced Ground-Borne Noise Modelling. In: *Proceedings of ACOUSTICS*, Adelaide, Australia November 23–25. URL: <https://clck.ru/3VN5Tk> (Accessed 08/22/2026). (In Engl.)

23. Rodríguez, R. Vibration Analysis and Empirical Law Definition for Different Equipment in a Civil Construction / R. Rodríguez, M. Bascompta // *Appl. Sci.* 2020. № 10. P. 4689. <https://doi.org/10.3390/app10144689>.

Rodríguez R.; Bascompta M. Vibration Analysis and Empirical Law Definition for Different Equipment in a Civil Construction. In: *Appl. Sci.*, 2020, no. 10, p. 4689. <https://doi.org/10.3390/app10144689>. (In Engl.)

24. Smirnov, V. Vibration Protection of Historical Buildings Located near the Lines of Urban Rail Transport / Smirnov, V. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.318 // *Materials Science Forum*. 2019. № 945. P. 318–324. URL: <https://clck.ru/3VN5Yw> (дата обращения 22.08.2026).

Smirnov V. Vibration Protection of Historical Buildings Located near the Lines of Urban Rail Transport. In: *Materials Science Forum*, 2019, no. 945, pp. 318–324. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.318. URL: <https://clck.ru/3VN5Yw> (Accessed 08/22/2026). (In Engl.)