



ОТЧЕТ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)»
КАФЕДРА «МОСТЫ И ТОННЕЛИ»

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОННЕЛЬНОЙ ОБДЕЛКИ НА ПЕРЕДАЧУ ВИБРАЦИЙ В ОКРУЖАЮЩЕЕ ПРОСТРАНСТВО

Автор:
Баев Л.В.

г. Москва
2017

Содержание

1. Актуализация проблемы	3
2. Обзор современного опыта	6
2.1 Глубина заложения тоннелей.....	6
2.2 Толщина обделки тоннеля.....	8
2.3 Размер тоннельной обделки	11
2.4 Форма тоннельной обделки.....	13
3. Численное моделирование распространения вибраций	15
3.1 Параметры расчетной модели	15
3.2 Сводчатые обделки.....	16
3.3 Обделки прямоугольного очертания.....	19
3.2 Результаты расчета и критерии сравнения	21
4. Натурные измерения вибраций для проверки расчетов.....	30
Заключение.....	35
Список литературы.....	37
Приложение А.....	38
Приложение Б	58

1. Актуализация проблемы

Для зданий и сооружений, расположенных вблизи тоннелей метрополитена и железнодорожных тоннелей, вибрационные воздействия, обусловленные движением транспортных средств, могут являться существенным фактором, влияющим на здоровье и комфортность проживания людей.

Люди, находящиеся в таких помещениях, могут ощущать такое воздействие в виде общей вибрации, передающуюся через опорные поверхности на тело сидящего или стоящего человека, или в виде низкочастотного шума (гула).

Сильные вибрации могут привести как к косметическим, так и к структурным повреждениям зданий, а также нарушать работу особо чувствительного оборудования.

Пути распространения вибраций от тоннелей будут зависеть от свойств и характера расположения грунтов (рисунок 1).

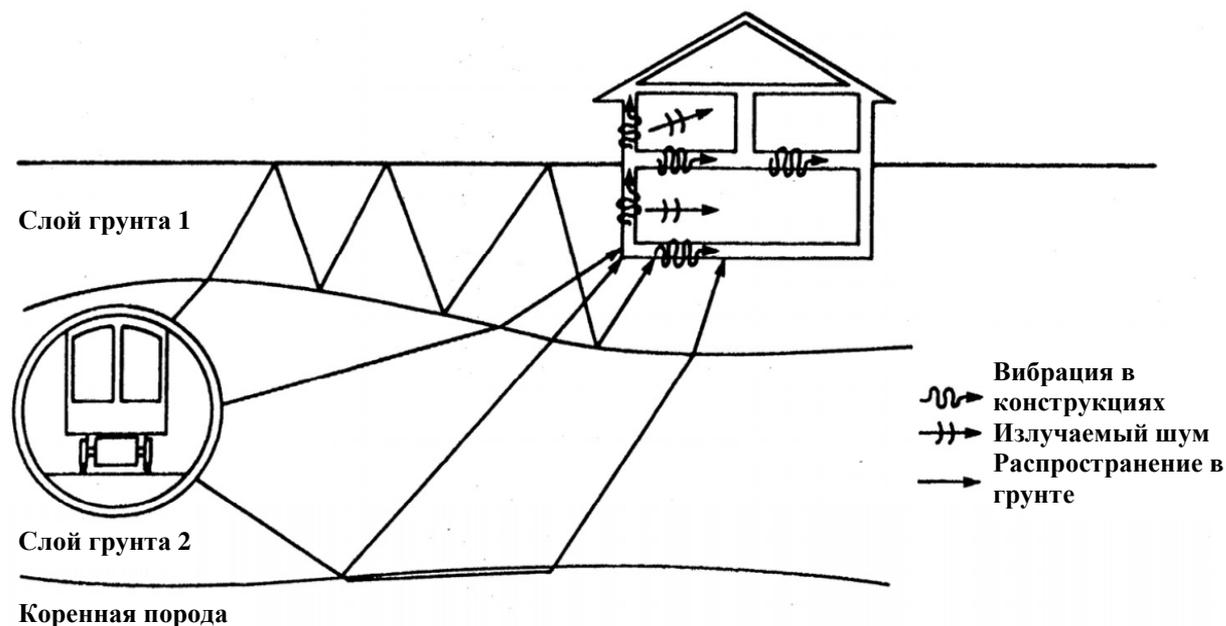


Рисунок 1 – Различные схемы распространения вибраций от железнодорожных тоннелей (Remington et al., 1987) [1]

Проблема защиты от такого рода вибраций особенно актуальна для крупных городов и мегаполисов, где плотность застройки высока, и с каждым годом для строительства новых сооружений используются территории,

расположенные все ближе и ближе к источникам вибрации и транспортным сооружениям.

При расчете вибрационного воздействия от тоннелей метрополитена на близлежащую застройку, когда отсутствует возможность провести прямые измерения, за исходные данные традиционно берутся уровни вибраций лотковой части типовой тоннельной обделки из сборного железобетона кругового очертания, которые указаны в табл. 3.2 СП 23-105-2004 «Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена».

Однако в реальности характеристики и формы тоннельных обделок могут сильно отличаться от типовой обделки из сборного железобетона (рисунок 2). К таким отличиям относятся:

- материал (чугун или железобетон);
- геометрическая форма (круговое очертание или прямоугольное);
- размер (в том числе диаметр для круглого тоннеля);
- количество путей (однопутный или двухпутный);
- конструкция (сборная или монолитная).

Как следствие, тоннельные обделки имеют разную массу и жесткость, а значит такие системы имеют и разные собственные частоты. Кроме того, к различиям относится форма излучателя, которым является тоннель.

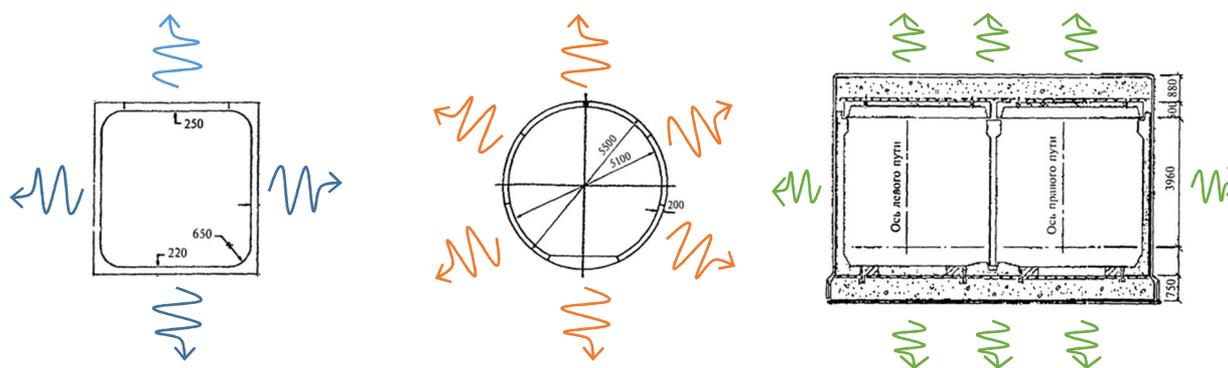


Рисунок 2 – Примеры различных конфигураций тоннельных обделок и схем излучения вибраций

В данной работе автором ставится задача оценки влияния вышеперечисленных факторов на:

- характер (направления) распространения вибраций;
- снижение уровней вибраций в окружающем грунтовом массиве¹, в том числе на поверхности грунта, в октавных полосах частот;
- размер санитарно-защитной зоны, при которой уровни вибраций не будут превышать допустимые значения для жилых помещений².

Примечания:

1 – для типового грунта, характерного для г. Москвы.

2 – по оценочной методике для типовых жилых зданий и сооружений.

2. Обзор современного опыта

Исследованию распространения вибраций от железнодорожных тоннелей посвящено большое количество работ. Основные факторы, влияющие на распространение вибраций, принято классифицировать по следующим группам:

- Параметры подвижного состава (скорость, масса, количество вагонов, гладкость колес и др.).
- Параметры верхнего строения пути (конструкция и жесткость пути, гладкость рельс, наличие стыков, стрелочных переводов и др.).
- Характеристики окружающих грунтов (в том числе последовательность расположения слоев).
- Конструкция тоннельной обделки (материал, форма, размер и др.).
- Глубина заложения тоннелей.

В данной работе будут рассмотрены последние две группы факторов. Кратко рассмотрим относящийся к ним существующий опыт.

2.1 Глубина заложения тоннелей

В работе [3] рассматривалось влияние глубины заложения тоннелей от 10 до 30м с помощью передаточной функции. Уровни вибраций на поверхности грунта уменьшались с увеличением глубины заложения тоннеля. Таким образом, вибрации от тоннелей мелкого заложения будут более заметными по сравнению с тоннелями глубокого заложения.

Увеличение глубины заложения приводит к снижению диапазона частот, при котором волны Рэлея играют значительную роль, тем самым снижая уровни вибрации на поверхности грунта.

В работе [4] функция нагрузки от поездов (при скорости движения 30 м/с) модулировалась с частотой от 0 до 20 Гц, что характеризует влияние в большей степени подрессоренной массы и в меньшей степени

неподрессоренной массы и неровностей колес и рельс. Рассматривались глубины заложения тоннелей от 5 до 25м.

Для случая квазистатической подвижной нагрузки ($f_0 = 0$) увеличение глубины заложения тоннеля сопровождается снижением уровней виброскорости на поверхности земли при расстоянии в плане по поверхности земли менее 30м (рисунок 3). При увеличении расстояния до поверхности земли глубина заложения тоннеля вносит все меньший вклад. При частоте $f_0 = 15$ Гц наблюдается та же картина (рисунок 4б). Однако, для случая $f_0 = 5$ Гц влияние глубины заложения не так очевидно (рисунок 4а). Такое поведение возможно объясняется тем фактом, что длина волны при $f_0 = 5$ Гц больше, чем при $f_0 = 15$ Гц, что требует рассмотрения большего диапазона расстояний до поверхности, чем рассмотренные в работе 50м.

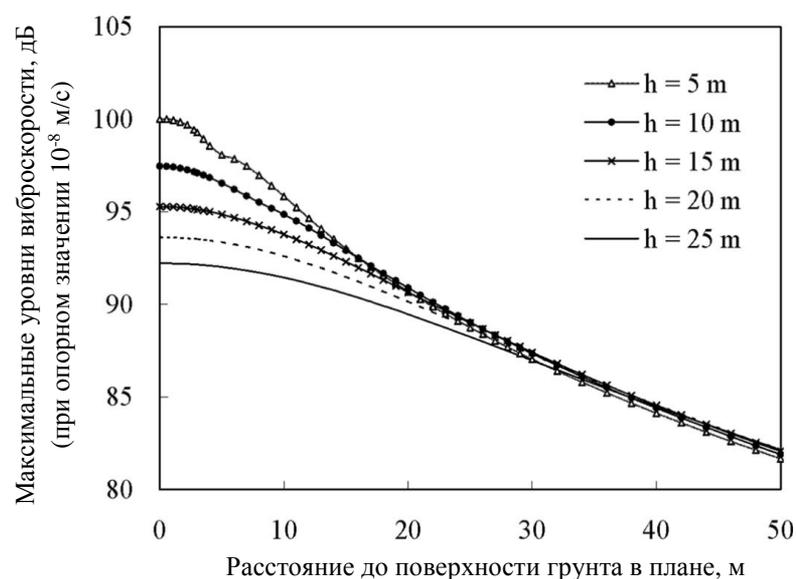


Рисунок 3 – Влияние глубины заложения тоннеля на затухание колебаний на поверхности грунта при движении поезда со скоростью 30 м/с ($f_0 = 0$ Гц)

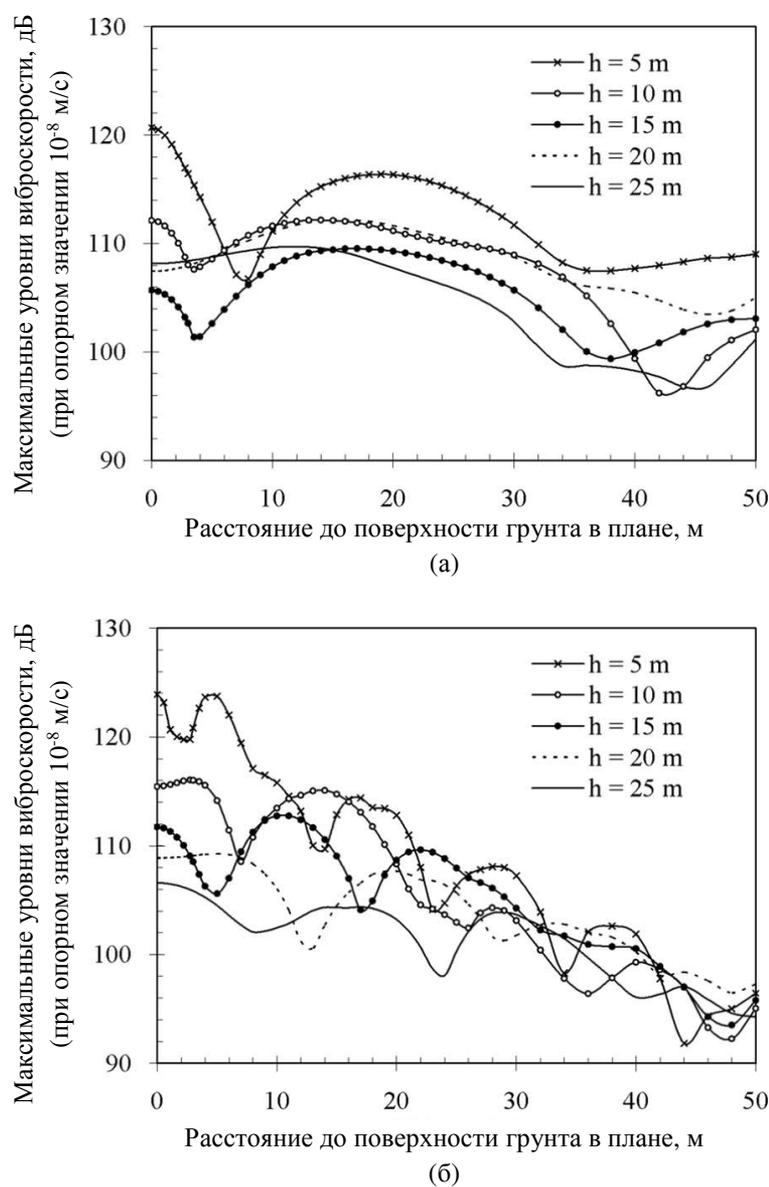


Рисунок 4 – Влияние глубины заложения тоннеля на затухание колебаний на поверхности грунта при движении поезда со скоростью 30 м/с: (а) $f_0 = 5$ Гц; (б) $f_0 = 15$ Гц

2.2 Толщина обделки тоннеля

В работе [4] рассматривались тоннельные обделки толщиной от 12.5 до 50 см при проходе поезда со скоростью 30 м/с. Для случая квазистатической подвижной нагрузки ($f_0 = 0$) увеличение толщины обделки практически не влияет на уровни вибраций на поверхности грунта (рисунок 5). При частоте модуляции нагрузки $f_0 = 5$ и 15 Гц наблюдается сдвигка по фазе при увеличении толщины обделки, однако общее влияние на уровни вибраций грунта также оказывается незначительным.

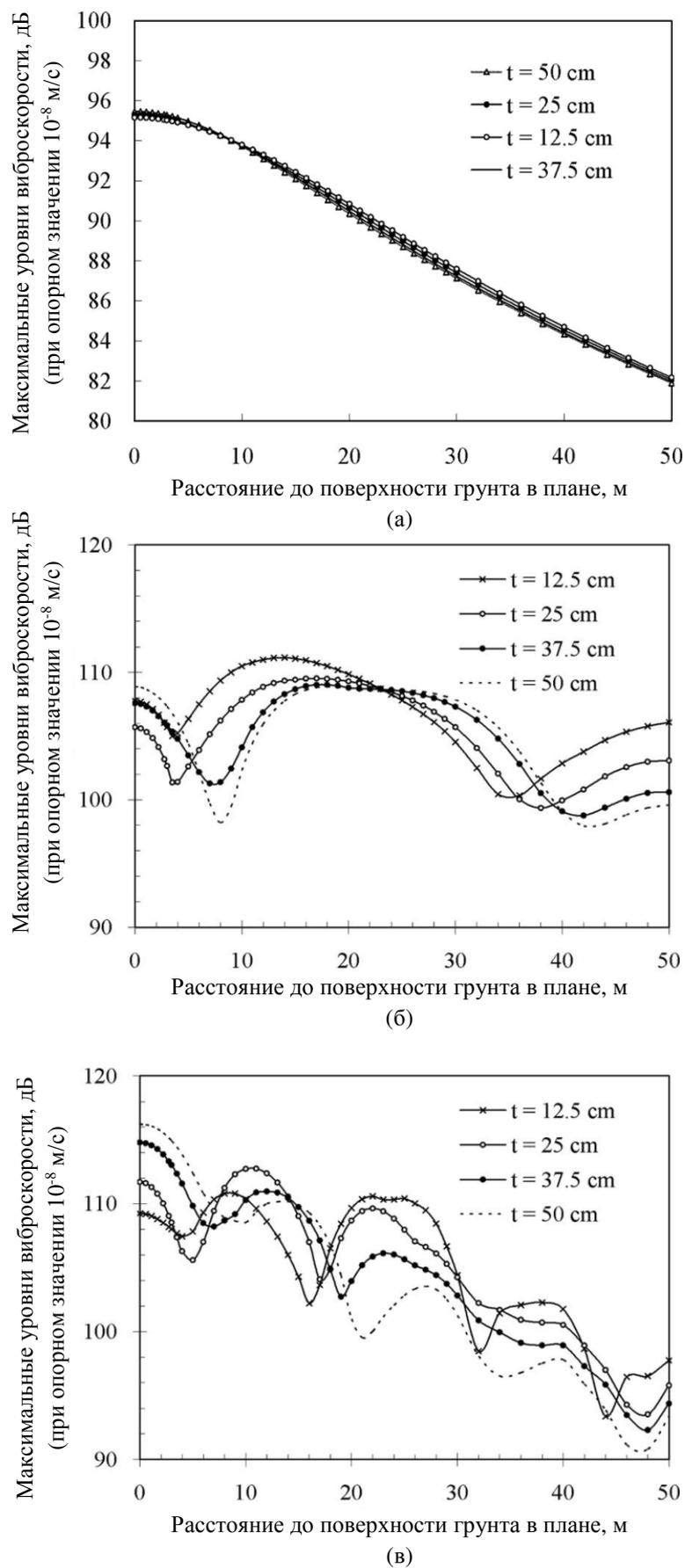


Рисунок 5 – Влияние глубины заложения тоннеля на затухание колебаний на поверхности грунта при движении поезда со скоростью 30 м/с: (а) $f_0 = 5$ Гц; (б) $f_0 = 5$ Гц; (в) $f_0 = 15$ Гц

В работе [3] рассматривалось влияние тоннельных обделок толщиной 0.25м, 0.3м и 0.37м на вибрации поверхности грунта с помощью передаточной функции. Влияние толщины обделки на передаточную функцию признано незначительным, что говорит о неэффективности снижения вибраций таким методом.

Дополнительно исследовалось влияние наличия обратного свода в обделке, который увеличивает жесткость обделки. Делается вывод, что обратный свод принимает на себя большую часть энергии вибраций и излучает ее вниз. Это позволяет излучать меньше энергии на поверхность грунта. Таким образом, дополнительную массу лучше добавлять к обратному своду, а не наращивать толщину обделки.

В исследовании [6] при увеличении толщины плиты в основании тоннеля с 0.6 до 2.0м наблюдалось снижение уровней вибраций на 5 дБ. Также давалась грубая оценка, что при увеличении массы тоннеля в 2 раза, уровни вибраций снизятся на 5 дБ.

Схожие выводы сделаны в работе [5], где изучалось влияние дополнительной массы под обделкой тоннеля. Было обнаружено, что уровни вибраций обделки снизилось на 7-10 дБ, при этом снижение вибраций на фундаменте на поверхности земли составило 4-10 дБ в зависимости от глубины заложения тоннеля.

Целесообразность идеи снижения шума и вибраций с помощью увеличения массы тоннельной обделки подтверждается историческим фактом. В 70-х годах при строительстве тоннелей мелкого заложения Тбилисского метрополитена были использованы утяжелённые конструкции обделки с устройством в основании тоннеля дополнительной бетонной подушки толщиной 1м [7].

2.3 Размер тоннельной обделки

В работе [3] рассматривалось влияние размера тоннельных обделок с внешним диаметром 4.7м, 6.0м и 9.35м на вибрации поверхности грунта с помощью передаточной функции. Данные размеры соответствуют реальным тоннелям, построенным в Лондоне, Пекине и Антверпене соответственно. Толщина обделок для первых двух размеров составляет 0.3м, а для самого большого размера – 0.35м. Глубина заложения тоннелей принята 20м до центральной оси. И хотя большие тоннели зачастую являются двухпутными, что приводит к несимметричной нагрузке, в работе нагрузка прикладывалась симметрично.

Расчеты показали, что влияние размера тоннеля достаточно комплексное и наблюдается на разных частотах. Передаточные функции имеют схожий вид на низких частотах для трех различных точек на поверхности грунта, но становятся различными на высоких частотах вследствие влияния различных форм собственных колебаний тоннелей (рисунок 6). Частоты, при которых взаимодействие тоннельной обделки и грунта вносит существенный вклад, снижаются вместе с размерами тоннеля.

Из рисунков 7 и 8 можно видеть, что больше энергии излучается вниз в случае большого тоннеля. Это должно снизить уровни вибраций на поверхности грунта.

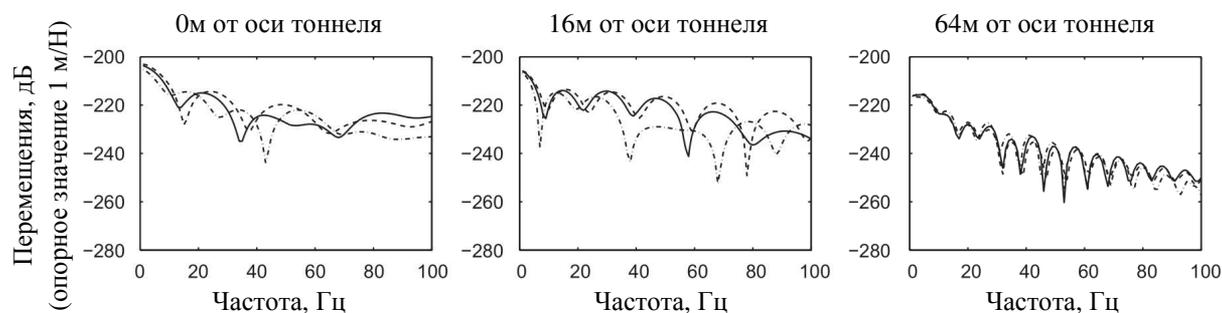


Рисунок 6 – Вертикальные передаточные функции на поверхности грунта для малого (пунктирная линия), среднего (сплошная) и большого (штрихпунктирная) тоннелей

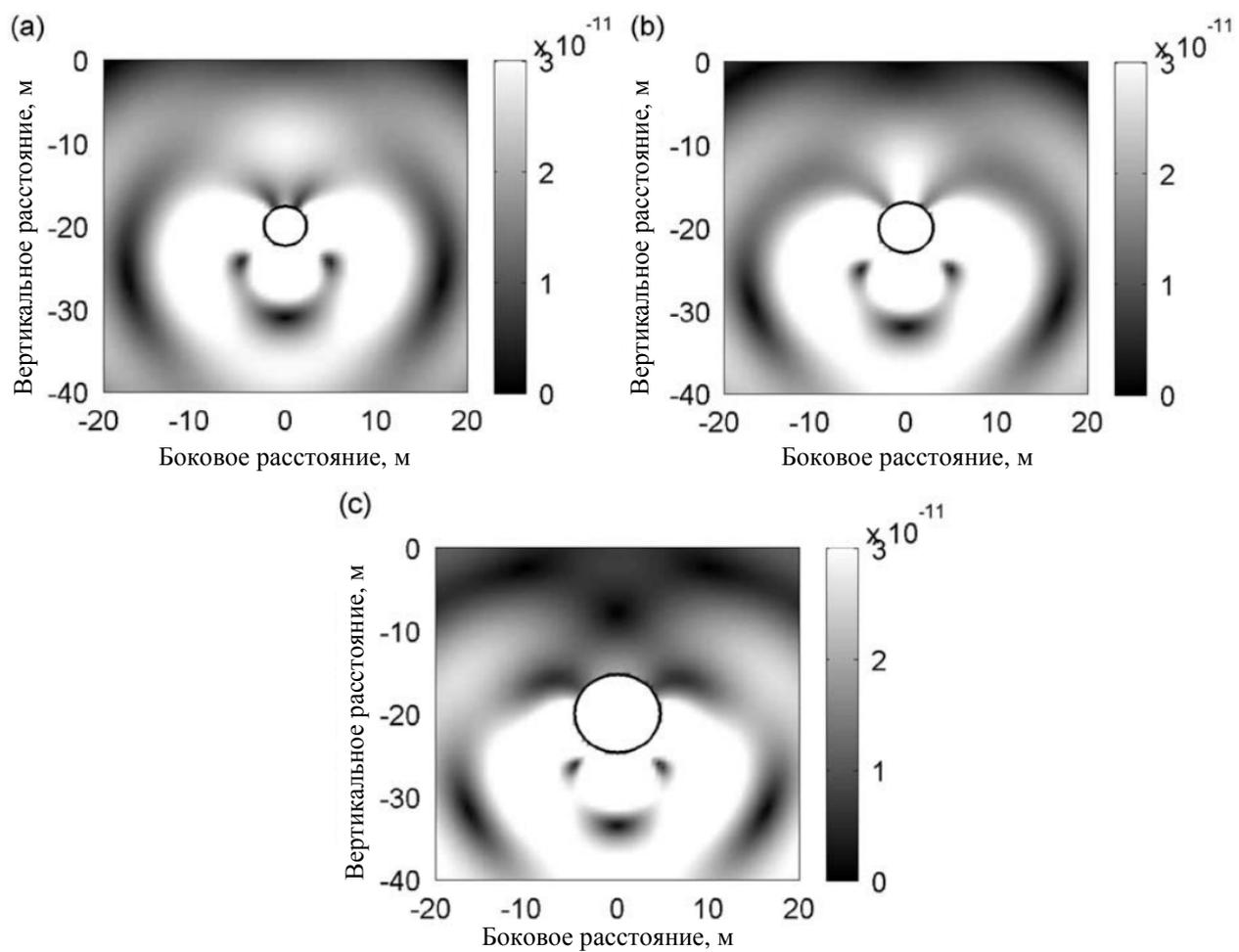


Рисунок 7 – Перемещения свободного поля при гармонической нагрузке 10 Гц для малого (а), среднего (б) и большого (с) тоннелей

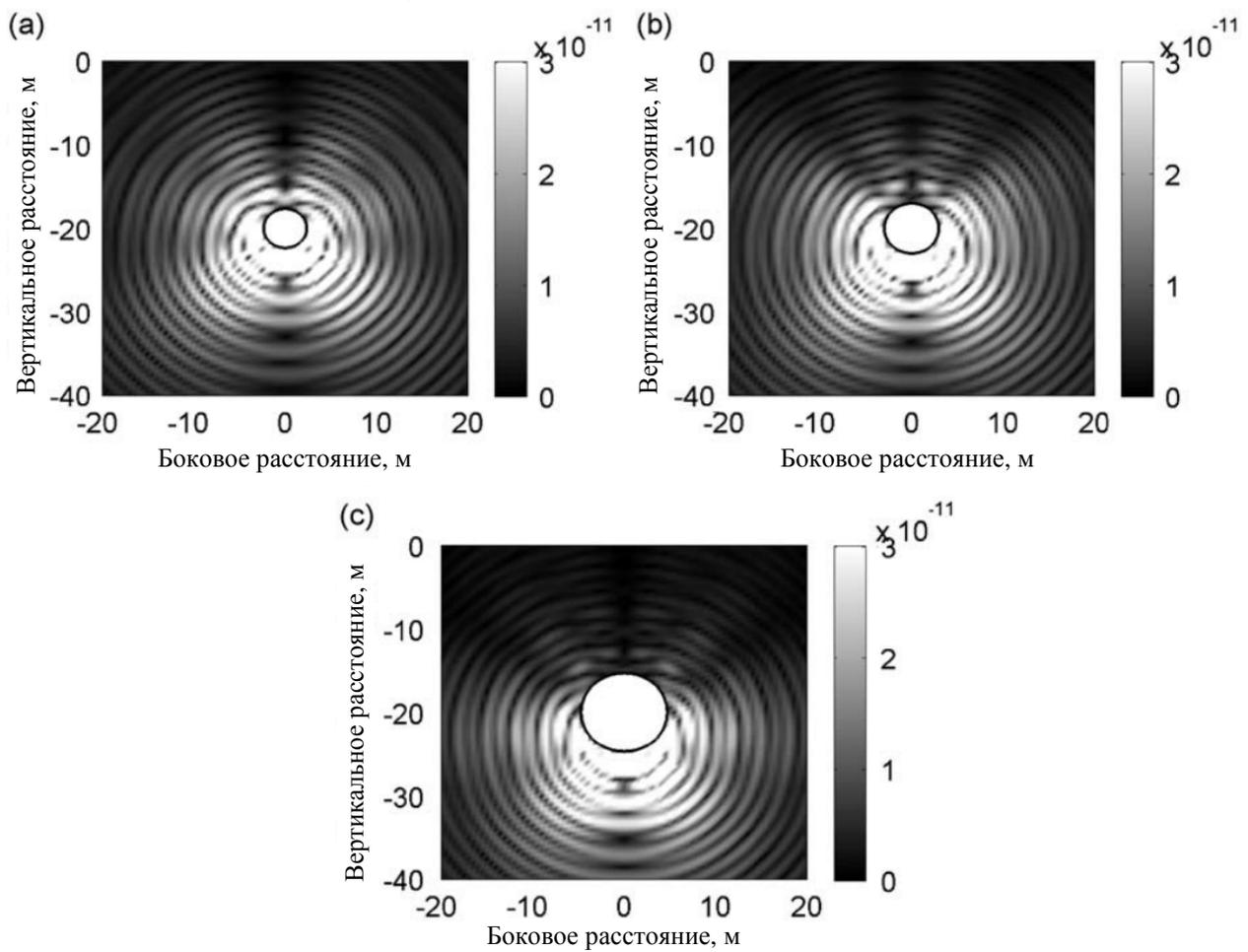


Рисунок 8 – Перемещения свободного поля при гармонической нагрузке 80 Гц для малого (а), среднего (б) и большого (с) тоннелей

2.4 Форма тоннельной обделки

В работе [3] рассматривались три формы тоннельной обделки: круглого очертания, овального и прямоугольного очертания (рисунок 9). Обделка круглого очертания имеет внешний диаметр 9.12м, овального – размер 8.6м x 8.9м, прямоугольного – 7.3м x 7.3м. Для всех обделок принята толщина 0.7м. Глубина заложения 24м до подошвы.

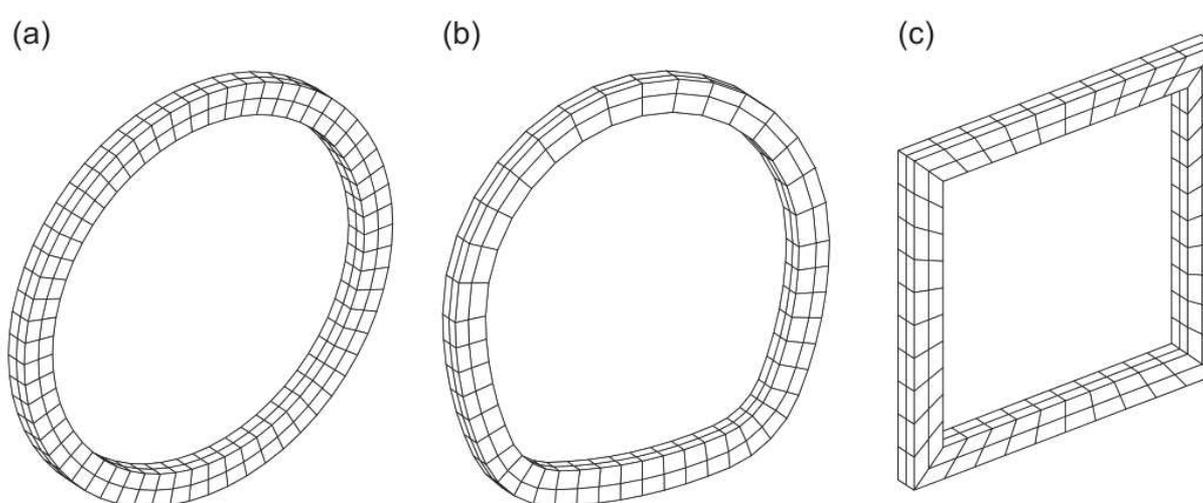


Рисунок 9 – Конечноэлементные сетки для обделок круглого (а), овального (b) и прямоугольного (с) очертаний

Рассматриваемые передаточные функции на поверхность грунта, изображенные на рисунке 10, оказались равными для круглой и овальной обделки. Для обделки прямоугольного очертания ситуация отличается, в особенности на высоких частотах для точек, близких к тоннелю. На низких частотах длина волны оказывается больше тоннельной обделки, и ее форма мало влияет на реакцию. На большом расстоянии форма обделки становится менее значимой и все три формы показывают схожие значения.

Меньшие уровни вибраций непосредственно над обделкой прямоугольного очертания объясняются ее плоским основанием, которое в большей степени излучает энергию глубже вниз (рисунок 11).

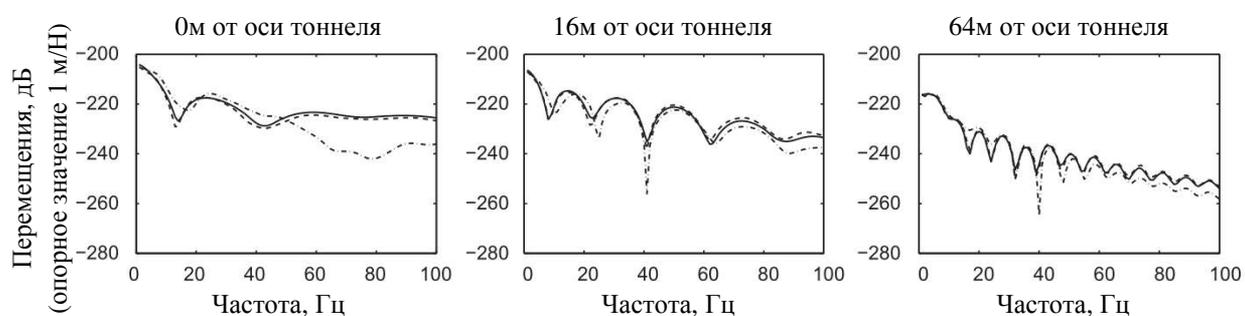


Рисунок 10 – Вертикальные передаточные функции на поверхности грунта для обделки овального (пунктирная линия), круглого (сплошная) и прямоугольного (штрихпунктирная) очертания

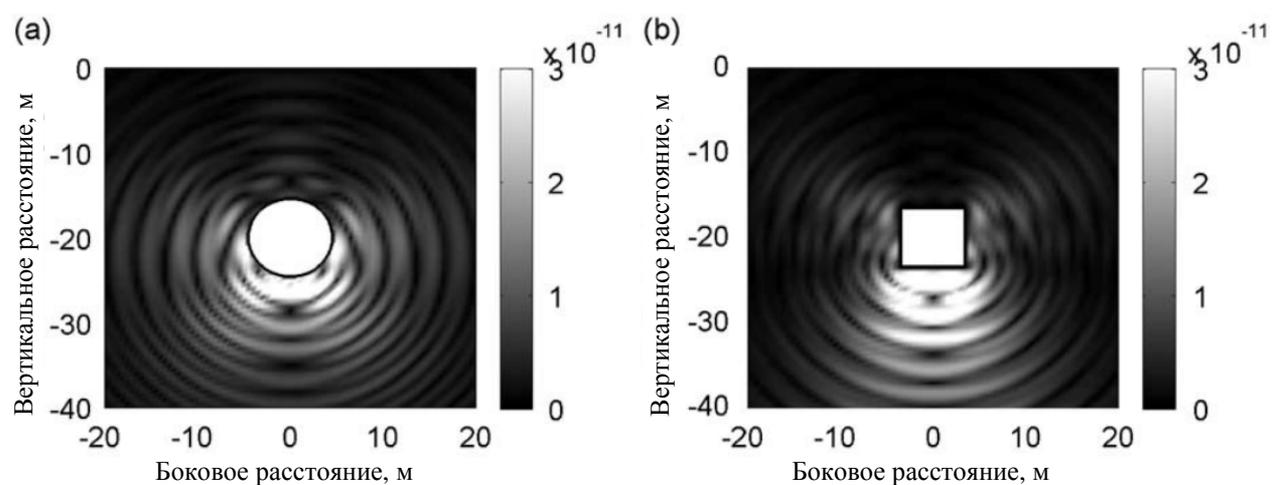


Рисунок 11 – Перемещения свободного поля при гармонической нагрузке 80 Гц для обделок круглого (а) и прямоугольного (б) очертаний

Результаты демонстрируют, что при прогнозе уровней вибраций на больших расстояниях от тоннеля, достаточно рассматривать обделку круглого очертания эквивалентного сечения.

3. Численное моделирование распространения вибраций

3.1 Параметры расчетной модели

Для оценки уровней вибраций в грунтовом массиве использовался метод конечных элементов с применением программного комплекса для геотехнических расчетов и расчета тоннелей MIDAS GTS NX.

Для расчета использовалась плоская расчетная схема с вязкими граничными условиями, позволяющими полностью или частично избежать отражений упругих волн от границ условного контура [8].

В качестве тоннельных обделок рассматривались конструкции, описанные в разделе 3.2 и 3.3.

Глубина заложения тоннелей принята 25м до центра тоннелей. В качестве грунта принимался характерный для московского региона песчаный грунт (скорость распространения продольных волн $V_p = 400$ м/с). Для вычисления модуля упругости грунта воспользуемся формулой, справедливой для распространения продольной волны в тонком стержне:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}}$$

где

$$E_{oed} = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E$$

Тогда модуль упругости будет равен:

$$E = \frac{\rho V_p^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Размера грунтового массива принят одинаковым для всех расчетов и составляет 50x50м.

Коэффициент Пуассона для грунта принят равным 0.2 для случая сверхмалых деформаций [9], актуальных для вибрационного воздействия от поездов. Остальные принятые для расчета характеристики грунта и материалов представлены в таблице 2.

Наименование грунта / материала	ρ (кг/м ³)	E (МПа)	ν	ξ
Песчаный грунт	2000	288	0.2	0.05
Железобетон	2400	30000	0.2	0.02
Чугун серый	7100	110000	0.22	0.01

Таблица 2 – Расчетные характеристики грунта и материалов

В качестве исходного воздействия была принята единичная вертикальная нагрузка в виде силы, приложенная к путевому бетону и изменяющаяся во времени по гармоническому закону для частот 2-125 Гц.

Расчет выполнялся во временной области пошаговым методом. Длина шага по времени составляла от 0.00075 сек (для 125 Гц) до 0.048 сек (для 2 Гц).

3.2 Сводчатые обделки

В качестве сводчатых обделок рассматривались обделки 5 типов:

- Сборная обделка кругового очертания из чугунных тубингов с внутренним диаметром 5.1м и толщиной 0.2м (рисунок 12);
- Сборная обделка из высокоточных железобетонных блоков с внутренним диаметром 5.1м и 8.65м и толщиной 0.35м (рисунок 13);
- Монолитная обделка из бетона с внутренним диаметром 5.1м и габаритами 6.5м на 7.5м толщиной 0.7м (рисунок 14);
- Односводчатая овальная обделка из монолитного бетона для тоннелей, сооружаемых горным способом с габаритами 5.9м на 6.34м и переменной толщиной 0.35-0.45м (рисунок 15).

Примечание: для сборной обделки из высокоточных железобетонных блоков с внешним диаметром 9.35м нагрузка прикладывалась симметрично, относительно оси тоннеля по аналогии с однопутными тоннелями.

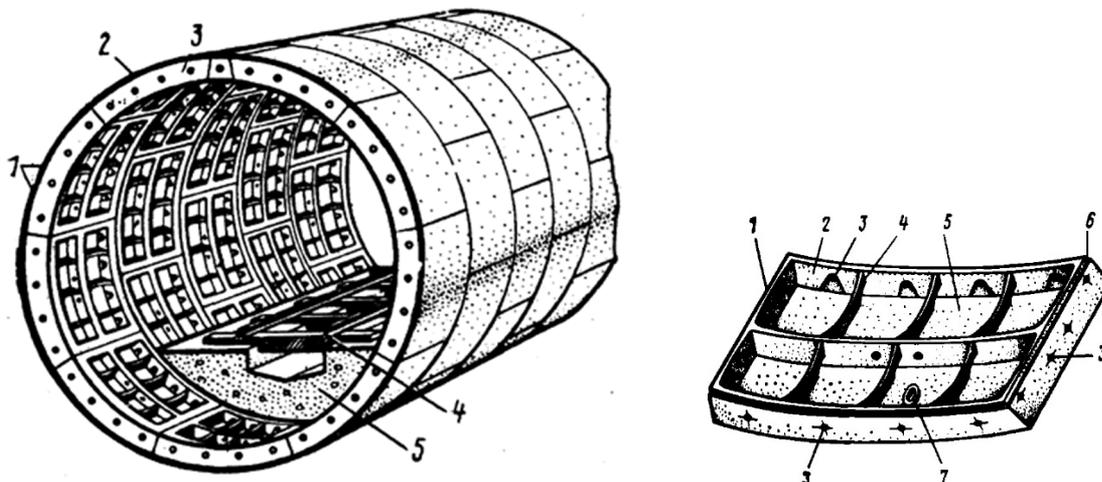


Рисунок 12 – Сборная обделка кругового очертания из чугунных тубингов

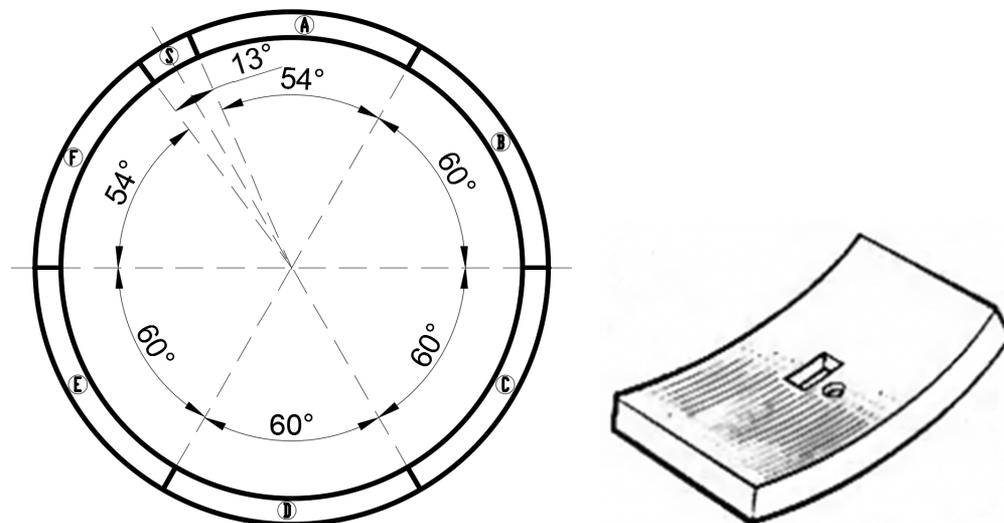


Рисунок 13 – Сборная обделка из высокоточных железобетонных блоков

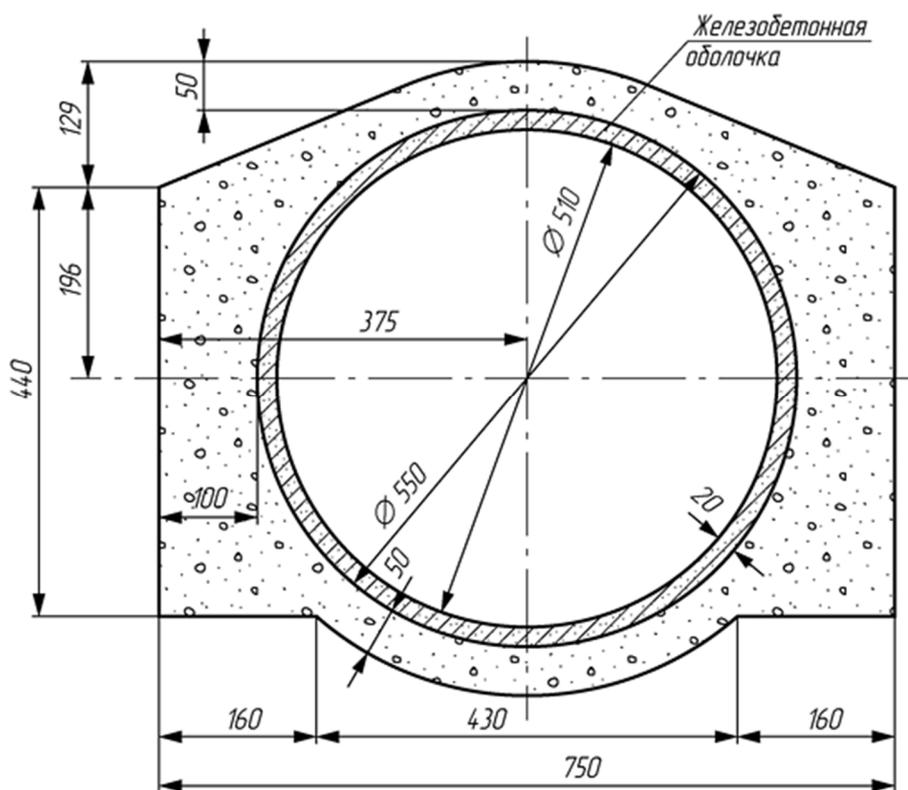


Рисунок 14 – Монолитная обделка из бетона

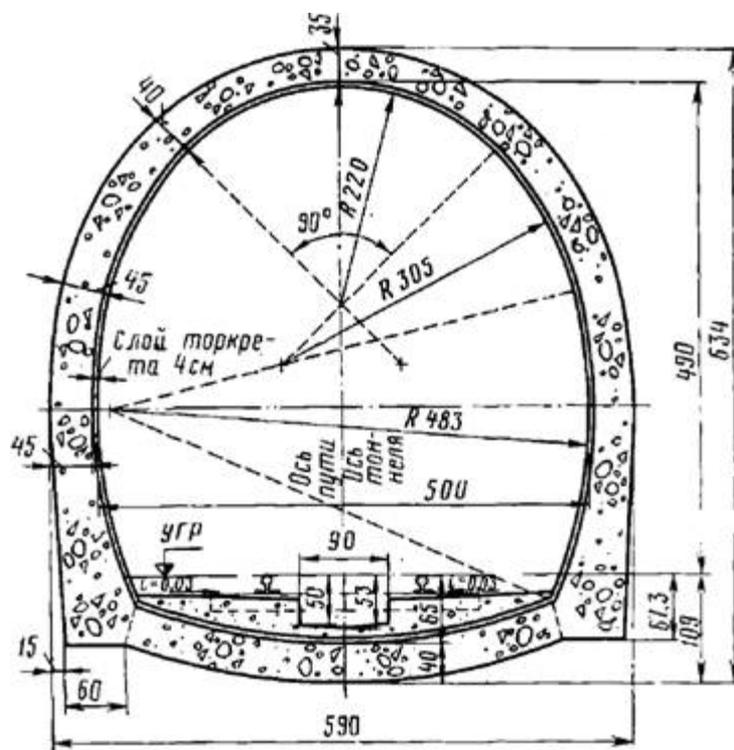


Рисунок 15 – Одноводчатая овальная обделка из монолитного бетона

3.3 Обделки прямоугольного очертания

В качестве обделок прямоугольного очертания рассматривались обделки 2 типов:

- Цельносекционная железобетонная обделка однопутного тоннеля габаритами 4.4x4.95м и толщиной 0.15-0.2м (рисунок 16);
- Цельносекционная железобетонная обделка двухпутного тоннеля габаритами 8.8x4.95м и толщиной 0.15-0.2м (рисунок 17).

Дополнительно рассматривалось еще два варианта прямоугольной цельносекционной железобетонной обделки однопутного тоннеля обделки:

- С дополнительной массой в виде железобетонной плиты толщиной 1м в основании (рисунок 18);
- С дополнительным свайным ростверком толщиной 0.3м в основании и забивными сваями 0.3x0.3x12м с шагом 1.1м, служащими волноводами вибраций в нижнюю часть грунтового массива (рисунок 19)

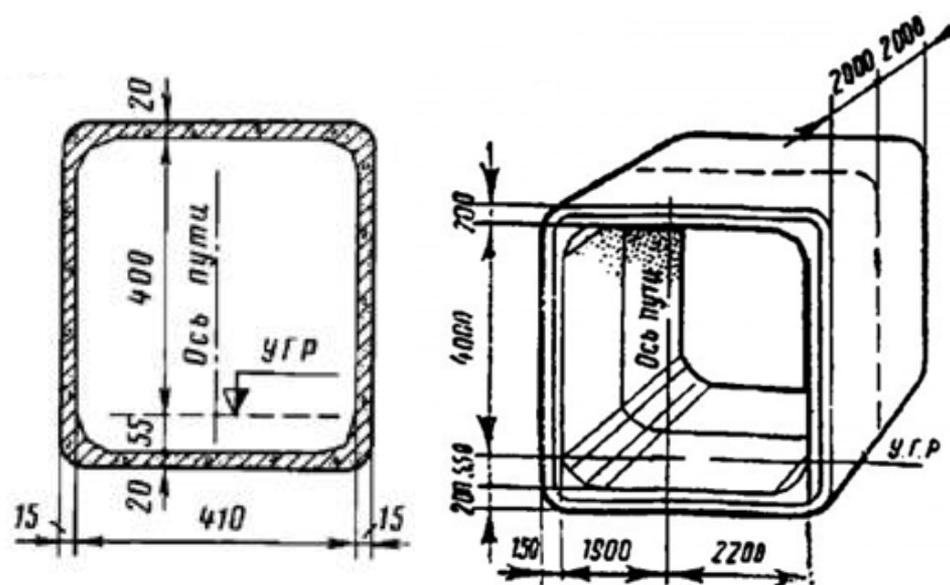


Рисунок 16 – Цельносекционная железобетонная обделка однопутного тоннеля

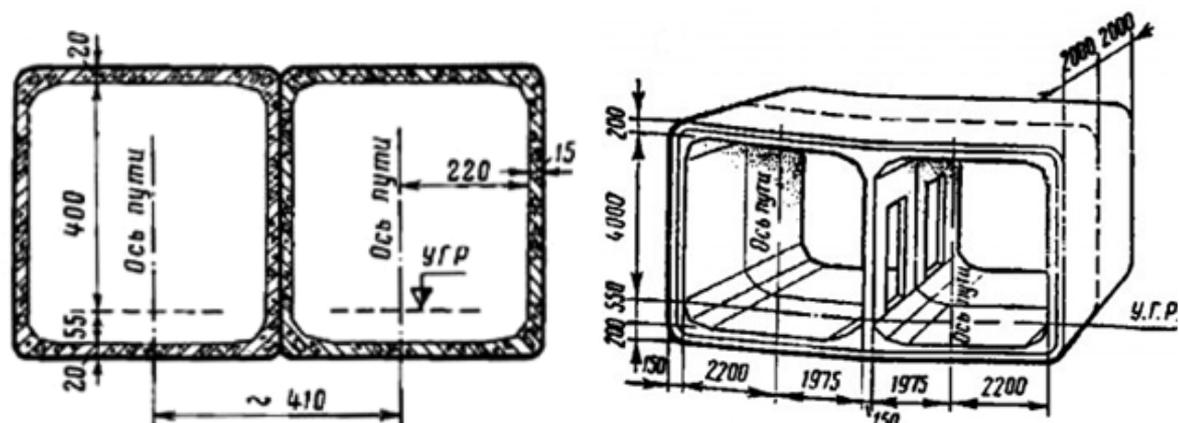


Рисунок 17 – Цельносекционная железобетонная обделка двухпутного тоннеля

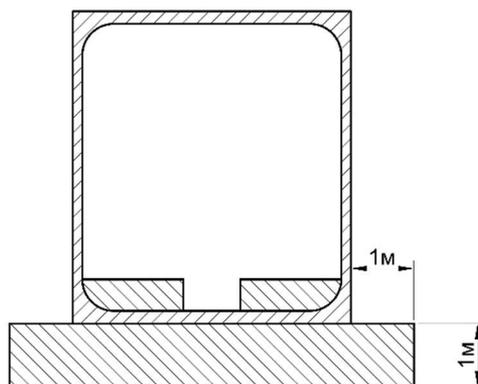


Рисунок 18 – Цельносекционная железобетонная обделка однопутного тоннеля с дополнительной массой в виде железобетонной плиты толщиной 1м в основании

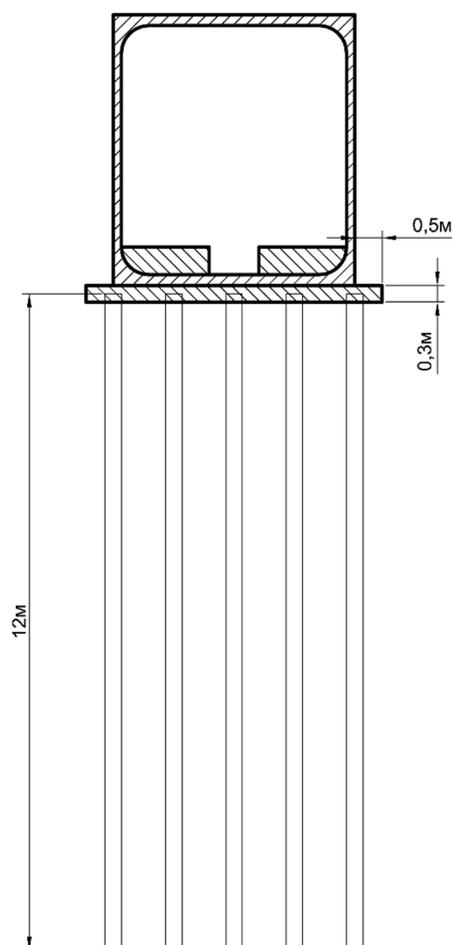


Рисунок 19 – Цельносекционная железобетонная обделка однопутного тоннеля с дополнительным свайным ростверком толщиной 0.3м в основании и забивными сваями 0.3x0.3x12м с шагом 1.1м

3.2 Результаты расчета и критерии сравнения

Для наглядного сравнения результатов все полученные уровни виброускорения нормировались относительно соответствующих уровней в точках приложения нагрузки, который принят за 0 дБ. Таким образом, на полученных картинах виброускорения по сути отображается передаточная функция с путевого бетона на различные точки в грунтовом массиве (результаты представлены в Приложении А и Б).

Отрицательные значения уровней виброускорения на полученных картинах означают, на сколько уменьшатся уровни вибраций в данных точках относительно исходного уровня воздействия.

Для всех картин построена диаграмма изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля. Графики по всем сводчатым обделкам представлены на рисунках 20-26. Графики по всем обделкам прямоугольного очертания представлены на рисунках 28-34.

Для грубой оценки влияния типа тоннельной обделки на санитарную зону, обеспечивающую допустимые уровни вибраций в типовых жилых зданиях, для каждой рассматриваемой обделки была построена картина с указанием соответствующих границ (Приложение А и Б). Для наглядности эти картины представлены на двух рисунках (рисунок 27 и 35).

Для расчета санитарной зоны в качестве ожидаемых величин в жилых помещениях приняты полученные уровни вибрации в точках грунта, соответствующих потенциальному месту расположения фундамента (в соответствии с п.3.1.4 СП 23-105-2004). При средних интервалах движения поездов метрополитена 2.2 мин днем и 4.5 ночью в обе стороны, санитарные нормы будут соблюдены, если среднеквадратические уровни виброускорения с коррекцией W_m не превысят 75.5 дБ. Это значение и использовалось в качестве граничной величины. При этом в качестве исходного воздействия принимались уровни виброускорения в полосах частот 16, 31.5 и 63 Гц равными 80, 106 и 110 дБ соответственно по п.3.2.1 таблице 3.2 СП 23-105-2004.

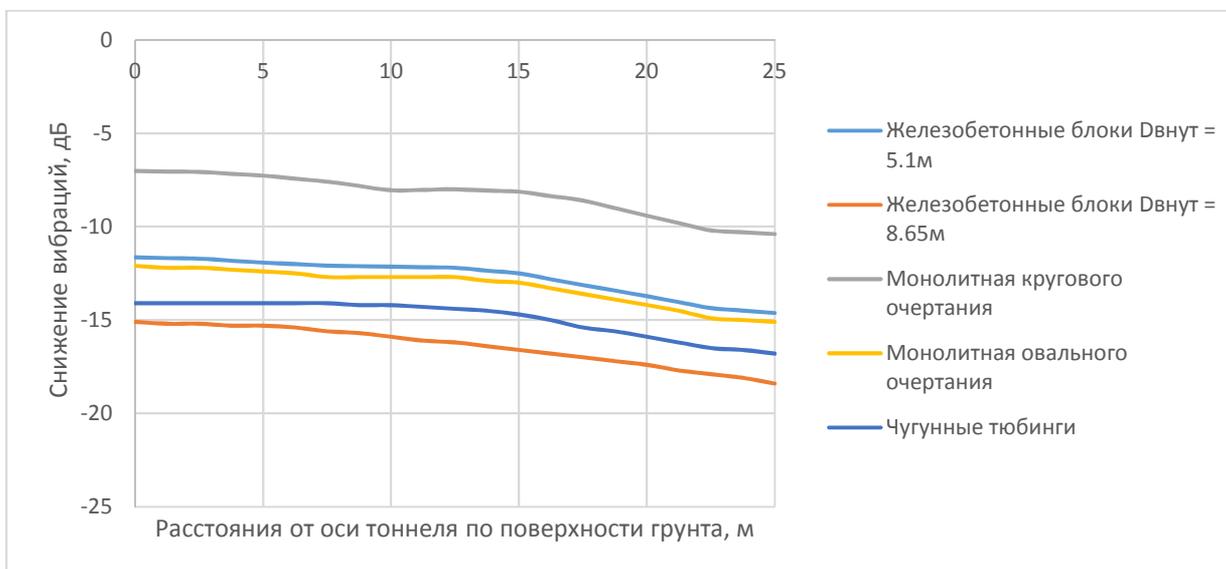


Рисунок 20 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для сводчатых тоннельных обделок на частоте 2 Гц

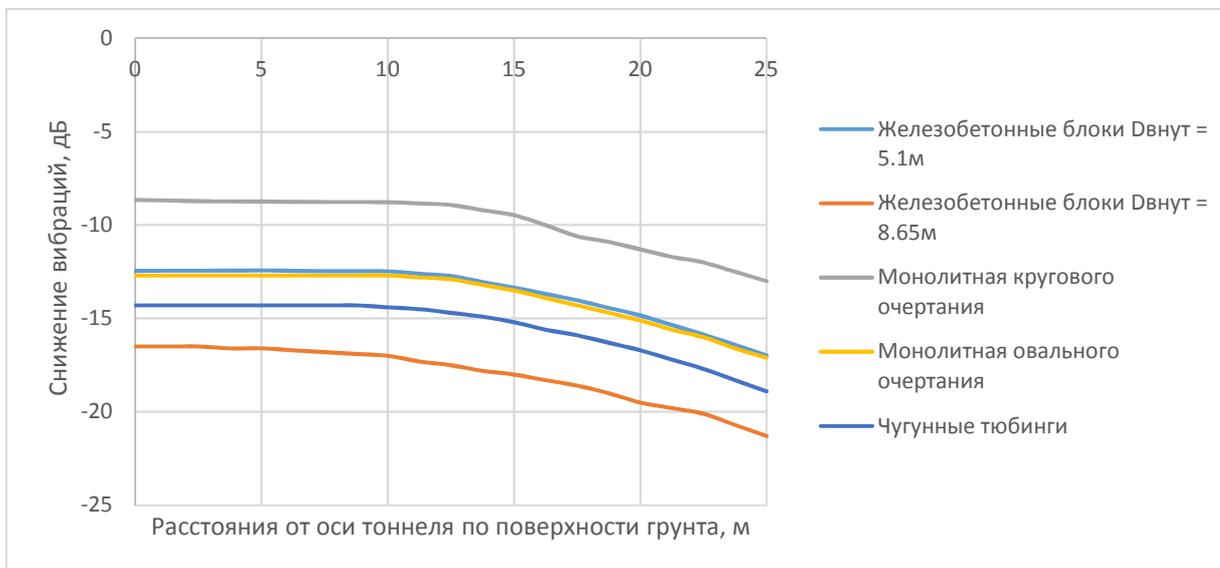


Рисунок 21 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для сводчатых тоннельных обделок на частоте 4 Гц

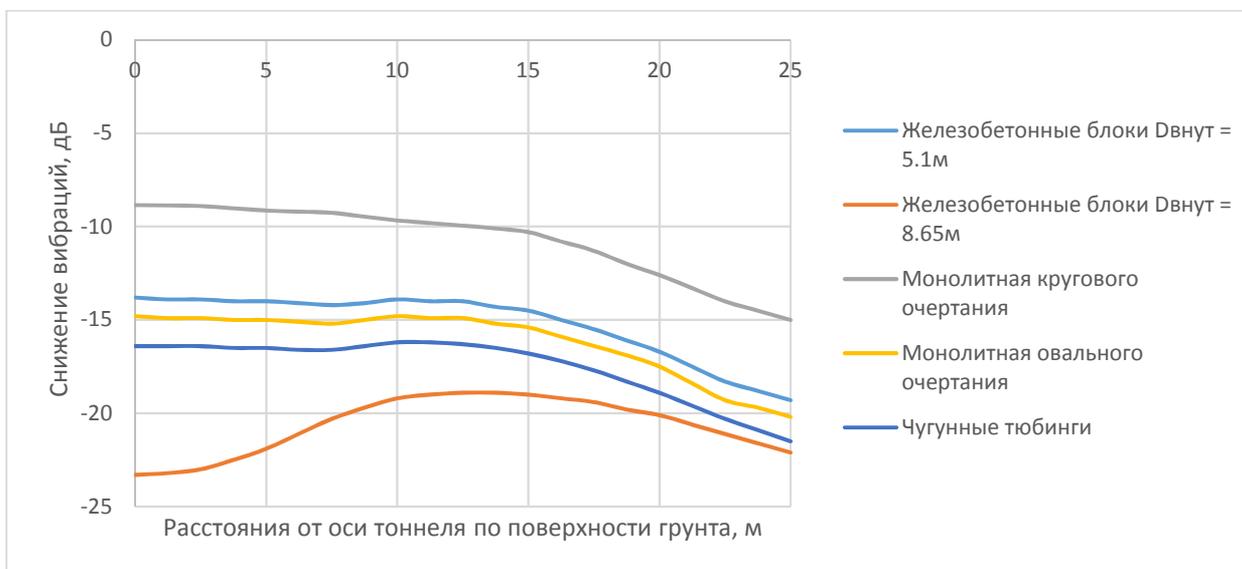


Рисунок 22 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для сводчатых тоннельных обделок на частоте 8 Гц

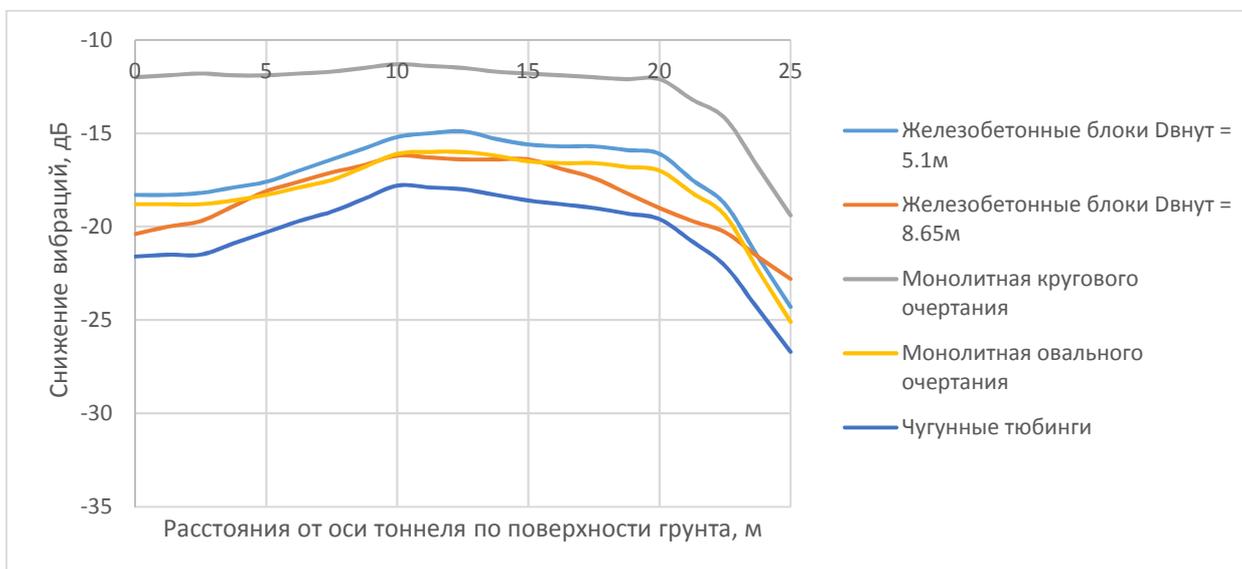


Рисунок 23 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для сводчатых тоннельных обделок на частоте 16 Гц

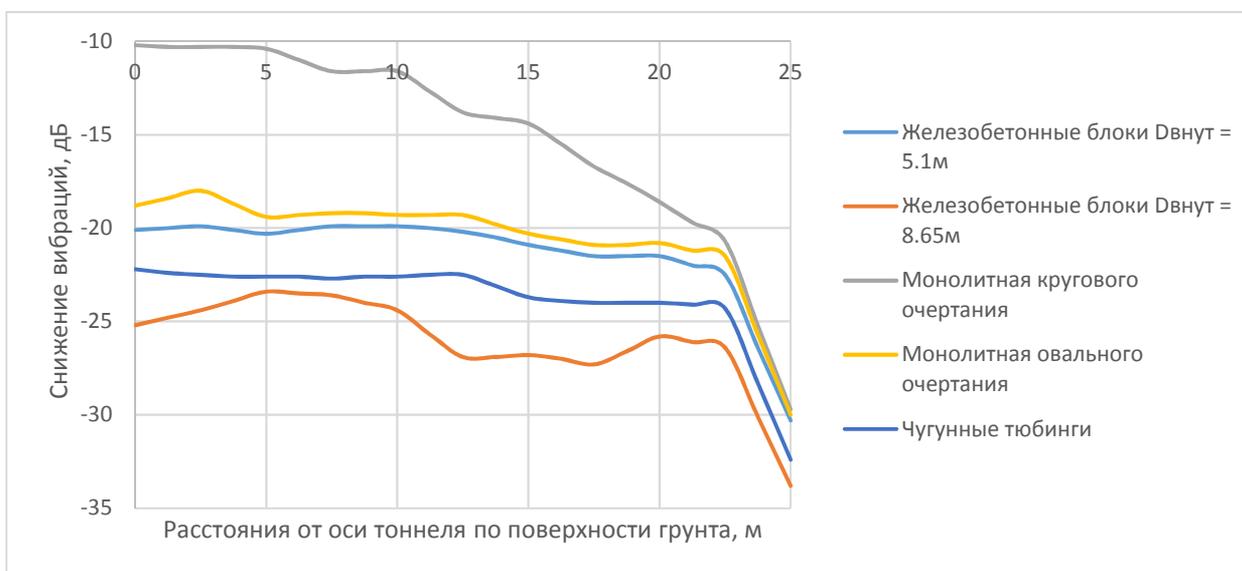


Рисунок 24 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для сводчатых тоннельных обделок на частоте 31.5 Гц

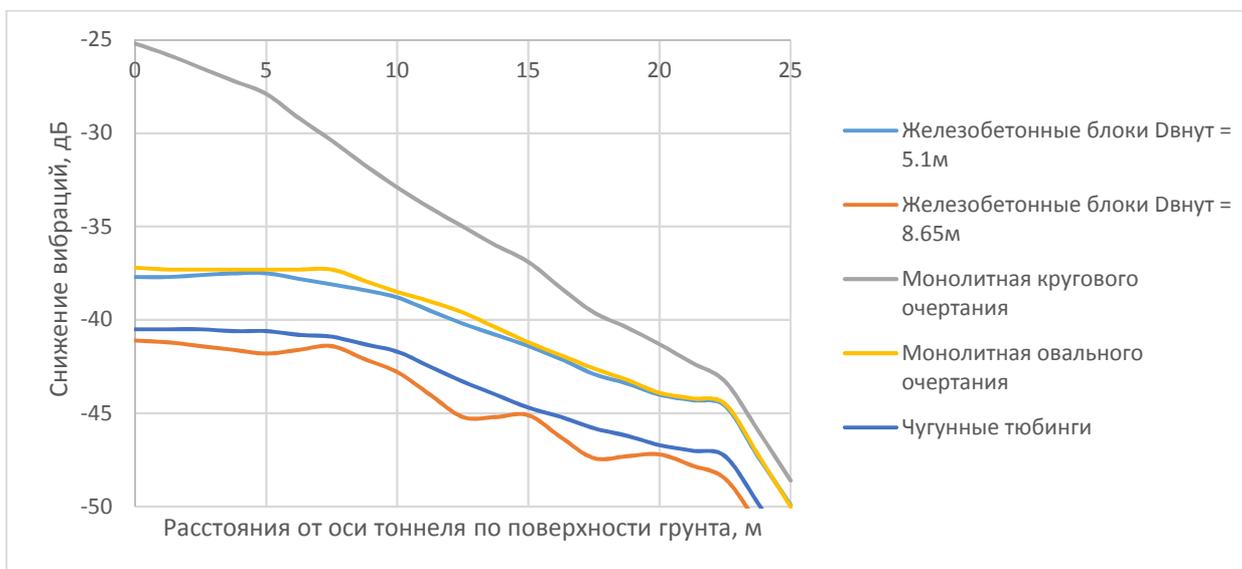


Рисунок 25 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для сводчатых тоннельных обделок на частоте 63 Гц

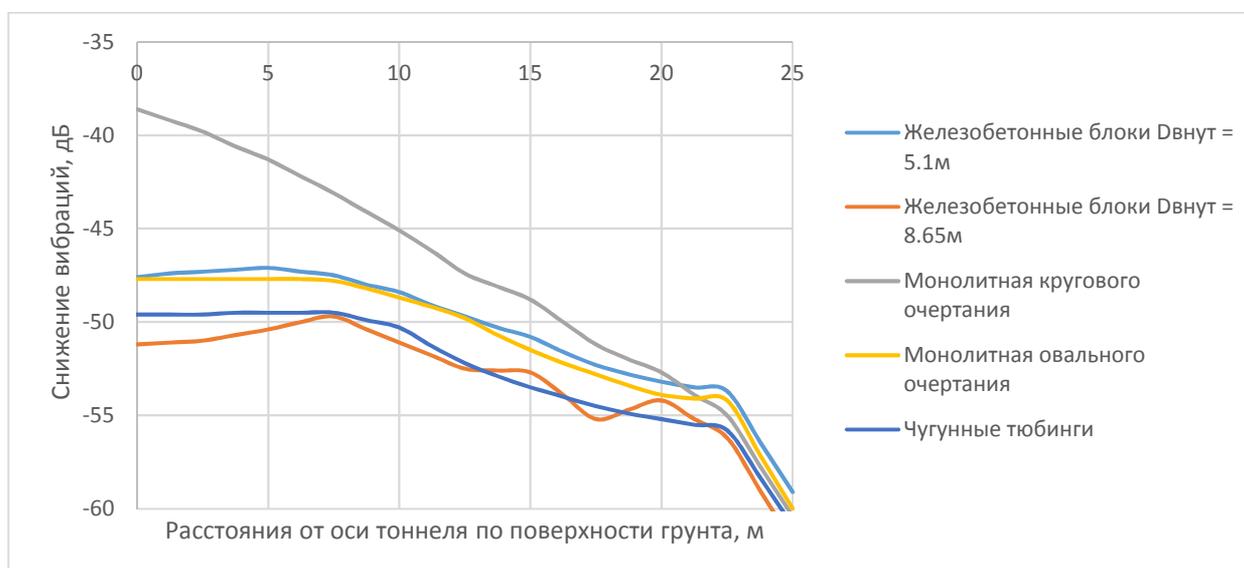


Рисунок 26 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для сводчатых тоннельных обделок на частоте 125 Гц

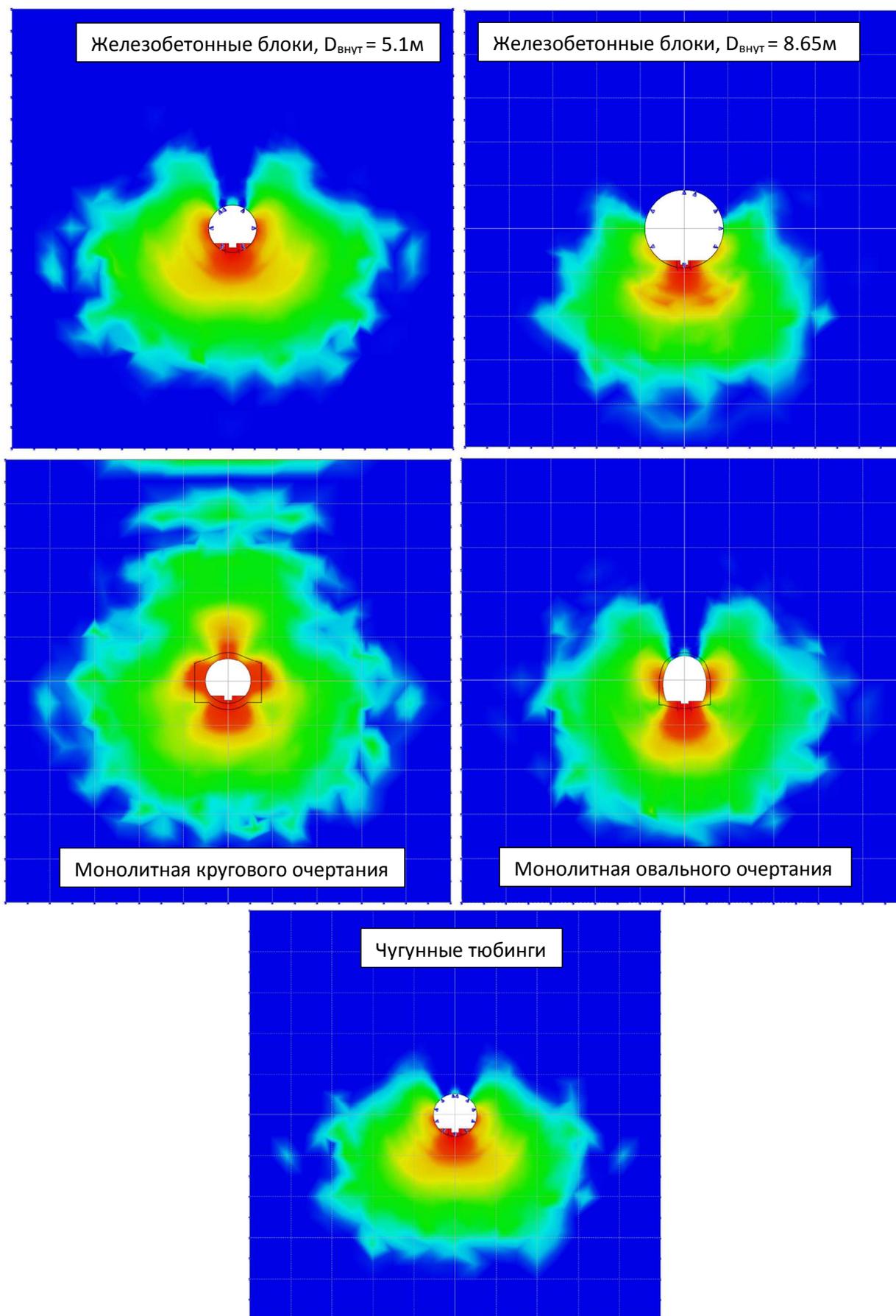


Рисунок 27 – Границы санитарных зон (синий фон) для жилых помещений по вибрационному воздействию для сводчатых тоннельных обделок

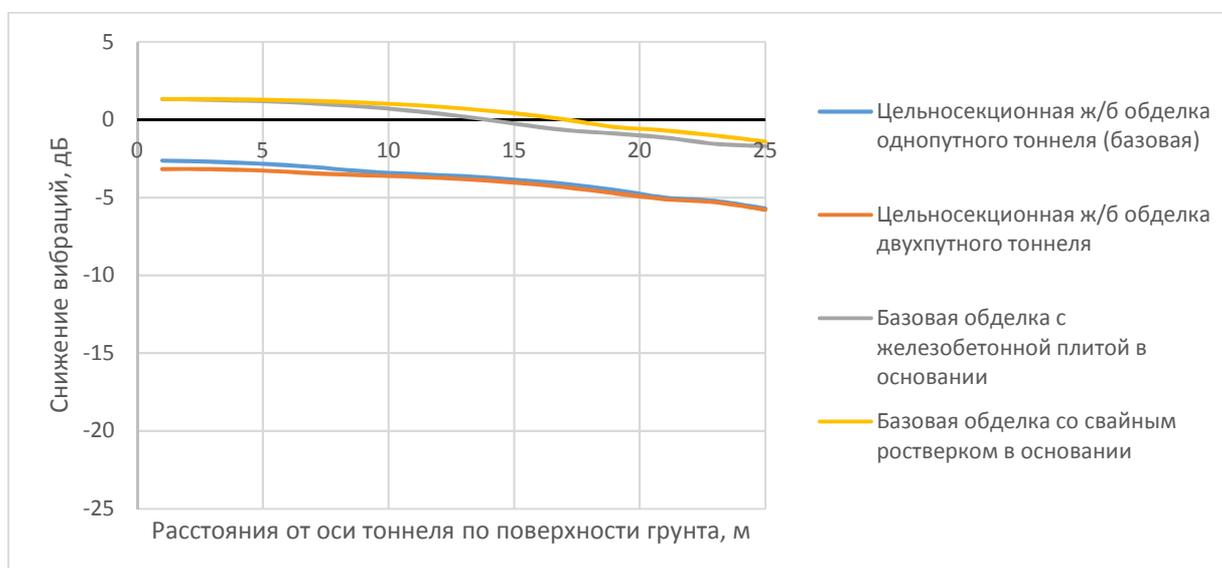


Рисунок 28 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для обделок прямоугольного очертания на частоте 2 Гц

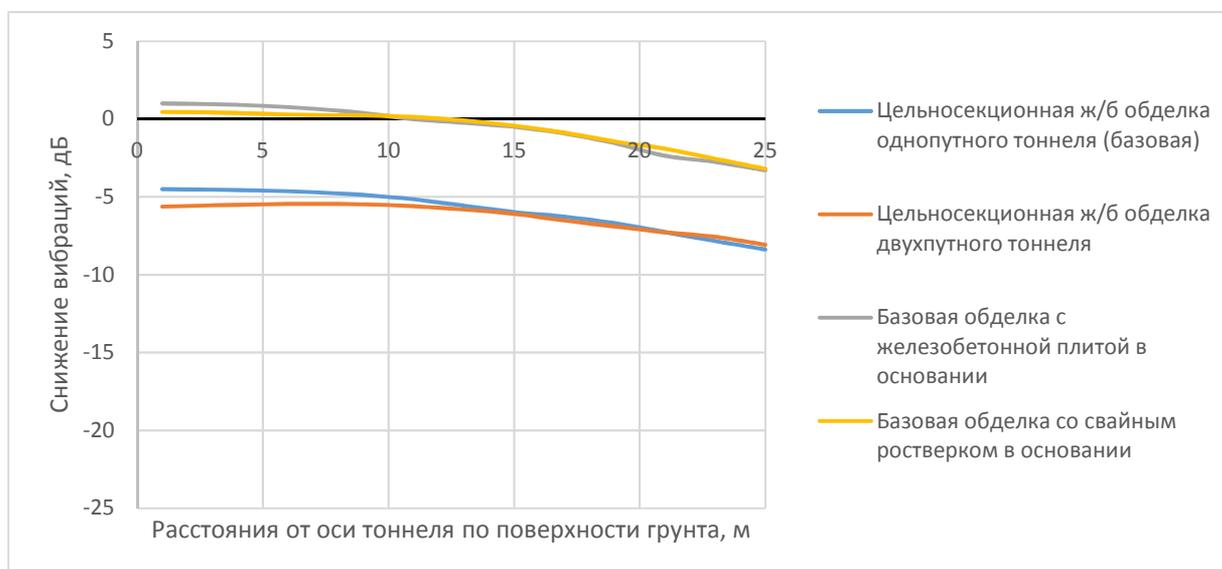


Рисунок 29 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для обделок прямоугольного очертания на частоте 4 Гц

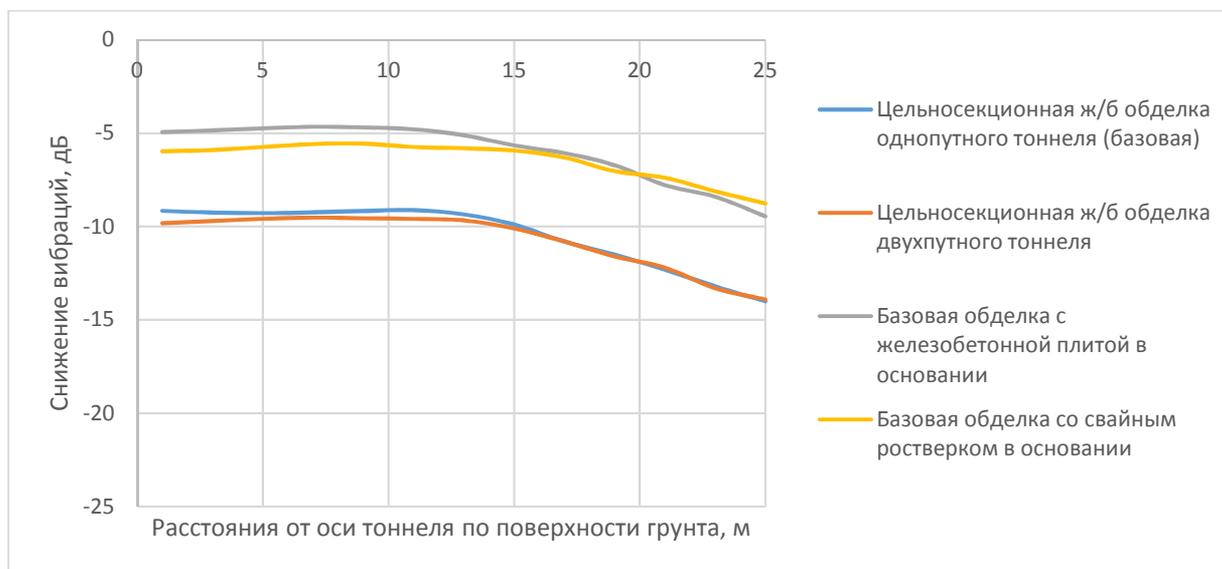


Рисунок 30 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для обделок прямоугольного очертания на частоте 8 Гц

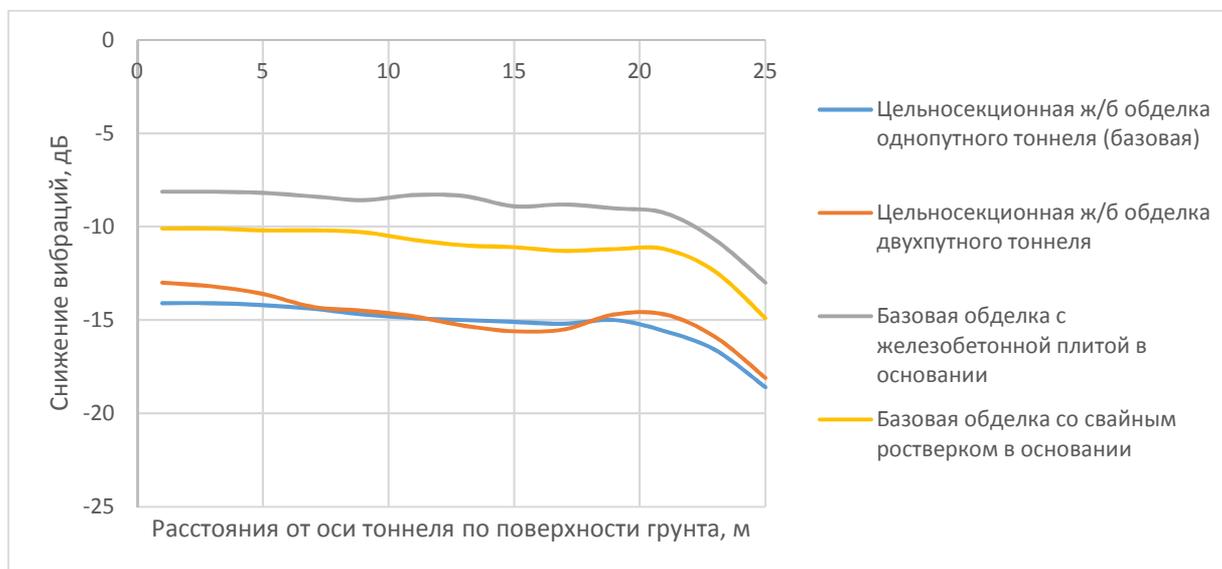


Рисунок 31 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для обделок прямоугольного очертания на частоте 16 Гц

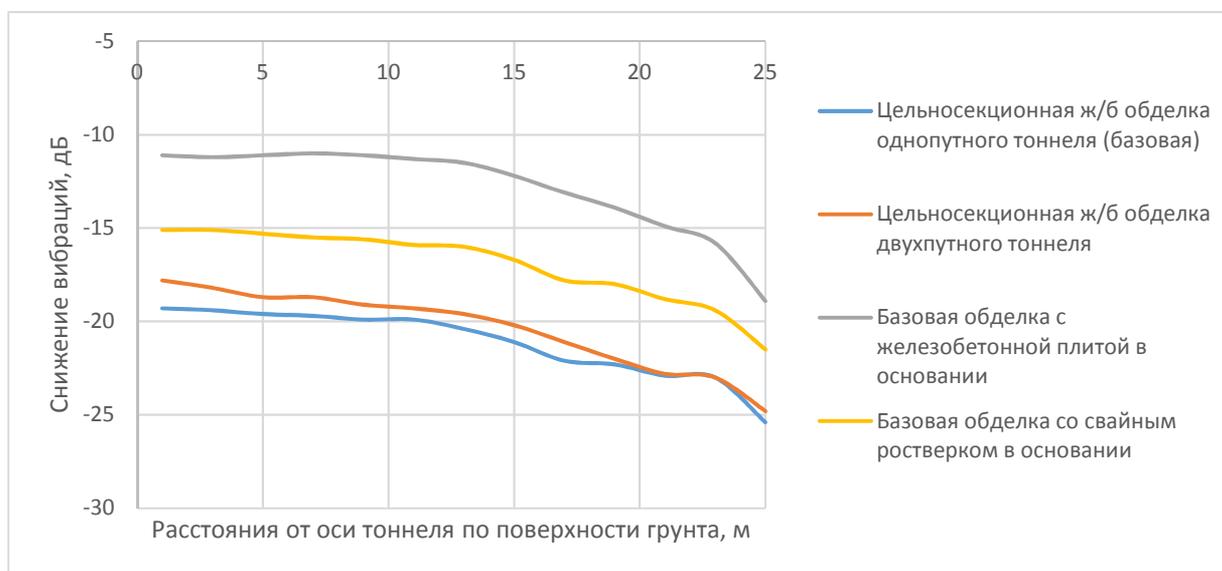


Рисунок 32 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для обделок прямоугольного очертания на частоте 31.5 Гц

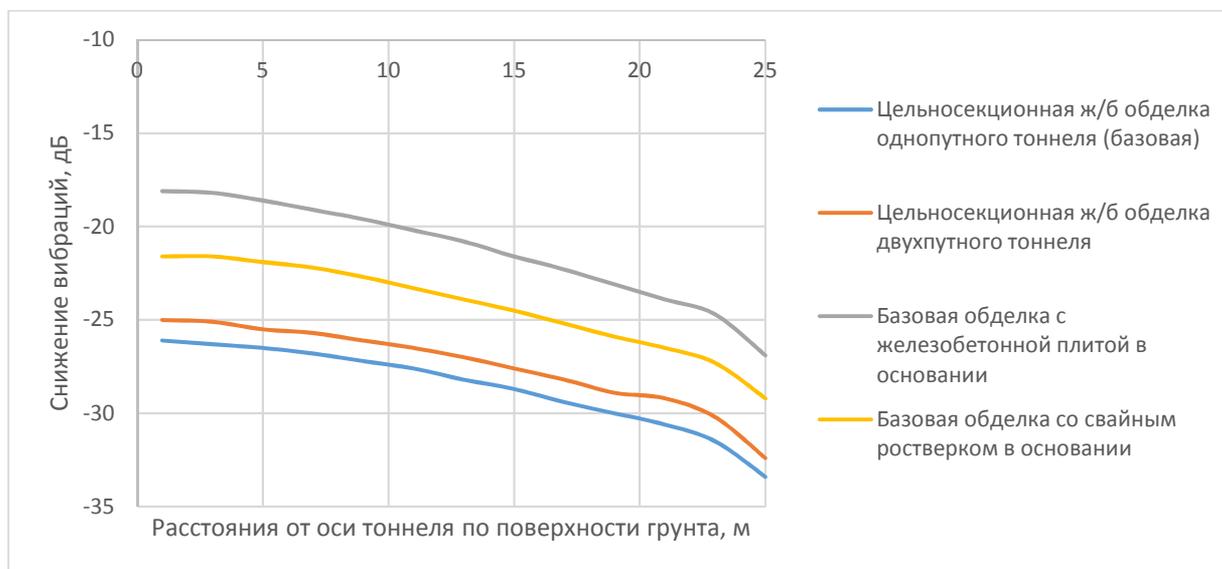


Рисунок 33 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для обделок прямоугольного очертания на частоте 63 Гц

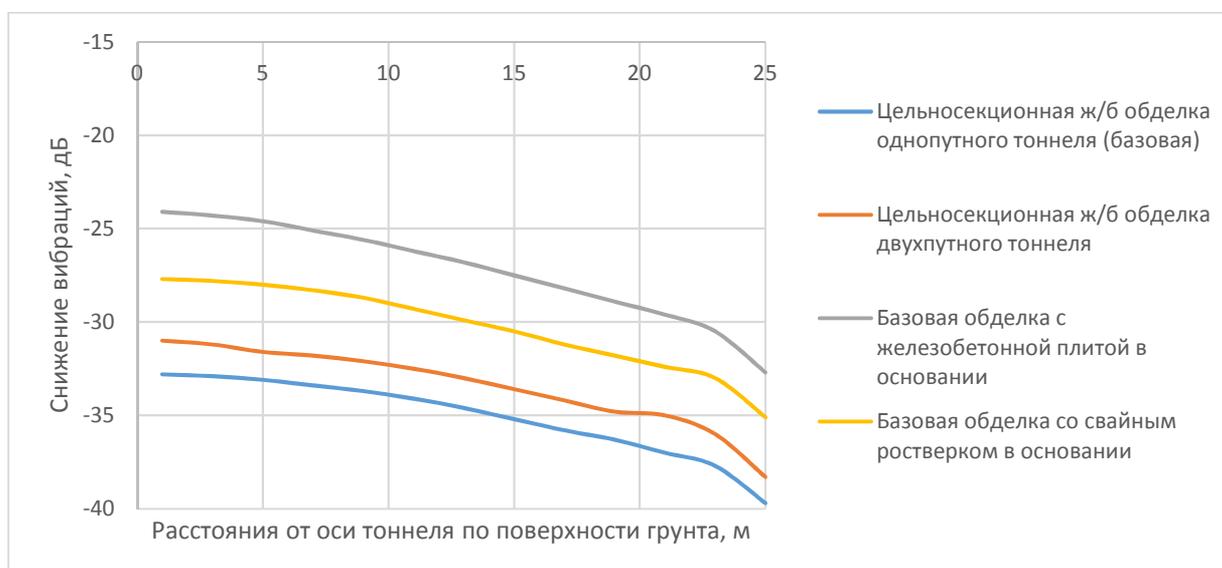


Рисунок 34 – Графики изменения уровней виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для обделок прямоугольного очертания на частоте 125 Гц

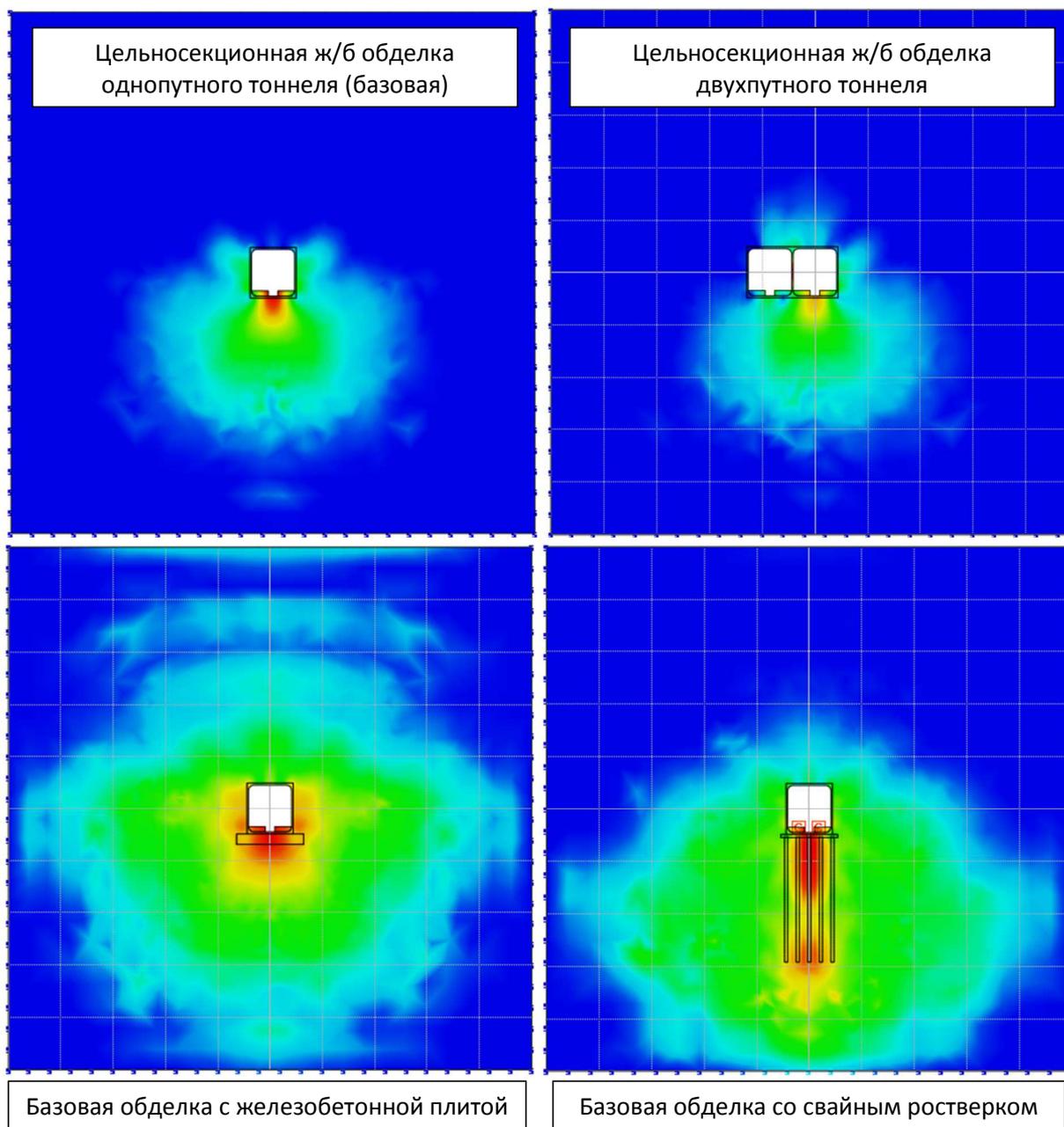


Рисунок 35 – Границы санитарных зон (синий фон) для жилых помещений по вибрационному воздействию для тоннельных обделок прямоугольного очертания

На рисунках 36 и 37 представлены результаты сравнения уровней корректированного по характеристике W_m виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для сводчатых обделок и обделок прямоугольного очертания. Одночисловая характеристика корректированного виброускорения удобна для сравнения и для предварительного анализа вибрационного воздействия по санитарным нормам.

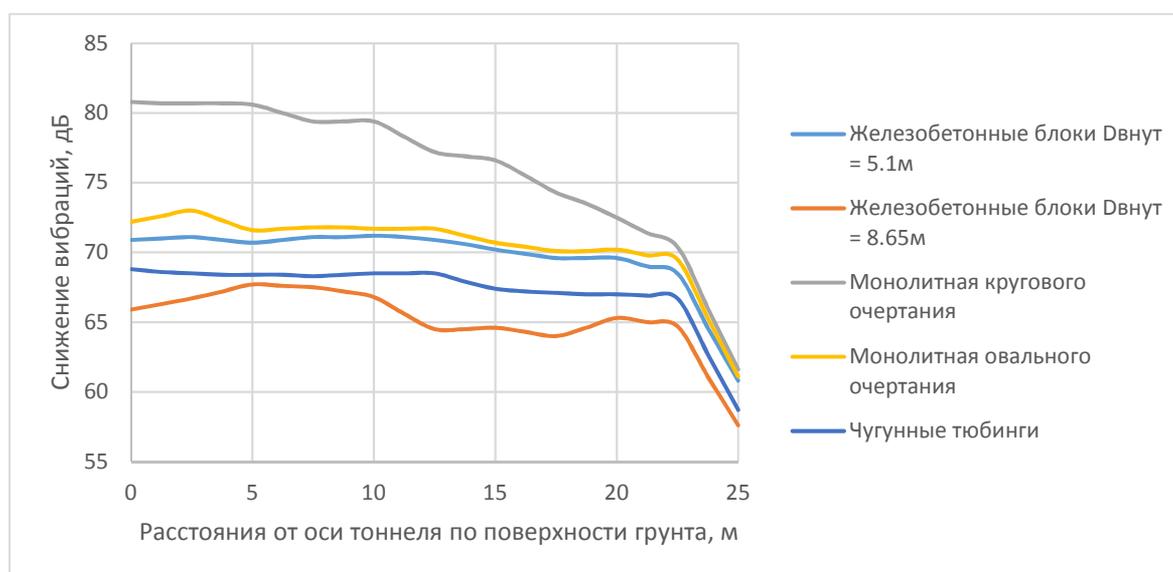


Рисунок 36 – Графики изменения уровней корректированного по характеристике W_m виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для сводчатых тоннельных обделок

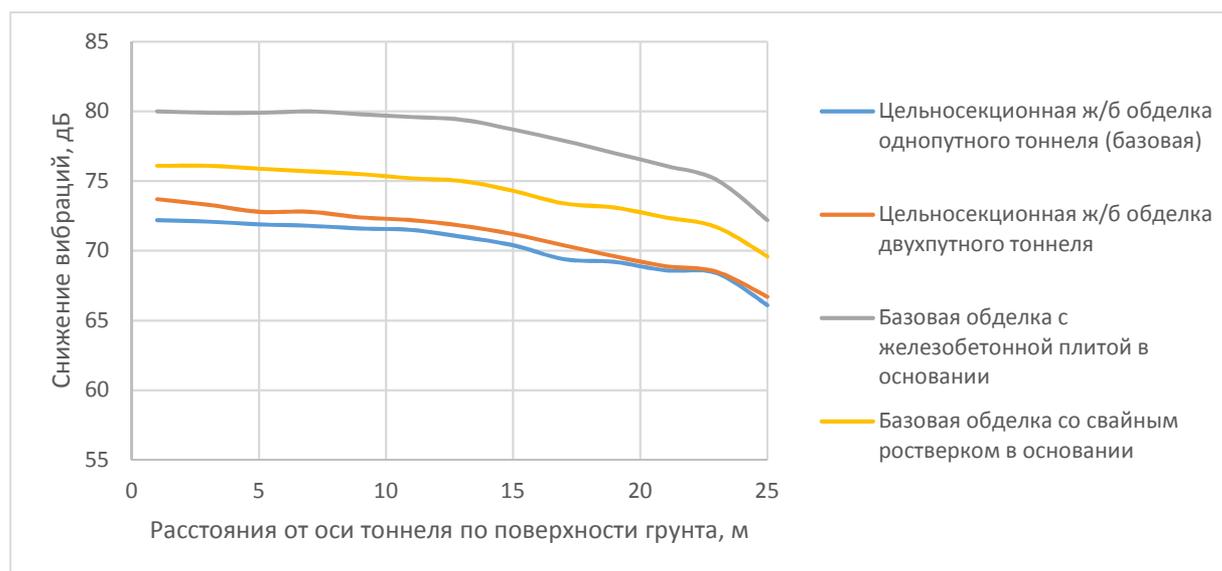


Рисунок 37 – Графики изменения уровней корректированного по характеристике W_m виброускорения на поверхности грунта относительно оси тоннеля для обделок прямоугольного очертания

4. Натурные измерения вибраций для проверки расчетов

Для проверки параметров модели была выбрана тоннельная обделка из чугунных тубингов. Для натуральных измерений с такой обделкой был выбран участок на пересечении ул. Академика Павлова и аллеи 11-ти Героев Саперов. На данном участке проходят тоннели мелкого заложения Арбатско-Покровской линии на глубине 10.3м до центра тоннеля. Тоннельная обделка выполнены из чугунных тубингов с внешним диаметром 5.5м и толщиной 0.2м.

Натурные измерения вибраций выполнялись 15.08.2017. Измерения проведены на поверхности грунта в 7 точках. Фиксировались уровни виброускорений по трем взаимно перпендикулярным направлениям в октавных полосах частот 16-125 Гц. В каждой точке измерений было замерено не менее 5 проходов поездов метрополитена. Схема расположения точек измерения представлена на рисунке 38.

Для обеспечения достоверности была проведена статистическая обработка и вычислены погрешности результатов измерения для каждой точки измерения. В качестве результата измерения в точках принималось среднее значение максимальных уровней вибраций от прохода всех поездов в точке с добавлением расширенной неопределенности U_p . Расширенная неопределенность U_p вычислялась при коэффициенте охвата 2, соответствующему уровню доверия 95% по ГОСТ Р 54500.3-2011.

В таблице 3 представлены результаты измерений уровней вибраций от прохода поездов метрополитена в точках с указанием расстояния до оси ближайшего тоннеля в плане.

Для дальнейших расчетов использовалась модель с теми же параметрами, что и в разделе 3.1, но при глубине заложения тоннеля 10.3м, соответствующей реальным условиям. Исходное воздействие изначально также принималось в виде единичной силы, изменяющейся по гармоническому закону. По результатам расчетов воздействие увеличивалась на такую величину, чтобы уровни вибраций на поверхности грунта на расстоянии 50м от тоннеля в плане соответствовали натурным измерениям в точке 7 в каждой

октавной полосе частот. В таблице 4 представлены полученные по такой методике исходные уровни вибраций лотковой части тоннельной обделки.

На рисунках 39-42 представлены картины распределения максимальных ускорений в грунте для частот 16-125 Гц. На рисунке 43 представлены графики сравнения уровней вибраций на поверхности грунта по результатам натуральных измерений и расчетной модели.

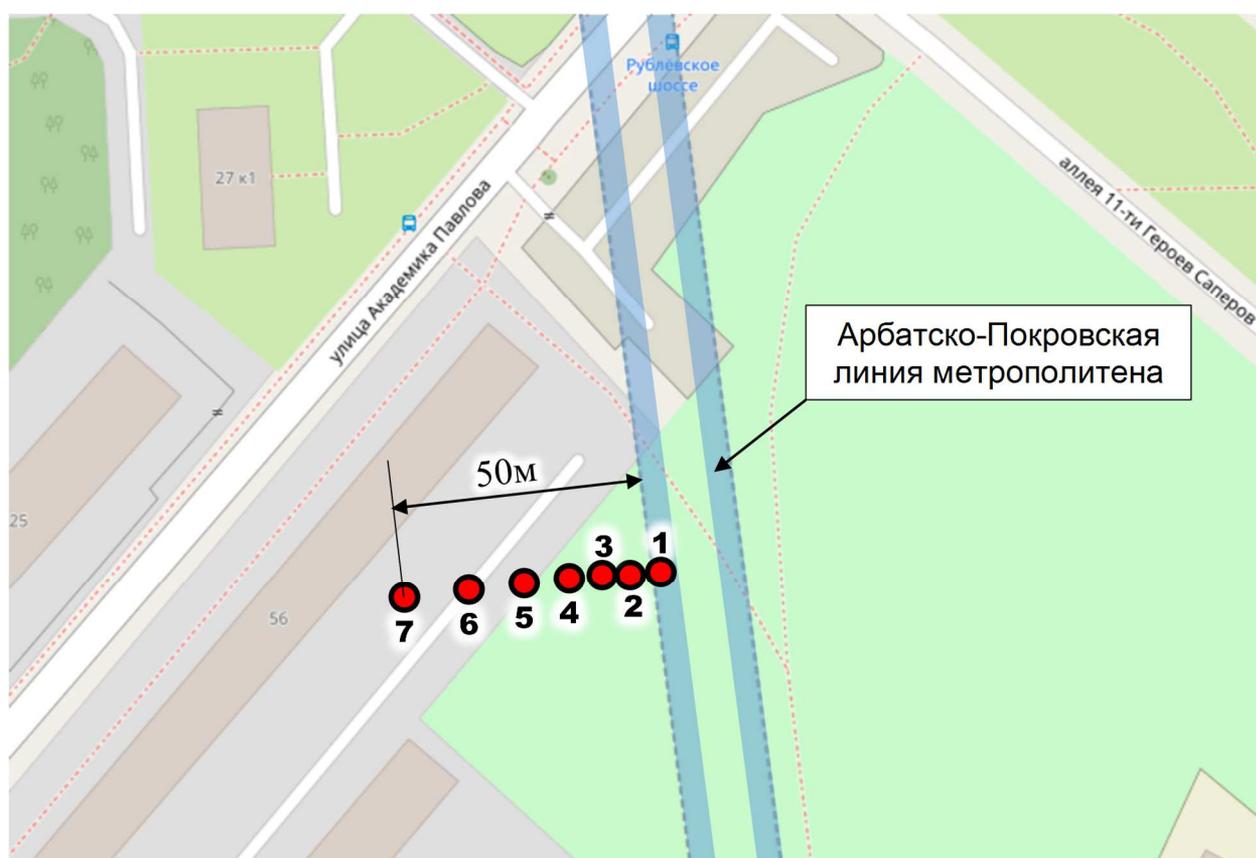


Рисунок 38 – Схема расположения точек измерения и тоннелей метрополитена

Точка	Расстояния до оси тоннеля в плане	Максимальные уровни виброускорения по трем направлениям в точке, дБ			
		16 Гц	31.5 Гц	63 Гц	125 Гц
1	0м	59.4 ±0.5	85.2 ±1.3	92.2 ±0.8	82.4 ±1.1
2	2.5м	60.8 ±1.8	90.1 ±0.6	99.7 ±1.0	74.4 ±1.1
3	6м	59.3 ±1.4	76.5 ±1.2	78.5 ±1.6	70.4 ±1.4
4	13м	56.2 ±1.0	79.2 ±1.7	85.7 ±2.4	68.9 ±2.9
5	25м	58.3 ±1.0	77.7 ±1.6	81.3 ±1.2	67.1 ±2.4
6	35м	53.2 ±1.8	76.4 ±1.8	78.1 ±1.3	63.2 ±1.3
7	50м	52.7 ±0.9	72.3 ±1.5	76.8 ±1.1	61.3 ±1.8

Таблица 3 – Максимальные уровни вибраций от поездов метро с учетом расширенной неопределенности U_p

Источник	Уровни виброускорения в октавных полосах частот, дБ			
	16 Гц	31.5 Гц	63 Гц	125 Гц
Полученные исходные уровни вибраций тоннельной обделки	69.7	101.7	109.1	120.9
Максимальные уровни вибраций тоннельной обделки по СП 23-105-2004 (справочно)	80	106	110	–

Таблица 4 – Полученные исходные уровни вибраций лотковой части тоннельной обделки

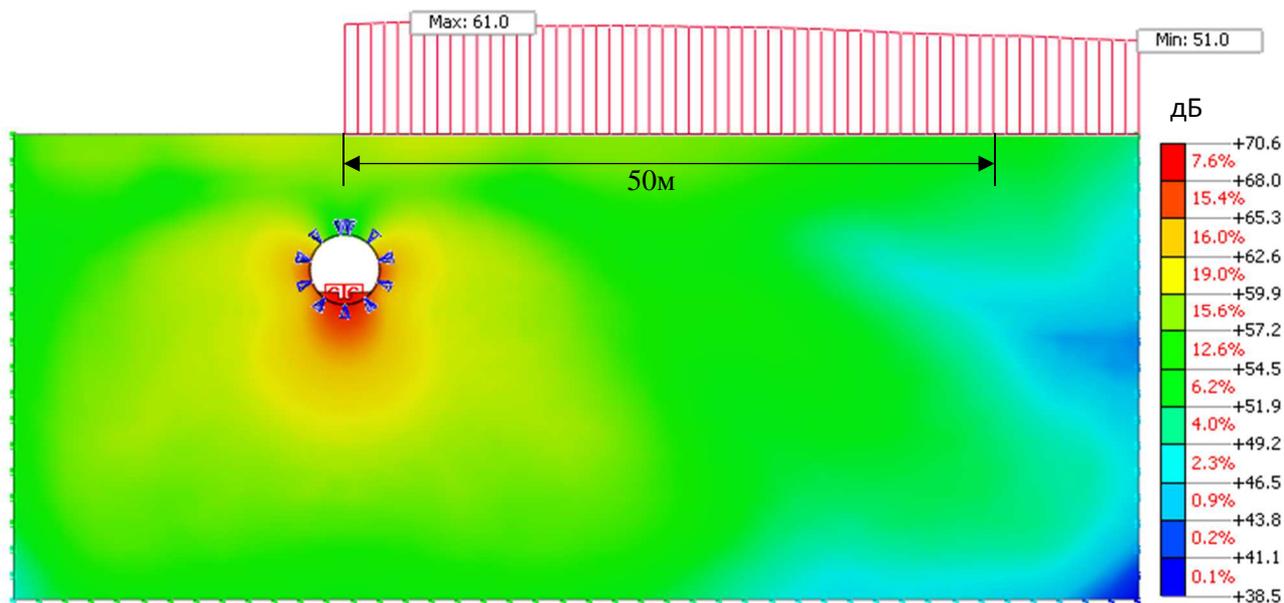


Рисунок 39 – Картины распределения максимальных ускорений в грунте для частоты 16 Гц

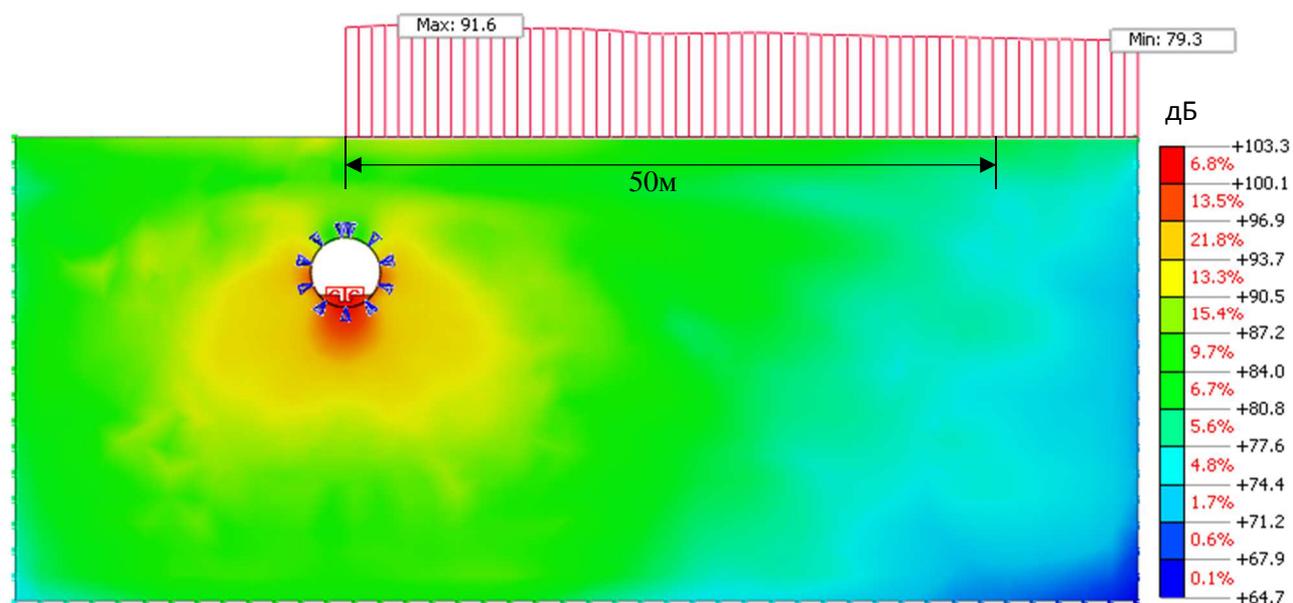


Рисунок 40 – Картины распределения максимальных ускорений в грунте для частоты 31.5 Гц

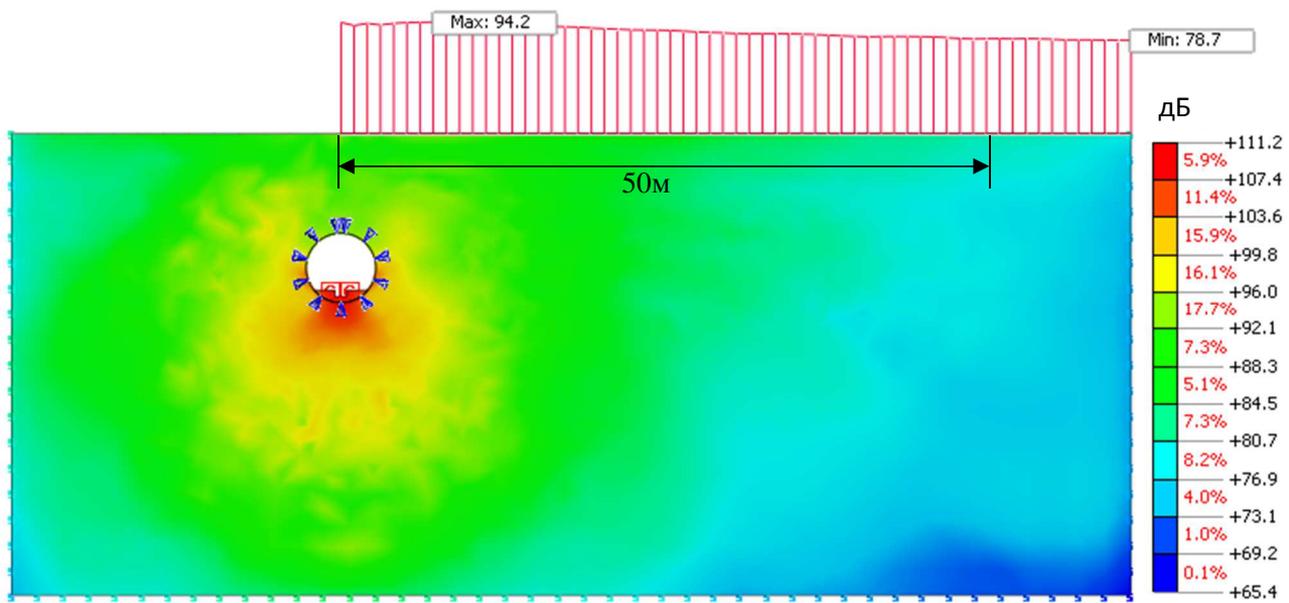


Рисунок 41 – Картины распределения максимальных ускорений в грунте для частоты 63 Гц

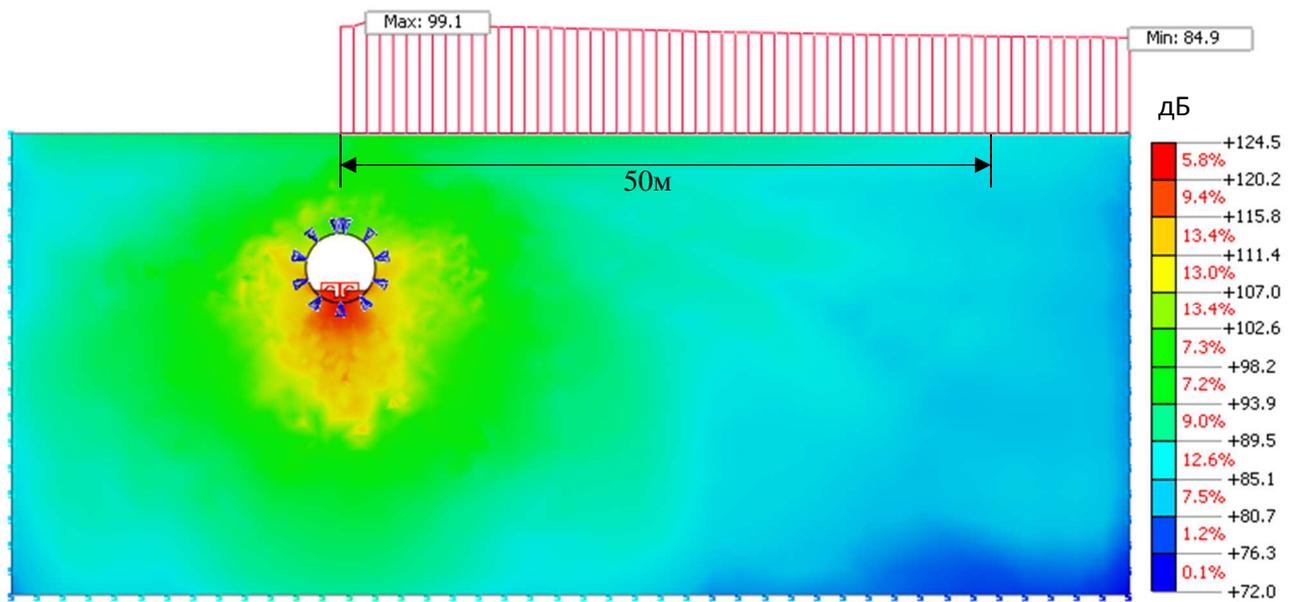


Рисунок 42 – Картины распределения максимальных ускорений в грунте для частоты 125 Гц

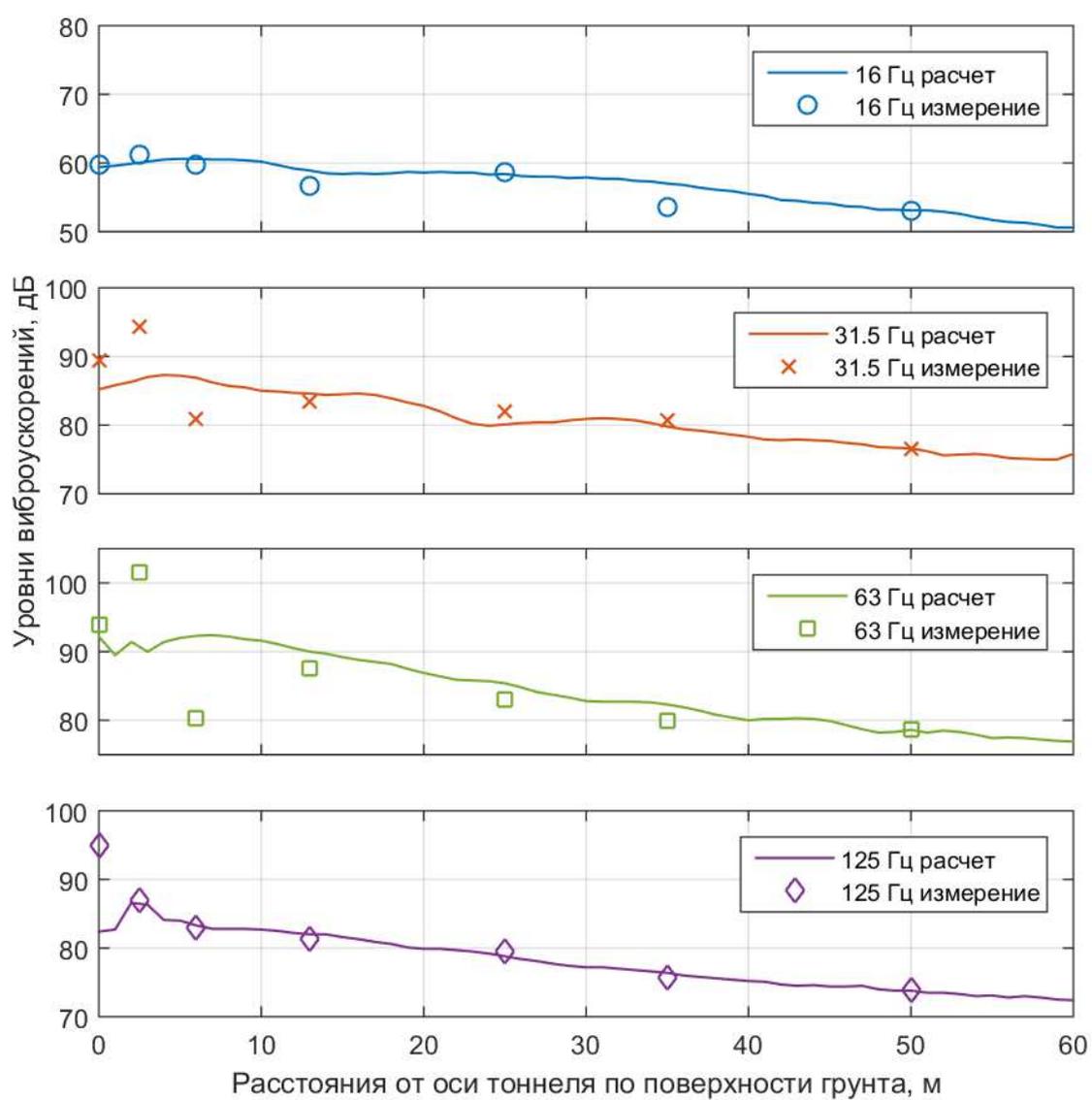


Рисунок 43 – Сравнение уровней вибраций на поверхности грунта по результатам натуральных измерений и расчетной модели

Заключение

1) В отчете представлены результаты численного моделирования распространения вибраций от различных типов тоннельных обделок и сравнения их между собой. Во всех случаях рассматривалась одинаковая глубина заложения тоннелей 25м до его оси. В качестве окружающего грунта для всех случаев принимался характерный для московского региона песчаный грунт (скорость распространения продольных волн $V_p = 400$ м/с).

2) В работе рассматривалось 5 типов обделок сводчатого очертания, 2 типа прямоугольного очертания и 2 варианта обделок прямоугольного очертания с добавлением массивных конструкций в основании: железобетонной плиты и свайного ростверка.

3) По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

- Обделка кругового очертания из чугунных тубингов позволяет снизить вибрации на поверхности земли на 2-3 дБ больше, чем обделка из железобетонных блоков схожего диаметра по скорректированным уровням виброускорения;

- Монолитная обделка овального очертания по картинкам распространения вибраций приближается к обделке из железобетонных блоков;

- Монолитная массивная обделка из бетона с толщиной до 0.7м ввиду своей жесткости распространяет вибрации практически во всех направлениях одинаково. При этом над тоннелем уровни становятся выше на 10 дБ по скорректированным уровням виброускорения по сравнению со сборными обделками кругового очертания. Разница сходит на нет на расстоянии около 22м от оси тоннеля;

- Железобетонная обделка из блоков большого диаметра оказалась наиболее эффективной с точки зрения снижения уровней вибраций на поверхности земли. Такой эффект достигается за счет ее достаточно низкой жесткости и в то же время широкой площади соприкосновения с грунтом, которая позволяет рассеивать большую часть энергии в толщу грунта.

- Цельносекционная железобетонная обделка прямоугольного очертания по эффективности сопоставима с железобетонной обделкой круглого очертания. Цельносекционная однопутная и двухпутная обделка

отличаются друг от друга незначительно, при этом последняя хуже на 1-2 дБ по скорректированным уровням виброускорения;

– Добавление железобетонной плиты толщиной 1м в основание цельносекционной обделки дало отрицательный эффект и увеличило скорректированные уровни виброускорения на поверхности земли почти на 12 дБ. Это происходит из-за сильно возросшей жесткости основания, при которой обделка в большей степени колеблется как единое целое, увеличивая распространение вибрации во все стороны, в том числе и вверх от тоннеля.

– Добавление свайного ростверка в основание цельносекционной обделки также дало отрицательный эффект и увеличило скорректированные уровни виброускорения на поверхности земли на 4 дБ. Увеличившаяся жесткость основания не скомпенсировала более эффективный отвод энергии в толщу грунта за счет свай, играющих роль волноводов. При наличии скального основания, на которое можно было бы опереть сваи и передавать в него энергию вибраций, эффективность такого решения была бы существенно выше.

4) Сравнение результатов численного моделирования при использовании предложенных параметров модели и натурных измерений уровней вибрации на поверхности грунта показало их высокую сходимость на расстоянии более 5м от оси тоннеля.

5) По результатам анализа результатов можно сделать следующие обобщения:

– Форма тоннельной обделки незначительно влияет на распространение вибраций в окружающий грунт;

– Увеличение размера тоннельной обделки значительно снижает распространение вибраций в верхнюю полуплоскость грунтового массива при глубине заложения тоннелей 25м и менее;

– Менее жесткая тоннельная обделки более эффективна, чем жесткая за счет концентрированной передачи энергии вибрации в нижнюю полуплоскость грунтового массива;

– Добавление массы тоннельной обделки без существенного увеличения ее жесткости или жесткости основания сложно реализуемо на практике. При отсутствии должных расчетов или проведенных опытов может привести к отрицательному эффекту.

Список литературы

[1] Remington. P.J., Kurtweil, L.G. and Tower. D.A. Low-frequency noise and vibrations from trains. In: Transportation noise reference book. Ed. Nelson. P.M. London: Butterworths, 1987.

[2] Eitzenberger A. Train-induced Vibrations in Tunnels – A Review. Luleå University of Technology. SE-971 87 Luleå. Sweden, 2008

[3] S. Gupta, Y. Stanus, G. Lombaert, G. Degrande. Influence of tunnel and soil parameters on vibrations from underground railways. Journal of Sound and Vibration Volume 327, Issues 1–2, 23 October 2009, Pages 70–91.

[4] Y.B. Yang, F. ASCE, H.H. Hung. Soil Vibrations Caused by Underground Moving Trains. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134, No. 11, November 1, 2008.

[5] W. Unterberger, R. Poisel, C. Honeger, Numerical prediction of surface vibrations caused by high-speed rail traffic in tunnels, Proceedings of the World Tunnel Congress, Vienna, Austria, April 1997.

[6] Kazamaki. T. and Watanabe, T. (1975). Reduction of solid borne sound from a subway. In: Proceeding of the 4 th International Conferences on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 75), Sendai, Japan, August 27-29 1975. 85-92.

[7] «Мы строим метро», изд. «Московский рабочий», 1983

[8] J. Lysmer and R. L. Kuhlemeyer, “Finite Dynamic Model for Infinite Media” Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 95, No. EM4, 1969, pp. 859-877

[9] Thomas Benz, «Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences», Germany, 2007

[10] Волков В.П., Наумов С.Н., Пирожкова А.Н. «Тоннели и метрополитены», М.: Издательство "Транспорт", 1975 г. - 551 с.

Приложение А

Уровни вибраций в полубесконечном грунтовом массиве
 Обделка кругового очертания из чугунных тубингов, $D_{внут} = 5.1\text{м}$

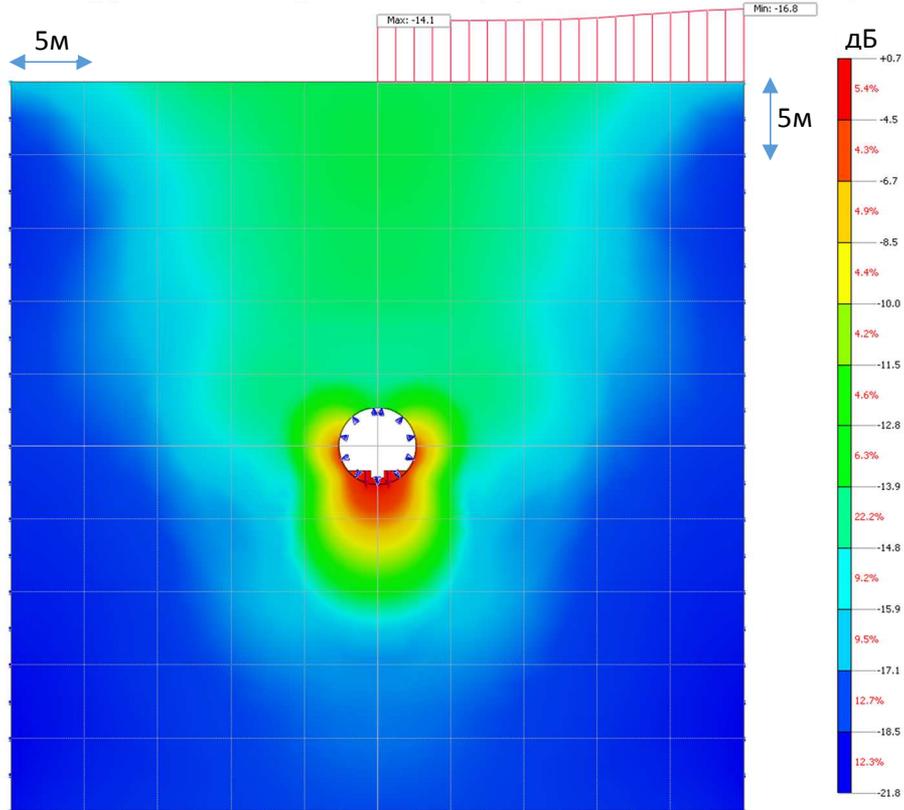


Рисунок А.1 – Снижение уровней виброускорений в грунте при обделке кругового очертания из чугунных тубингов на частоте 2 Гц

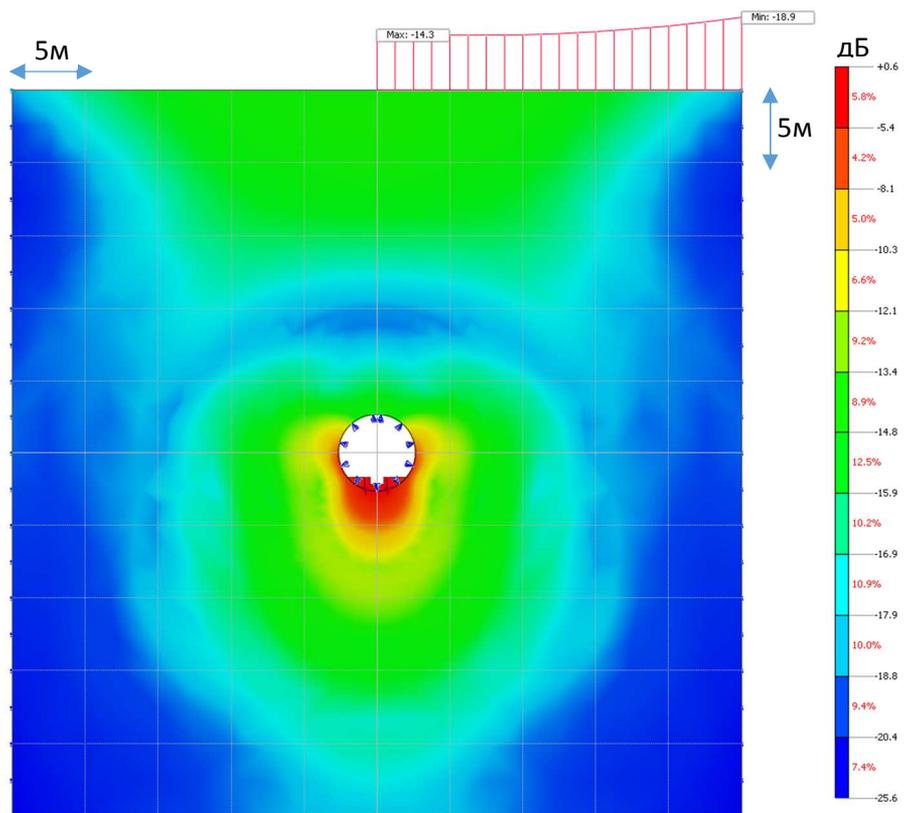


Рисунок А.2 – Снижение уровней виброускорений в грунте при обделке кругового очертания из чугунных тубингов на частоте 4 Гц

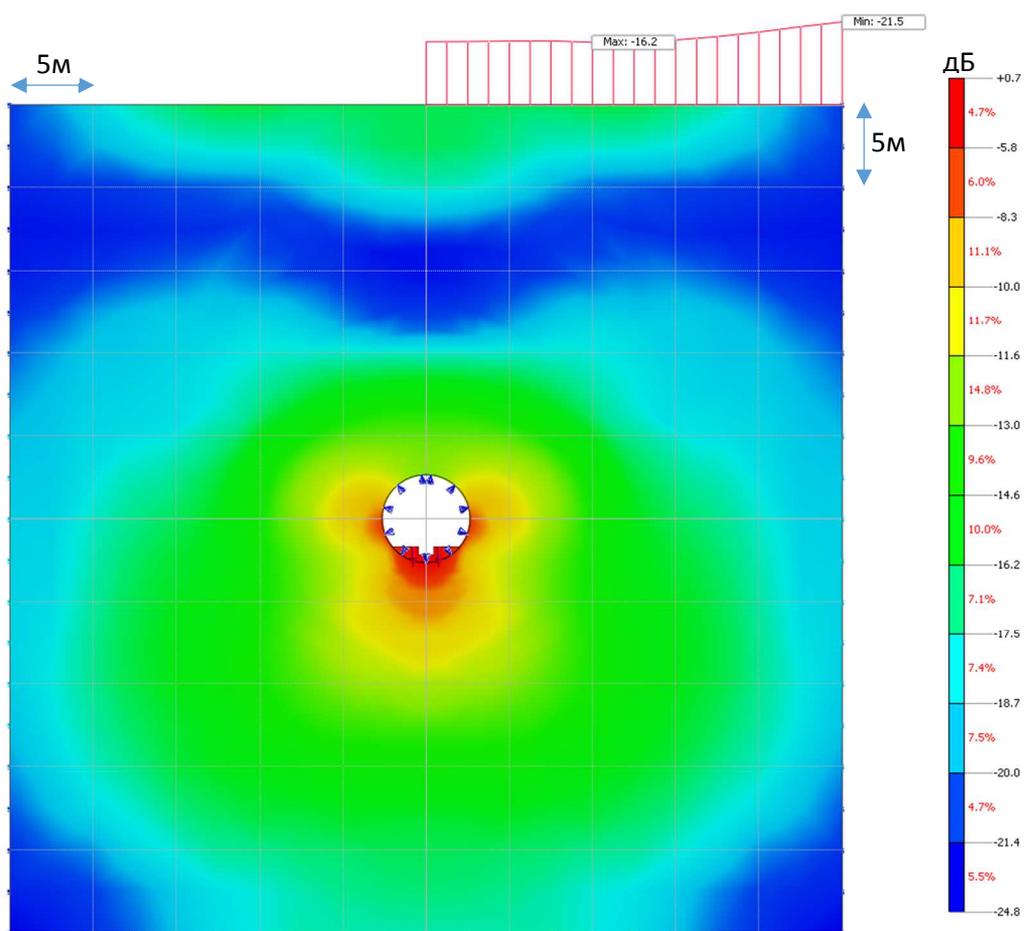


Рисунок А.3 – Снижение уровней виброускорений в грунте при обделке кругового очертания из чугунных тубингов на частоте 8 Гц

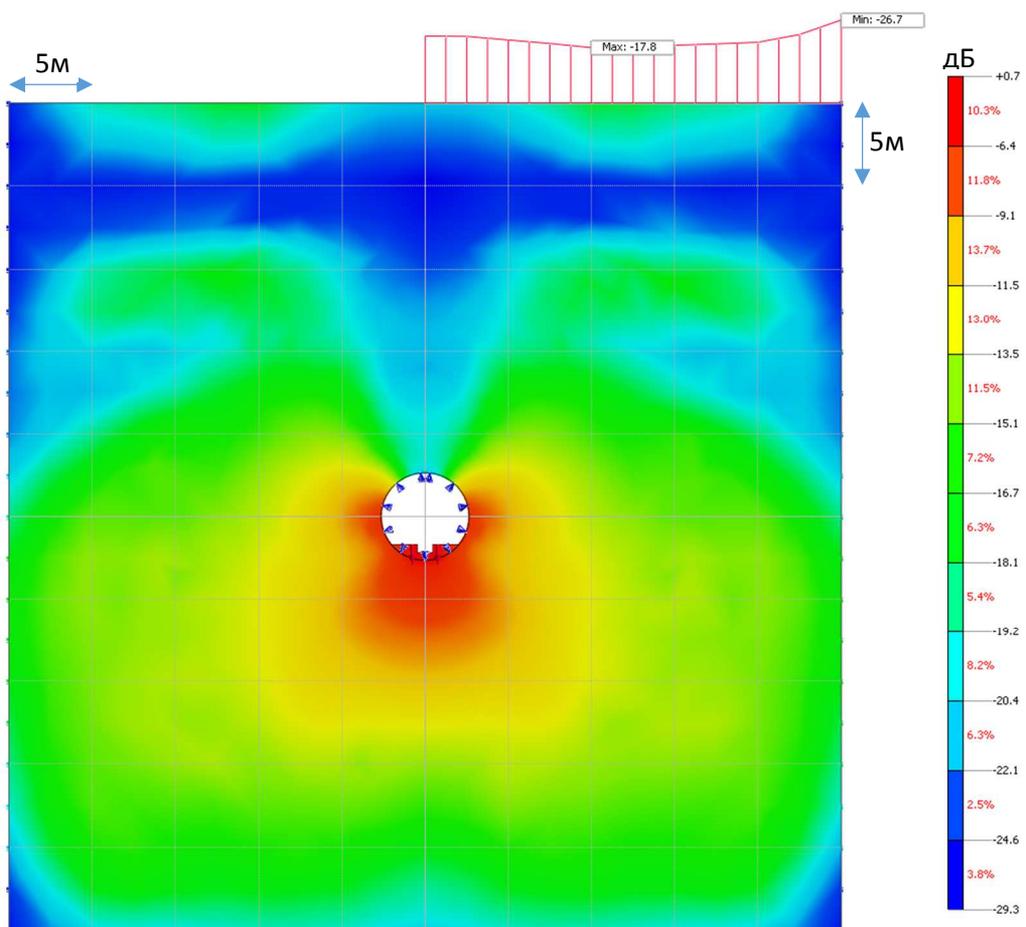


Рисунок А.4 – Снижение уровней виброускорений в грунте при обделке кругового очертания из чугунных тубингов на частоте 16 Гц

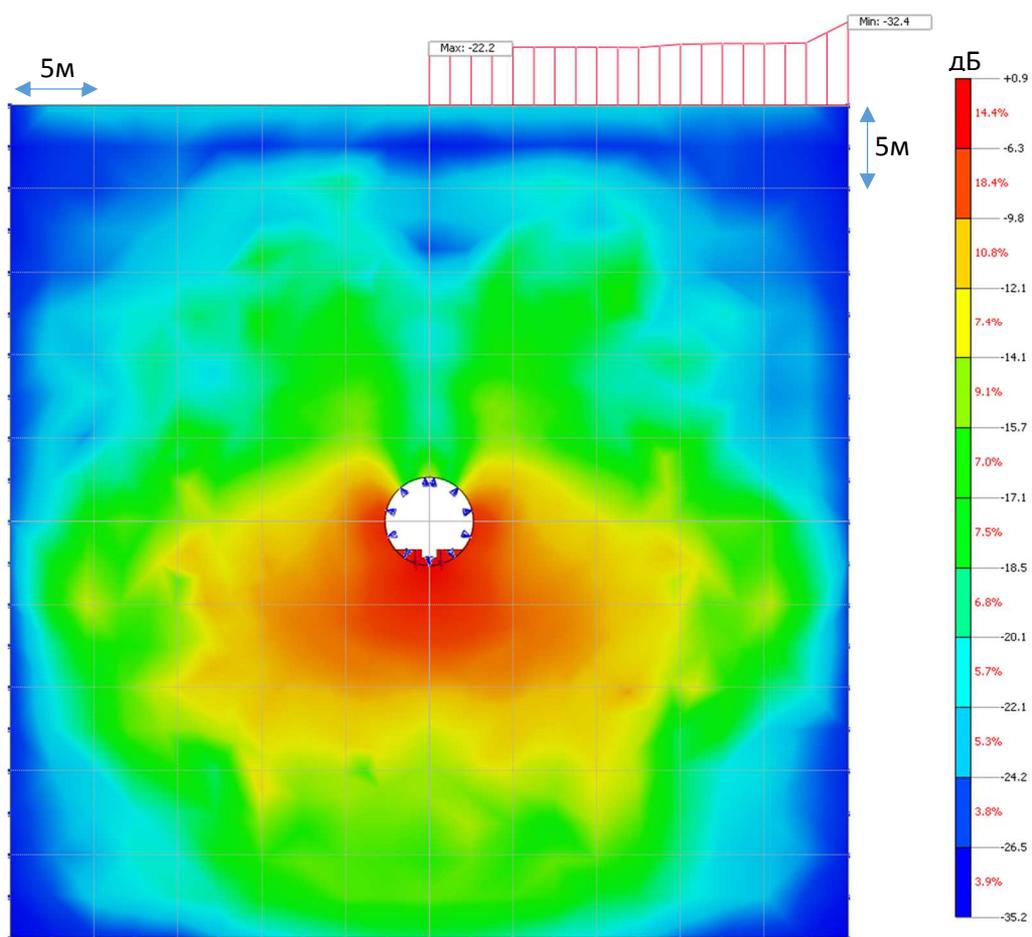


Рисунок А.5 – Снижение уровней виброускорений в грунте при обделке кругового очертания из чугунных тубингов на частоте 31.5 Гц

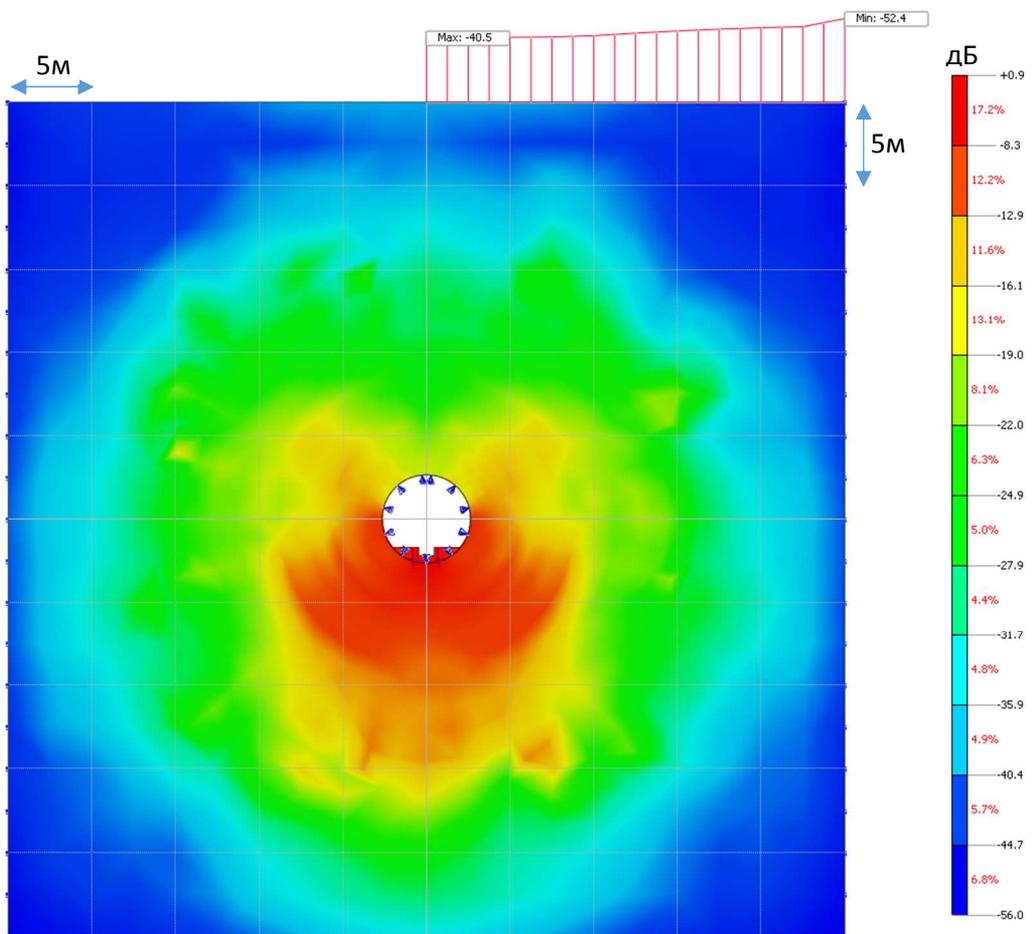


Рисунок А.6 – Снижение уровней виброускорений в грунте при обделке кругового очертания из чугунных тубингов на частоте 63 Гц

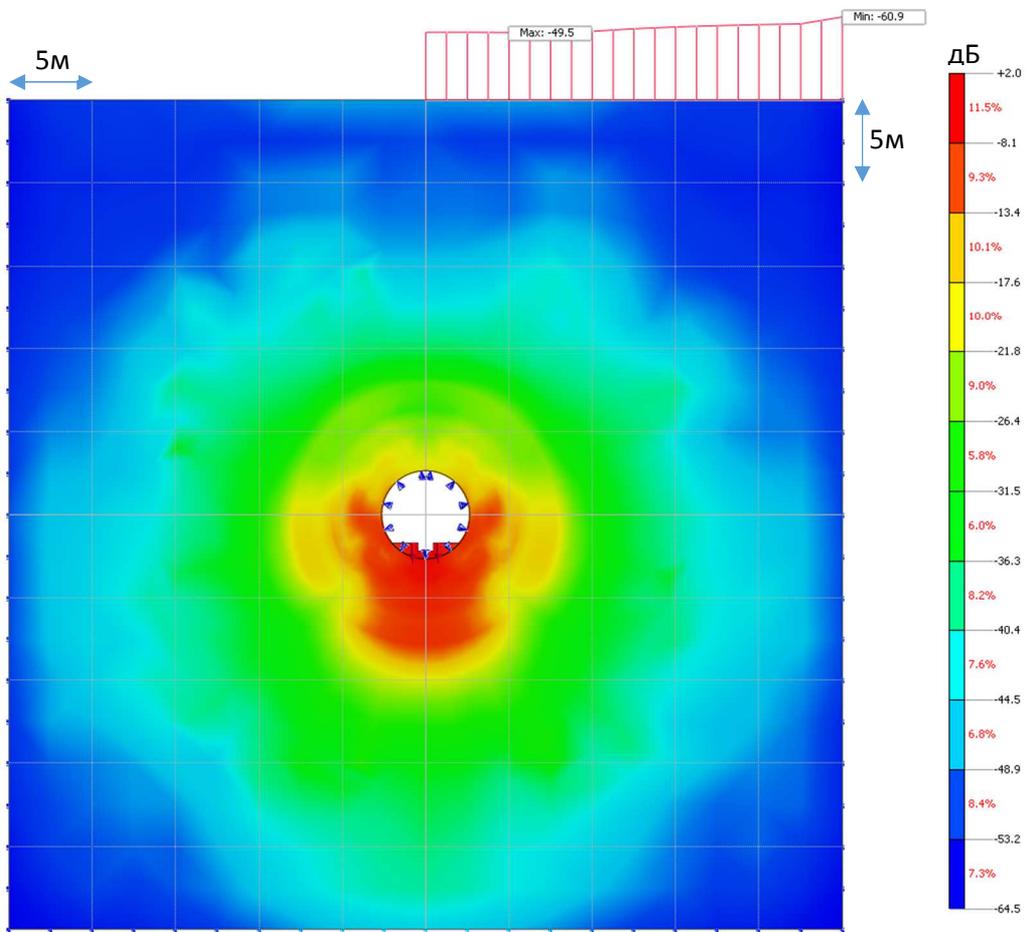


Рисунок А.7 – Снижение уровней виброускорений в грунте при обделке кругового очертания из чугунных тубингов на частоте 125 Гц

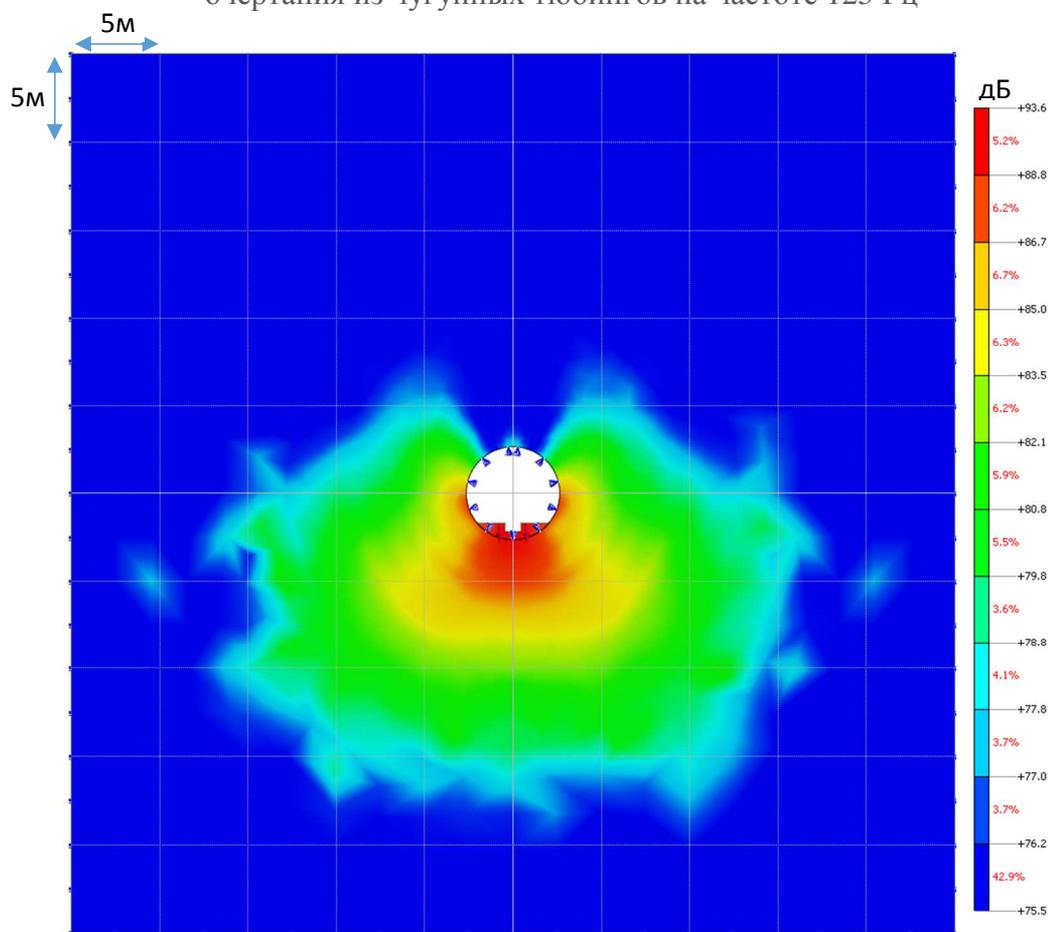


Рисунок А.8 – Визуализация уровней виброускорений с коррекцией W_m , при которых выполняются санитарные нормы для жилых помещений (синий фон) при обделке кругового очертания из чугунных тубингов

Монолитная обделка кругового очертания из бетона, $D_{внут} = 5.1\text{ м}$

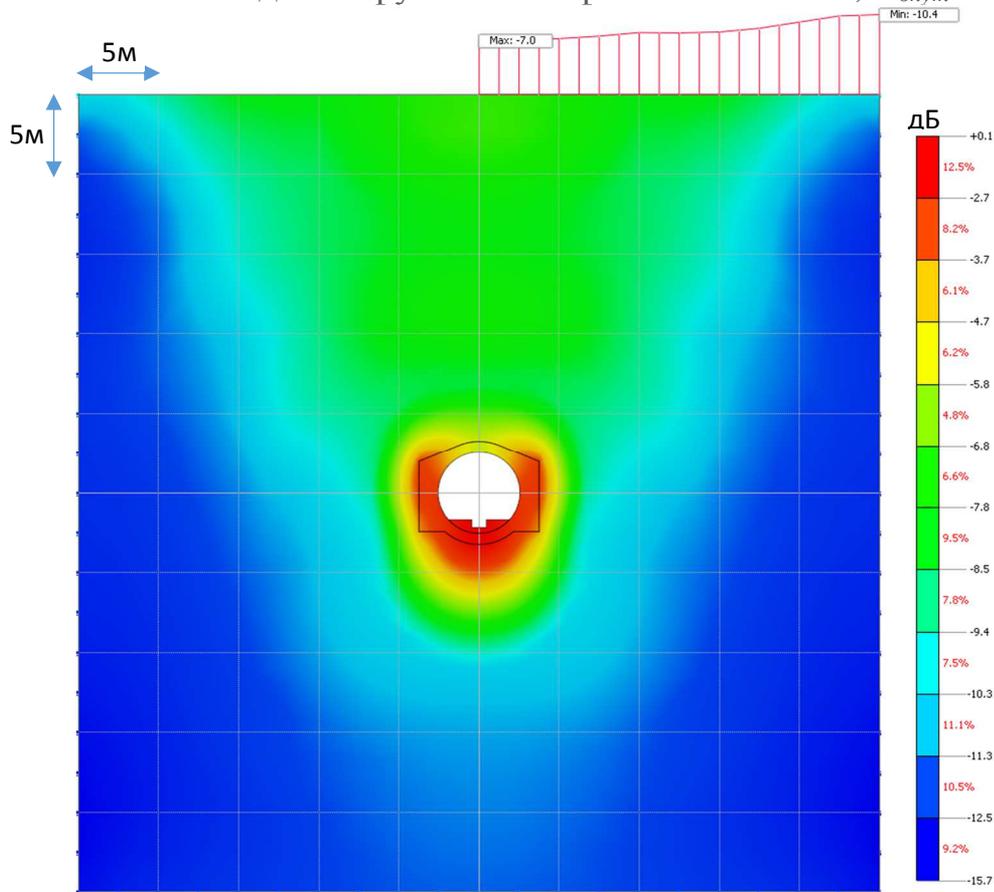


Рисунок А.9 – Снижение уровней виброускорений в грунте при монолитной обделке кругового очертания из бетона на частоте 2 Гц

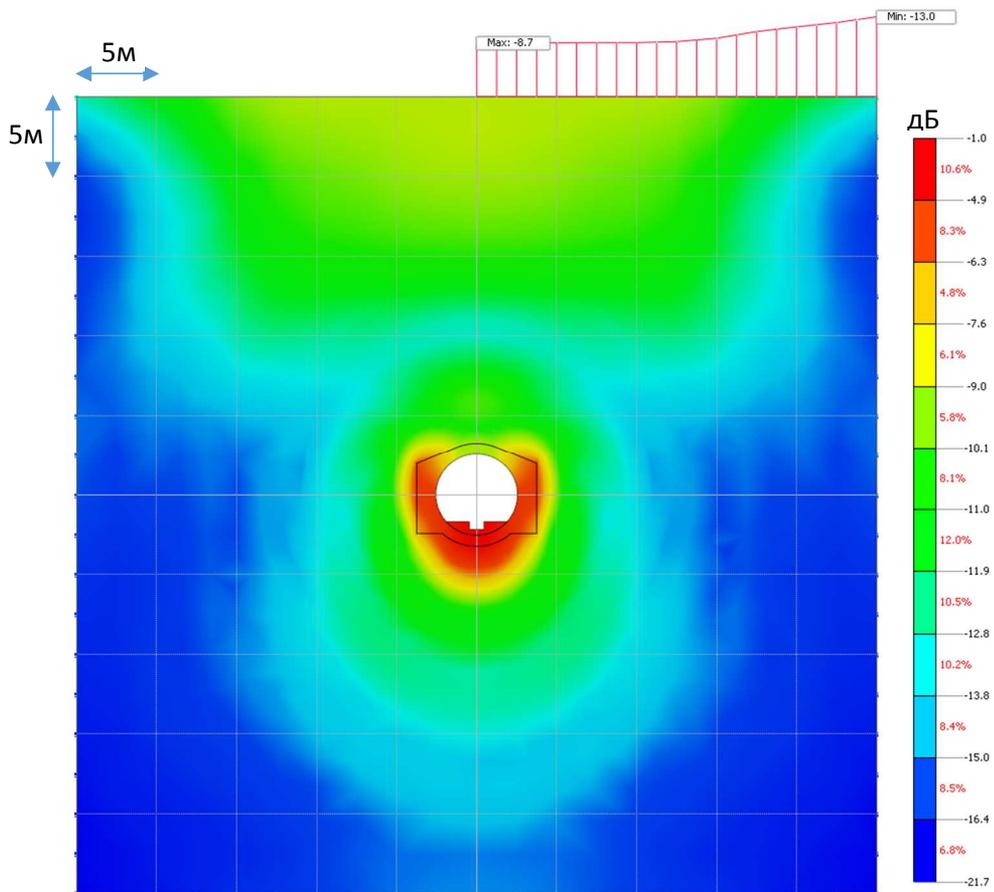


Рисунок А.10 – Снижение уровней виброускорений в грунте при монолитной обделке кругового очертания из бетона на частоте 4 Гц

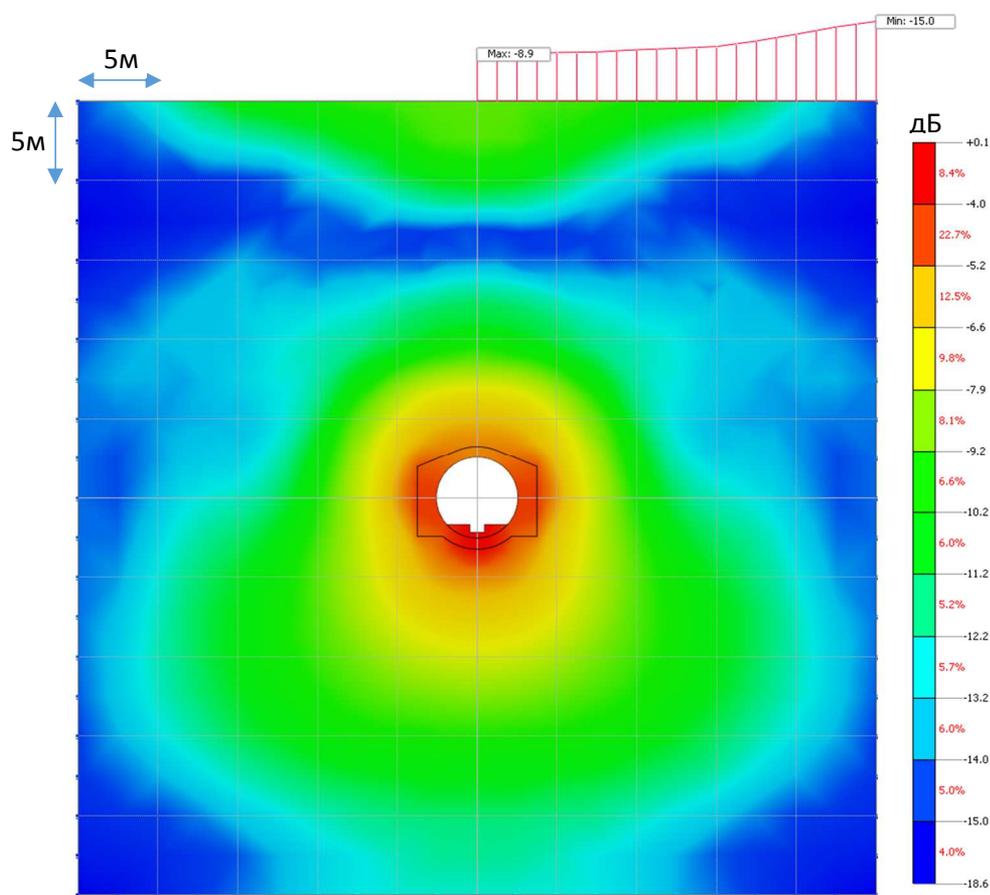


Рисунок А.11 – Снижение уровней виброускорений в грунте при монолитной обделке кругового очертания из бетона на частоте 8 Гц

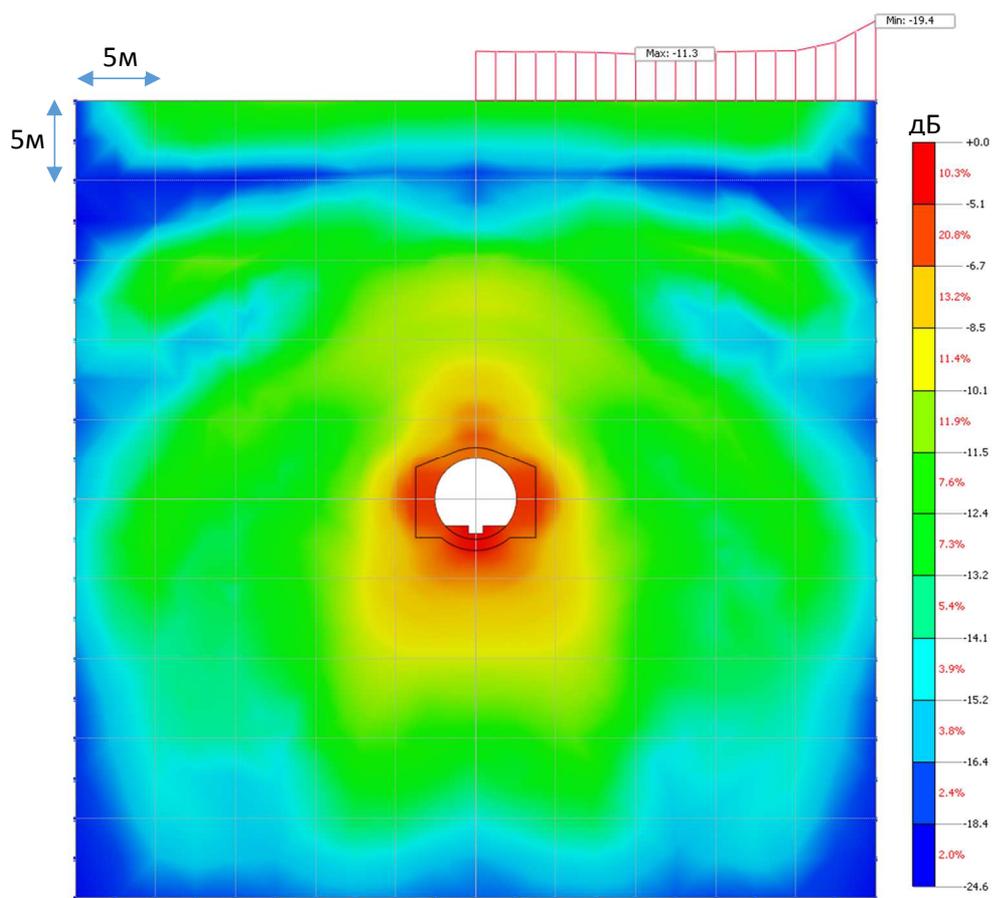


Рисунок А.12 – Снижение уровней виброускорений в грунте при монолитной обделке кругового очертания из бетона на частоте 16 Гц

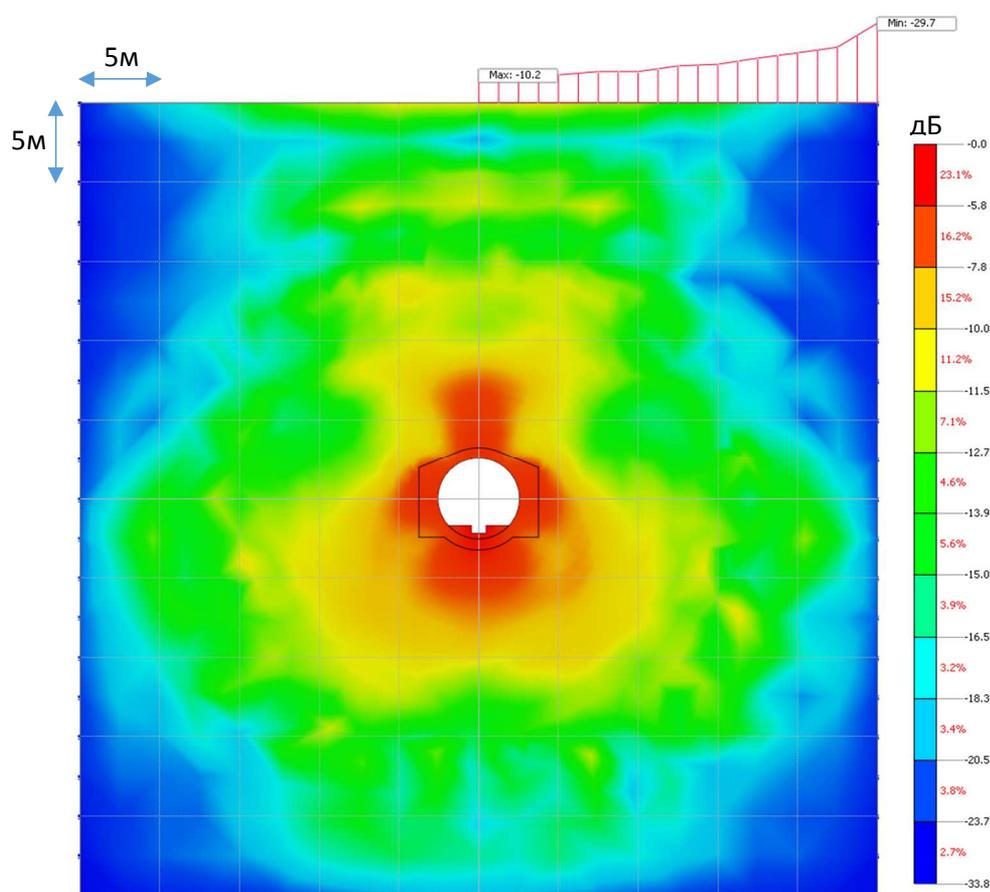


Рисунок А.13 – Снижение уровней виброускорений в грунте при монолитной обделке кругового очертания из бетона на частоте 31.5 Гц

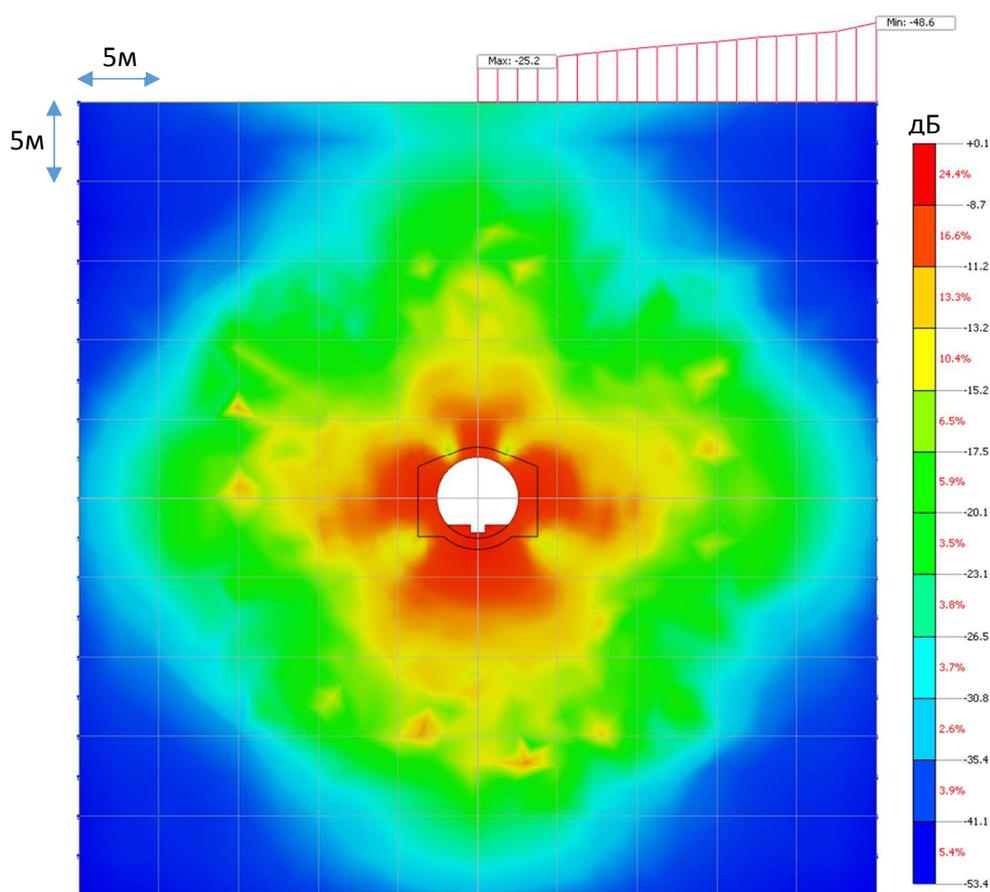


Рисунок А.14 – Снижение уровней виброускорений в грунте при монолитной обделке кругового очертания из бетона на частоте 63 Гц

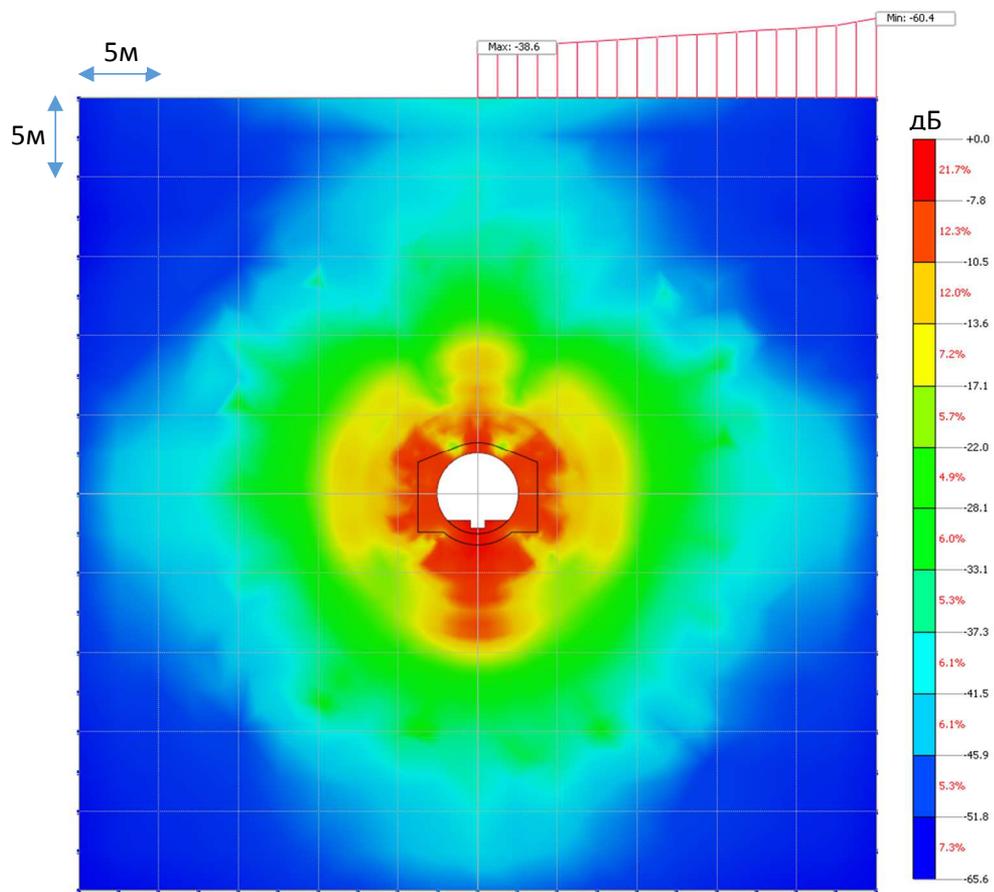


Рисунок А.15 – Снижение уровней виброускорений в грунте при монолитной обделке кругового очертания из бетона на частоте 125 Гц

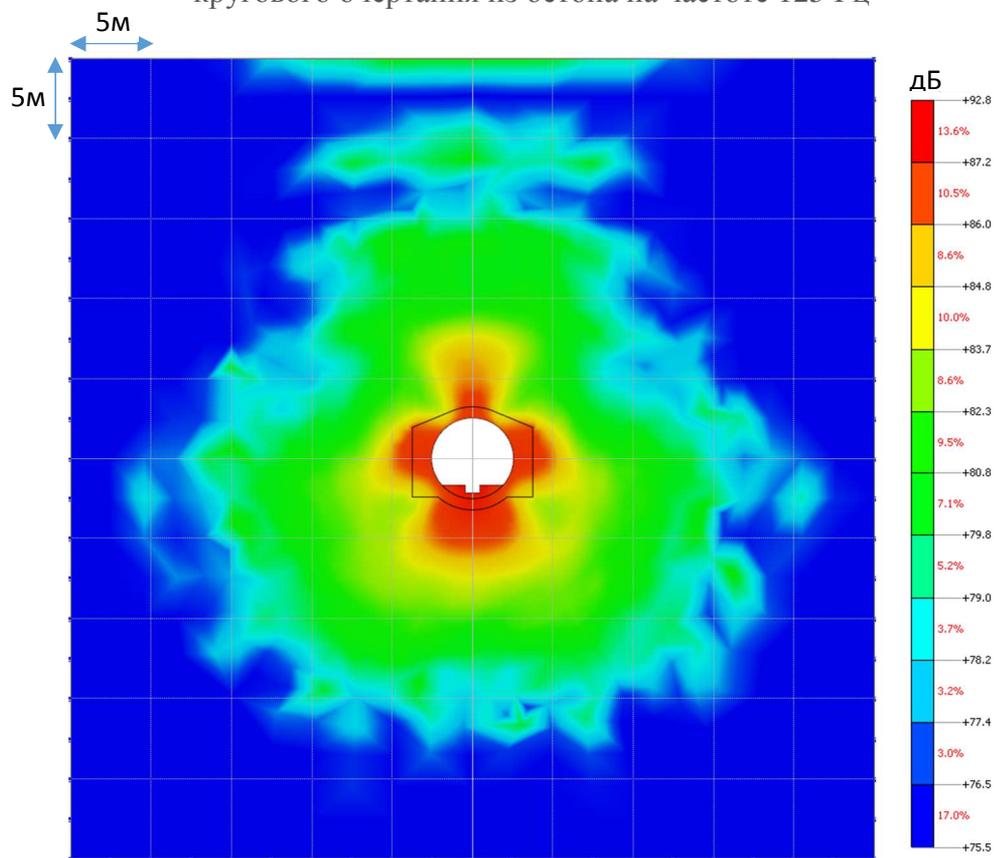


Рисунок А.16 – Визуализация уровней виброускорений с коррекцией W_m , при которых выполняются санитарные нормы для жилых помещений (синий фон) при монолитной обделке кругового очертания из бетона

Односводчатая овальная обделка из монолитного бетона

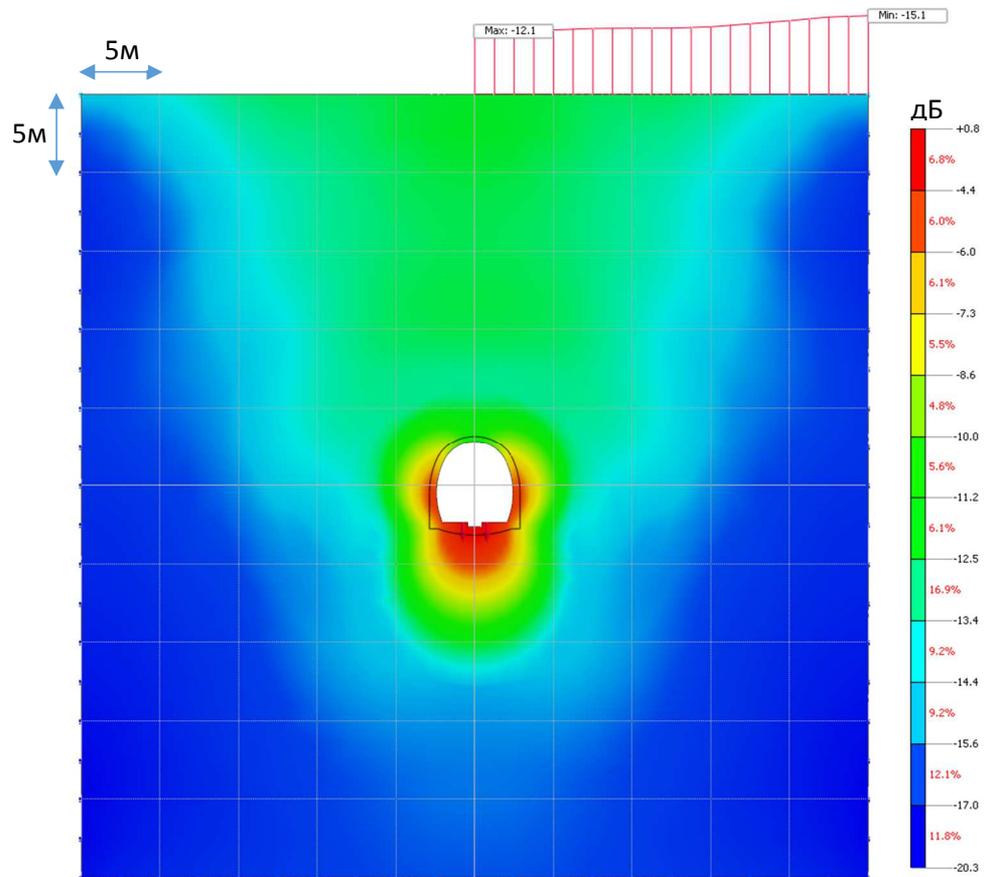


Рисунок А.17 – Снижение уровней виброускорений в грунте при односводчатой овальной обделке из монолитного бетона на частоте 2 Гц

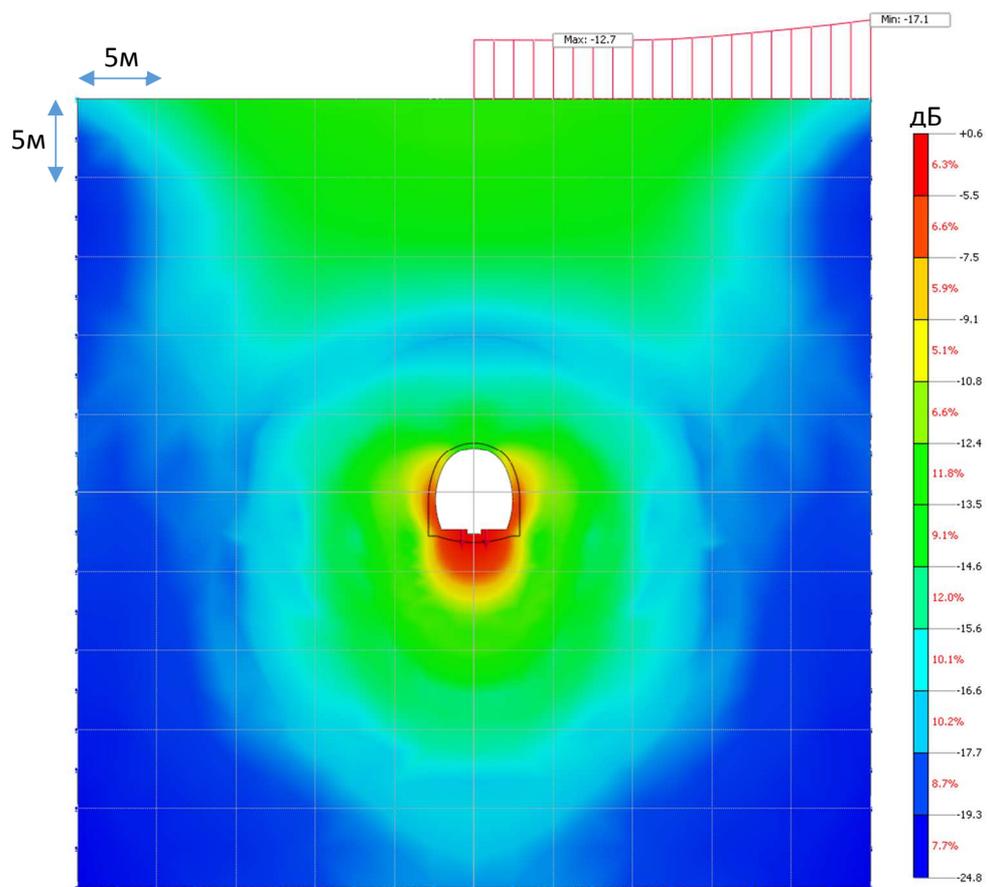


Рисунок А.18 – Снижение уровней виброускорений в грунте при односводчатой овальной обделке из монолитного бетона на частоте 4 Гц

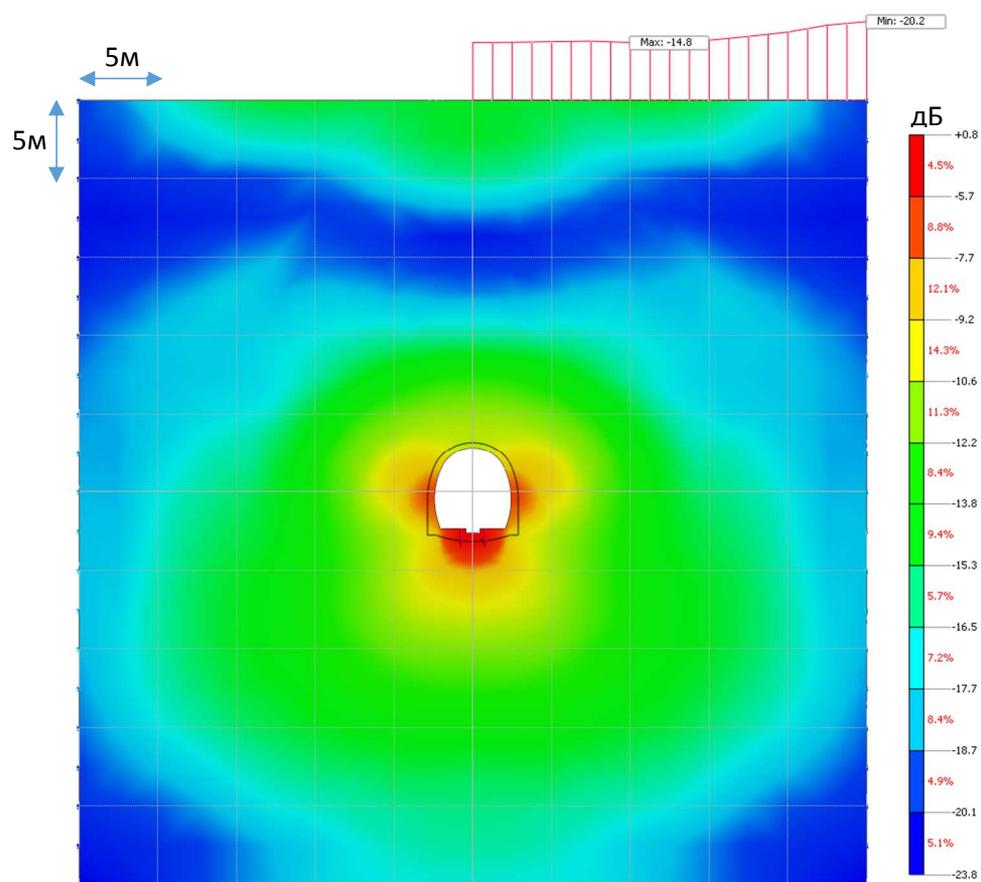


Рисунок А.19 – Снижение уровней виброускорений в грунте при односводчатой овальной обделке из монолитного бетона на частоте 8 Гц

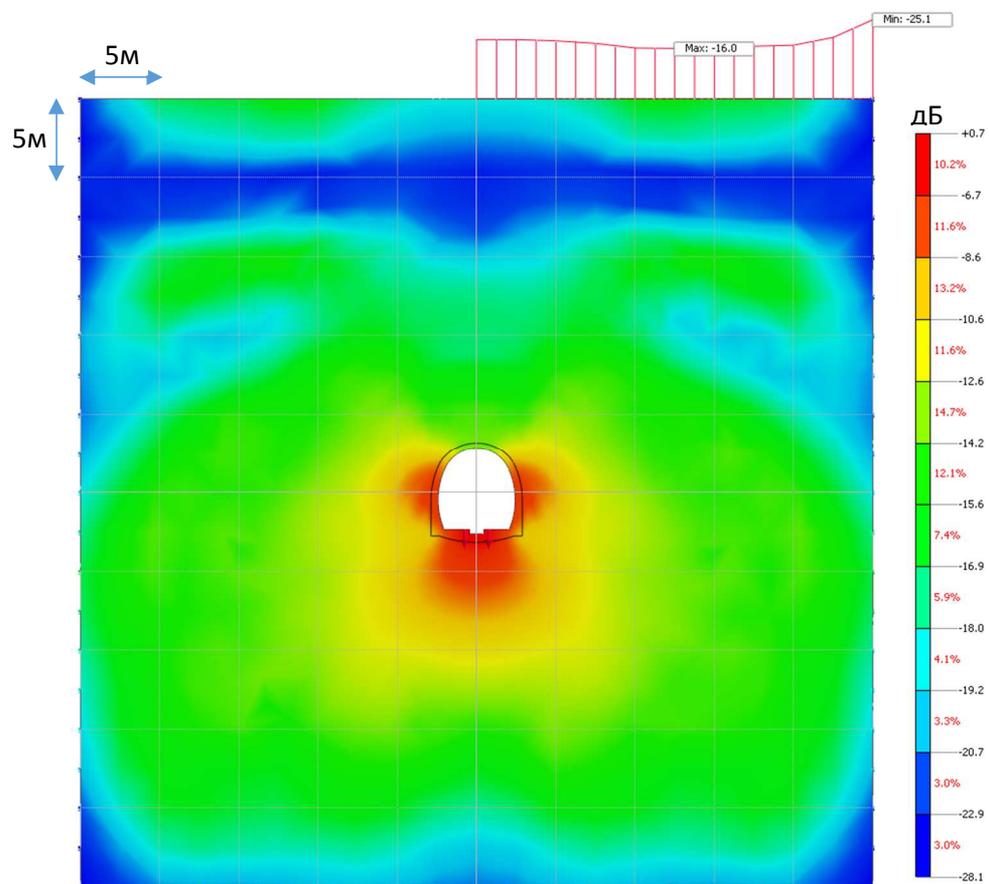


Рисунок А.20 – Снижение уровней виброускорений в грунте при односводчатой овальной обделке из монолитного бетона на частоте 16 Гц

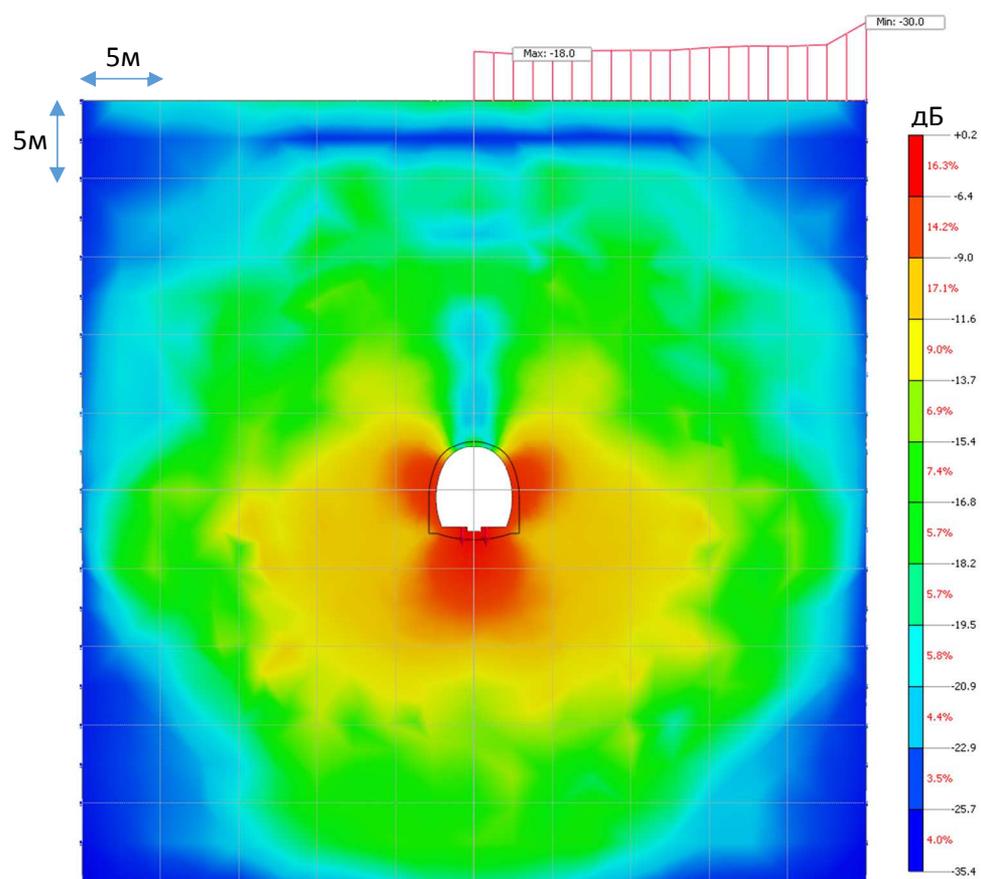


Рисунок А.21 – Снижение уровней виброускорений в грунте при односводчатой овальной обделке из монолитного бетона на частоте 31.5 Гц

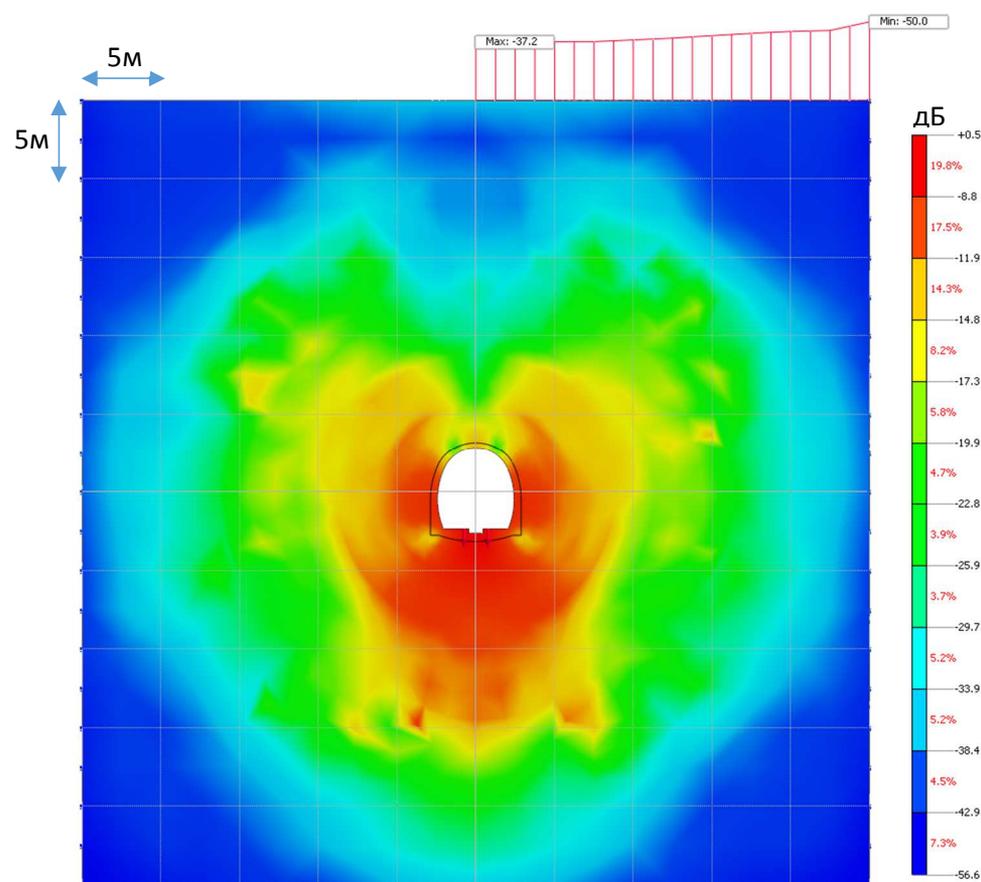


Рисунок А.22 – Снижение уровней виброускорений в грунте при односводчатой овальной обделке из монолитного бетона на частоте 63 Гц

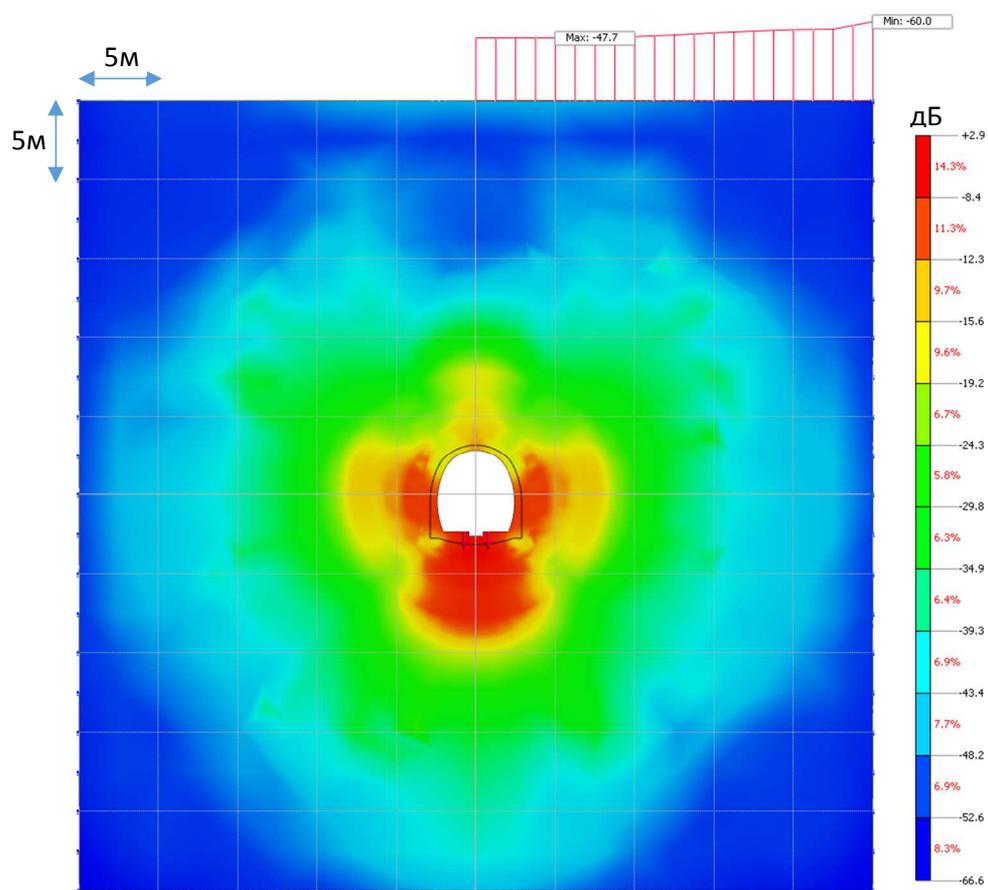


Рисунок А.23 – Снижение уровней виброускорений в грунте при односводчатой овальной обделке из монолитного бетона на частоте 125 Гц

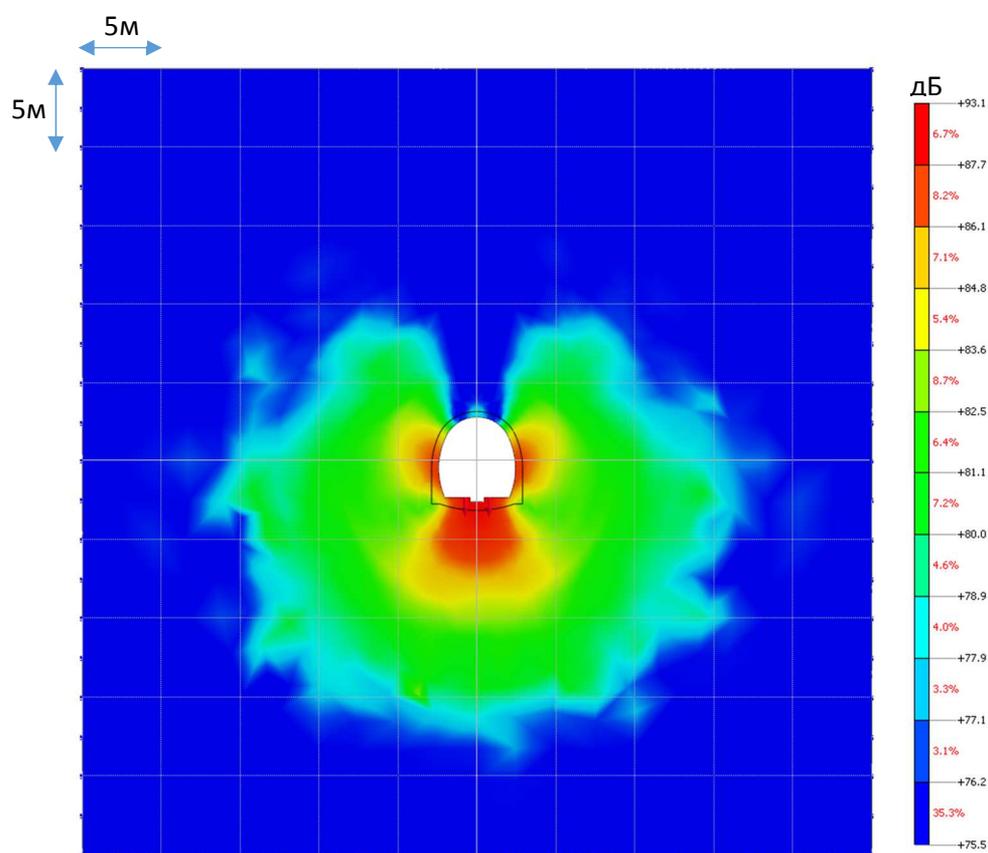


Рисунок А.24 – Визуализация уровней виброускорений с коррекцией W_m , при которых выполняются санитарные нормы для жилых помещений (синий фон) при односводчатой овальной обделке из монолитного бетона

Сборная обделка из высокоточных железобетонных блоков, $D_{внут} = 5.1\text{м}$

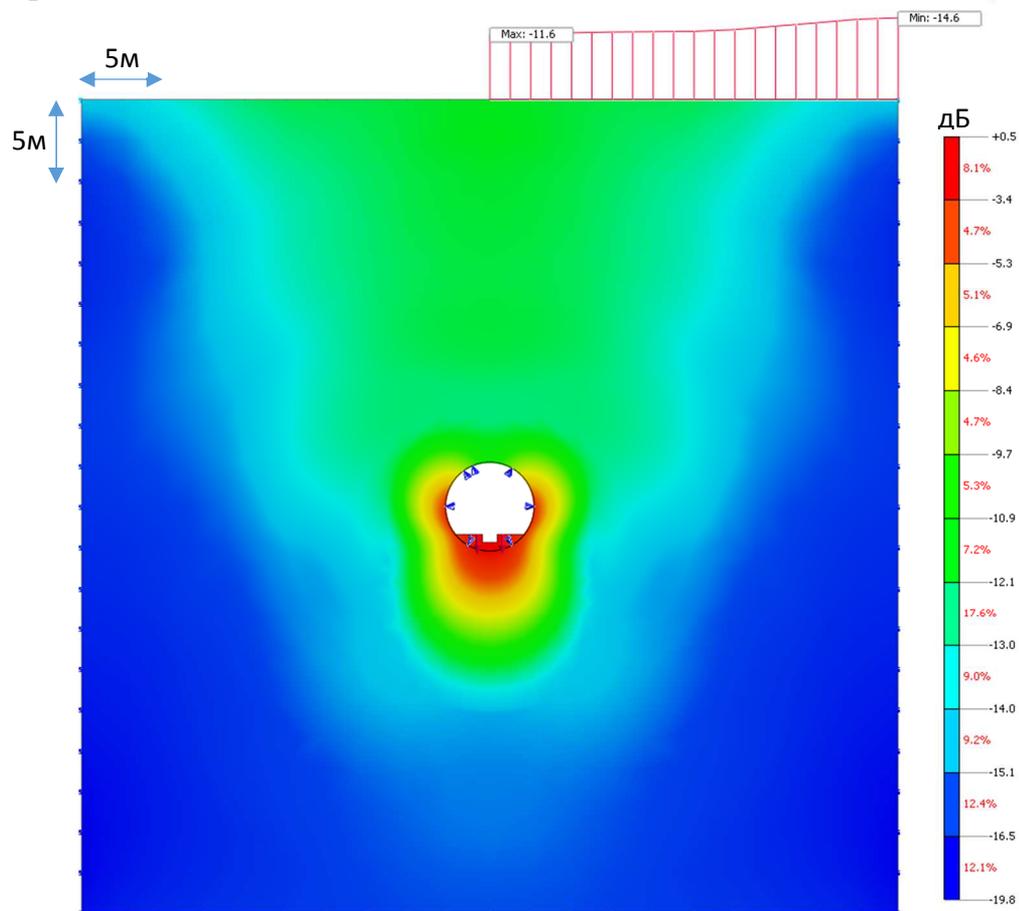


Рисунок А.25 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 5.1\text{м}$) на частоте 2 Гц

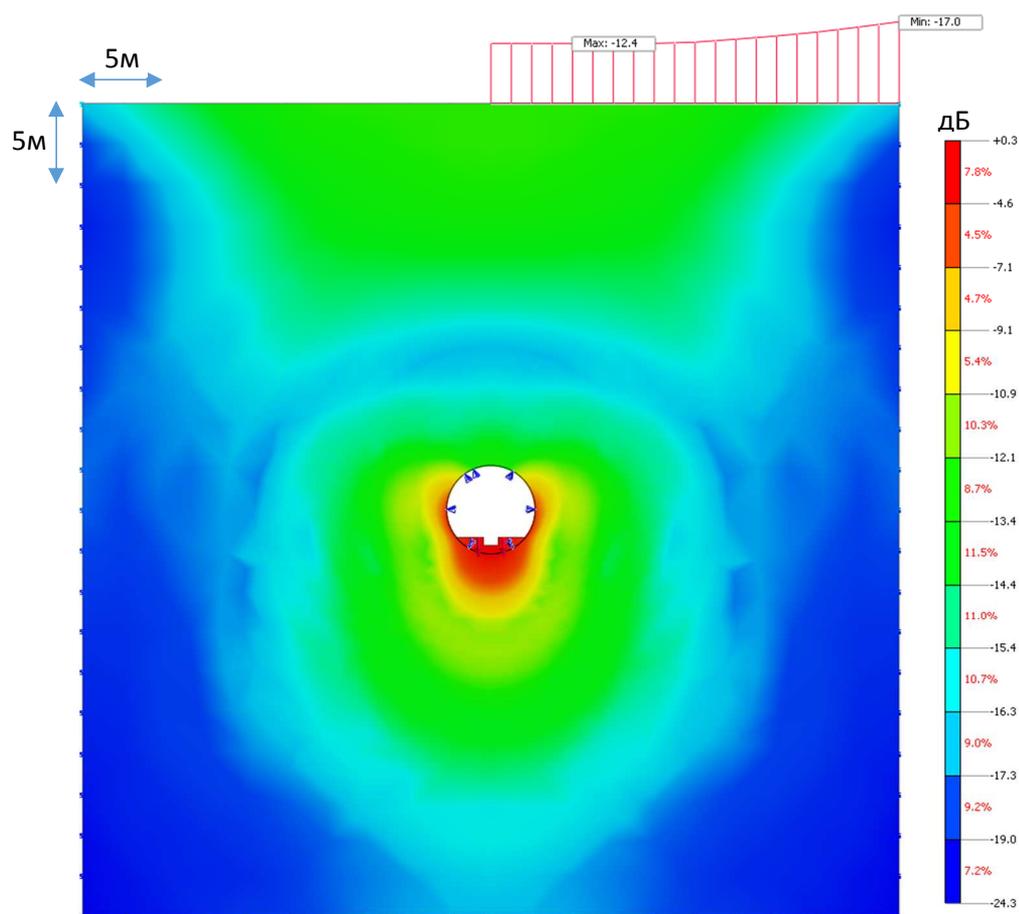


Рисунок А.26 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 5.1\text{м}$) на частоте 4 Гц

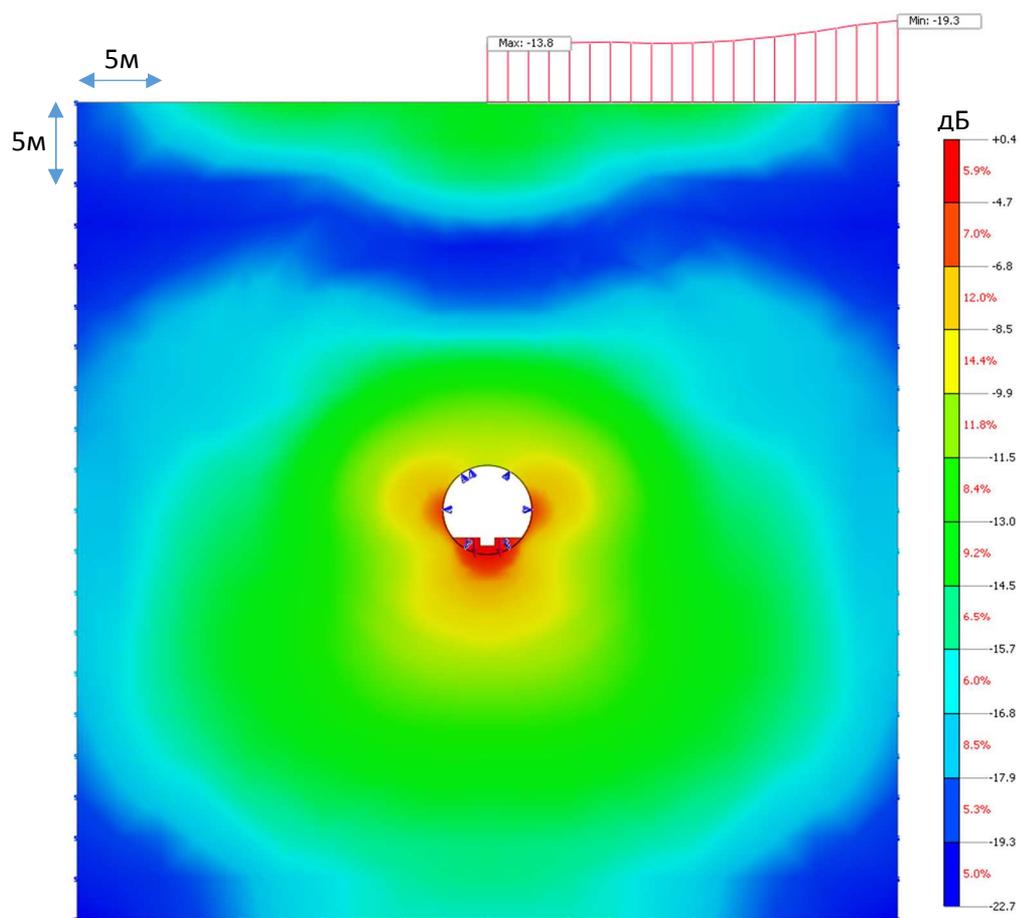


Рисунок А.27 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокочастотных железобетонных блоков ($D_{внут} = 5.1\text{м}$) на частоте 8 Гц

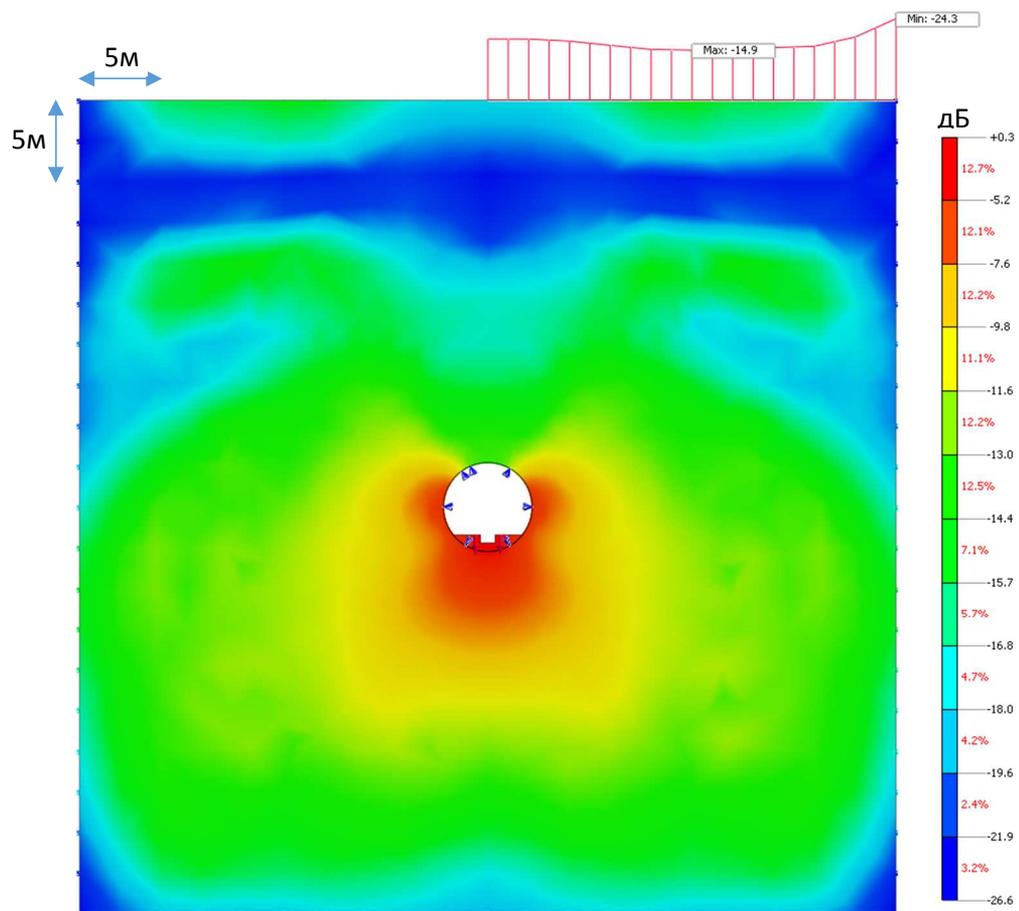


Рисунок А.28 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокочастотных железобетонных блоков ($D_{внут} = 5.1\text{м}$) на частоте 16 Гц

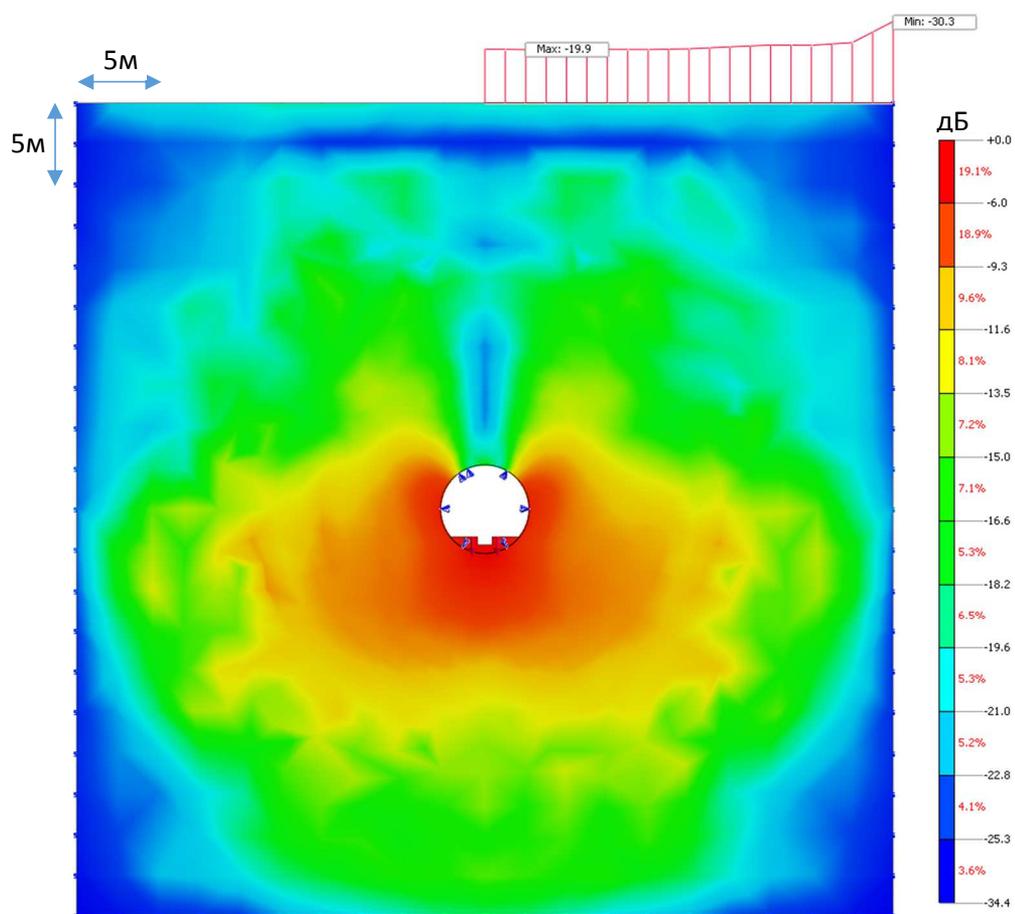


Рисунок А.29 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 5.1\text{м}$) на частоте 31.5 Гц

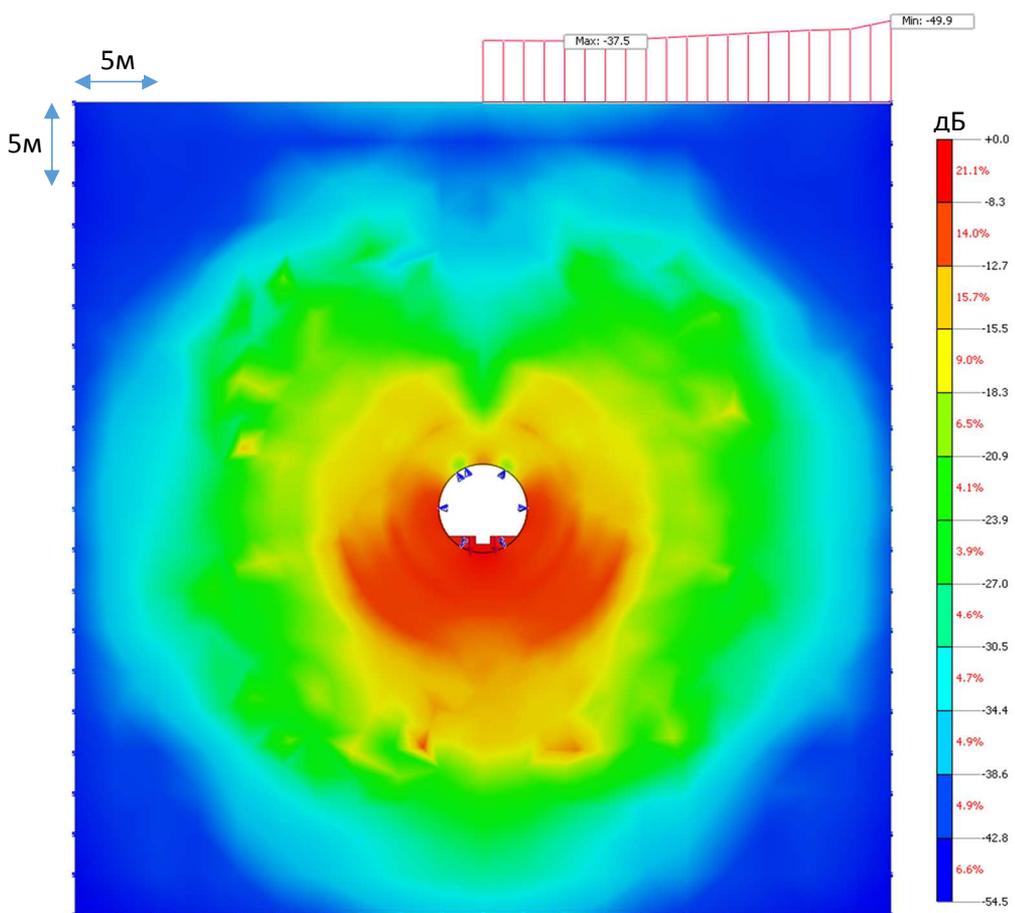


Рисунок А.30 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 5.1\text{м}$) на частоте 63 Гц

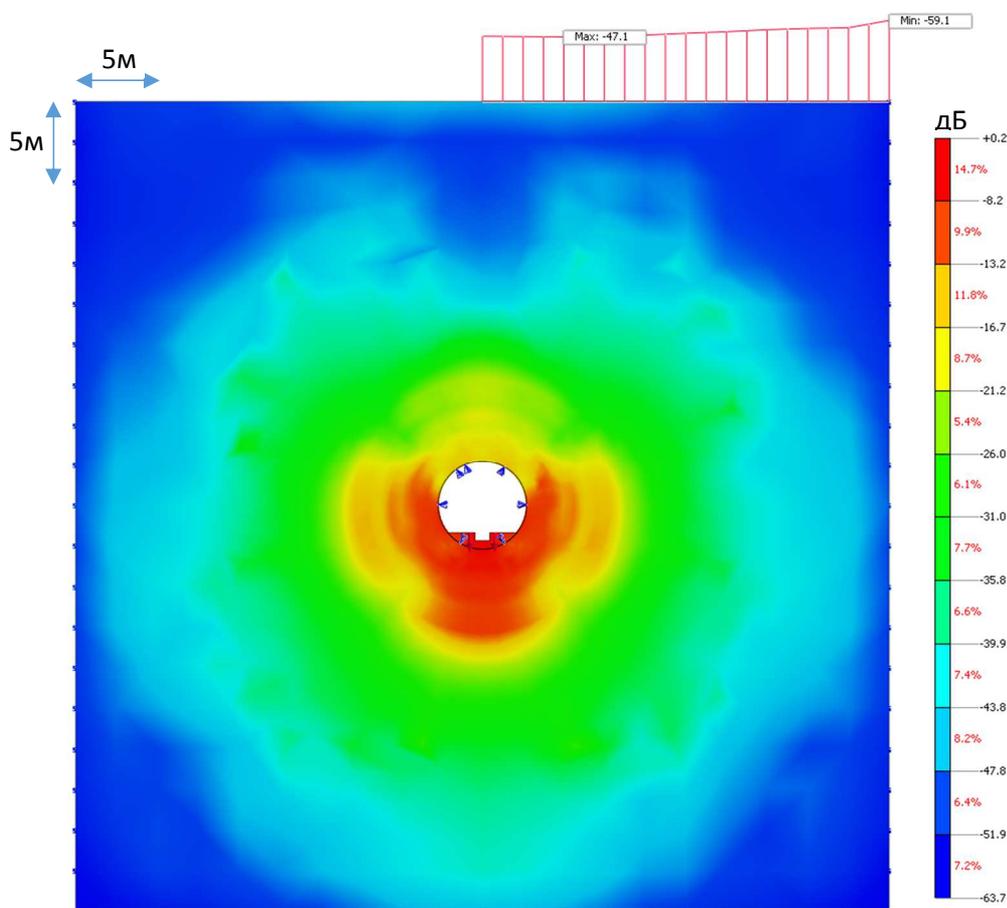


Рисунок А.31 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 5.1\text{м}$) на частоте 125 Гц

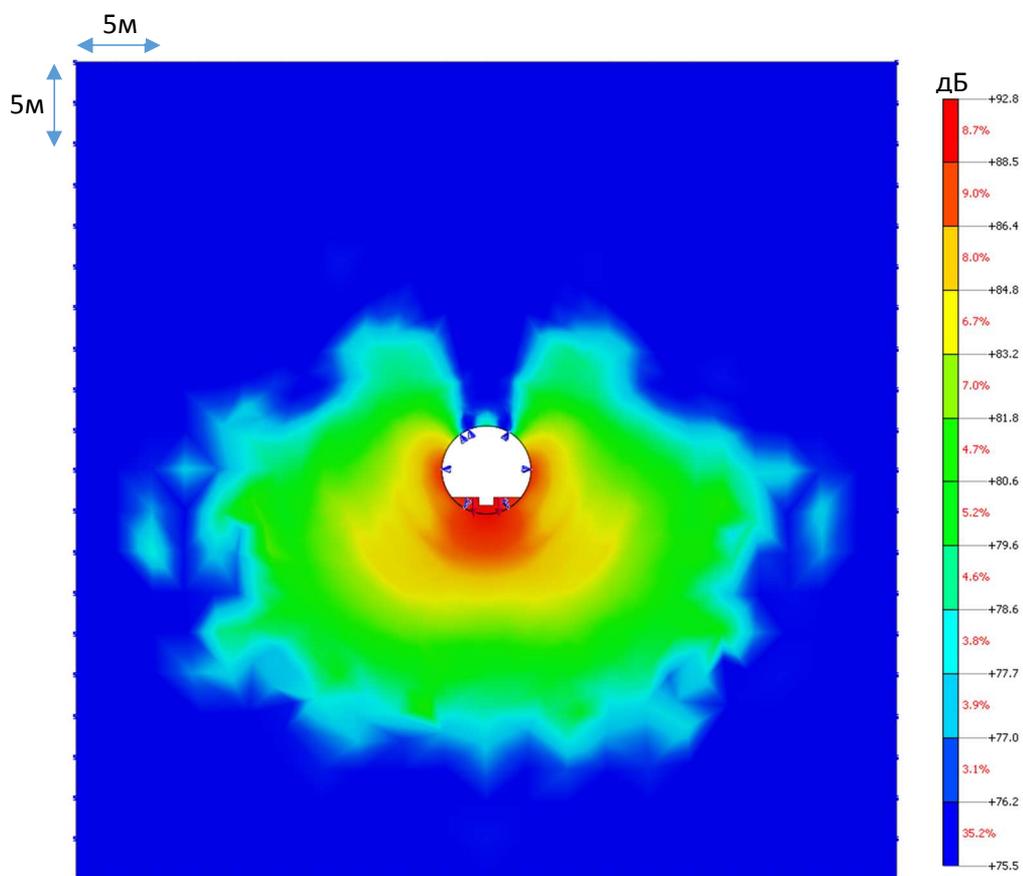


Рисунок А.32 – Визуализация уровней виброускорений с коррекцией W_m , при которых выполняются санитарные нормы для жилых помещений (синий фон) при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 5.1\text{м}$)

Сборная обделка из высокоточных железобетонных блоков, $D_{внут} = 8.65\text{м}$

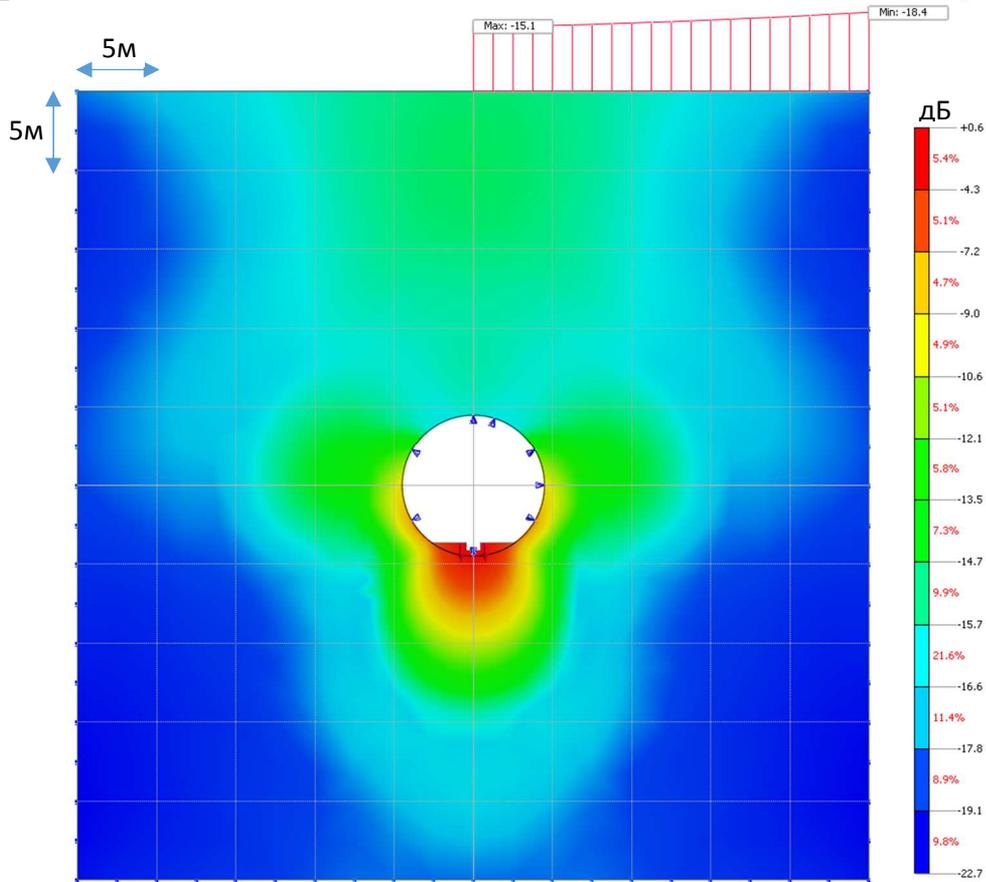


Рисунок А.33 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 8.65\text{м}$) на частоте 2 Гц

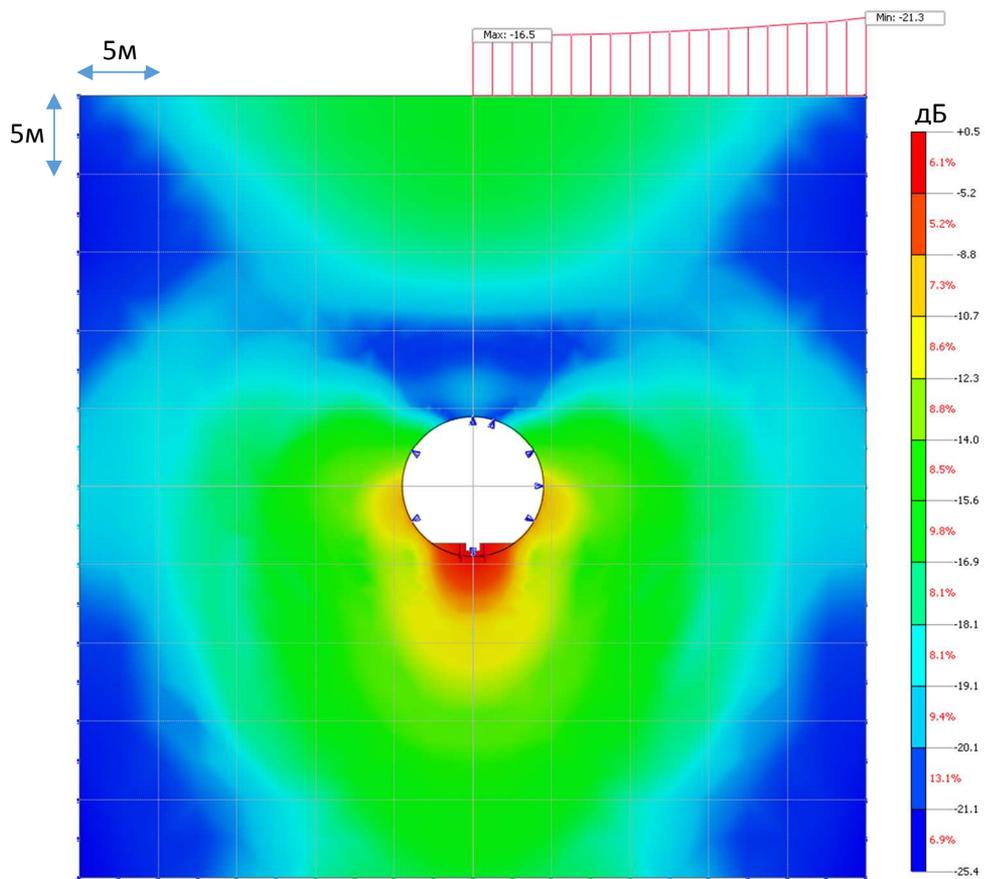


Рисунок А.34 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 8.65\text{м}$) на частоте 4 Гц

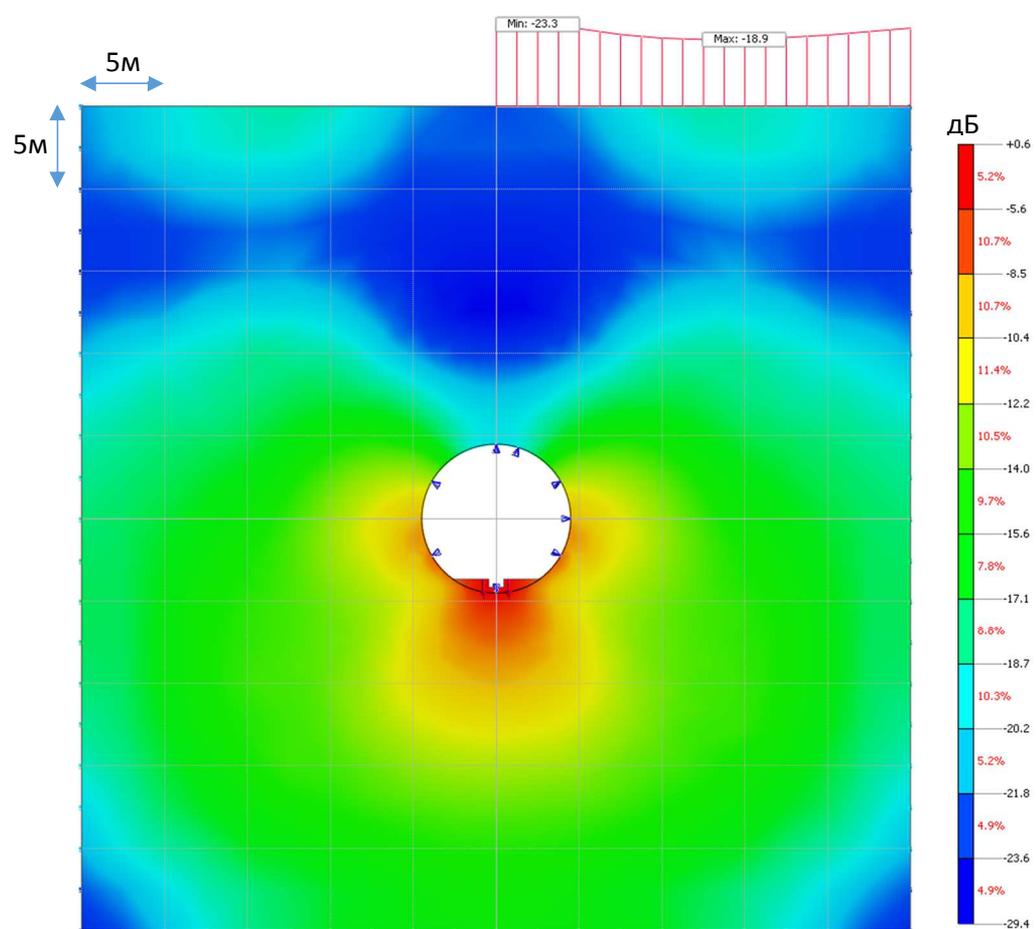


Рисунок А.35 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 8.65\text{м}$) на частоте 8 Гц

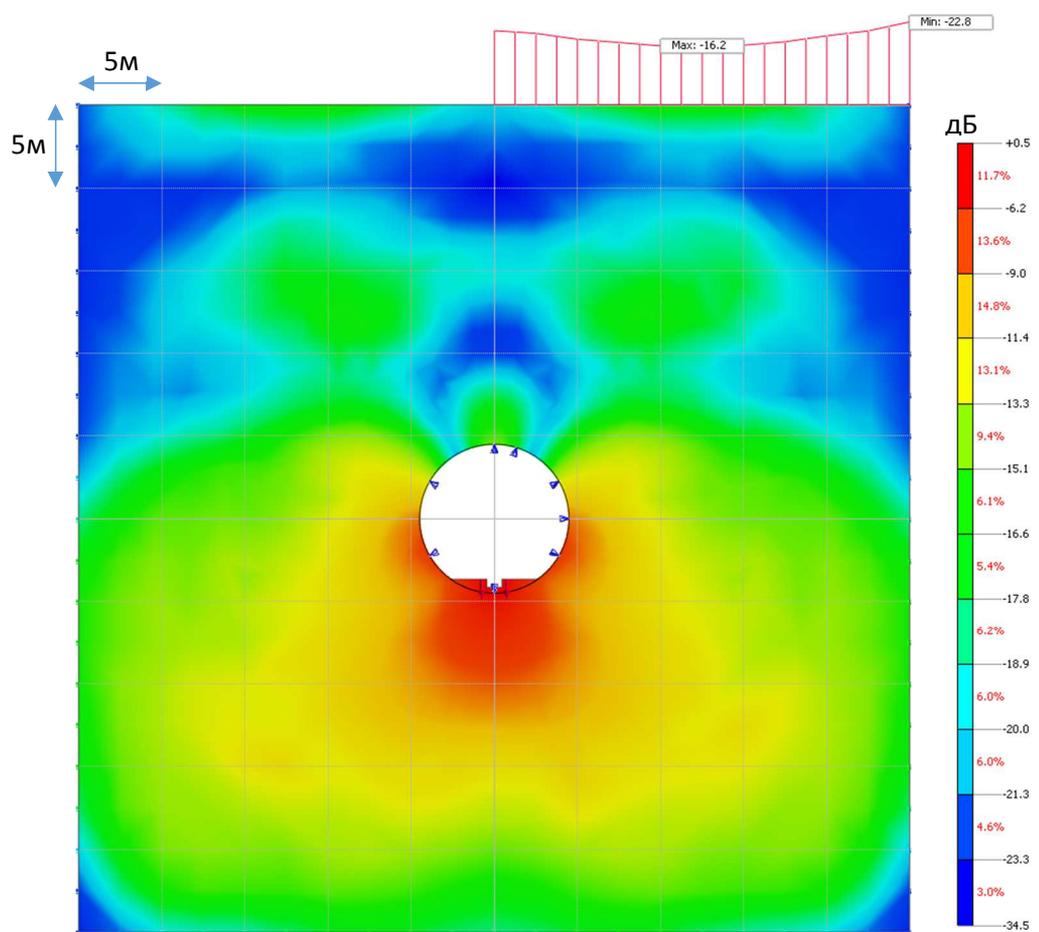


Рисунок А.36 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 8.65\text{м}$) на частоте 16 Гц

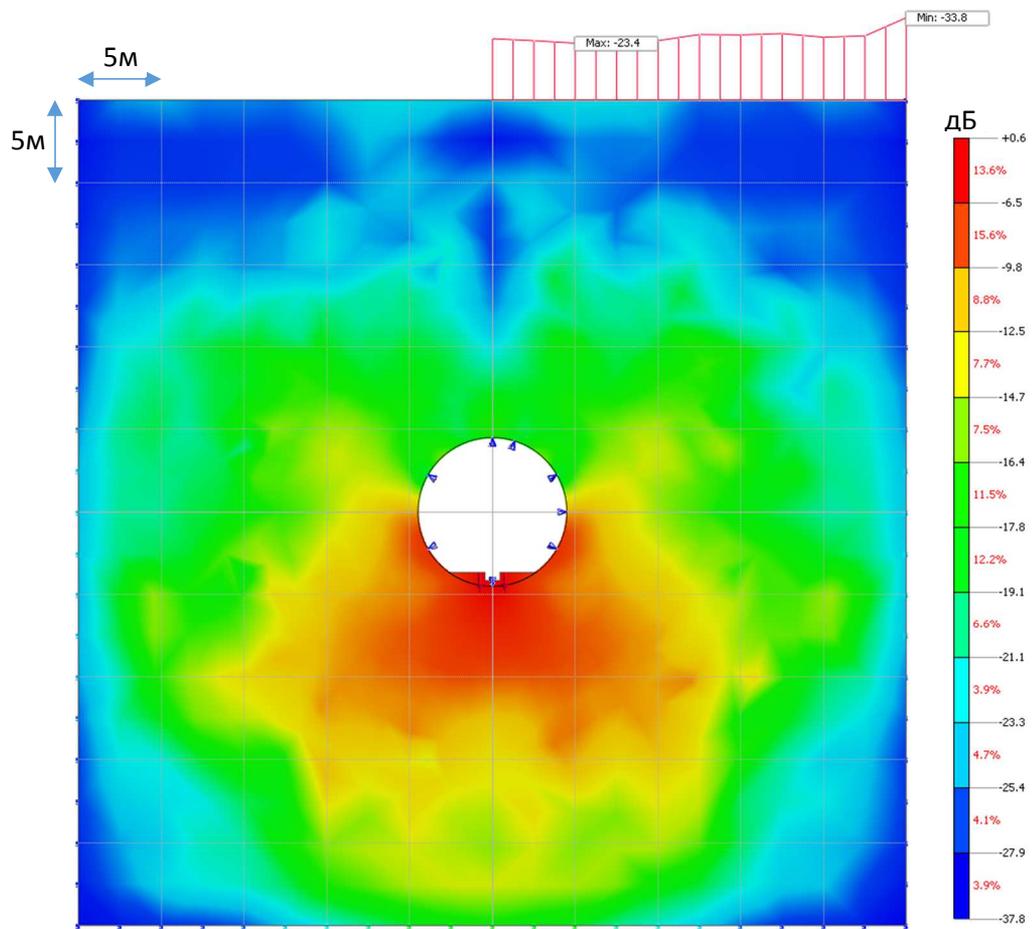


Рисунок А.37 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокочастотных железобетонных блоков ($D_{внут} = 8.65\text{м}$) на частоте 31.5 Гц

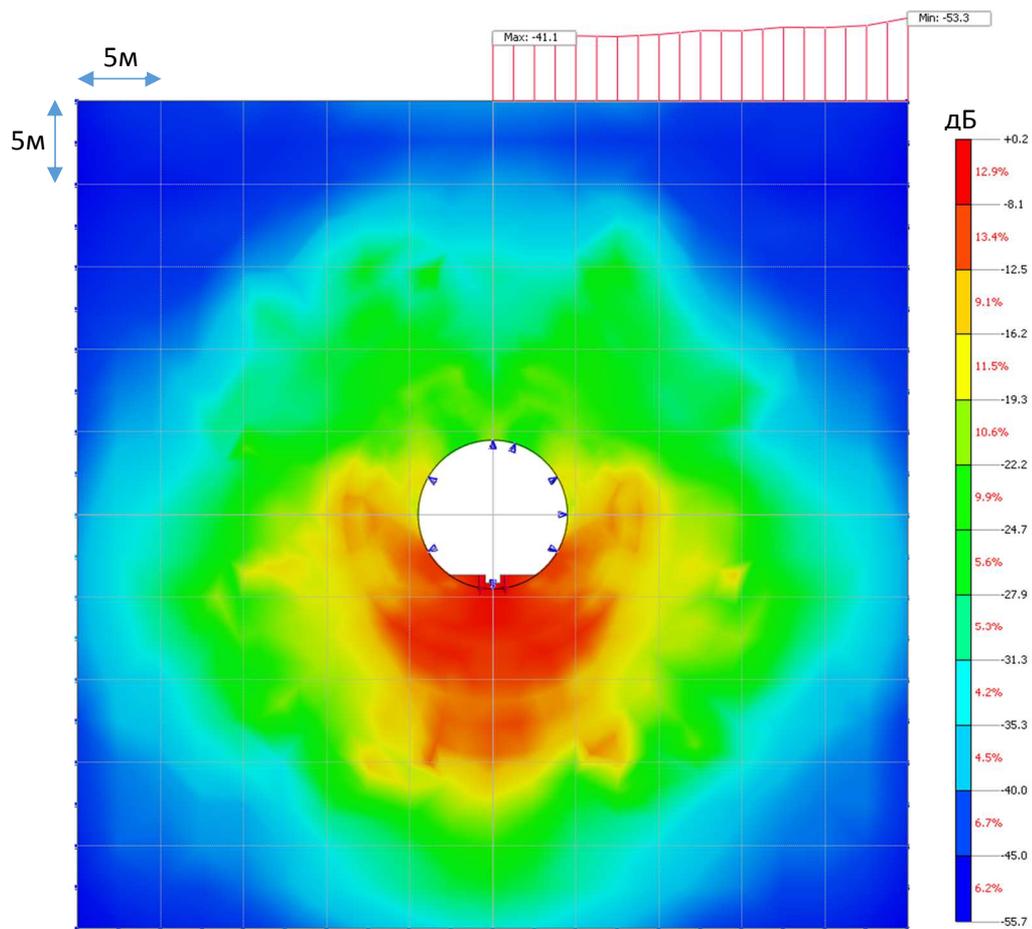


Рисунок А.38 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокочастотных железобетонных блоков ($D_{внут} = 8.65\text{м}$) на частоте 63 Гц

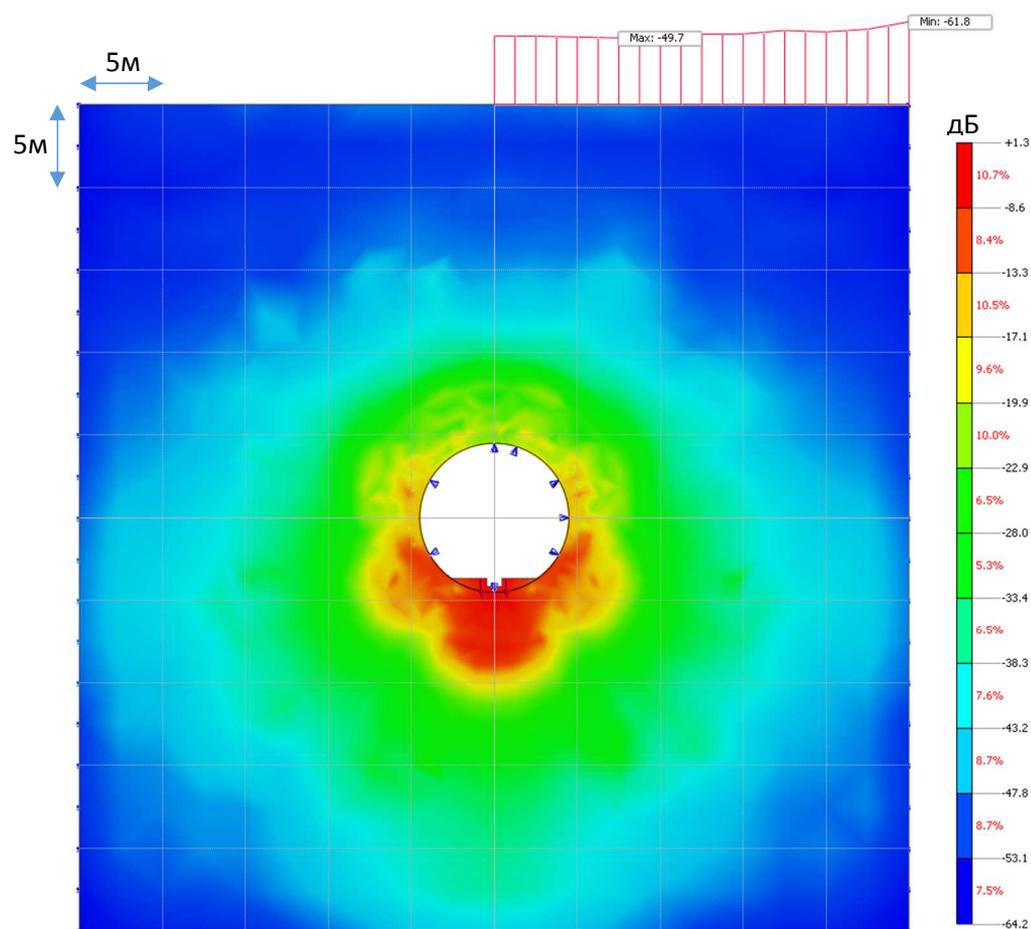


Рисунок А.39 – Снижение уровней виброускорений в грунте при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 8.65\text{м}$) на частоте 125 Гц

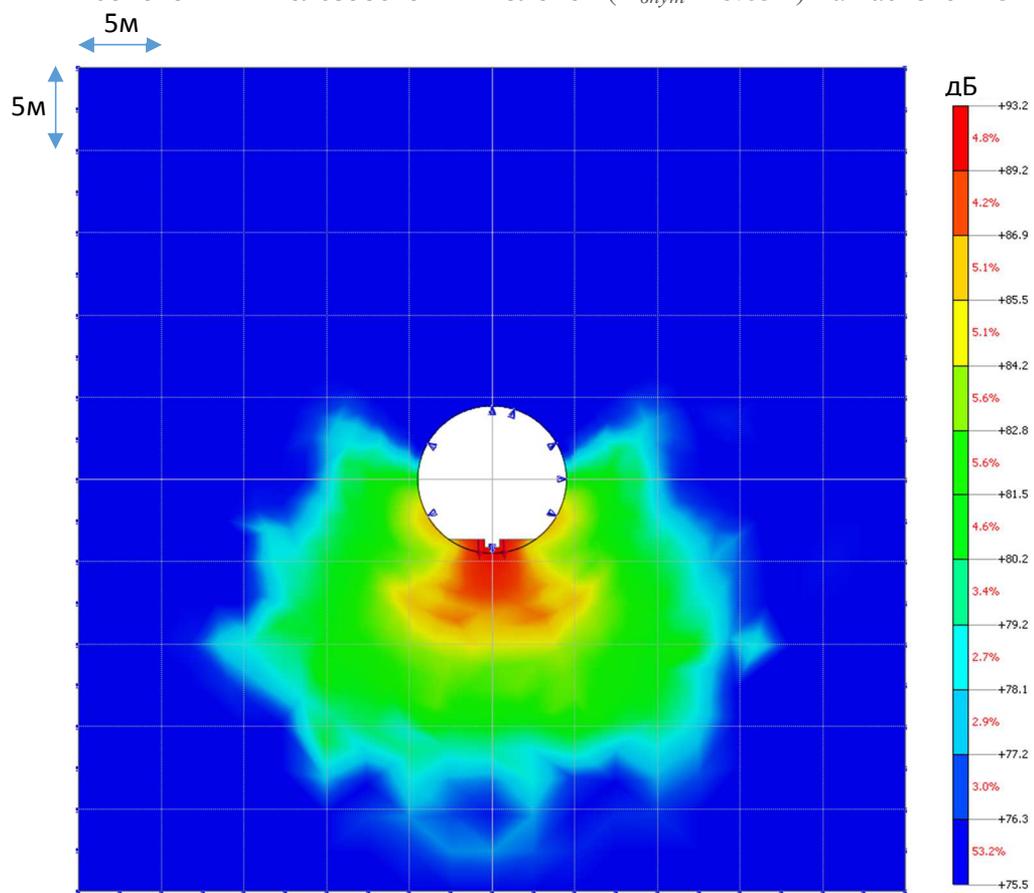


Рисунок А.40 – Визуализация уровней виброускорений с коррекцией W_m , при которых выполняются санитарные нормы для жилых помещений (синий фон) при сборной обделке из высокоточных железобетонных блоков ($D_{внут} = 8.65\text{м}$)

Приложение Б

Уровни вибраций в полубесконечном грунтовом массиве

Цельносекционная ж/б обделка однопутного тоннеля габаритами 4.4x4.95м

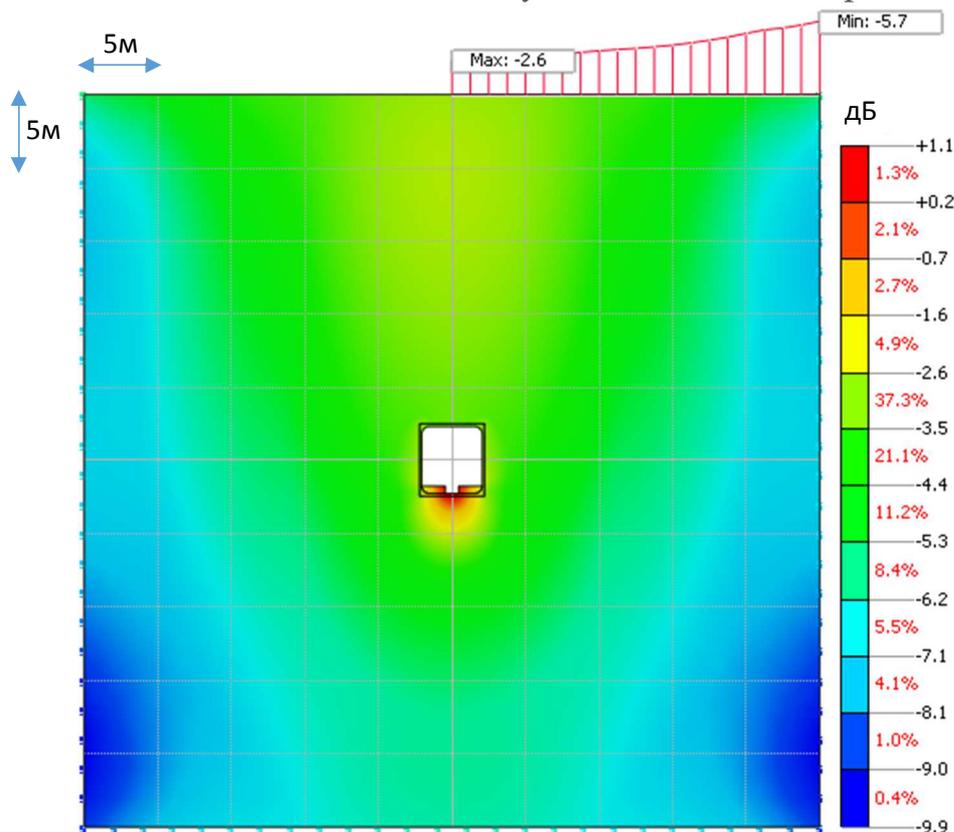


Рисунок Б.1 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля на частоте 2 Гц

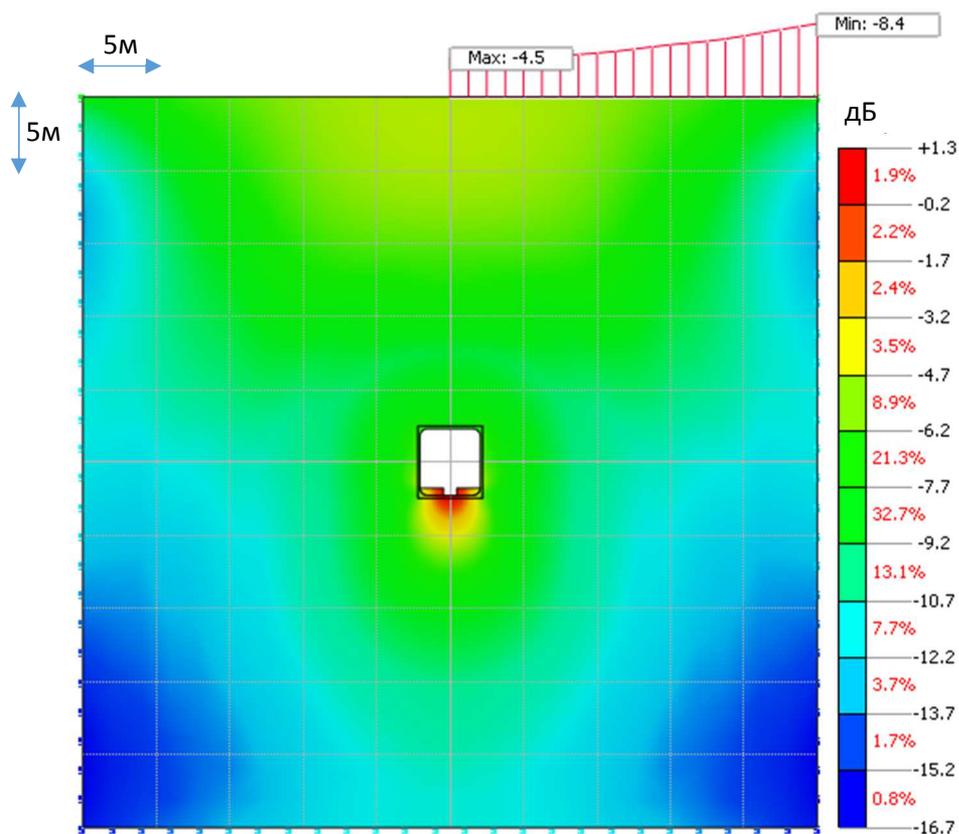


Рисунок Б.2 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля на частоте 4 Гц

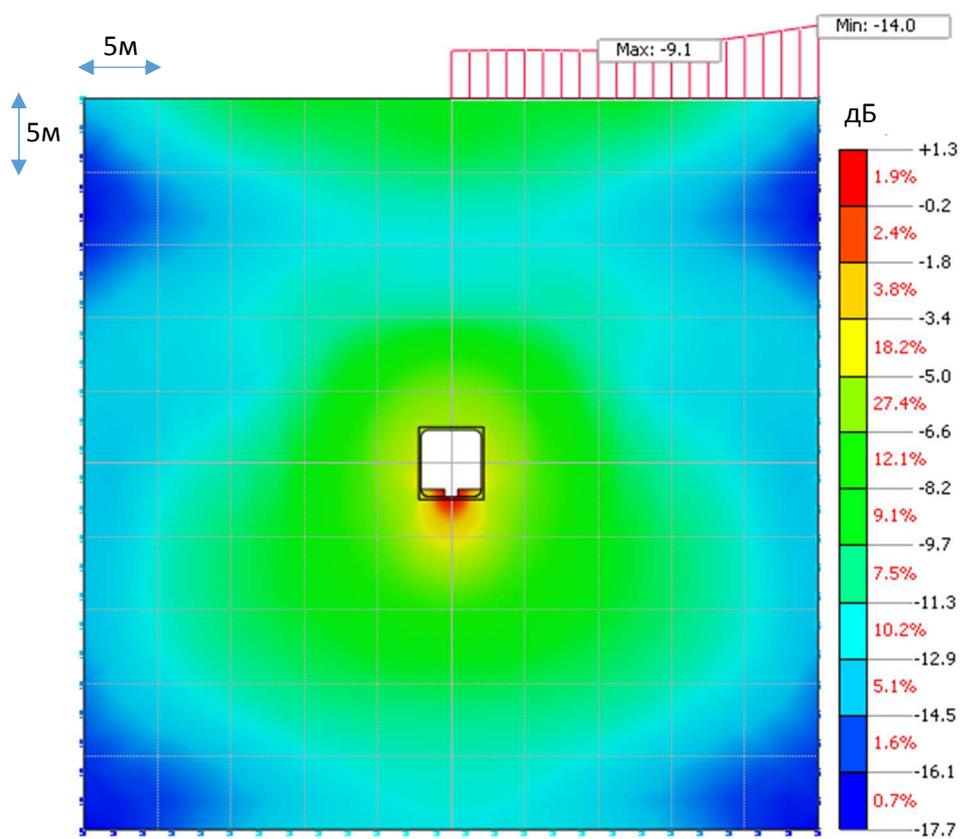


Рисунок Б.3 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля на частоте 8 Гц

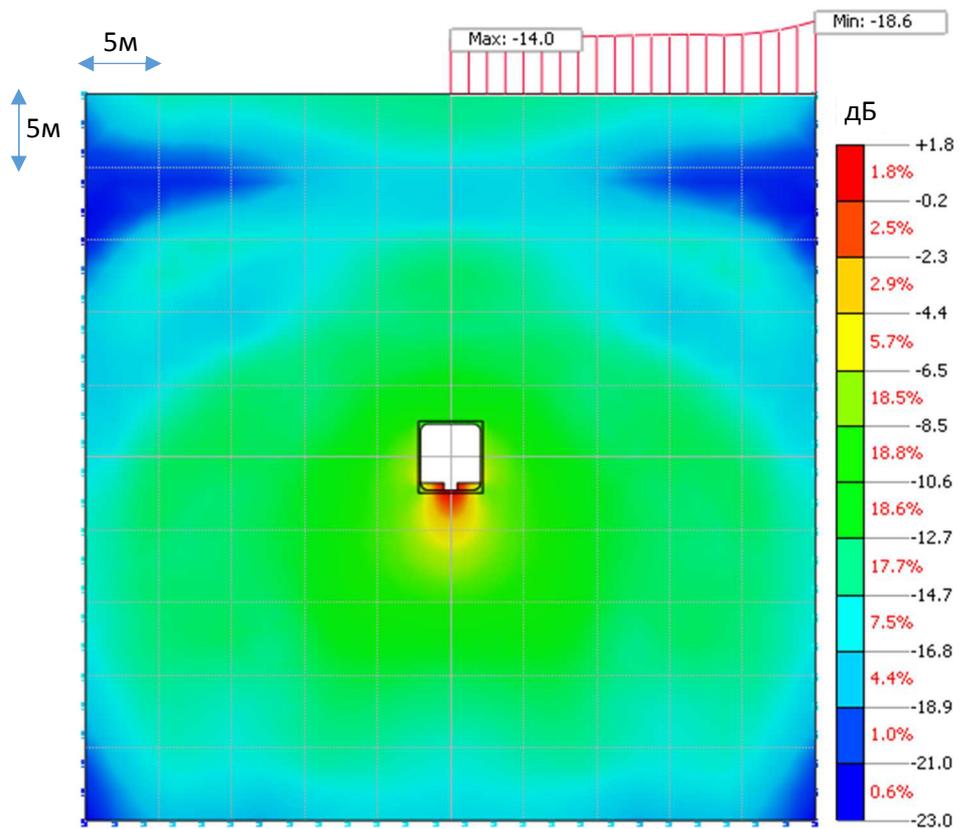


Рисунок Б.4 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля на частоте 16 Гц

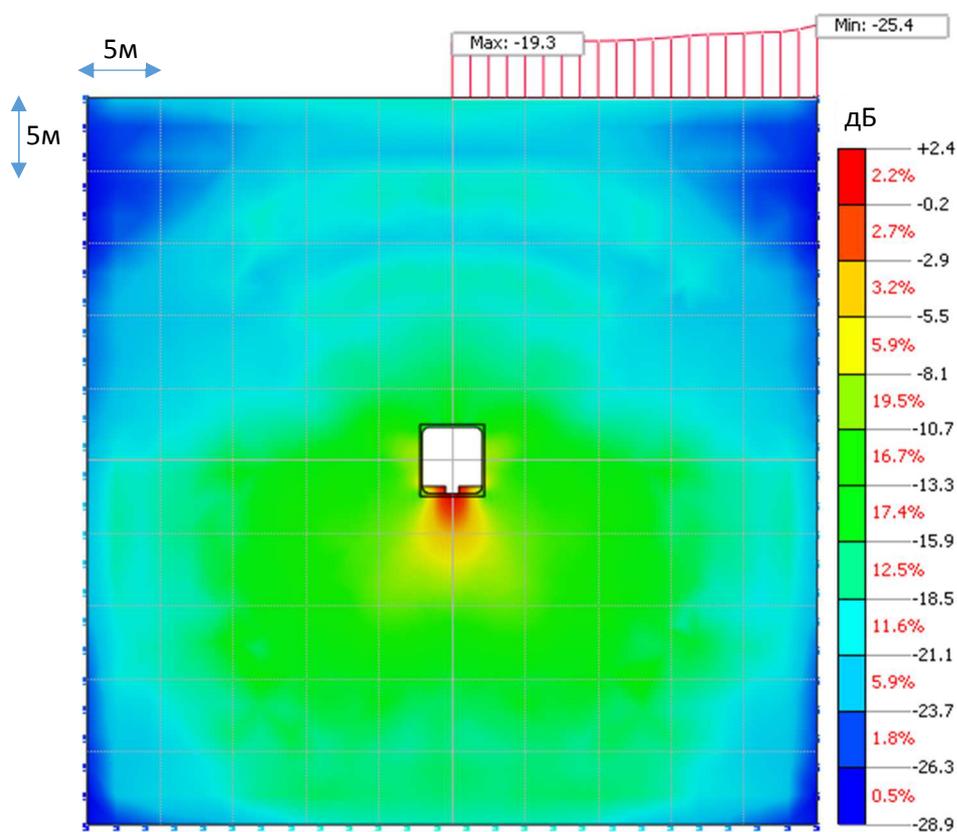


Рисунок Б.5 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля на частоте 31.5 Гц

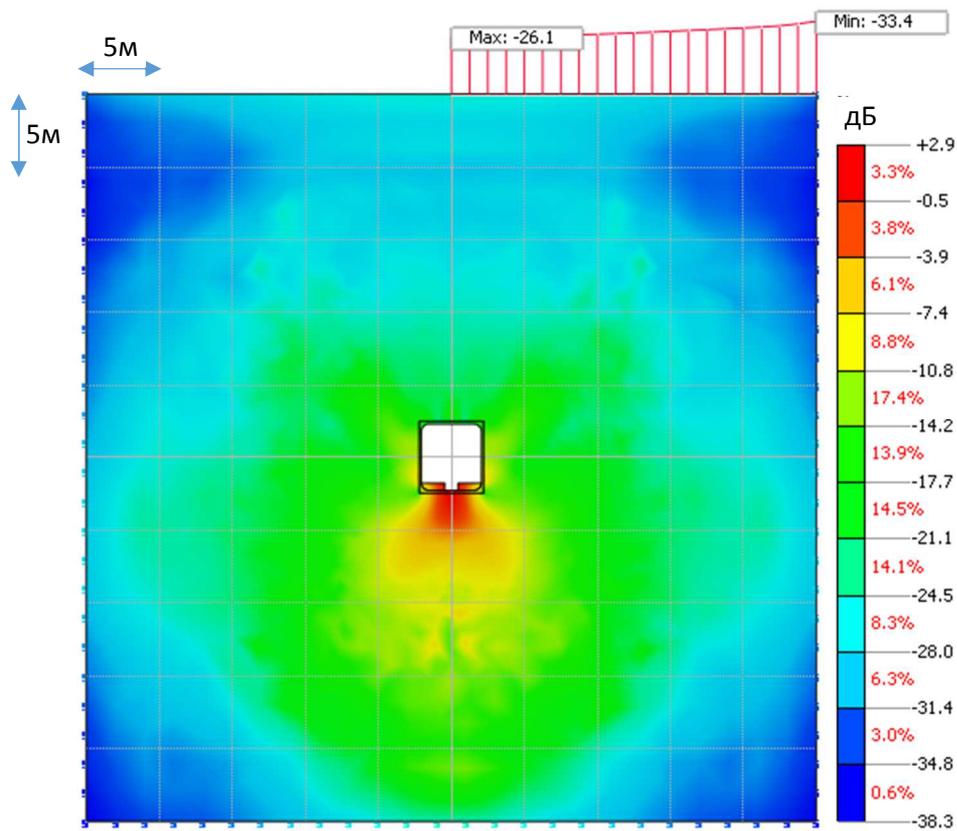


Рисунок Б.6 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля на частоте 63 Гц

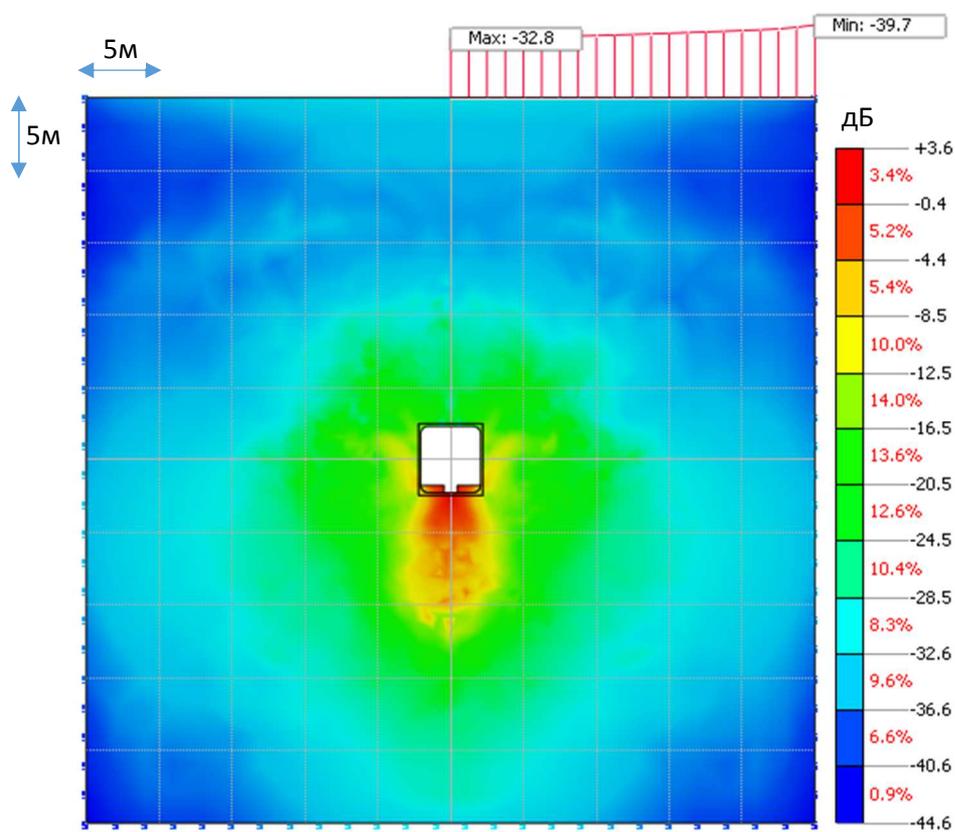


Рисунок Б.7 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля на частоте 125 Гц

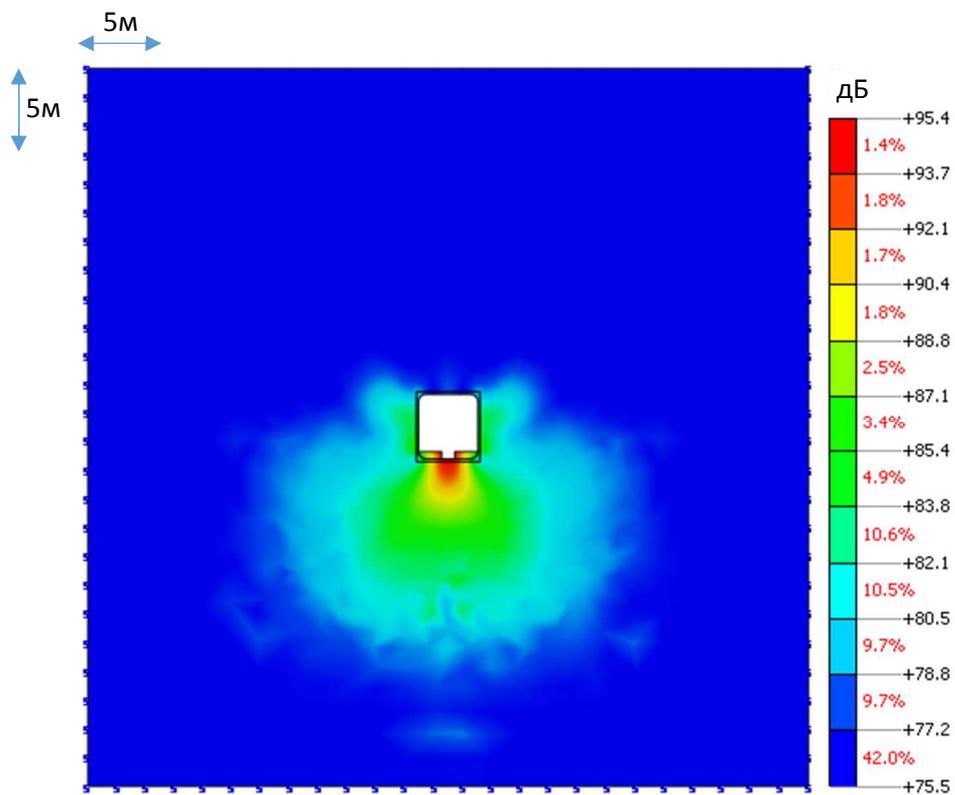


Рисунок Б.8 – Визуализация уровней виброускорений с коррекцией W_m , при которых выполняются санитарные нормы для жилых помещений (синий фон) при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля

Цельносекционная ж/б обделка двухпутного тоннеля габаритами 8.8x4.95м

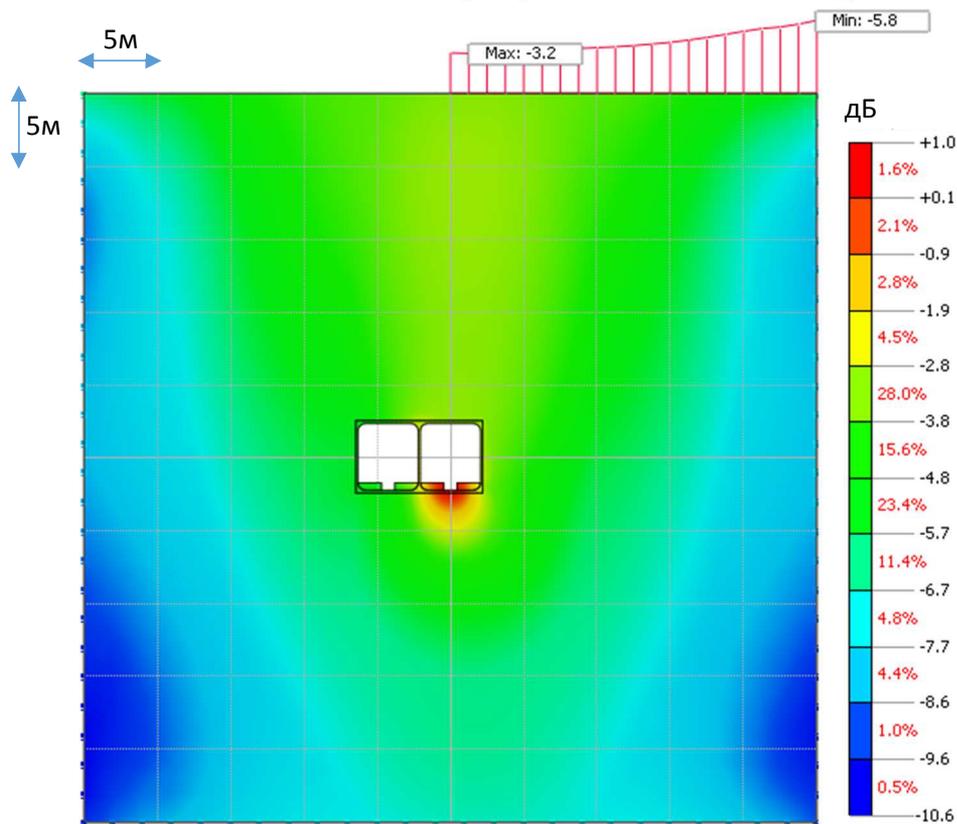


Рисунок Б.9 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке двухпутного тоннеля на частоте 2 Гц

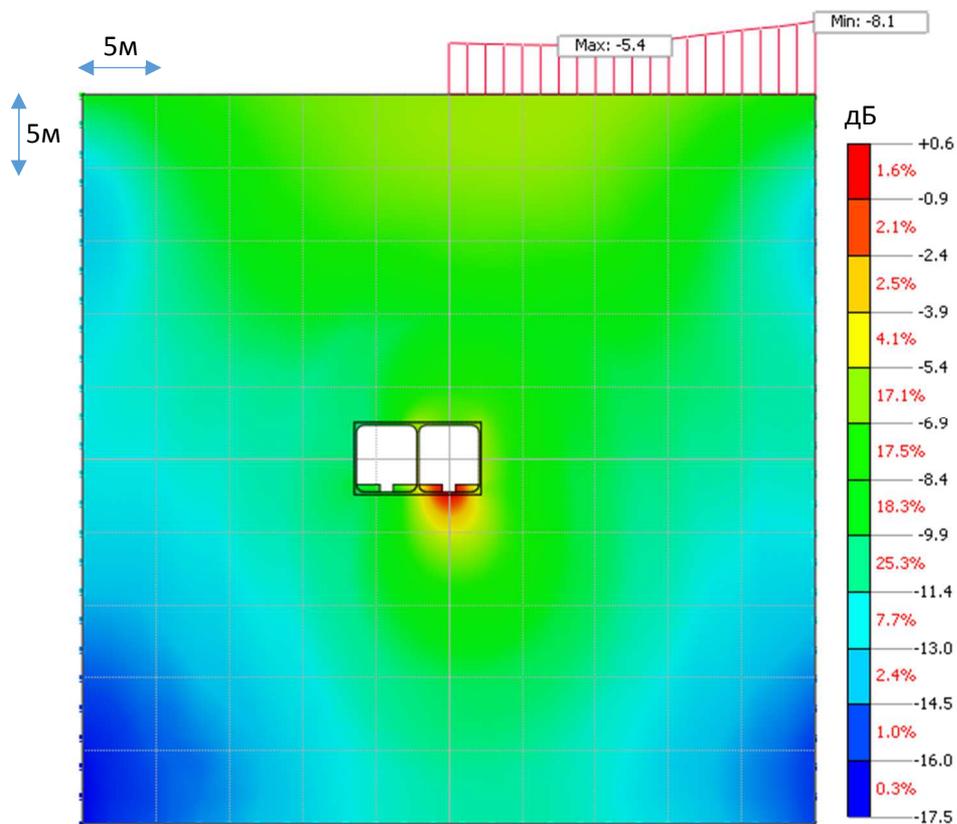


Рисунок Б.10 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке двухпутного тоннеля на частоте 4 Гц

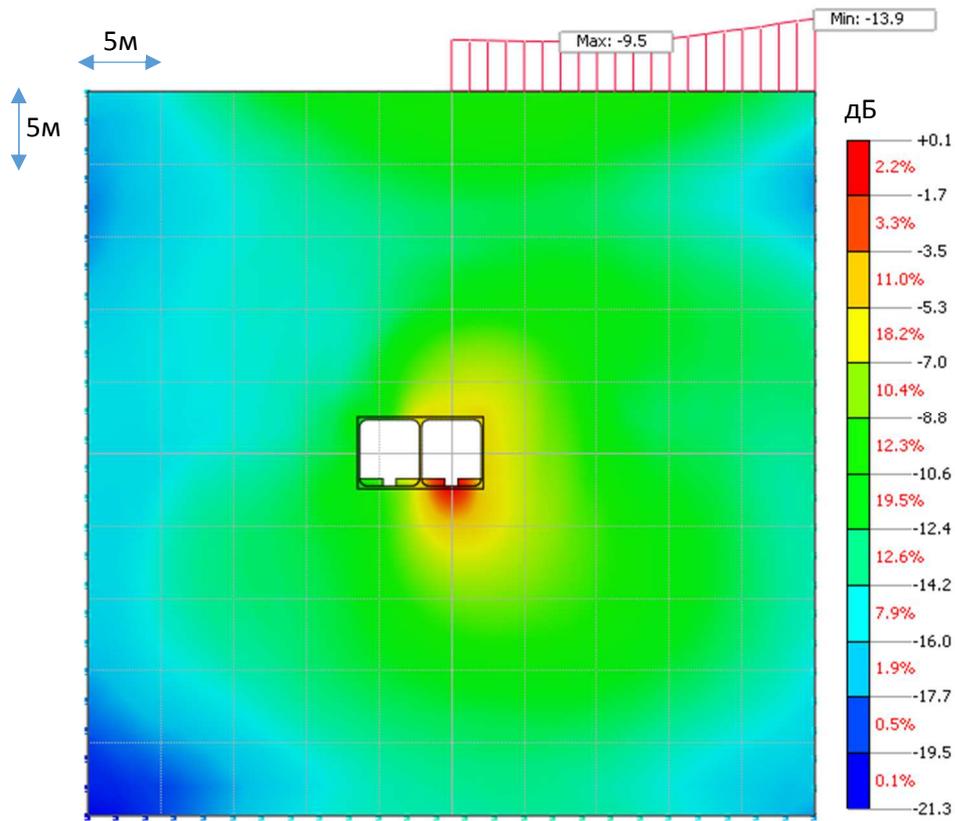


Рисунок Б.11 – Снижение уровней виброускорений в грунте при целлюлозно-секционной ж/б обделке двухпутного тоннеля на частоте 8 Гц

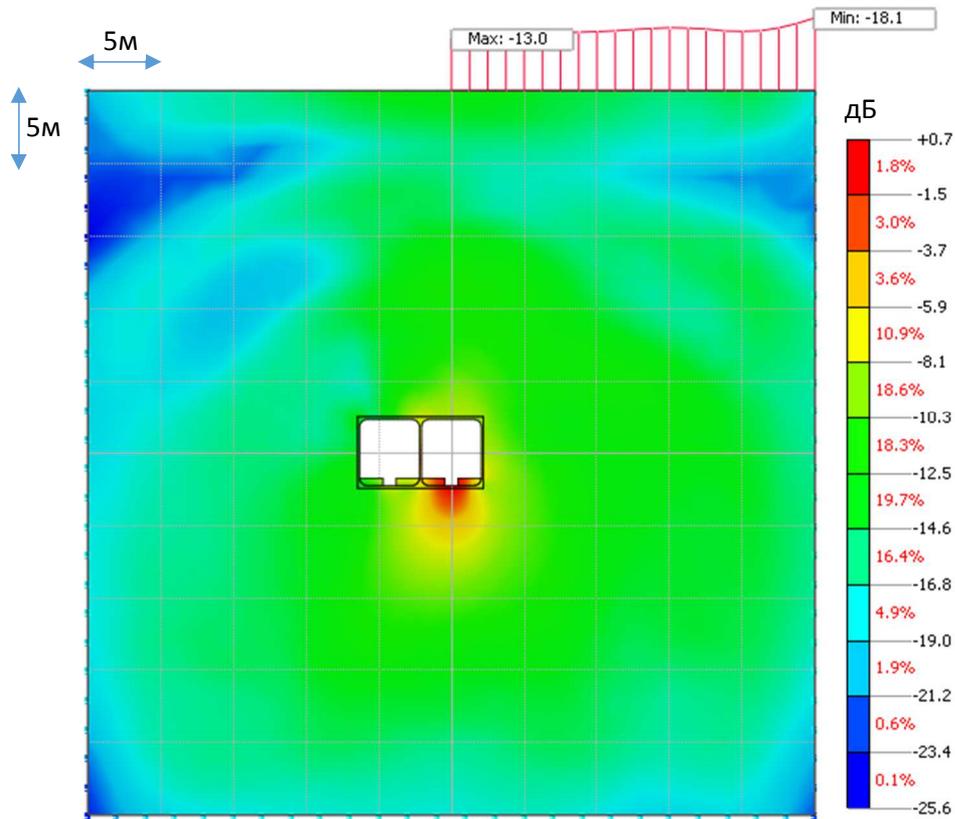


Рисунок Б.12 – Снижение уровней виброускорений в грунте при целлюлозно-секционной ж/б обделке двухпутного тоннеля на частоте 16 Гц

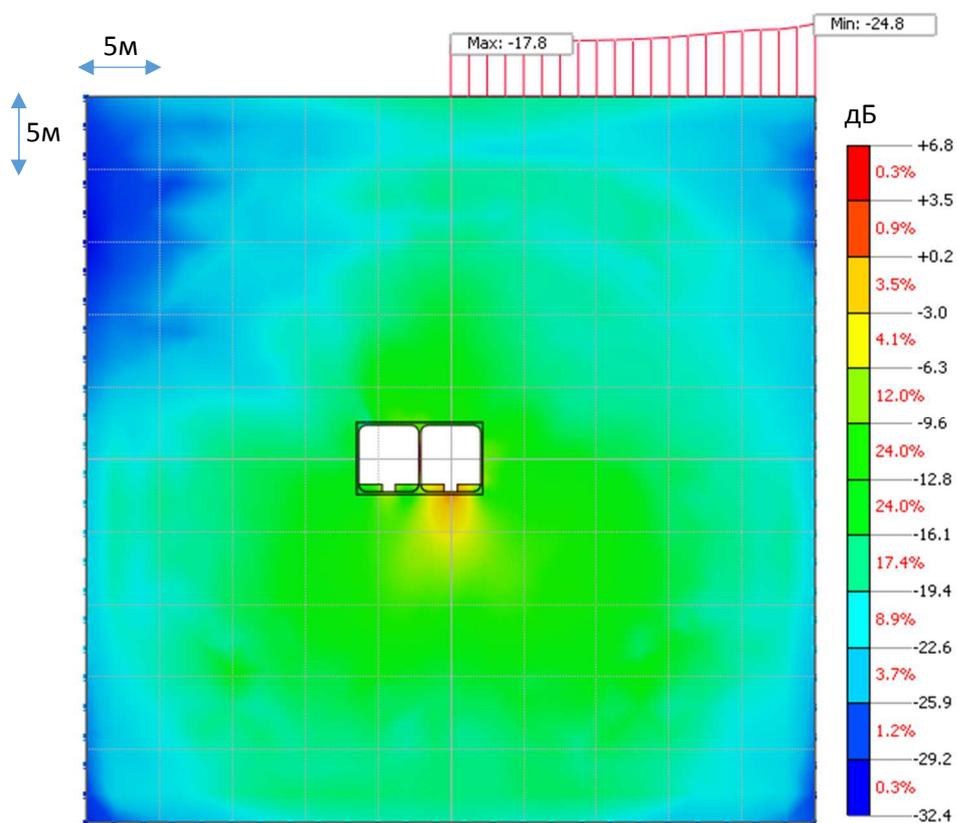


Рисунок Б.13 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке двухпутного тоннеля на частоте 31.5 Гц

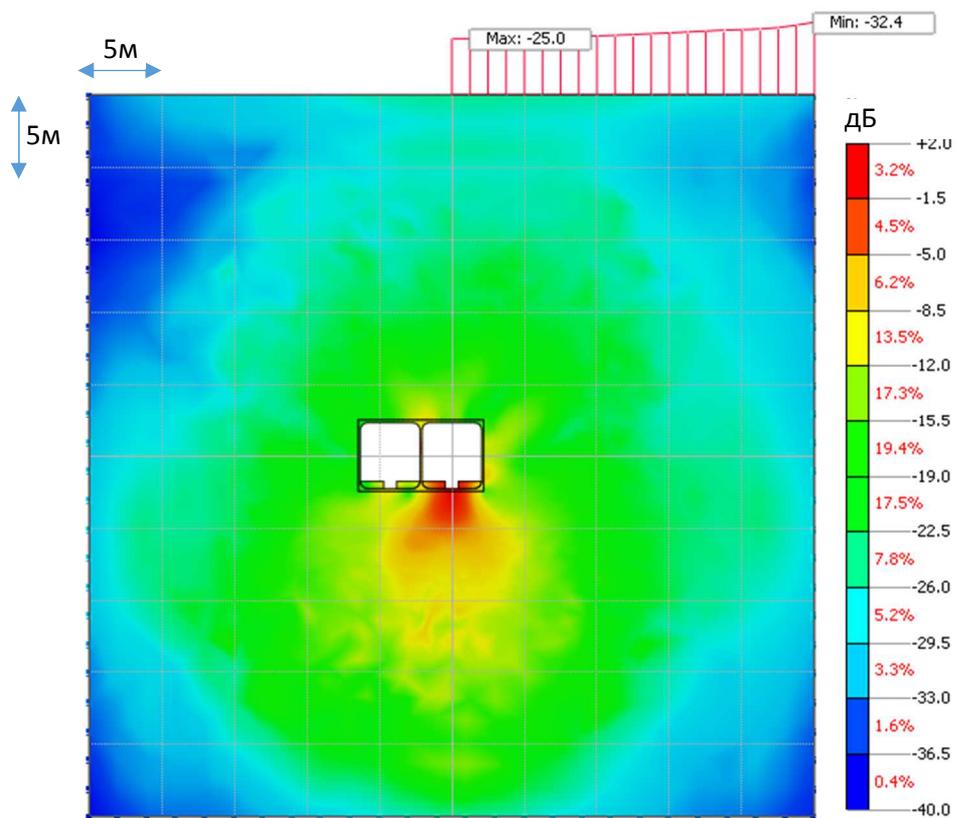


Рисунок Б.14 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке двухпутного тоннеля на частоте 63 Гц

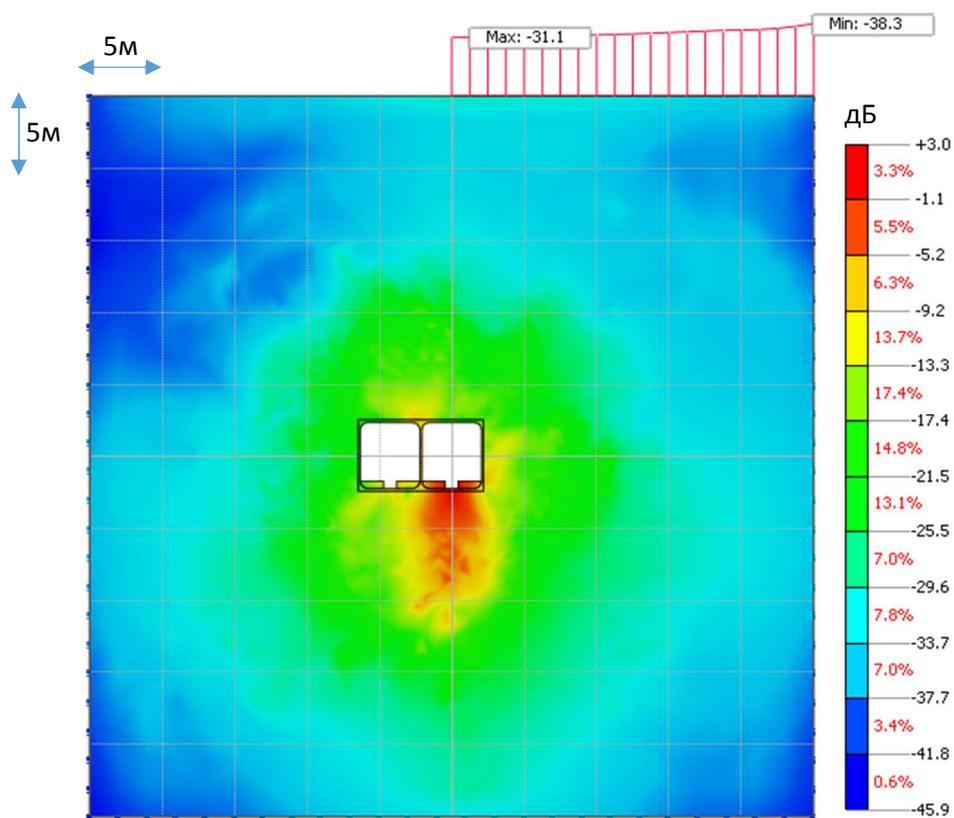


Рисунок Б.15 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке двухпутного тоннеля на частоте 125 Гц

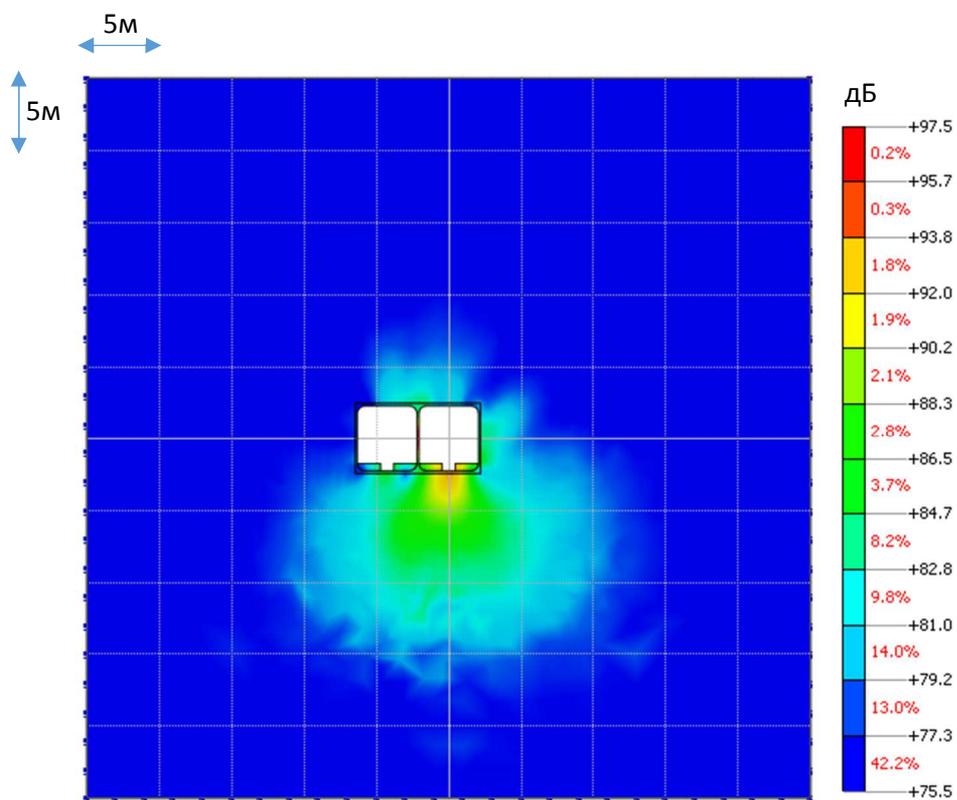


Рисунок Б.16 – Визуализация уровней виброускорений с коррекцией W_m , при которых выполняются санитарные нормы для жилых помещений (синий фон) при цельносекционной ж/б обделке двухпутного тоннеля

Цельносекционная ж/б обделка однопутного тоннеля габаритами 4.4x4.95м с дополнительной массой в основании

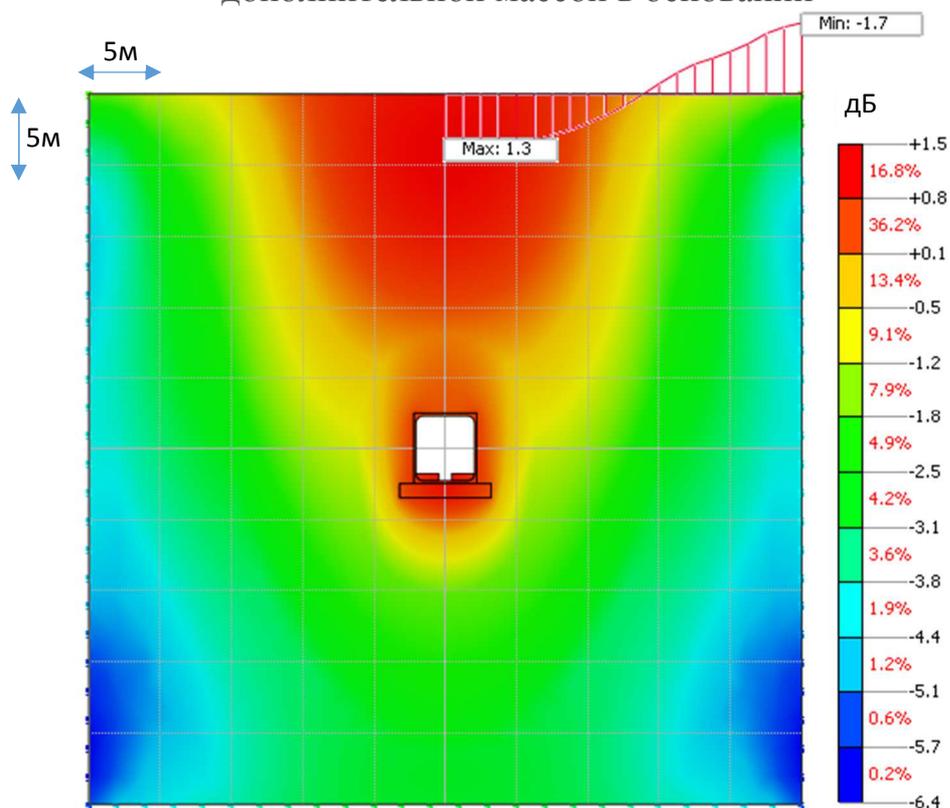


Рисунок Б.17 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительной массой в основании на частоте 2 Гц

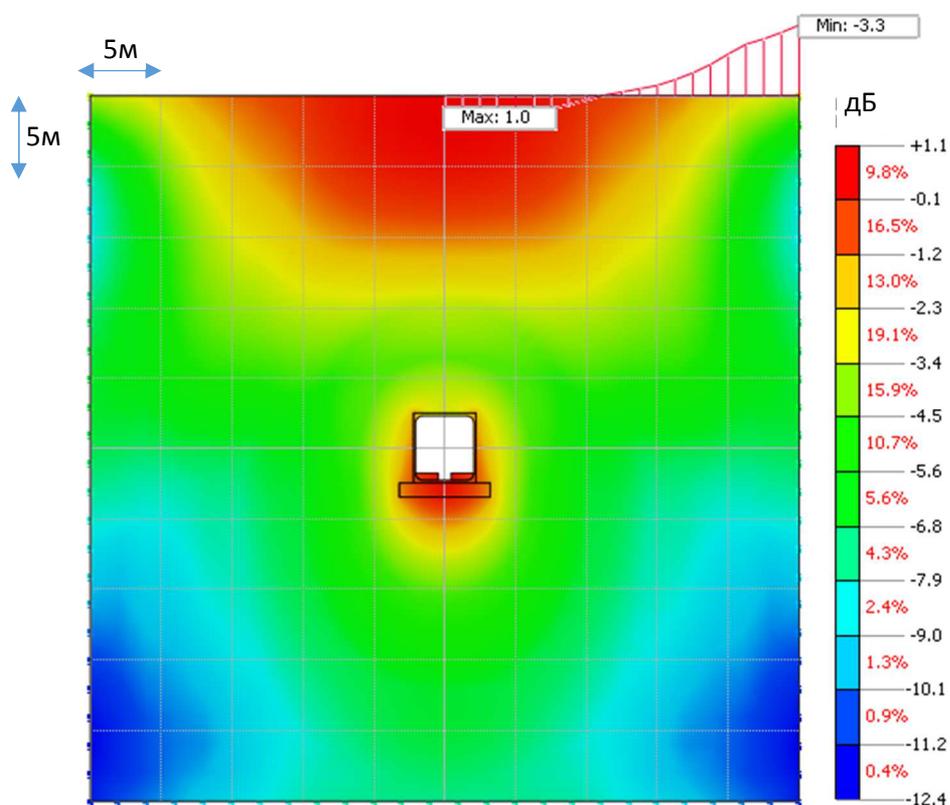


Рисунок Б.18 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительной массой в основании на частоте 4 Гц

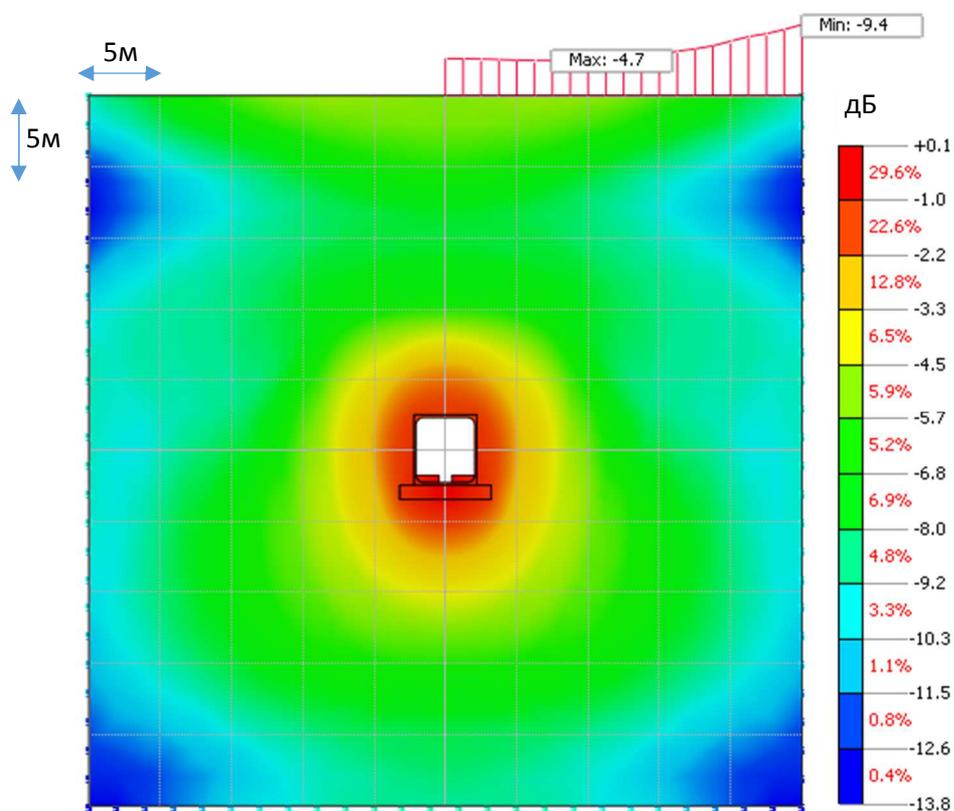


Рисунок Б.19 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительной массой в основании на частоте 8 Гц

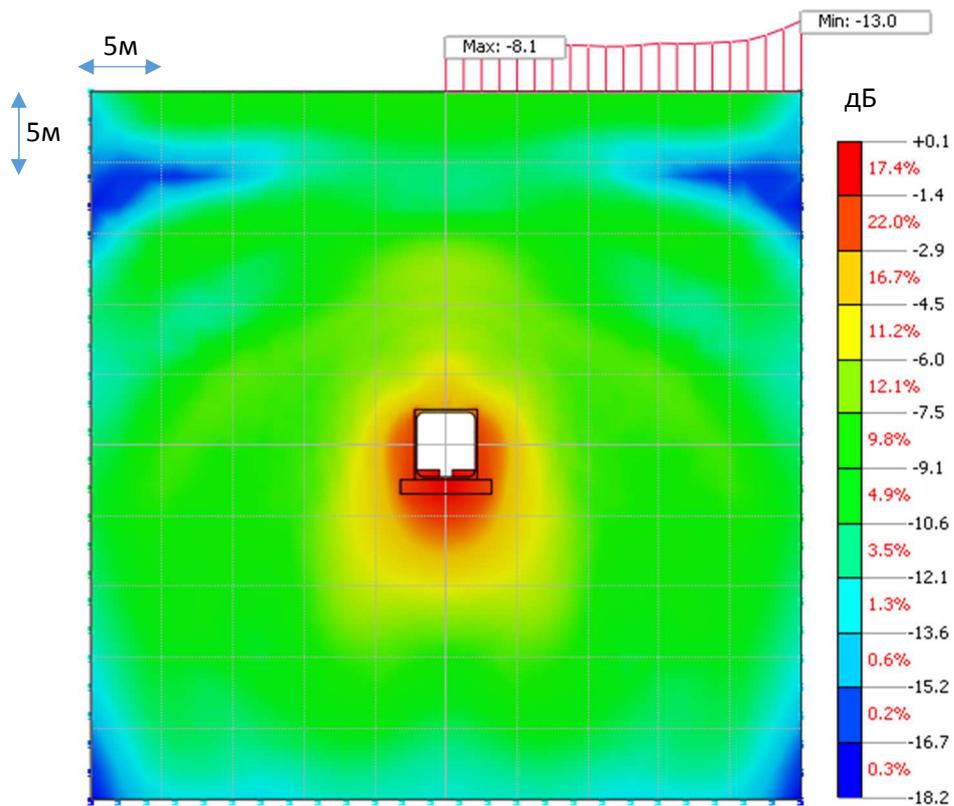


Рисунок Б.20 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительной массой в основании на частоте 16 Гц

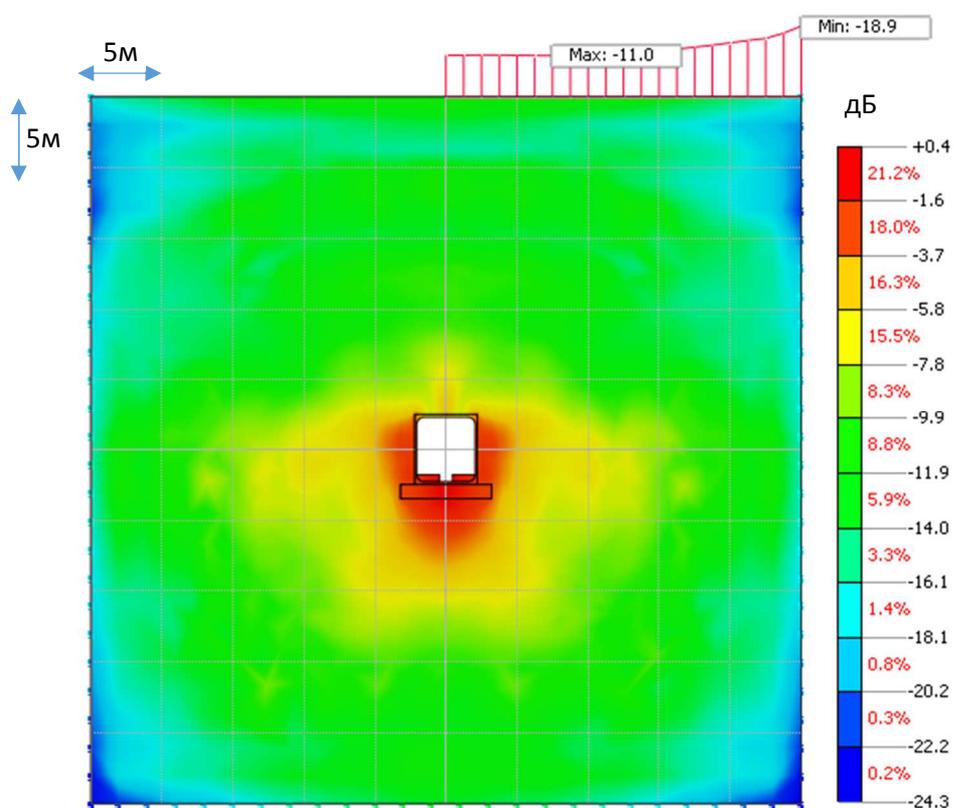


Рисунок Б.21 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительной массой в основании на частоте 31.5 Гц

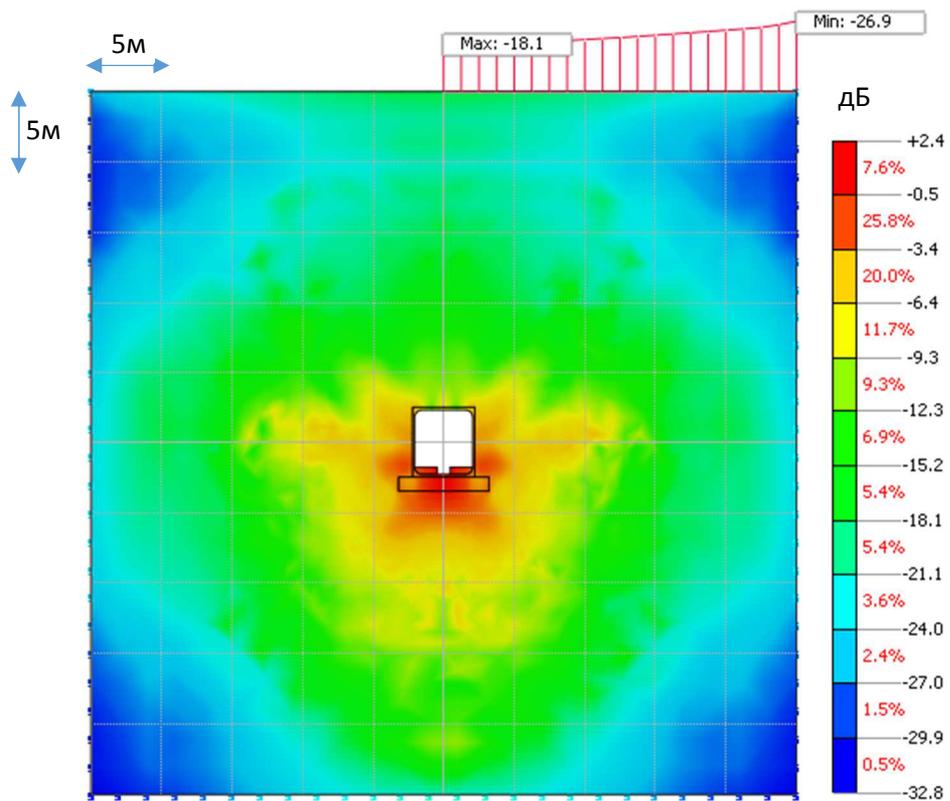


Рисунок Б.22 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительной массой в основании на частоте 63 Гц

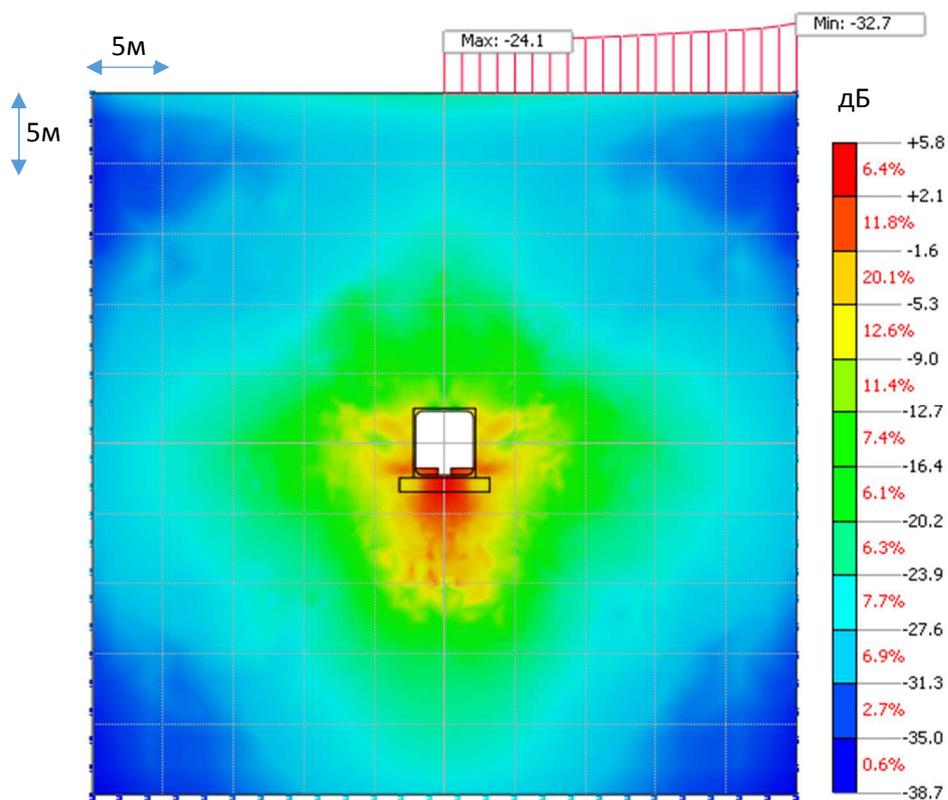


Рисунок Б.23 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительной массой в основании на частоте 125 Гц

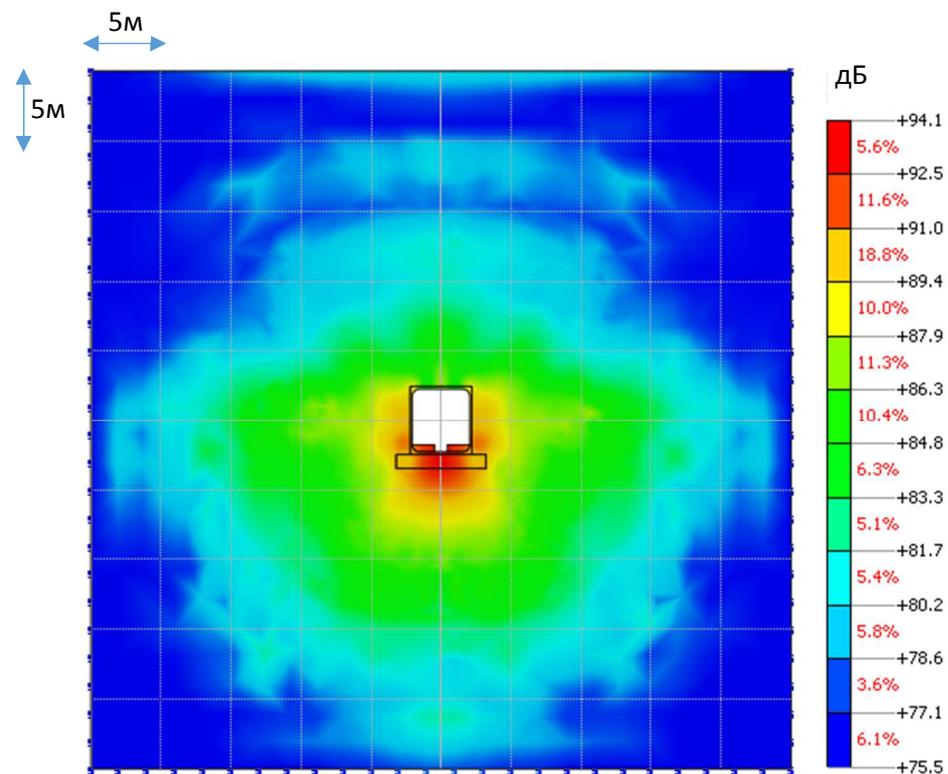


Рисунок Б.24 – Визуализация уровней виброускорений с коррекцией W_m , при которых выполняются санитарные нормы для жилых помещений (синий фон) при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительной массой в основании

Цельносекционная ж/б обделка однопутного тоннеля габаритами 4.4x4.95м с дополнительными сваями в основании

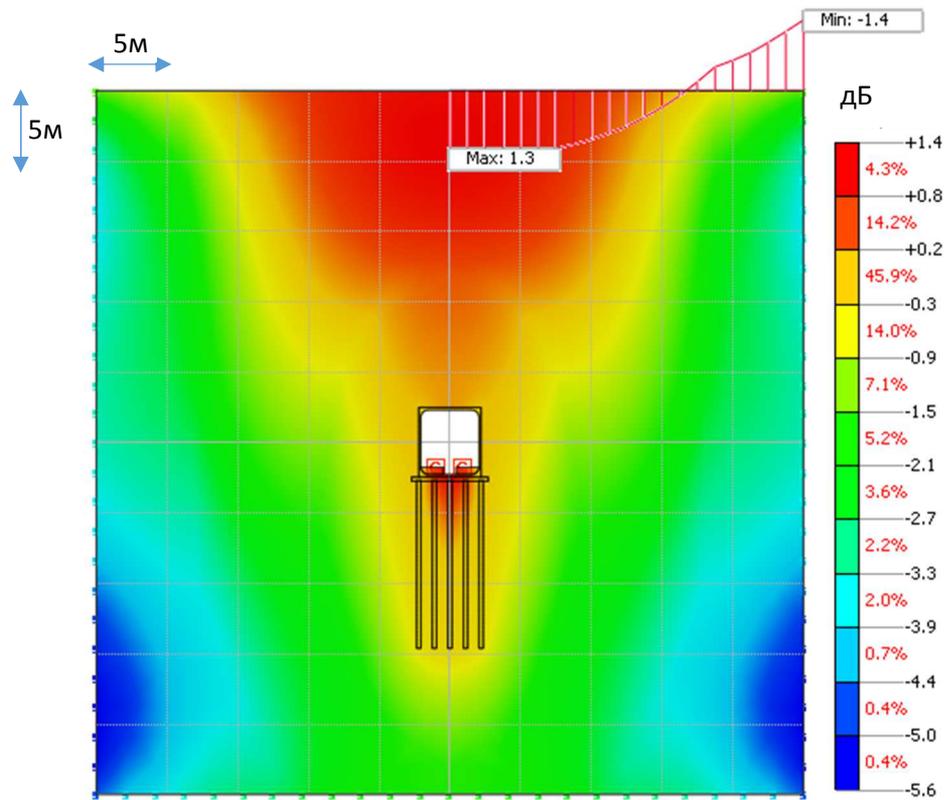


Рисунок Б.25 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительными сваями в основании на частоте 2 Гц

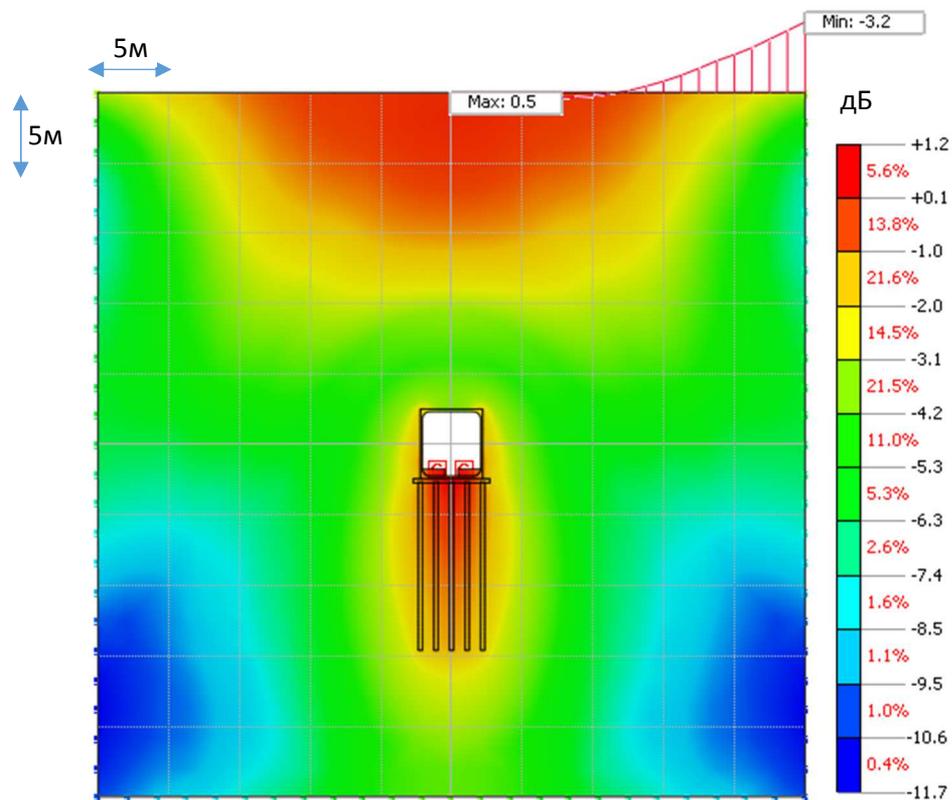


Рисунок Б.26 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительными сваями в основании на частоте 4 Гц

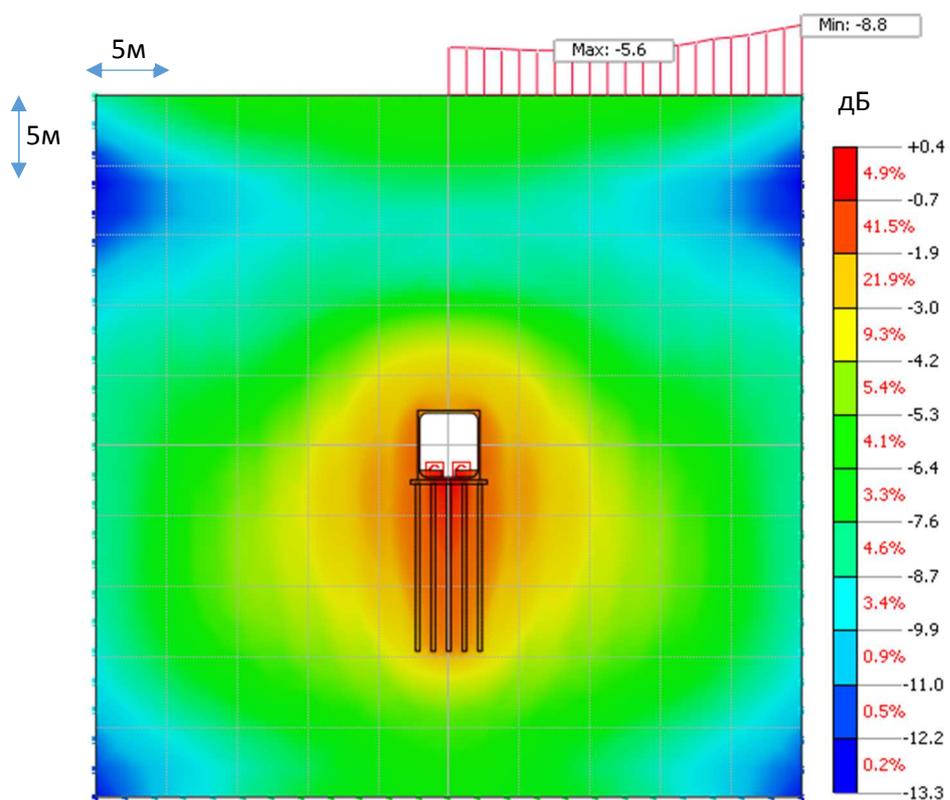


Рисунок Б.27 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительными сваями в основании на частоте 8 Гц

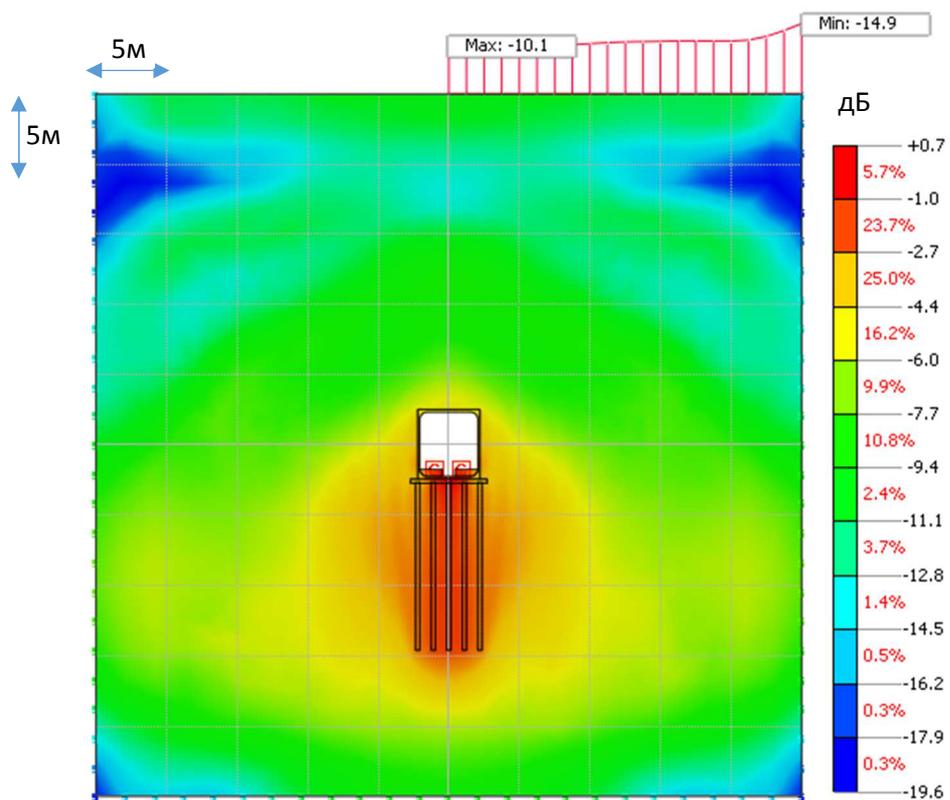


Рисунок Б.28 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительными сваями в основании на частоте 16 Гц

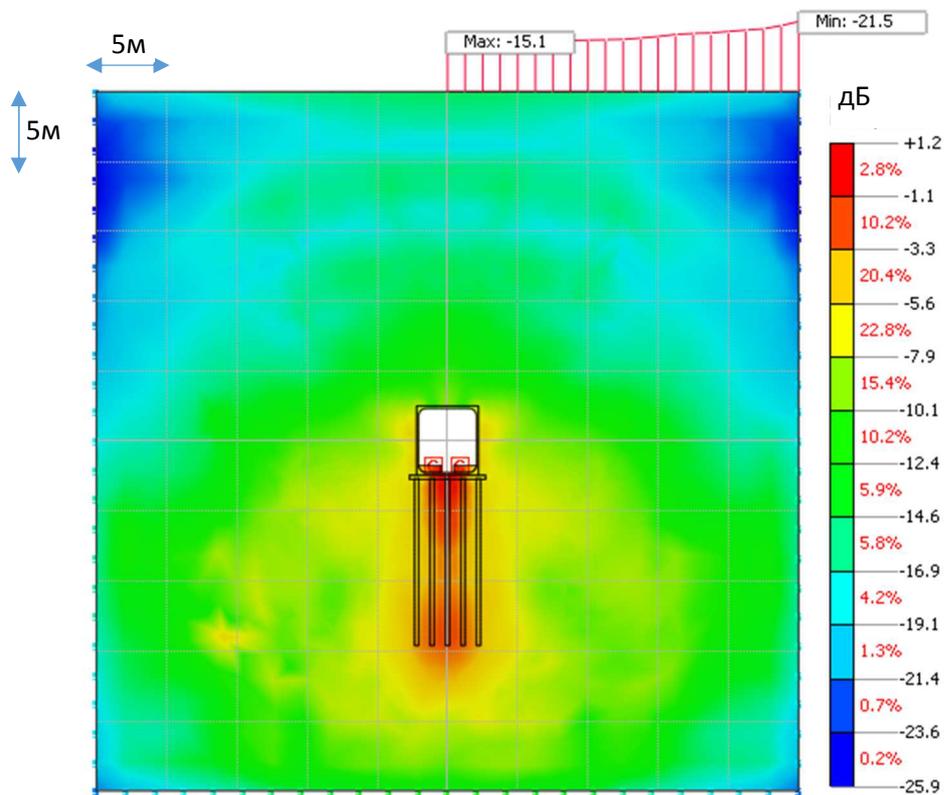


Рисунок Б.29 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительными сваями в основании на частоте 31.5 Гц

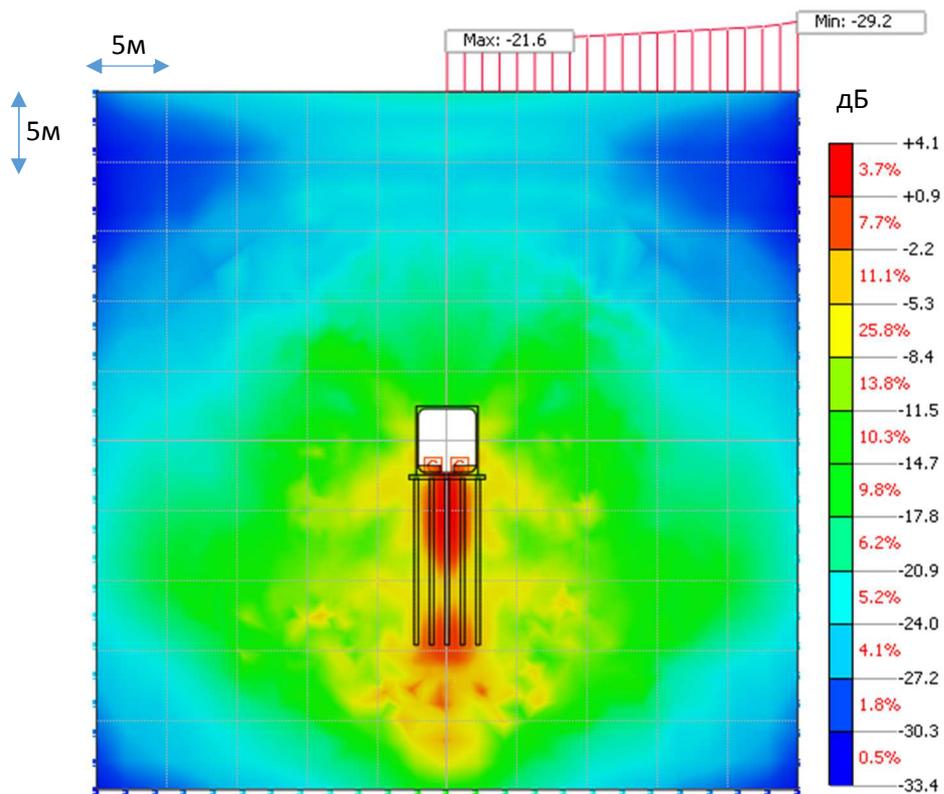


Рисунок Б.30 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительными сваями в основании на частоте 63 Гц

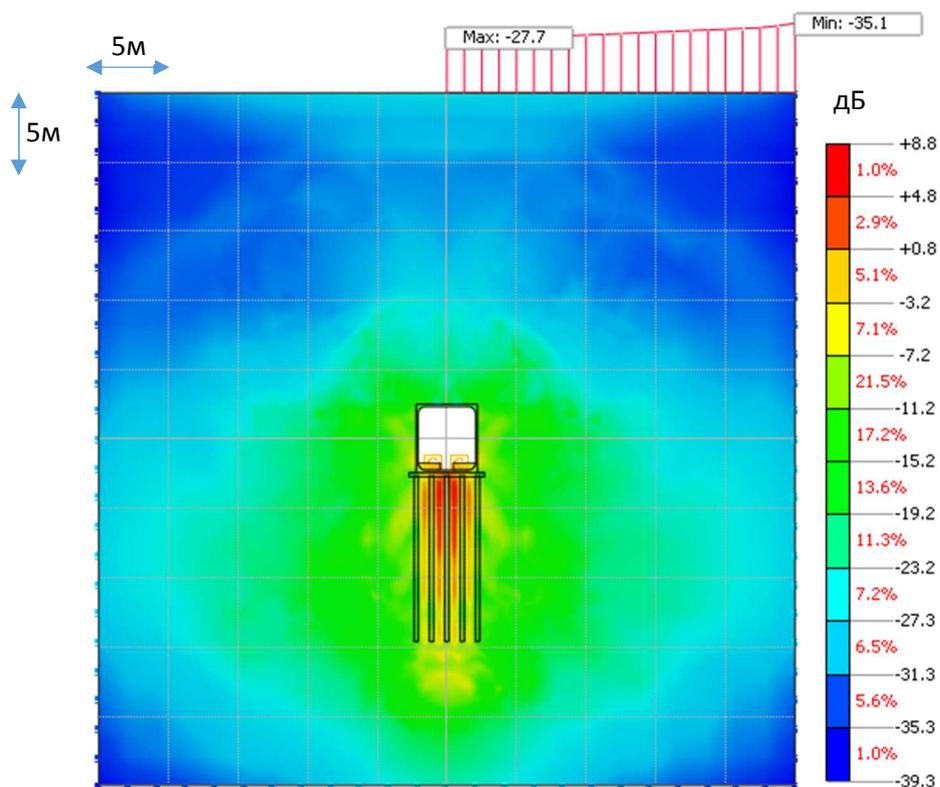


Рисунок Б.31 – Снижение уровней виброускорений в грунте при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительными сваями в основании на частоте 125 Гц

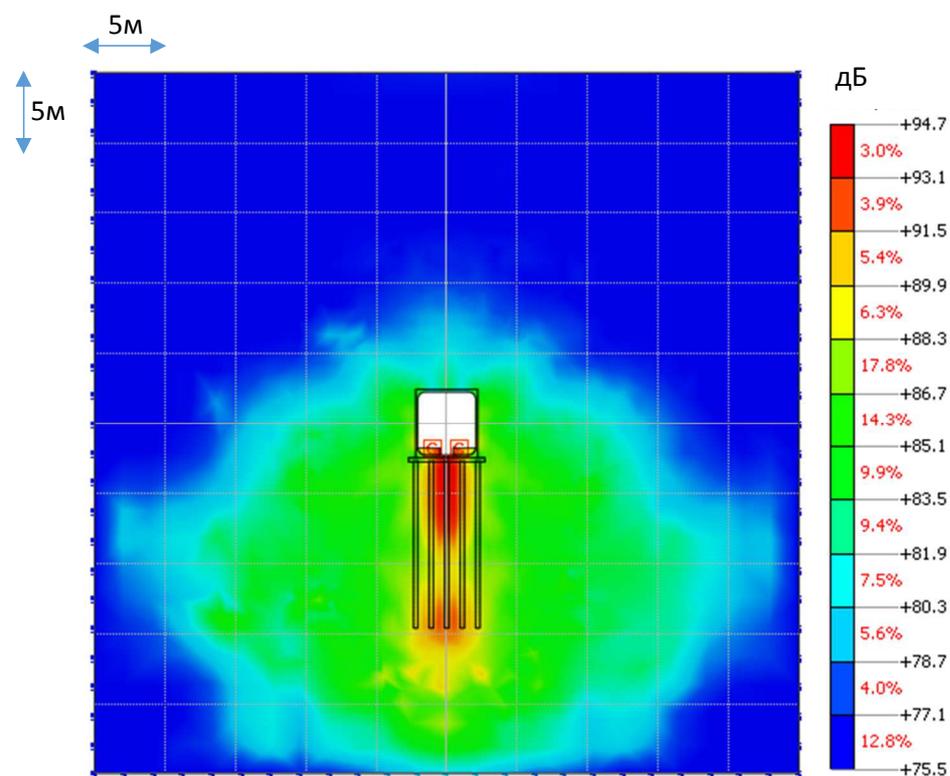


Рисунок Б.32 – Визуализация уровней виброускорений с коррекцией W_m , при которых выполняются санитарные нормы для жилых помещений (синий фон) при цельносекционной ж/б обделке однопутного тоннеля с дополнительными сваями в основании