

УДК 550.34

DOI [10.37153/2618-9283-2021-2-38-53](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-2-38-53)

Сейсмическое районирование

Решение прямой задачи как новый метод сейсмического микрорайонирования

Алешин А.С.¹, Погребченко В.В.¹, Никитин С.Н.¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Москва, Российская Федерация

Аннотация: В статье описан новый вид сейсмического микрорайонирования, получивший наименование метода решения прямой задачи. Основным методическим приемом при этом принимается формирование на основе комплексных инженерно-геологических и геофизических исследований моделей грунтовой толщи. Предложена оригинальная техника компьютерного моделирования, основанная на использовании в качестве исходного сейсмического воздействия короткого импульса ускорений. В расчетах приращения сейсмической интенсивности используется новая формула, учитывающая все факторы влияния свойств грунтов на параметры сейсмических воздействий – сейсмическую жесткость, обводненность, резонансные эффекты и нелинейность реакции грунтов на сильные сейсмические воздействия. По полученным данным производится картирование моделей грунтовых толщ на площадке строительства и определяются параметры сейсмических воздействий, отвечающие свойствам каждой модели грунтовых толщ. Приведенные в статье предложения нашли свое отображение в нормативных документах, посвященных СМР объектов повышенной ответственности и территориальному планированию.

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование, прямая задача, сейсмические свойства грунтов, модель, спектр реакции, коэффициент динамичности, средняя модель, скорость поперечных волн, сейсмическая жесткость

Для цитирования: Алешин А.С., Погребченко В.В., Никитин С.Н. Решение прямой задачи как новый метод сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 2. С. 38-53

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-2-38-53](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-2-38-53)

Seismic zoning

Solving a direct problem as a new method of seismic microzonation

Aleshin A.S.¹, Pogrebchenko V.V.¹, Nikitin S.N.¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth Russian Academy of Sciences.
Moscow, Russian Federation

Abstract: The article describes a new type of seismic microzonation, called the method of solving a direct problem. The main methodological technique in this case is the formation of models of the soil layer on the basis of complex engineering-geological and geophysical studies.

@ Aleshin A.S., Pogrebchenko V.V., Nikitin S.N., 2021

An original computer simulation technique based on the use of a short acceleration pulse as the initial seismic impact is proposed. In the calculations of the increment of seismic intensity, a new formula is used that takes into account all the factors of the influence of soil properties on the parameters of seismic impacts – seismic rigidity, water saturation, resonant effects and the nonlinearity of the reaction of soils to strong seismic impacts. Based on the obtained data, the models of ground layers at the construction site are mapped and the parameters of seismic impacts that correspond to the properties of each model of ground massif are determined. The proposals presented in the article are reflected in the regulatory documents devoted to the SMZ of objects of increased responsibility and territorial planning.

Keywords: seismic microzonation, direct problem, seismic properties of soils, model, response spectrum, dynamic coefficient, average model, shear wave velocity, seismic rigidity

For citation: Aleshin A.S., Pogrebchenko V.V., Nikitin S.N. Solving a direct problem as a new method of seismic microzonation. *Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 2, pp. 38-53. (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-2-38-53](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-2-38-53)

Введение

Задача сейсмического микрорайонирования (СМР), как известно, состоит в уточнении параметров сейсмических воздействий на площадке строительства и эксплуатации зданий и сооружений в зависимости от местных условий – грунтовых, геоморфологических, гидрогеологических и геофизических. Эта задача решается несколькими способами, из которых наиболее распространенный метод сейсмических жесткостей. Родоначальник метода С.В. Медведев для того, чтобы с помощью количественных соотношений связать свойства грунта с изменением сейсмической интенсивности, использовал зависимость приращения сейсмической интенсивности от трех факторов: величины сейсмической жесткости – произведения скорости упругих волн на плотность, от уровня грунтовых вод и от резонансных явлений в грунтовой толще.

Метод сейсмических жесткостей – исторически один из первых инструментальных способов оценки влияния свойств грунтов на параметры сейсмических воздействий. С одной стороны, это – наиболее часто используемый метод СМР, с другой стороны, в арсенале методов СМР вряд ли можно найти другой метод, подвергающийся столь ожесточенной и разноплановой критике. И, несмотря на это, метод жив. Одна из возможных причин такой живучести метода, по нашему мнению, состоит в том, что С.В. Медведев из множества параметров, характеризующих свойства грунтов, выбрал сейсмическую жесткость, которая через плотность теснейшим образом связана с инженерно-геологическими, а через скорость упругих волн – с сейсмическими свойствами грунтовой толщи.

Связь свойств грунта с параметрами сейсмических воздействий С.В. Медведев в книге [1] основал на корреляционных соотношениях, что с одной стороны обеспечило практическую надежность оценок сейсмической опасности, но с другой, было причиной многих недостатков, обусловленных тем, что корреляционная методика только устанавливает факт влияния того или иного фактора инженерно-геологической обстановки (сейсмическая жесткость, обводненность, рельеф и т.д.) на сейсмический эффект, но не отвечает на вопрос о причинах такого влияния. Альтернативой корреляционной методике уже довольно давно было выдвинута необходимость разработки физических основ СМР [2]. Развитие такого подхода с течением времени и

привело к созданию и внедрению в практику СМР нового метода, основанного на решении прямой задачи, описанию чего посвящена настоящая статья.

1. Физические основы методики

Формально зависимость параметров сейсмических воздействий в форме приращения сейсмической интенсивности от свойств грунта выражается соотношением: $\Delta I_{\Sigma} = \Delta I_{сж} + \Delta I_{ув} + \Delta I_{рез}$, где последовательно прописаны факторы сейсмической реакции грунтов – сейсмическая жесткость, обводненность и резонансный эффект. С.В. Медведев вывел количественные выражения каждого из приведенных факторов.

Зависимость приращения сейсмической интенсивности от сейсмической жесткости определялась им в виде следующего выражения: $\Delta I_{сж} = 1,67 \lg (R_0/R_1)$, где R_0, R_1 – сейсмическая жесткость соответственно жесткого полупространства и рыхлого слоя.

Влияние обводненности С.В. Медведев представил в виде зависимости: $\Delta I_{ув} = K \exp(-0,04h^2)$, где h – глубина уровня грунтовых вод, K – литологический коэффициент.

Учет резонансов является наименее разработанной частью методики сейсмических жесткостей. Влияние резонансных эффектов ограничено учетом колебаний рыхлого слоя на жестком полупространстве. В таком виде методика оценки приращения сейсмической интенсивности нашла, как было сказано, широкое распространение вплоть до сегодняшнего дня [3].

Вместе с тем в ряде публикаций [4-6] были показаны ошибки в каждом из трех слагаемых, входящих в формулу метода сейсмических жесткостей. Кратко рассмотрим аргументы, приведенные в этих работах.

Неверен уже первый основной член формулы метода сейсмической жесткости. В частности неверна предпосылка, при помощи которой было выведено соотношение, определяющее зависимость приращения сейсмической интенсивности от сейсмической жесткости $\Delta I_{сж} = 1,67 \lg (R_0/R_1)$ – равенство потока мощности в двух соседних точках с различным строением грунтов. Это уже было показано в книге [4], теперь кратко повторим этот вывод.

Предположим, что снизу из упругого полупространства с сейсмической жесткостью R_0 на слой рыхлого грунта с сейсмической жесткостью $R_1 < R_0$ нормально падает плоская упругая сдвиговая волна. В таком случае при переходе из скального основания в рыхлый грунт большая часть энергии отражается назад в полупространство. Тем самым при сравнении потоков энергии, выходящих на дневную поверхность, в двух соседних точках условие равенства не соблюдается, что лишает достоверности основное соотношение метода сейсмических жесткостей.

Несмотря на то, что плотность энергии на рыхлом грунте значительно ниже, чем в скальном, амплитуда ускорений на рыхлых грунтах из-за низкой сейсмической жесткости окажется большей, чем ускорение на скальном грунте. Точные математические выкладки и окончательные результаты приведены в цитированных выше работах.

Таким образом, получили общий результат: за счет сейсмической жесткости изменение ускорений может быть различным в зависимости от соотношения сейсмических жесткостей слоев грунта и полупространства, слагающих разрез, и вовсе не так, как принято в настоящее время в Нормативных документах. Это ставит под сомнение корректность использования таблицы 4.1 норматива [3] и методики оценки приращения сейсмической интенсивности по измерениям амплитуд записи слабых землетрясений.

Вместе с тем, полученный результат не противоречит макросейсмическим данным, если принять, что в изменение скоростей смещений, помимо сейсмической жесткости, вносят вклад резонансные эффекты.

Условие равенства потоков энергии в соседних точках на фронте сейсмической волны сохраняется до уровня, на котором свойства среды в двух соседних (с точки зрения

СМР) точках не изменяются. В геологическом отношении этот уровень обычно соответствует кровле скального грунта. Выше этого уровня скальный грунт перекрыт рыхлым осадочным чехлом, свойства которого довольно сильно (сравнительно с нижележащей толщей) варьируют как по глубине, так и по латерали. Для корректного расчета частотных характеристик грунтового массива лучше всего за этот уровень принимать подошву слоя рыхлых грунтов, а частотную характеристику рассчитывать, как отношение спектров колебаний, зарегистрированных в некоторой точке поверхности рыхлых грунтов, к аналогичному спектру на выходе на дневную поверхность скальных грунтов.

Все изложенные соображения позволяют представить связь интенсивности сейсмических колебаний с сейсмической жесткостью грунтового массива в виде измененной формулы сейсмических жесткостей:

$$\Delta I = 3,3 \lg [2/(R_1/R_0+1)] = 1 - 3,3 \cdot \lg(R_1/R_0+1), \quad (1)$$

где индексы 0 и 1 относятся соответственно к нижней и верхней части грунтовой толщи.

Изменение свойств грунта под влиянием обводнения учитывается через изменение сейсмической жесткости. Обводнение увеличивает плотность грунта и по-разному влияет на скорости поперечных волн в грунтах, различающихся литологией вследствие изменения контактного сцепления на границах зерен. Вопросы влияния обводненности на сейсмические свойства дисперсных грунтов рассмотрены в работе [5]. В некоторых случаях (например, при замачивании лессов) уменьшение контактной прочности на границах зерен может привести к частичной или полной потере несущей способности грунта. Сейсмические последствия этого явления достаточно подробно исследованы в работе [7] и потому нет нужды повторять здесь полученные результаты. Никаких других эффектов (вроде гидравлического удара, на что указывалось в ранних работах по этой проблематике) не существует, хотя бы из-за не достаточно высокой интенсивности сейсмических воздействий.

Таково представление первых двух слагаемых формулы сейсмических жесткостей. Что касается учета спектральных особенностей, здесь нельзя обойтись без специальных модельных экспериментов, о чем пойдет речь ниже.

2. Модели грунтовой толщи

Вначале рассмотрим общие вопросы представления задач СМР с использованием моделей сейсмогрунтовых условий.

К этому понятию относятся все локальные особенности геологической обстановки, определяющие специфику сейсмических воздействий – их амплитуду и спектральный состав. В самом общем виде модель сейсмогрунтовых условий определяется набором параметров – скоростью поперечных волн, плотностью, мощностью, константами поглощения и нелинейности каждого слоя, входящего в грунтовую толщу определенной суммарной мощности.

Грунт, как правило, представляет собой слоистую среду, свойства слоев которой различаются порой довольно заметно. Потому свойства слоистой сейсмической среды принято характеризовать величинами средних плотностей и средних скоростей поперечных волн, определяемых по формулам: $\rho_{сред.} = \Sigma \rho_i h_i / \Sigma h_i$; $V_{сред.} = \Sigma h_i / \Sigma (h_i / V_i)$ и средней сейсмической жесткостью $R_{сред.} = \rho_{сред.} \cdot V_{сред.}$

Предлагается все разнообразие локальных сейсмогрунтовых условий на исследуемой территории разделить на некоторое количество типовых моделей. Наиболее

частым случаем, встречающемся в природе, является модель с постоянными значениями скоростей в каждом слое, причем скорость слоев увеличивается с глубиной. Такой тип геологического разреза естественно назвать "нормальным". Пример "нормального" геологического и сейсмического скоростного разреза приведен на рис. 1.

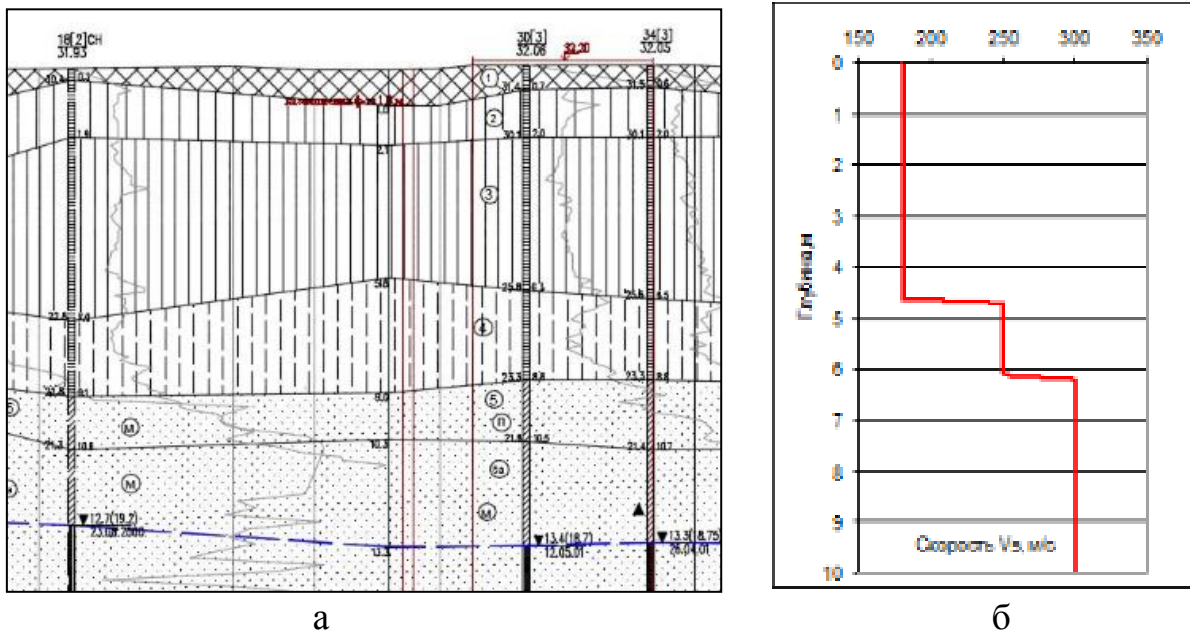


Рисунок 1 – Пример нормального инженерно-геологического (а) и сейсмического (б) разрезов

Figure 1 – Example of normal engineering-geological (a) and seismic (b) sections

Причиной роста скорости сейсмических волн с глубиной является консолидация пород Земли под влиянием процессов метаморфизма и геостатического нагружения.

В противоположность такому «нормальному» закону изменения скорости с глубиной в ряде случаев существуют так называемые инверсные разрезы, в которых скорость в нижележащих слоях характеризуется более низкими значениями, чем в вышележащих слоях.

В качестве примера можно привести данные сейсморазведочных наблюдений в районе г. Калининграда [8]. Здесь на участках, расположенных в пойме р. Преголя, согласно фоновым данным в инженерно-геологических разрезах по близлежащим скважинам в пределах поймы в интервале глубин 3-16 м выделяются низкоскоростные пропластки торфов и илов. Скорость распространения поперечных волн в таких грунтах существенно ниже, чем в песчано-глинистых отложениях. Верхняя часть разреза на этих участках, как правило, представлена насыпными грунтами, достаточно хорошо уплотненными и вследствие этого характеризующимися высокими значениями скоростей упругих волн. Инженерно-геологический разрез участка поймы р. Преголя и соответствующий скоростной разрез, полученный при сейсморазведочных работах на том же участке, приведены на рис.2.

За счет эффекта экранирования выделение в разрезе низкоскоростных слоев при наземных наблюдениях с помощью преломленных волн принципиально невозможно.

Содержание работ в рамках сейсмического микрорайонирования состоит, таким образом, в определении набора моделей и картировании их на районируемой территории. В соответствии с этой картой можно будет определять оптимальные для данной модели конструкции зданий и сооружений.

С точки зрения возможных изменений грунтовых условий при дальнейшей эксплуатации сооружений на карте СМР следует выделить два типа моделей.

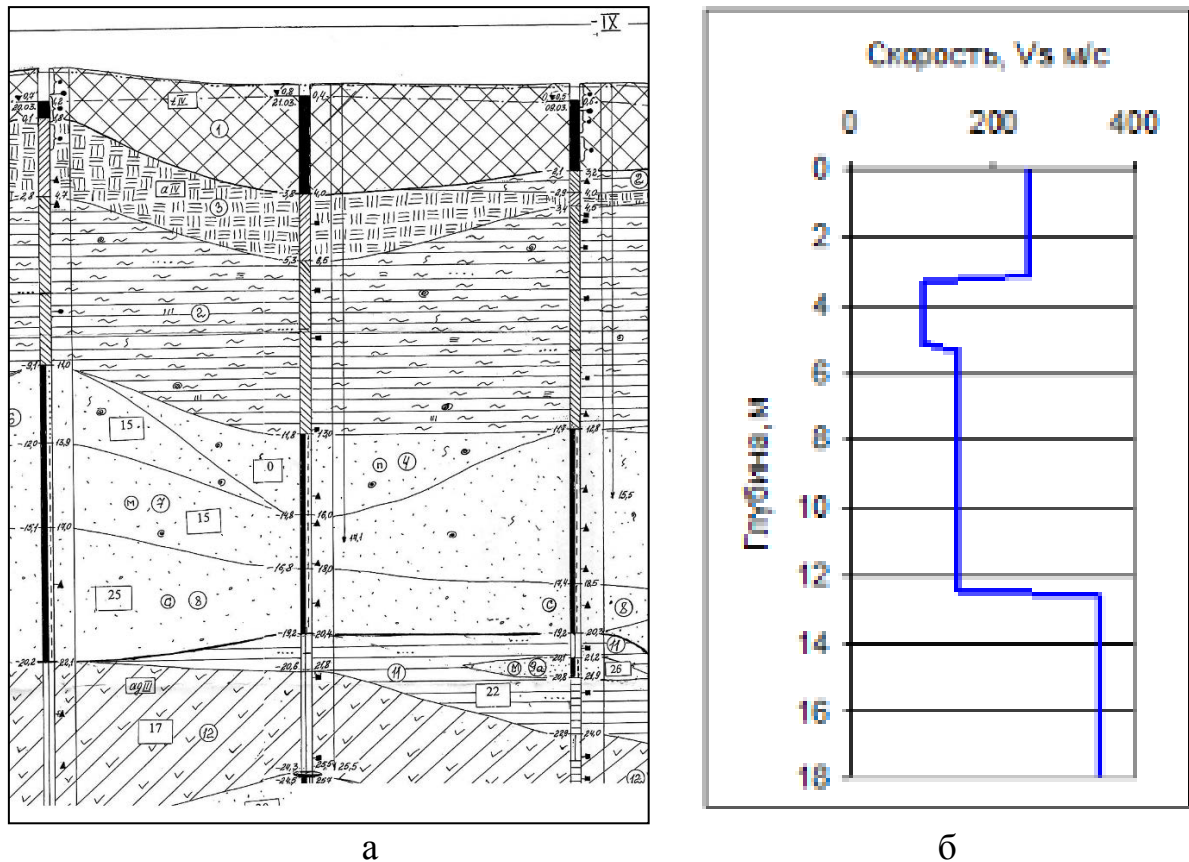


Рисунок 2 – Аномальные инженерно-геологический (а) и сейсмический (б) разрезы

Figure 2 – Anomalous engineering-geological (a) and seismic (b) sections

1) Модели стандартных сейсмогрунтовых условий. Каждая модель определяется набором слоев грунта, представленных в разрезе, характерном для участка территории. Каждый слой характеризуется мощностью, плотностью, упругими (V_p , V_s), нелинейными и диссипативными характеристиками. Для каждой модели определены свои спектральные характеристики (спектры Фурье и спектры реакции), а также коэффициенты динамичности.

2) Модели участков развития опасных геологических процессов – оползней, карстово-суффозионных явлений, подтопления. Поскольку существует возможность активизации их при достаточно сильных сейсмических событиях, следует с особой осторожностью относиться к строительству на таких участках ответственных зданий и сооружений, и, во всяком случае, учитывать эти процессы при проектировании. Реальное количество моделей зависит от сложности сейсмогрунтовых условий на территории районированного объекта.

Таким образом, конечной задачей сейсмического микрорайонирования на площадке предполагаемого строительства является *картирование моделей грунтовых толщ*, различающихся реакцией на сейсмические воздействия, подходящие к ним со стороны упругого (скального) полупространства. Каждый отдельный участок районированной площадки характеризуется набором параметров сейсмического воздействия, определяемого совокупным влиянием, как исходного сейсмического воздействия, так и локальными свойствами грунтовой толщи. При этом желательна замена

балла и приращения балла на физически более содержательные величины, например, уровень ускорения или спектры реакции.

3. Техника моделирования

Задачи СМР решаются с помощью различных расчетных методов, позволяющих получать спектральные характеристики грунтовых толщ, и акселерограммы на свободной поверхности или во внутренних точках слоистой слабо поглощающей среды при падении на ее подошву под произвольным углом из нижнего полупространства продольной или поперечной упругой плоской волны. При заданных параметрах каждого слоя (скорости упругих волн, плотности и мощности слоя) скорости смещений и напряжения при переходе через границы раздела слоев могут быть выражены системой линейных уравнений, которая может быть представлена в матричном виде.

Из компьютерных программ расчетов отклика слоистой упругой среды на сейсмические воздействия на основе матричного метода наибольшее распространение получила программа *NERA* [9], предназначенная для расчета влияния слоистой грунтовой толщи на динамические характеристики сейсмических колебаний, источник которых находится в полупространстве, на поверхности грунта или в любом из слоев грунтовой толщи. Моделировалось одномерное (вертикальное) распространение волн в предположении, что слои грунтовой толщи залегают горизонтально. Расчеты могут проводиться как в линейном приближении, т.е. в предположении пропорциональности напряжений и деформаций, так и в нелинейном приближении на основе модели, учитывающей механизм нелинейного поведения грунтов при сильных сейсмических воздействиях. Входное воздействие задается в цифровом виде акселерограммой. Шаг квантования по времени Δt может изменяться, в соответствии с чем меняется длительность обрабатываемого процесса. Таким образом, общая длительность входной сейсмограммы может меняться в весьма широких пределах. Заданное сейсмическое воздействие можно масштабировать по амплитуде. Скоростной разрез задается системой плоскопараллельных слоев, для каждого из которых задается значение мощности, плотности ρ и скорости V_s . Для того чтобы отобразить модель более точно следует представить разрез большим количеством подслоев. При этом суммарная мощность подслоев должна соответствовать мощности толстого слоя. В этом случае следует руководствоваться требованиями работ [10; 11] из области радиотехники, акустики и сейсмологии, в которых исследован вопрос о представлении объектов с непрерывным распределением свойств дискретными параметрами.

Для каждого слоя задается также тип грунта – песчаный, глинистый, гравелистый или скальный. Соответственно с типом грунта в программе автоматически назначается специфическое поглощение и кривая нелинейной связи между напряжением и деформацией. На этом ввод исходных данных заканчивается. Вычислительная процедура программы *NERA* устроена на базе программы электронных таблиц *Excel*. Выходные данные *NERA* включают выдачу следующих сведений: импульсная реакция системы или акселерограмма с учетом влияния грунтов, коэффициент спектрального усиления, спектр Фурье и спектр реакции при 5% затухании. Помимо этих «стандартных» выходных данных имеется возможность получать коэффициенты динамичности – спектры реакции, нормированные на значения при «нулевом» периоде.

Важным методическим приемом компьютерного моделирования является возбуждение колебаний в модели с использованием короткого импульса длительностью один отсчет по времени. Практически столбик значений акселерограммы заменяется столбиком нулевых значений с единственным ненулевым значением, равным PGA, соответствующего сейсмического события. При моделировании линейных процессов это значение не должно превышать некоего порога, например, 0,1g. Преимуществом такого

способа возбуждения является то, что в спектре входного воздействия присутствуют «все» частоты: при частоте квантования по времени 0,02 с все частоты ниже 50 Гц. С другой стороны возбуждение стандартным импульсом позволяет получить частотную характеристику, свободную от спектра возбуждающего импульса. Для пояснения приведем на рис. 3 в качестве примера сравнение коэффициентов динамичности от возбуждения акселерограммой землетрясения Лома-Приета и коротким импульсом.

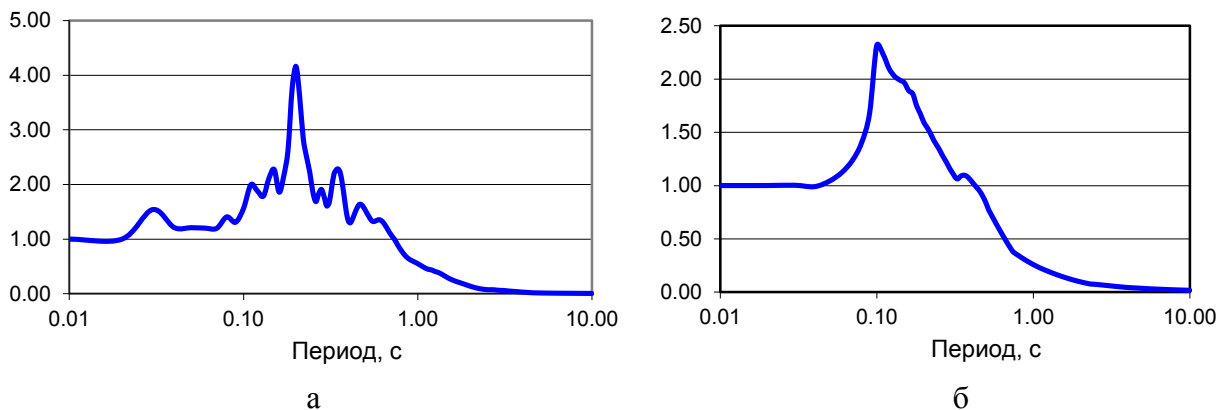


Рисунок 3 – Коэффициенты динамичности записей Лома-Приета (а) и короткого импульса (б)

Figure 3 – Dynamic coefficients of Loma Prieta (a) and short pulse (b) records

Рис.3 показывает, как заметно различаются вид коэффициентов динамичности записей землетрясения в Лома-Приета и короткого импульса. Для записи землетрясения на форме коэффициента динамичности заметно влияние частотных особенностей исходного сейсмического воздействия, в то время как форма графика коэффициента динамичности короткого импульса не искажена влиянием частотной характеристики исходного воздействия: в нем «все» частоты и это не искажает вид суммарной частотной характеристики грунтового массива. Те же замечания относятся к величине максимума коэффициентов динамичности: в случае короткого импульса.

То, что программой рассчитывается одномерная задача, да еще при нормальном падении сейсмических волн на слоистую толщу грунтов, нельзя отнести к недостаткам *NERA*, поскольку именно такая упрощенная постановка задачи отвечает большинству условий СМР и позволяет уверенно контролировать ход решения и получаемые результаты. Более сложная постановка и соответствующая программа, отвечающие условиям вблизи очаговой зоны до сих пор не разработаны и не внедрены в практику работ по СМР.

С использованием описанной методики было промоделировано множество конкретных задач СМР, включая определение значений грунтовых коэффициентов, исследование влияния инверсных разрезов на свойства грунтового массива и роль нелинейных процессов в дисперсных грунтах при сильных сейсмических воздействиях.

Кратко коснемся методических приемов, выполнение которых обязательно при составлении отчета по СМР площадки изысканий. В этом контексте перечислим несколько таблиц, составление которых вошло в состав обязательных моментов при составлении отчета.

1. Таблица физико-механических свойств грунтов. В ней для каждого инженерно-геологического элемента приведены основные данные – плотности, скорости сдвиговых волн, модули деформации, сцепление, сопротивление сжатию и т.п.

2. Таблица, в которой определены параметры сейсмических моделей – мощности слоя, плотности, скорости сдвиговых волн.

3. Таблица расчета интенсивности и приращений интенсивности. Здесь приводятся сведения об исходной и расчетной сейсмичности с обязательной привязкой к каким-то объектам на площадке изысканий. Чаще всего это скважины. При наличии на площадке изысканий объектов с различной степенью ответственности необходимо отметить этот факт в отчетных материалах.

4. Расчетная формула метода

Рассмотрим теперь вопрос об учете в рамках метода решения прямой задачи спектральных особенностей грунтового разреза. Для этого рассмотрим результаты компьютерного моделирования семейства моделей грунтовых условий. Общая модель представляет 30-метровый слой грунта, расположенного на упругом полупространстве с параметрами $V_s = 1000$ м/с, $\rho = 2,2$ т/м³. Параметры слоя грунта последовательно меняются от 1 до 5 соответственно с параметрами грунтовых категорий от А до Е. Упругие колебания возбуждаются коротким импульсом амплитудой 0,1 г, что обеспечивает линейность соотношений «напряжение-деформация».

Результаты моделирования, приведенные в книге [12], показали, что коэффициент динамичности адекватно реагирует на свойства грунтового массива. В достаточно широком диапазоне изменений сейсмической жесткости максимум коэффициента динамичности b находится в диапазоне значений от 2 до 6 и более, т.е. изменяется не менее, чем в 3 раза. В упомянутой работе [12] показана зависимость максимума коэффициента динамичности от сейсмической жесткости R . Таким образом, спектральные свойства грунтового массива могут быть описаны без использования понятия грунтовых категорий. Максимум коэффициента динамичности функционально связан с сейсмической жесткостью грунтового массива.

Если предположить, что значение $b = 2$ соответствует приращению сейсмической интенсивности $\Delta I = 0$ (иными словами отсутствию резонансных явлений), приращение сейсмической интенсивности за счет спектральных свойств грунтового массива по шкале MSK-64 может быть определено с помощью выражения: $(b/2) = 2^{\Delta I}$.

$$\text{Отсюда, логарифмируя, получим выражение } \Delta I \text{ (балл)} = 3,3 \lg b - 1 \quad (2)$$

При $b = 2$ $\Delta I = 0$; при $b = 4$ $\Delta I = 1$; при $b = 6$ $\Delta I = 1,6$ балла.

Объединяя выражения (1) и (2), можно окончательно получить:

$$\Delta I \text{ (балл)} = 1 - 3,3 \cdot \lg(R_1/R_0 + 1) + 3,3 \lg b - 1 = 3,3 \lg b R_0 / (R_0 + R_1), \quad (3)$$

В этом выражении учтено влияние сейсмической жесткости, обводненности (через влияние обводненности на V_s) и спектральная характеристика грунтовой толщи.

5. Мощность расчетной толщи

Одним из важнейших параметров грунтовой толщи в практике СМР является мощность расчетной толщи. Эта величина различно определяется различными нормативными документами. С.В. Медведев считал, что сейсмический эффект определяется главным образом 10-метровой толщиной [1]. В следующем по времени документе [13] мощность грунтовой толщи возросла до 20 м. Наконец, в нормативе [3] мощность грунтовой толщи была определена значением 30 м. Для учета возможной слоистости грунтового массива в этом документе [3] было сделано примечание, что «в случае многослойного строения грунтовой толщи грунтовые условия участка относят к более неблагоприятной категории, если в пределах верхней 30-метровой толщи (считая от планировочной отметки) слой, относящийся к этой категории, имеют суммарную мощность более 10 м». Что такое определение мощности грунтовой толщи, включая

замечание, неудовлетворительно определяет сейсмические свойства грунтовой толщи, показывает следующий модельный пример. Допустим, что грунтовые условия на площадке СМР описываются следующими двумя моделями, параметры которых представлены в таблице 1. В соответствии с определениями норматива [3] грунты обеих моделей по таблице 4.1 и примечанию 2 к ней относятся к разным сейсмогрунтовым категориям: М-1 ко второй, а М-2 к третьей грунтовой категории, что соответствует изменению сейсмической нагрузки в два раза. Промоделируем данную ситуацию, чтобы оценить справедливость утверждений нормативного документа [3].

Параметры моделей приведены в Таблице 1. Результаты моделирования в виде графиков коэффициентов динамичности по обеим моделям приведены на рис.4.

Очевидно, что максимумы коэффициентов динамичности обеих моделей отличаются незначительно. Напротив, заметно различаются периоды обеих моделей, что естественно: для модели М-2 с большей мощностью рыхлого слоя период максимума коэффициента динамичности $T_2=0,62$ с значительно больше периода модели М-1 $T_1=0,2$ с. Если сравнить средние сейсмические жесткости 30-метровой мощности двух рассмотренных моделей, как показывает таблица 1, они различаются весьма значительно, в то время как значение сейсмической жесткости слоя рыхлого грунта одно и то же.

Таблица 1 – Параметры моделей грунтовых толщ
 Table 1 – Parameters of soil massif models

Модель 1					
Номер слоя	Мощность слоя, м	Плотность, т/м ³	Скорость V_s , м/с	Средняя сейсмическая жесткость R_{30} , тм ⁻² с ⁻¹	Средняя сейсмическая жесткость R_I , тм ⁻² с ⁻¹
1	9	1.5	200	841	300
2	21	2.0	1000		
Модель 2					
1	28	1,5	200	323	300
2	2	2.0	1000		

Таким образом, именно мощность верхнего рыхлого слоя определяет расчетную мощность грунтового массива. Она меньше 30 м, если на этой глубине встречена кровля пород с сейсмической жесткостью более 2000 тм⁻²с⁻¹. Этот результат нашел отражение в рекомендациях норматива [14].

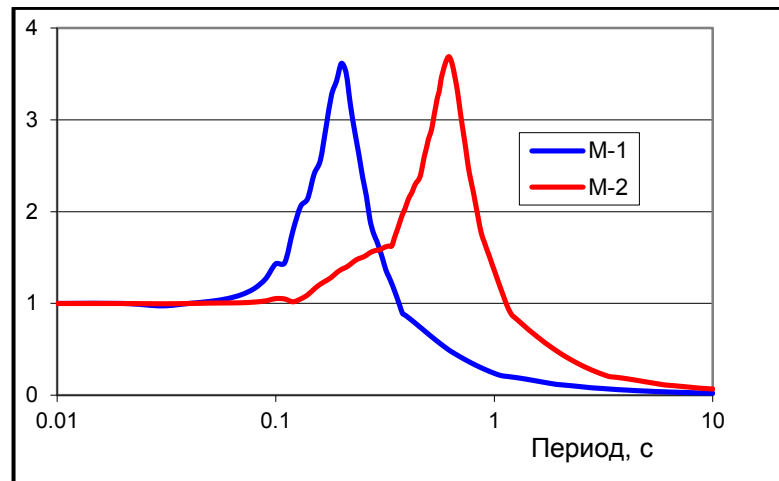


Рисунок 4 – Коэффициенты динамичности двух моделей
Figure 4 – Dynamic coefficients of two models

При этом остается открытым вопрос, а как быть, если кровля жестких пород расположена глубже 30 м? На этот вопрос отвечают результаты следующего модельного эксперимента. На рис. 5 приведено семейство графиков коэффициентов динамичности слоя переменной мощности от 5 до 200 м с сейсмической жесткостью $R_I = 460 \text{ тм}^{-2} \text{ с}^{-1}$, лежащего на полупространстве с сейсмической жесткостью $2000 \text{ тм}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Очевидно, что величина максимума коэффициента динамичности, начиная с $H = 10$ м, сравнительно мало изменяется, равняясь примерно 3,5. Это означает, что, даже не зная точно, на какой глубине располагается кровля жестких пород, мы можем определить максимум коэффициента динамичности и тем самым рассчитать приращение сейсмической интенсивности по вышеприведенной формуле.

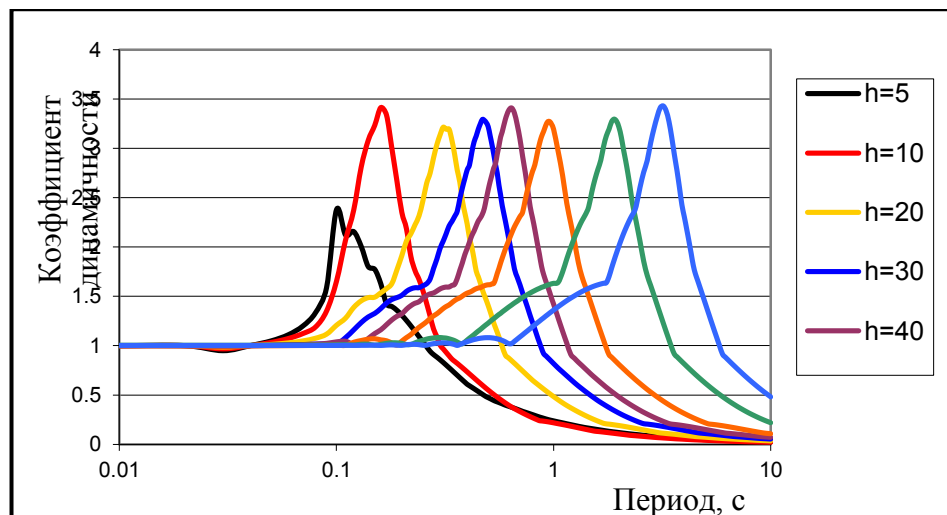


Рисунок 5 – Семейство графиков коэффициентов динамичности слоев различной мощности

Figure 5 – Family of graphs of dynamic coefficients of layers of different power

6. Структурный фактор

В практике сейсмического микрорайонирования США, начиная с конца прошлого века, утвердилась классификация грунтов, рекомендованная Национальным Стандартом

по обеспечению сейсмической безопасности *NEHRP (National Earthquake Hazard Response Provisions)*. В ней в качестве основной характеристики свойств грунта была принята средняя величина скорости поперечных волн в 30-метровой толще. Примерно такая же характеристика утвердилась также в нашей стране [3]. На основе усредненных характеристик грунтов определялись значения грунтовых коэффициентов. Значения грунтовых коэффициентов были подтверждены моделированием, результаты которого представлены в статье [16].

Ранее в статье [6] в практику работ по СМР было введено понятие *структурный фактор*. Этим термином обозначается влияние на параметры сейсмических воздействий внутренней структуры массива грунта, т.е. порядка чередования слоев в массиве, который может быть произвольным, хотя средние величины скоростей и плотностей сохраняются. Эта тема была значительно развита в недавней работе [15]. В ней было показано особое значение инверсных слоев, т.е. слоев, в которых значение сейсмической жесткости уменьшено по сравнению с аналогичной характеристикой вышележащих слоев, в нарушение условий возможного резонанса. В виду важности этого вопроса мы позволим себе повторно воспроизвести приведенный в этой работе пример. Для исследования влияния инверсного слоя на спектральные характеристики был проведен эксперимент с использованием моделей трех типов – нормальной с возрастанием плотности и скорости с глубиной, аномальной с наличием в разрезе инверсных слоев и усредненной моделью. Параметры моделей приведены в Таблице 2.

Результаты моделирования представлены в виде коэффициентов динамичности на рис. 6. Максимум коэффициента динамичности нормальной модели равен около 2.5, аномальной модели – менее 2. Для усредненной модели коэффициент динамичности равен 3.5, что соответствует модели категории D. Вместе с тем вид графиков нормальной и усредненной модели резко различаются. Для усредненной модели характерен заметный спектральный пик на периоде около 0.7 с, что примерно соответствует резонансу рыхлого слоя на жестком полупространстве.

Таблица 2 – Параметры нормальной, аномальной и усредненной моделей
 Table 2 – Parameters of the normal, anomalous, and averaged models

Нормальная модель N			
№ слоя	Мощность слоя, м	Плотность, т/м³	Скорость Vs, м/с
1	1.5	1.5	100
2	7.5	1.7	240
3	19	2.0	420
4	2	2.1	470
5	∞	2.5	800
Аномальная модель A			
1	6	1.8	230
2	5	1.6	120
3	5.5	1.7	200
4	2	1.4	80
5	11.5	2.0	320
6	∞	2.5	800
Усредненная модель M			
1	30	1.76	193
2	∞	2.5	800

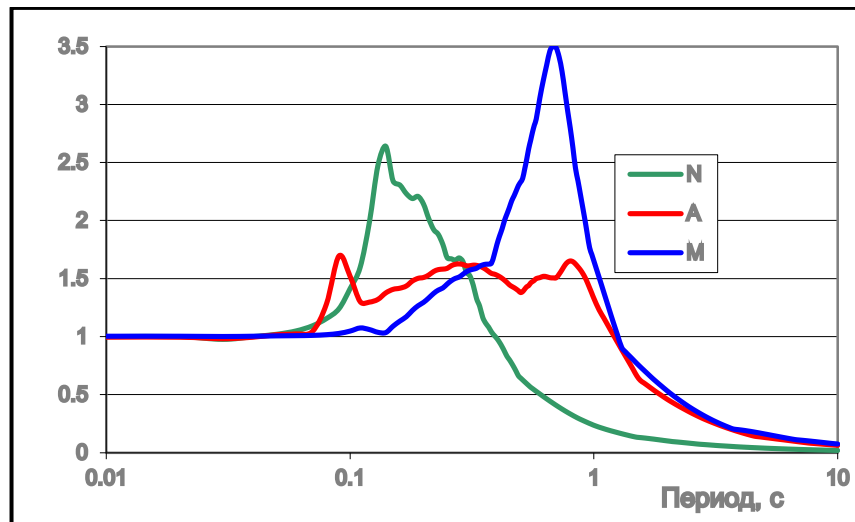


Рисунок 6 – Коэффициенты динамичности трех моделей
Figure 6 – Dynamic coefficients of the three models

В то же время для нормального разреза максимум коэффициента динамичности отмечается на коротком периоде 0.14 с. Таким образом, хотя график коэффициента динамичности модели с инверсными слоями наиболее значительно отличается от коэффициента динамичности усредненной модели, но и модель нормального, т.е. монотонного увеличения свойств грунта также отличается от графика коэффициента динамичности усредненной модели. Таким образом, реальные модели как с нормальным, так и аномальным характером изменения параметров среды с глубиной не совпадают с характеристиками усредненных моделей, соответствующих классификации *NEHRP*.

7. Заключительные замечания

Все вышесказанное позволяет сделать основной вывод по проделанной работе. Разработана новая методика сейсмического микрорайонирования – метод решения прямой задачи (МПЗ). Эта методика характеризуется следующими существенными моментами.

1. В основе метода МПЗ лежит формирование на основе комплексных инженерно-геологических и геофизических исследований моделей грунтовой толщи. Глубина буровых выработок на площадке строительства должна быть равна мощности грунтов до кровли скальных пород с сейсмической жесткостью порядка $2000 \text{ тм}^{-2}\text{с}^{-1}$, но не более 30 м.

2. Модель представляет собой обобщенный инженерно-геологический разрез, где каждому инженерно-геологическому элементу сопоставлено в соответствие значение плотности и скорости поперечных волн. Последняя величина определяется на основании сопоставления данных инженерно-геологических и геофизических, главным образом сейсморазведочных, исследований.

3. При полевых сейсморазведочных исследованиях сейсмических свойств грунтов предпочтение следует отдать скважинным наблюдениям (сейсмический каротаж и вертикальное сейсмическое профилирование).

4. Предложена оригинальная техника компьютерного моделирования, основанная на использовании в качестве исходного сейсмического воздействия короткого импульса ускорений.

5. С использованием техники компьютерного моделирования производятся расчеты спектральных характеристик моделей грунтовых толщ. Основной характеристикой,

определяющей частотные свойства грунтового массива, следует признать коэффициент динамичности.

6. Предложена новая формула расчета приращения сейсмической интенсивности, учитывающая все факторы влияния свойств грунтов на параметры сейсмических воздействий – сейсмическую жесткость, обводненность, резонансные эффекты и нелинейность реакции грунтов на сильные сейсмические воздействия.

7. По полученным данным производится картирование моделей грунтовых толщ на площадке строительства и определяются параметры сейсмических воздействий, отвечающие свойствам каждой модели грунтовых толщ.

8. Показана неудовлетворительность использования для характеристики свойств грунтов усредненных моделей (NEHRP, Еврокод-8 и др.).

9. Приведенные выше предложения нашли свое отображение в нормативных документах, посвященных СМР объектов повышенной ответственности [14] и территориальному планированию [17].

10. С использованием разработанной методики проведен целый ряд работ по СМР различных объектов на территории России.

Список литературы

1. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. М.: Стройиздат.1962. 284 с.
2. Алешин А.С. О физических основах сейсмического микрорайонирования // В кн.: Очаговые зоны и колебания грунта (Вопросы инж. сейсм., вып.21). М.: Наука. 1981. С.85-92.
3. СП 14.13330. 2018. Строительство в сейсмических районах. М. 2018.
4. Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. М.: Светоч Плюс. 2010. 304 с.
5. Алешин А.С., Пиоро Е.В. О влиянии обводненности грунтов на результаты сейсмического микрорайонирования // Инженерные изыскания. 2015. № 4. С.34-41.
6. Алешин А.С. О спектральных характеристиках грунтовой толщи // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. №5. С.16-23.
7. Кригер Н.И., Кожевников А.Д., Миндель И.Г. Сейсмические свойства дисперсных пород (сейсмолитозекологический подход). М.: ИНЖЭКО. 1994. 196 с.
8. Алешин А.С., Погребченко В.В., Скворцов А.Г., Царев А.М. Особенности сейсмического микрорайонирования территории Калининграда // Тезисы 1-й Международной конференции «Актуальные вопросы мониторинга геологической среды и безопасности урбанизированных территорий». Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта. 2011. С. 25–30.
9. Bardet J.P., Tobita T. NERA. A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California. Department of Civil Engineering, April, 2001, p. 44.
10. Харкевич А.А. Теоретические основы радиосвязи. М.: Связьиздат. 1957. 348 с.
11. Бат М. Спектральный анализ в геофизике. М.: Недра. 1980. 536 с.
12. Алешин А.С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. М.: Научный мир. 2017. 300 с.
13. Республиканские строительные нормы. РСН- 60-86. М.: Стройиздат. 1986.
14. СП 283.1325800.2016. Свод правил. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования. М.: Минстрой России. 2016.
15. Aleshin A.S. On the Disadvantages of the NEHRP Soil Classification. Open Journal of Earthquake Research. 2021, no.10, pp. 1-15.

16. Алешин А.С. О грунтовых коэффициентах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. №2. С.6-13.
17. СП 408. 1325800. Свод правил. Детальное сейсмическое районирование и сейсмомикрорайонирование для территориального планирования. М.: Минстрой России. 2018.

References

1. Medvedev S. V. Inzhenernaia seismologiya. M.: Stroiizdat.1962. 284 p. (In Russian)
2. Aleshin A.S. O fizicheskikh osnovakh seismicheskogo mikroraiionirovaniia [On the physical foundations of seismic microzonation]. V kn.: Ochagovye zony i kolebaniia grunta (Voprosy inzh. seism., vyp.21). M.: Nauka. 1981, pp.85-92. (In Russian)
3. SP 14.13330. 2018. Stroitel'stvo v seismicheskikh raionakh [Seismic Building Design Code]. M. 2018. (In Russian)
4. Aleshin A.S. Seismicheskoe mikroraiionirovanie osobo otvetstvennykh ob"ektov. M.: Svetoch Plyus. 2010. 304 p. (In Russian)
5. Aleshin A.S., Piro E.V. O vlianii obvodnennosti gruntov na rezul'taty seismicheskogo mikroraiionirovaniia. Inzhenernye izyskaniia [On the influence of water content of soils by results of seismic microzonation]. 2015, no. 4, pp. 34-41. (In Russian)
6. Aleshin A.S. O spektral'nykh kharakteristikakh gruntovoi tolshchi. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety]. 2018, no.5, pp.16-23. (In Russian)
7. Kriger N.I., Kozhevnikov A.D., Mindel I.G. Seismicheskie svoistva dispersnykh porod (seismolitoekologicheskii podkhod) [Seismic properties of dispersed rocks (seismolithoecological approach)]. M.: INZHENKO. 1994. 196 p. (In Russian)
8. Aleshin A.S., Pogrebchenko V.V., Skvortsov A.G., Tsarev A.M. Osobennosti seismicheskogo mikroraiionirovaniia territorii Kaliningrada [Features of the seismic microzonation of the territory of Kaliningrad]. Tezisy 1-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Aktual'nye voprosy monitoringa geologicheskoi sredy i bezopasnosti urbanizirovannykh territorii». Kaliningrad: Izd-vo BFU im. I. Kanta. 2011, pp. 25–30. (In Russian)
9. Bardet J.P., Tobita T. NERA. A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California. Department of Civil Engineering, April, 2001, p. 44. (In English)
10. Kharkevich A.A. Teoreticheskie osnovy radiosviazi [Theoretical bases of radio]. M.: Sviaz'izdat. 1957. 348 p. (In Russian)
11. Bath M. Spektral'nyi analiz v geofizike [Spectral Analysis in Geophysics]. M.: Nedra. 1980. 536 p. (In Russian)
12. Aleshin A.S. Kontinual'naia teoriia seismicheskogo mikroraiionirovaniia [The Continual theory of seismic microzoning]. M.: Nauchnyi mir. 2017. 300 p. (In Russian)
13. Respublikanskii stroitel'nye normy [State Construction Norms]. RSN- 60-86. M.: Stroiizdat. 1986. (In Russian)
14. SP 283.1325800.2016. Svod pravil. Ob"ekty stroitel'nye povyshennoi otvetstvennosti. Pravila seismicheskogo mikroraiionirovaniia. M.: Ministroi Rossii. 2016. (In Russian)
15. Aleshin A.S. On the Disadvantages of the NEHRP Soil Classification. Open Journal of Earthquake Research. 2021, no.10, pp. 1-15. (In English)
16. Aleshin A.S. O gruntovykh koefitsientakh. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety]. 2018, no.2, pp. 6-13. (In Russian)
17. SP 408. 1325800. Svod pravil. Detal'noe seismicheskoe raionirovanie i seismomikroraiionirovanie dlia territorial'nogo planirovaniia. M.: Ministroi Rossii. 2018.

Данные об авторах/Information about authors

Алешин Александр Степанович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Москва, Российская Федерация
asa@ifz.ru

Погребченко Владимир Викторович, старший научный сотрудник. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Москва, Российская Федерация
pogr@ifz.ru

Никитин Сергей Николаевич, научный сотрудник. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Москва, Российская Федерация
niksn@ifz.ru

Aleshin Alexander S., DSc, chief researcher. The Schmidt Institute of Physics of the Earth, The Russian Academy of Sciences (IPE RAS). Moscow, Russian Federation
asa@ifz.ru

Pogrebchenko Vladimir V., senior researcher. The Schmidt Institute of Physics of the Earth, The Russian Academy of Sciences (IPE RAS). Moscow, Russian Federation
pogr@ifz.ru

Nikitin Sergey N., research associate. The Schmidt Institute of Physics of the Earth, The Russian Academy of Sciences (IPE RAS). Moscow, Russian Federation
niksn@ifz.ru

Поступила в редакцию / Received – 06.04.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised – 16.04.2021

Принята к публикации / Accepted – 23.04.2021