



Краткое сообщение

УДК 550.834.3

EDN: SBBOBB

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-321-334



Исследование структуры и свойств грунтов по данным инженерной сейсморазведки для сейсмического микрорайонирования на территории г. Петропавловска-Камчатского

А.В. Марычева^{a✉}, М.Д. Сидоров^b, Т.В. Пантелеймонова^c

^{a-c}Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия

Резюме. Важную роль в инженерной геологии играют геофизические методы, позволяющие эффективно исследовать структуру и свойства грунтов для определения сейсмического микрорайонирования при проектировании зданий и сооружений в промышленном и гражданском строительстве. Для оценки эффективности применения методов разведочной геофизики были выбраны территории Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук и кинотеатра «Горизонт» города Петропавловска-Камчатского (Россия), где были проведены исследования тонкой структуры и скоростных параметров грунтов методом сейсмического 2D-профилирования. Цель работы заключалась в получении и отслеживании изменения физико-механических параметров грунтов в естественном залегании пород как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Анализ сейсмичности площадок выполнялся методами многоволновой сейсмической разведки, базирующейся на регистрации продольных, поперечных и обменных волн с различной поляризацией. Для проведения сейсморазведочных работ была использована цифровая 24-канальная инженерная сейсморазведочная станция «Лакколит 24М». Для возбуждения упругих колебаний был применен импульсный невзрывной источник – тампер. Типы регистрируемых волн и природа их колебаний были определены как традиционными методами, так и с помощью теоретических расчетов волновых полей с использованием методики конструирования сейсмического разреза по наблюденному волновому полю. Результатом исследований стало построение сейсмических разрезов, анализ сейсмограмм которых в дальнейшем был подтвержден при бурении скважин до глубин 20–25 м. В ходе проведенных работ было установлено, что невозможно выбрать место для бурения одной уникальной скважины, которая позволила бы охарактеризовать площадку в целом. В связи с этим наиболее эффективным является проведение сейсмического профилирования, которое дает возможность измерения параметров для всей площадки как по латерали, так и на глубину.

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование, годограф, инженерные изыскания, сейсмограммы, физико-механические свойства грунтов, Камчатка

Для цитирования: Марычева А.В., Сидоров М.Д., Пантелеймонова Т.В. Исследование структуры и свойств грунтов по данным инженерной сейсморазведки для сейсмического микрорайонирования на территории г. Петропавловска-Камчатского // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 321–334. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-321-334>. EDN: SBBOBB.

Brief report

Investigation of soil structure and properties based on engineering seismic survey data for seismic microzoning in Petropavlovsk-Kamchatsky

Anastasia V. Marycheva^{a✉}, Mikhail D. Sidorov^b, Tatiana V. Panteleimonova^c

^{a-c}Scientific Research Geotechnological Centre, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. An important role in engineering geology belongs to geophysical methods that enable effective study of soil structure and properties to determine seismic microzoning when designing buildings and structures in industrial and civil engineering. To assess the effectiveness of exploration geophysics methods, the territories of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and the Horizon cinema in Petropavlovsk-Kamchatsky (Russia) were selected. The fine structure and velocity parameters of soils were conducted on those sites



using seismic 2D-profiling. The purpose of the work was to obtain and monitor changes in the physical and mechanical parameters of soils in their natural rock bedding, both horizontally and vertically. Seismicity analysis of the sites was performed using multiwave seismic exploration methods based on the recording of longitudinal, transversal, and converted waves with different polarizations. A Laccolith 24M digital 24-channel seismic survey station was used for seismic exploration. A pulsed non-explosive source (tamper) was used to excite elastic vibrations. The types of recorded waves and the nature of their oscillations were determined using both traditional methods and theoretical calculations of wave fields using a technique for constructing a seismic section based on the observed wave field. The study resulted in the construction of seismic sections, the analysis of which was subsequently confirmed by drilling wells to depths of 20–25 meters. Conducted studies showed impossibility to select a single unique site for drilling a well that would allow to provide a detailed description of the site as a whole. Therefore, seismic profiling was recognized as the most effective method enabling parameter measurement for the entire site, both laterally and at depth.

Keywords: seismic microzoning, time curve, engineering surveys, seismograms, soil physical and mechanical properties, Kamchatka

For citation: Marycheva A.V., Sidorov M.D., Panteleimonova T.V. Investigation of soil structure and properties based on engineering seismic survey data for seismic microzoning in Petropavlovsk-Kamchatsky. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):321-334. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-321-334>. EDN: SBBOBB.

Введение

Камчатский полуостров, расположенный на стыке тектонических плит, характеризуется высокой сейсмоактивностью, что делает его уникальным объектом для изучения и применения методов сейсмического районирования. Выполняемые в составе инженерных изысканий, они обеспечивают надежность и безопасность объектов строительства в сейсмоактивных регионах [1]. Правильное применение принципов сейсмического районирования становится особенно актуальным в условиях интенсивной застройки в свете растущего интереса к развитию туристической инфраструктуры [2].

При сейсмическом микрорайонировании выполняется оценка реакции на воздействия грунтов в зависимости от их тонкой структуры и физико-механических параметров, характерных для заданной строительной площадки. Анализ научных работ по оценке сейсмоопасности, состава пород, их мощности и обводненности на территории г. Петропавловска-Камчатского показывает, как значительно меняются эти факторы по простианию из-за резко расчлененного рельефа и насколько это, в свою очередь, влияет на изменения физико-механических параметров геосреды.

Оценка эффективности применения методов разведочной геофизики для определения физико-механических характеристик грунтов при сейсмическом микрорайонировании в промышленном и гражданском строительстве рассмотрена на примере двух площадок на территории г. Петропавловска-Камчатского: в районе Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН) и кинотеатра «Горизонт».

Исследование свойств грунтов является важным аспектом в принятии проектных решений при строительстве зданий и сооружений [3]. Важно отметить, что недостаток информации о грунтовых условиях, в том числе их сейсмических свойствах, может привести к катастрофическим последствиям, включая разрушение зданий и угрозу жизни людей [4].

Материалы и методы исследования

Методика полевых исследований и аппаратура. Изучение характеристик грунтов с целью анализа сейсмичности площадки выполнялось методами многоволновой сейсмической разведки, базирующейся на регистрации продольных, поперечных и обменных волн с различной поляризацией [5]. При решении инженерных задач сейсморазведку обычно применяют в тесном комплексе с другими геофизическими методами: электроразведкой и бурением. Сейсмическая разведка является одним из важнейших видов геофизической разведки и представляет собой совокупность методов исследований геологического строения земной коры, основанных на изучении распространения в ней искусственно возбужденных упругих волн.

На исследуемых участках территории ИВиС ДВО РАН и кинотеатра «Горизонт» сейсморазведка выполнялась методом преломленных волн в комплексе с бурением (рис. 1).

Способы наблюдений и интерпретации по методу преломленных волн позволяют определять глубины до преломляющих границ, строить разрезы и карты изоглубин; определять граничные скорости распространения волн вдоль преломляющих границ по годограф-

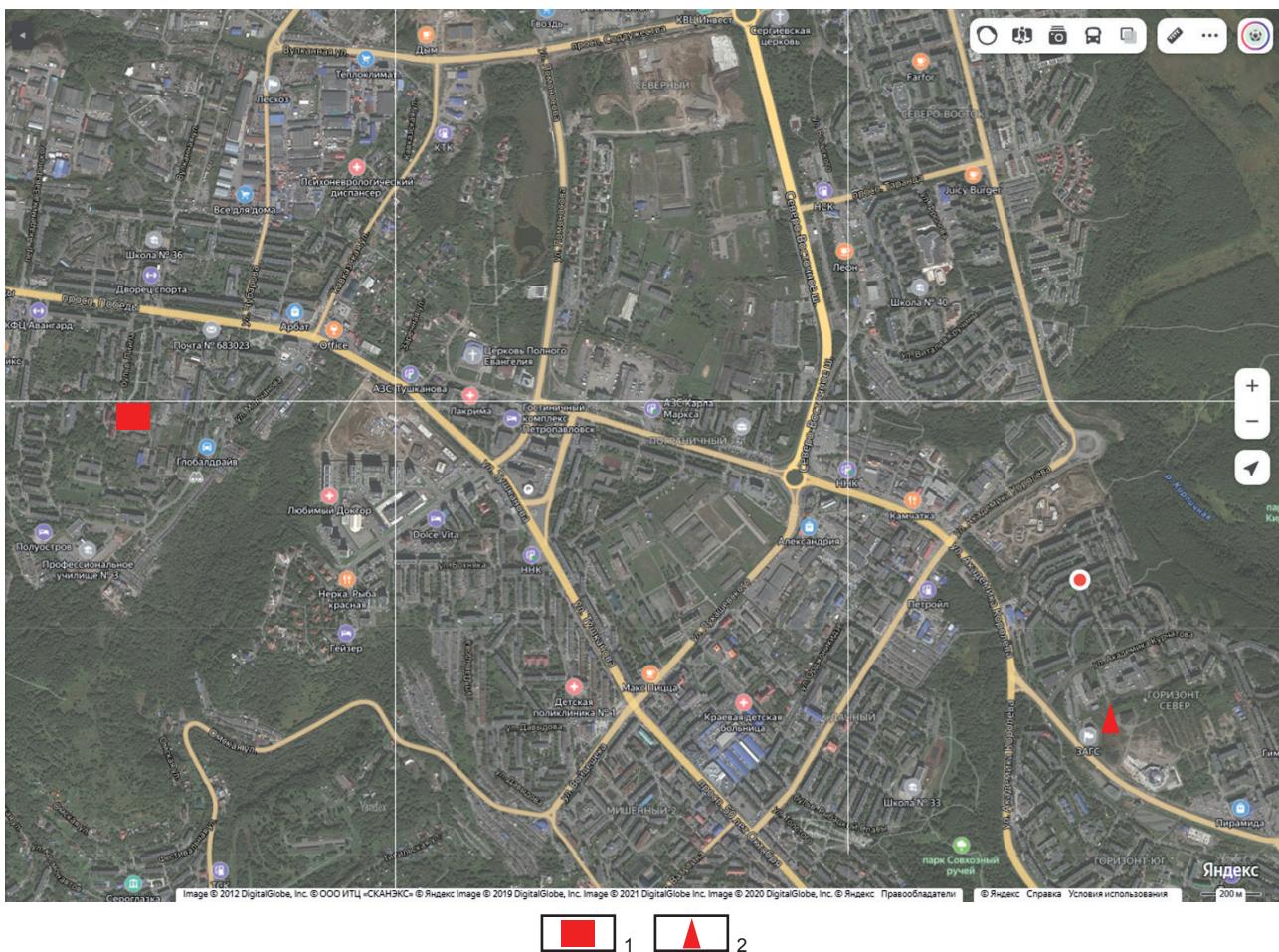


Рис. 1. Обзорная карта расположения участков исследования:

1 – на территории Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук; 2 – на территории кинотеатра «Горизонт»

Fig. 1. Overview map of study sites location:

1 – on the territory of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 2 – on the territory of the Horizon cinema

фам головных и слабо рефрагированных волн с введением поправки за рефракцию; оценивать зависимость региональной компоненты поля скоростей от глубины по гидографам рефрагированных волн; строить разрезы в изолиниях скорости; вычислять коэффициенты поглощения в препомлюющем слое по графикам амплитуд головных волн; находить модули упругости при совместной регистрации продольной и поперечной волн; трассировать в плане тектонические нарушения [6].

Преимущество метода заключается в возможности определять скорости распространения сейсмических волн вдоль глубинных сейсмических границ, по которым можно судить о физических свойствах препомлюющих горизонтов, их литологическом составе, о принадлежности сейсмических границ к геологическому разрезу [7]. Недостаток метода – его меньшая точность, детальность

и разрешающая способность по сравнению с методом отраженных волн, особенно при изучении криволинейных границ. Метод преломленных волн является основным при проектировании инженерных сооружений и разведке грунтовых вод. Этот метод дает наиболее надежную информацию о глубине границ грунтов геологического разреза, а также является экономичным, транспортабельным и экологичным.

Для проведения сейсмических работ на участках ИВиС ДВО РАН были разбиты три взаимно пересекающиеся профили и один профиль на участке кинотеатра «Горизонт» общей протяженностью 120 м (рис. 2). Расстояние между приемниками на сейсмических профилях участков ИВиС ДВО РАН и кинотеатра «Горизонт» составляло 2,5 м, глубина исследований – 65 и 35 м соответственно.

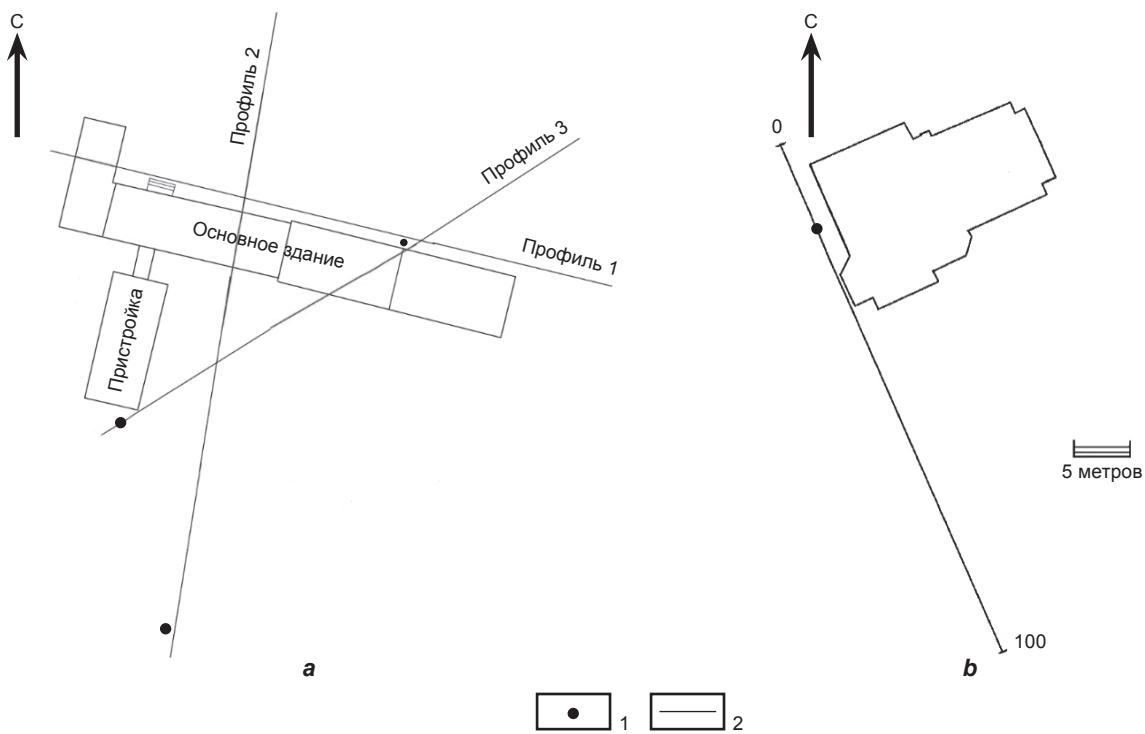


Рис. 2. План расположения сейсмических профилей:

a – на территории Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук; b – на территории кинотеатра «Горизонт»

1 – скважины; 2 – сейсмические профили

Fig. 2. Seismic profile location plan:

a – on the grounds of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; b – on the territory of the Horizon Cinema

1 – wells; 2 – seismic profiles

Для проведения сейсморазведочных работ была использована цифровая 24-канальная инженерная сейсморазведочная станция «Лакколит 24М». Для возбуждения упругих колебаний использовался импульсный невзрывной источник – ударный инструмент для малоглубинной сейсмической разведки (тампер) высотой 80 см и весом 50 кг. Преобразование механических колебаний в электрическое напряжение осуществлялось с помощью вертикальных сейсмоприемников СВ-10, представляющих собой инертную массу, подвешенную на пружине, жестко связанной с корпусом приемника [8, 9].

В комплект блока «Лакколит 24М» входит источник питания 12 В, зарядное устройство, кабель питания, кабель связи, программное обеспечение управлением сейсмостанцией. Компьютер обеспечивает управление блоками через локальную сеть Интернет, последующую обработку информации и отображение результатов. Скорость обмена по локальной сети 10 Мб. Параметры, установленные в программе, отмечаются в журнале оператора. По окончании полевых работ полученные сей-

сограммы обрабатываются в дальнейшем в камеральных условиях.

Методика обработки и интерпретация материалов. Типы регистрируемых волн и природа их колебаний были определены как традиционными методами, так и с помощью теоретических расчетов волновых полей с использованием методики конструирования сейсмического разреза по наблюденному волновому полю [10]. Основа этого поля представляет собой направленное распространение сейсмических лучей в неоднородно-слоистых средах в пакете программ SEIS83 с добавлениями (*от англ.: Seismic Experiment for Interior Structure – сейсмический эксперимент внутренней структуры*), адаптированном для целей инженерной сейсморазведки [11].

Эта методика позволяет получать детальные геометрические и упругие характеристики сейсмических разрезов, а результаты построений с ее использованием к настоящему времени достоверно подтверждены бурением практически во всех районах, где проводились сейсмические работы [12].



Расчеты прекращались при расхождении времени прихода экспериментальных и теоретических вступлений до одной четверти периода колебаний. Далее рассчитывались теоретические сейсмограммы.

Расчеты выполнялись раздельно для каждого типа элементарных волн, а затем индивидуальные сейсмограммы суммировались в одну синтетическую для каждого пункта возбуждения. Пакет программ дает возможность суммировать до 99 независимо рассчитанных элементарных волн. Такая методика позволяет наиболее точно определить природу волн, а также получить достоверные значения скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических колебаний [13].

Использованная методика обработки экспериментальных данных состоит из двух этапов:

- ручного – с построением системы встречных и нагоняющих гидографов и определением границ раздела традиционными методами;
- машинного – с уточнением построенных разрезов путем последовательного решения прямых задач сейсморазведки методом лучевого трассирования с использованием пакета специализированных программ SEIS83 с дополнительными модулями.

Ручная обработка сейсмических данных. Одной из основных задач на данном этапе исследований было построение сейсмического разреза по преломляющим границам. Эти границы строились по гидографам преломленных волн первых вступлений. Так как уверенно зафиксировать момент прихода волн из-за мешающего фона колебаний обычно не удается, на сейсмограммах выполняется фазовая корреляция, представляющая собой процесс прослеживания волн во времени и пространстве и основывающаяся на совокупности динамических и кинематических признаков. При волновой корреляции опираются на следующие признаки: полезная волна выделяется в виде импульса конечной длительности; амплитуда волны превышает амплитуду общего фона колебаний; форма записи (видимые периоды, соотношения основных и дополнительных экстремумов) повторяется на соседних трассах; время и кажущиеся скорости изменяются плавно [14]. Последние два признака основаны на предположении выдержанности или плавного изменения геометрии и физических свойств

границы и покрывающей ее среды и поэтому применимы в условиях относительно простого геологического строения. Из-за сложности определения начала и конца импульса волновая корреляция в чистом виде трудно осуществима. Фазовая корреляция ведется с прослеживанием одного или нескольких экстремумов записи. Линия, соединяющая одинаковые фазы колебаний, связанных с одной и той же волной на различных трассах, называется осью синфазности и представляет собой гидограф фазы. Поскольку от правильного выполнения фазовой корреляции зависит форма полученных гидографов, этот этап обработки играет важнейшую роль в процессе интерпретации [15].

В отличие от отраженных волн по определенному элементу гидографа преломленных волн нельзя однозначно определить положение соответствующего элемента границы, поэтому для построения преломляющей границы используют системы встречных и нагоняющих гидографов. Следующий этап – расчет глубины залегания границ. Для всех участков исследования ручным способом были схематично построены сейсмические разрезы, что является подготовительным этапом для дальнейшей обработки сейсмических данных и уточнения границ разреза в программном пакете SEIS83.

Машинная обработка сейсмических данных. Машинная обработка сейсмических данных позволяет уточнить разрез, построенный вручную. Поэтому при совпадении синтетической или экспериментальной (расчитанной в пакете программ SEIS83) и теоретической (полученной посредством ручной обработки) сейсмограмм для одного и того же пункта взрыва более точным будет разрез, рассчитанный автоматически, чем разрез, построенный вручную во время полевых работ (рис. 3).

Программный пакет SEIS83 предназначен для численного решения прямой задачи сейсмики лучевым методом для двухмерной модели Земли, представляющей собой горизонтально неоднородную среду с криволинейными границами. Вычисление синтетических сейсмограмм лучевым методом выполняет программа SYNTPL, предназначенная для создания записей волновых полей, используемых для анализа реальных наблюдений методами сейсморазведки. При этом вертикально-неоднородные слои пред-

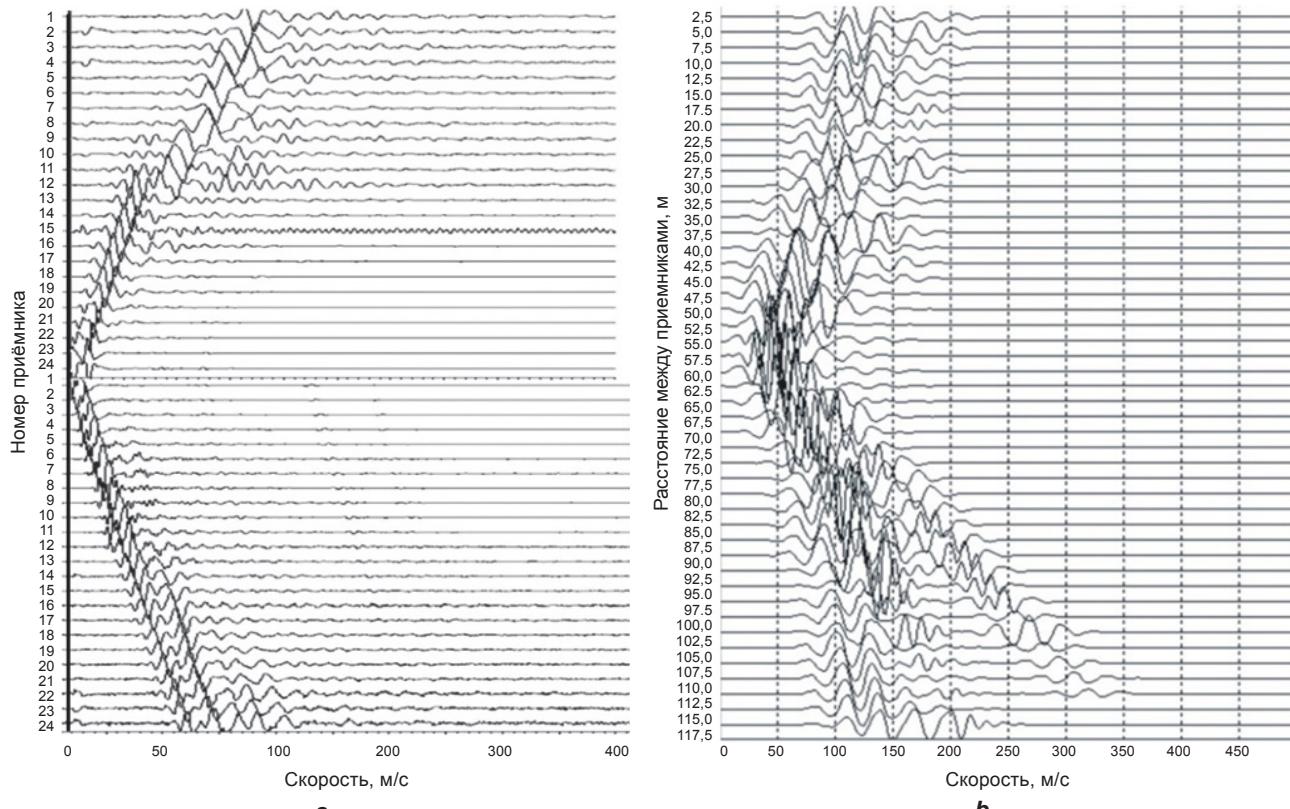


Рис. 3. Сопоставление сейсмограмм сейсмического профиля на территории кинотеатра «Горизонт»:

a – теоретическая сейсмограмма; b – экспериментальная сейсмограмма

Fig. 3. Comparison of seismic profile seismograms on the territory of the Horizon cinema:

a – theoretical seismogram; b – experimental seismogram

ставляются в виде тонкослоистой среды, состоящей из однородных слоев с плоскими параллельными границами. В этом случае воспроизводятся только отраженные волны, преломленные волны формируются автоматически как сумма отражений от фиктивных границ. Входными файлами для SYNTPL является файл ау вместе с LU2, созданные программой SEIS83.

Указанные файлы содержат всю информацию для лучевого метода: данные о границах, расположении приемников, скорости в слоях, соотношении скоростей и т. д. Границы задаются множеством точек, представляющих собой координаты X и Z , где Z – глубина, увеличивающаяся вниз, а X – горизонтальная координата, увеличивающаяся слева направо. Границы могут иметь угловые точки и быть фиктивными в некоторых частях, т. е. совпадать, но не пересекаться. Приемники располагаются на поверхности земли либо равномерно, либо в заданных пользователем точках. Скорости могут изменяться как по вертикали, так и по горизонтали. Расчеты производятся для продоль-

ной, поперечной и обменных волн. Результаты расчетов (лучи, гидографы, амплитудные графики) выводятся в числовом виде в файлы LU1, LU2 с произвольным названием по выбору пользователя.

Вывод информации в графическом виде выполняется программой RAYPLT_D. Входной файл de для RAYPLT_D содержит наблюденные гидографы для одного пункта взрыва и информацию о размерах выходного рисунка, время редукции и прочее для вывода на экран результатов расчета программы SEIS83 в графическом виде. Возможен вывод как всей рассчитанной модели, так и любой ее части. Лучевая диаграмма, гидограф и амплитуда выводятся в трех отдельных окнах, размер и масштаб которых можно менять. Пользователь может вывести как все лучи, так и лучи с заданными номерами.

Результаты исследования и их обсуждение

Решение проблем оценки сейсмической опасности в различных геологических условиях рассмотрены в работах [16–18].



Построение и изучение сейсмических разрезов на территории Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук. Волновое поле, зарегистрированное на трех сейсмических профилях с общей протяженностью 585 м на площадке ИВиС ДВО РАН (всего более 150 записей многоканальных сейсмограмм), соответствует тонкослоистому разрезу грунтов, внутри которого отмечено чередование высокоскоростных и низкоскоростных прослоев, что приводит к возникновению эффекта выпадения пластика. Например, если одна из границ имеет меньшую скорость, это приводит к тому, что преломленная волна от нее не фиксируется в области первых вступлений, а переходит в область вторых вступлений.

Эффект выпадения сейсмического слоя (выпадение пластика) – это явление, при котором преломленная волна, соответствующая какой-либо преломляющей границе, не регистрируется в области первых вступлений при сейсморазведке.

Это происходит в трехслойном (многослойном) разрезе, когда преломленная волна от первой границы раздела сред не появляется в области первых вступлений, а регистрируется только во вторых вступлениях.

Выпадение пластика может вызывать ошибки в определении глубин до второй границы раздела сред, так как вместо трехслойного разреза представляется двухслойный, состоящий из пластов со скоростями.

Однако при работе методом вторых вступлений выпадение пластика не опасно, так как преломленные волны этим методом можно проследить не только в первых вступлениях, а интерпретация наблюдений позволяет правильно сделать вывод о строении среды.

В целом регистрируемое волновое поле обеспечивает построение сейсмических границ в верхней части с использованием волн первых вступлений и последующим наращиванием разреза сверху вниз, введением в интерпретацию волн последующих вступлений с применением интеграционных процедур в процессе математического направленного моделирования [19].

В результате проведенных работ были изучены разрезы грунтов вдоль трех взаимно-пересекающихся профилей на территории ИВиС

ДВО РАН. Максимальная глубина исследований составила 65 м, а количество выделенных границ – 13. Все разрезы подстилаются толщей пород, скорость продольных волн в которых не менее 2,5 км/с. Прямых измерений этого параметра нет, но по соотношениям параметров падающих и отраженных волн полученные величины могут рассматриваться как предельные, т. е. нижний слой подстиается слоем со скоростями не более 2,5 км/с. Пример одного из трех сейсмических разрезов грунта представлен ниже (рис. 4).

Важной особенностью строения всех трех разрезов является обнаружение слоя пониженных скоростей на глубине приблизительно 18,5–20 м, который связан с озерными отложениями, что не является благоприятным условием для строительства.

При обработке сейсмических данных в программном пакете SEIS83 создаются файлы с физико-механическими параметрами грунтов, которые содержат информацию о скорости и коэффициенте затухания продольных и поперечных волн, плотности, мощности слоя и глубины залегания каждой границы, а также модули сдвига и сжатия. Для исследования горизонтальных неоднородностей грунтов, позволяющих оценить изменения литологического состава пород в слое, на сейсмические разрезы были нанесены изолинии скоростей, которые позволили более наглядно проследить изменение скоростей по горизонтали и вертикали вдоль профиля (рис. 5).

Неоднородности грунтов прослеживаются по горизонтали вдоль всех трех профилей. Это дает возможность утверждать, что на исследуемой площадке невозможно выбрать точку бурения инженерно-геологической скважины, которая позволит охарактеризовать площадку в целом. В соответствии с картой А ОСР-2015¹ площадка ИВиС ДВО РАН располагается в зоне 9-балльных сотрясений без учета локальных условий. Вместе с тем особенности структуры местных грунтов могут способствовать как уменьшению, так и увеличению этих значений.

Построение и изучение сейсмических разрезов на территории площадки кинотеатра «Горизонт». Методика конструирования сейсмического разреза по экспериментальному

¹ СП 14.13330.2018. «Строительство в сейсмических районах». Актуализированная редакция СНиП II-7-81. М.: Стандартинформ, 2018. 114 с.



Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

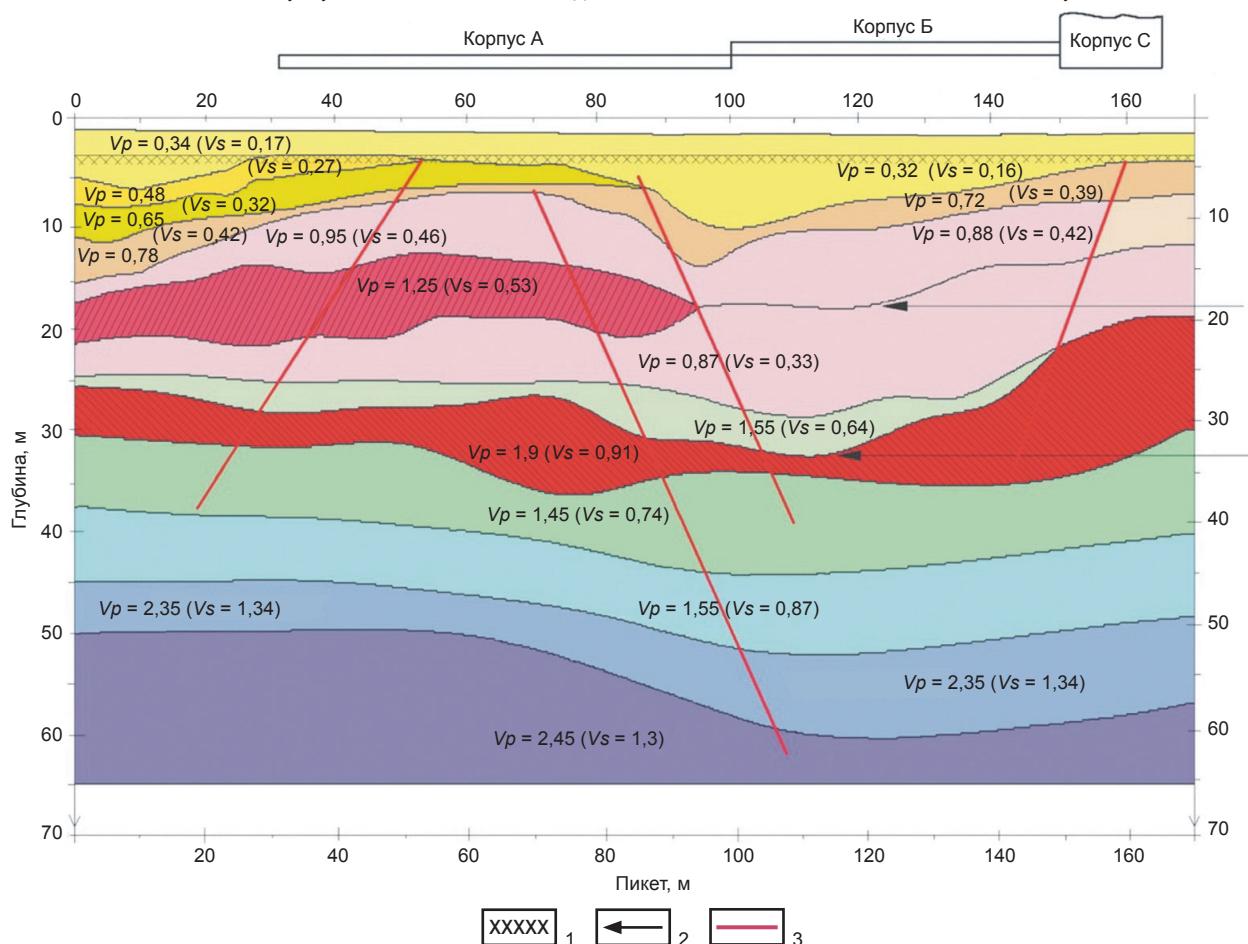


Рис. 4. Сейсмический разрез грунта вдоль профиля 1 на территории Института Вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук:

1 – уровень строительного фундамента здания; 2 – высокоскоростные слои;

3 – возможные разломы (границы резкой смены физических (геологических) параметров);

Fig. 4. Seismic soil cross-section along profile 1 on the territory of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences:

1 – building foundation level; 2 – high-velocity layers;
3 – possible faults (boundaries of abrupt changes in physical (geological) parameters);

Fig. 4. Seismic soil cross-section along profile 1 on the territory of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences:

волновому полю, основа которого представляет направленное трассирование сейсмических лучей в неоднородно-слоистых средах по пакету программ SEIS83, позволяет более точно определить природу волн, а также получить более достоверные значения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн (см. рис. 3)

На сейсмограммах профиля на территории кинотеатра «Горизонт» хорошо прослеживаются волны первых вступлений. Волны вторых вступлений – низкоскоростные, они имеют низкочастотные колебания. Это связано с процессом обмена продольных волн на поперечные и обратно, что позволяет регистрировать на вертикальных приборах ком-

поненты поперечных колебаний и, соответственно, получать информацию о сдвиговых характеристиках грунтов в большом диапазоне глубин.

В целом регистрируемое волновое поле обеспечивает построение сейсмических границ в верхней части с использованием волн первых вступлений с последующим наращиванием разреза сверху вниз и введением в интерпретацию волн последующих вступлений (рис. 6).

На сейсмическом разрезе показаны не только сейсмические границы (их геометрия), но также значения скоростей распространения продольных и поперечных волн (в километрах в секунду) и глубины (в метрах от

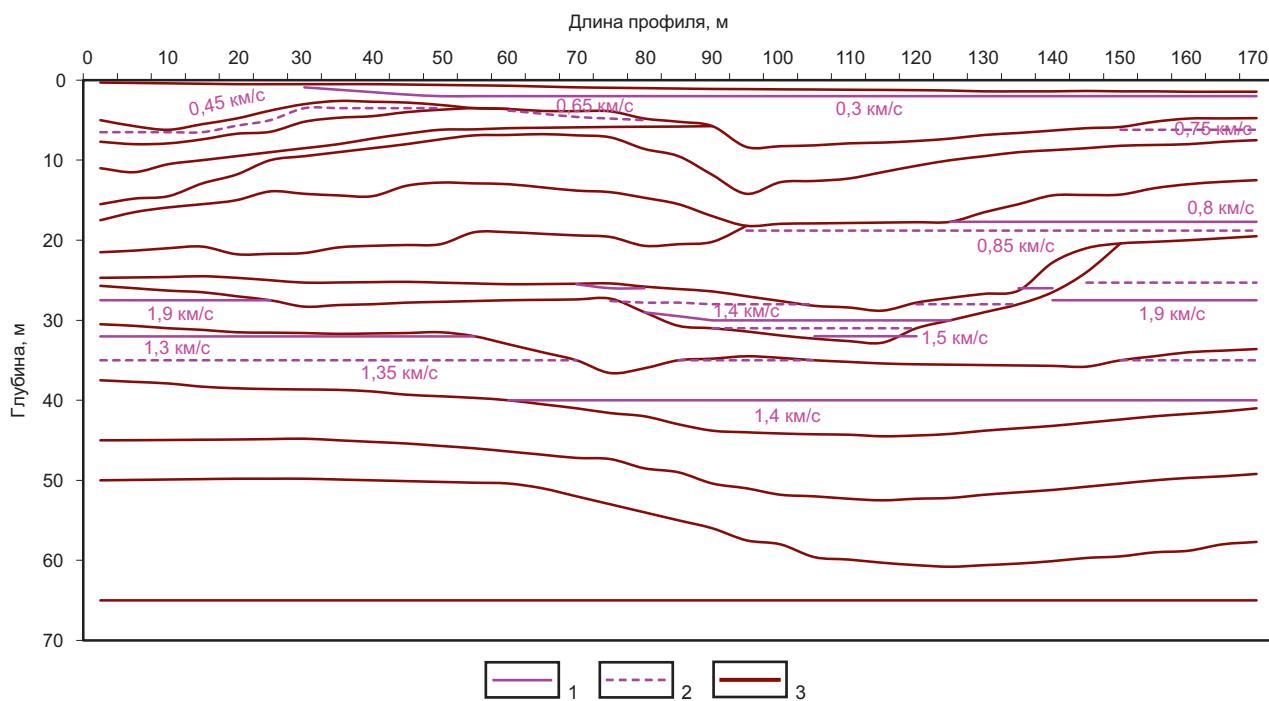


Рис. 5. Сейсмический разрез грунта по профилю 1 с нанесенными изолиниями скоростей на территории Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук:

1, 2 – изолинии скоростей; 3 – границы грунтов

Fig. 5. Seismic soil cross-section along profile 1 with plotted velocity isolines on the territory of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences:

1, 2 – velocity isolines; 3 – soil boundaries

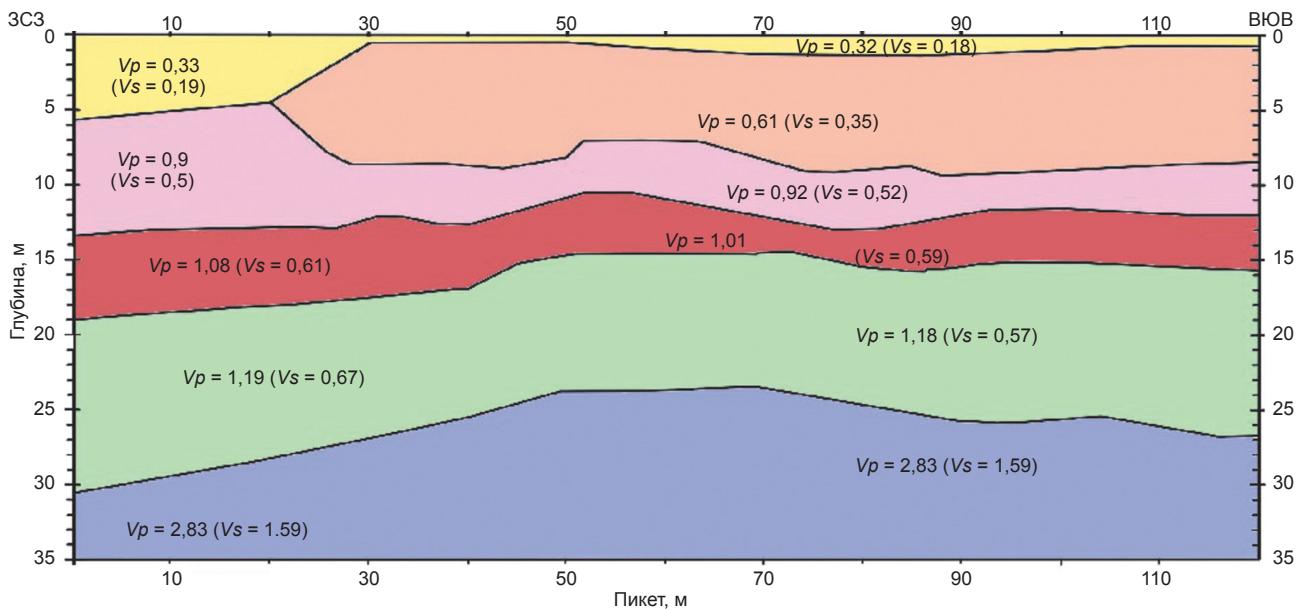


Рис. 6. Сейсмический разрез по профилю на территории кинотеатра «Горизонт»:
Vp – сейсмические скорости продольных волн; Vs – сейсмические скорости поперечных волн

Fig. 6. Seismic profile section on the territory of the Horizon cinema:

Vp – seismic velocities of longitudinal waves; Vs – seismic velocities of transversal waves

дневной поверхности). Рассчитанная модель разреза имеет 5 границ, причем максимальная глубина исследования составляет 35 м. Все слои подстилаются толщей пород, ско-

рость продольных волн в которых составляет 2,83 км/с.

Скоростные характеристики верхних 10 м грунта, за исключением слоя почвенно-пирокла-

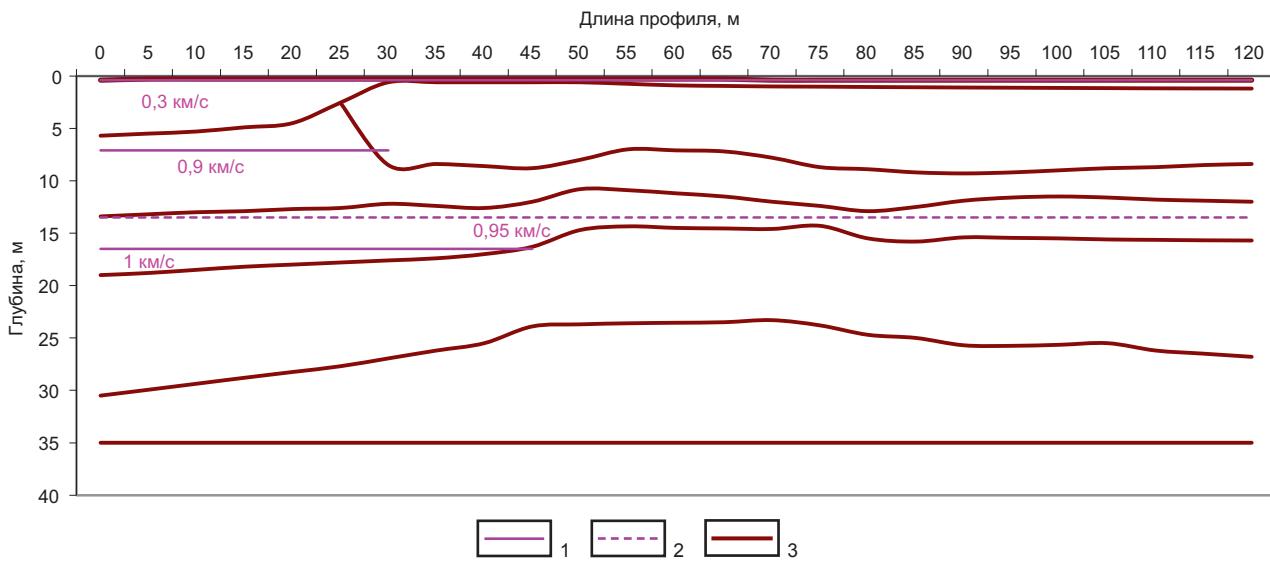


Рис. 7. Сейсмический разрез по профилю 1 с нанесенными изолиниями скоростей на территории кинотеатра «Горизонт»:
1, 2 – изолинии скоростей; 3 – границы грунтов
Fig. 7. Seismic section along the profile with plotted velocity isolines on the territory of the Horizon cinema:
1, 2 – velocity isolines; 3 – soil boundaries

стических отложений (1,5–5,5 м), по сейсмическим свойствам соответствуют грунтам II категории.

Используя данные скоростей, полученных в расчетных методах, на разрез были нанесены изолинии скоростей для более наглядного наблюдения за изменением скоростей по вертикали и горизонтали вдоль профиля (рис. 7).

Как видно из рис. 7, изолинии скоростей не повторяют геометрию границ. Это дает возможность утверждать о значительной неоднородности литологического состава пород в слоях грунта вдоль профиля. Это значит, что на исследуемом профиле невозможно выбрать точку бурения инженерно-геологической скважины, позволяющую охарактеризовать площадку в целом, поскольку изменение скоростей вдоль профиля относительно точки исследования может давать как увеличение, так уменьшение сейсмической балльности.

Заключение

В соответствие с картой А ОСР-2015¹ площадки ИВиС ДВО РАН и кинотеатра «Горизонт» располагаются в зоне 9-балльных сотрясений без учета локальных условий. Более детальное изучение сейсмических разрезов, а именно точное наблюдение за изменением скоростей на небольших участках, позволило выделить в пределах исследуемой территории зоны с различной

сейсмической интенсивностью, которая может не соответствовать аналогичным характеристикам, определяемым на карте сейсмического районирования входящих в состав строительных норм и правил [20].

На территории ИВиС ДВО РАН и кинотеатра «Горизонт» проведены исследования тонкой структуры и скоростных параметров грунтов методом сейсмического 2D-профилирования, полученные материалы были обработаны и интерпретированы. В результате исследования были построены сейсмические разрезы, анализ сейсмограмм которых в дальнейшем был подтвержден при бурении скважин до глубины 20–25 м на всех участках работ. При сравнении изменения скоростных характеристик была отмечена неоднородность геологической структуры участков исследования по вертикали и горизонтали. Такая неоднородность наблюдается не только в строении, но и в физико-механических свойствах грунта и может влиять на уменьшение или увеличение сейсмической балльности исследуемого участка. Исследования достоверно показали, что выбрать место для бурения одной уникальной скважины, которая позволила бы охарактеризовать площадку в целом, невозможно. Поэтому наиболее эффективным является проведение сейсмического 2D-профилирования, которое даст возможность трехмерного измерения физико-механических параметров.

**Список источников**

1. Ершов И.А. Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского // Труды Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М.: Наука, 1984. Вып. 25. Прогноз сейсмических воздействий. С. 82–90.
2. Soupios P.M., Georgakopoulos P., Papadopoulos N., Saltas V., Andreadakis A., Vallianatos F., et al. Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation // Journal of Geophysics and Engineering. 2007. Vol. 4. Iss. 1. P. 94–103. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/4/1/011>.
3. Ершов И.А., Медведев С.В., Федотов С.А., Штейнберг В.В. Сейсмическое микрорайонирование г. Петропавловска-Камчатского // Вопросы инженерной сейсмологии / отв. ред. С.В. Медведев. М.: Изд-во АН СССР, 1965. Вып. 10. Сейсмическое микрорайонирование. С. 3–33
4. Obare J.O., Mariitaa N.O., NjengaMburu. Application of geophysical methods in foundation investigation for construction purposes at Olkaria (V) fields, Kenya // Global Scientific Journals. 2020. Vol. 8. Iss. 3. P. 121–147. Режим доступа: https://globalscientificjournal.com/researchpaper/APPLICATION_OF_GEOPHYSICAL_METHODS_IN_FOUNDATION_INVESTIGATION_FOR_CONSTRUCTION_PURPOSES_AT_OLKARIA_V_FIELDS_KENYA.pdf (дата обращения: 28.11.2024).
5. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 143 с.
6. Kumar M., Saini R. Reflection and refraction of attenuated waves at boundary of elastic solid and porous solid saturated with two immiscible viscous fluids // Applied Mathematics and Mechanics. English Edition. 2012. Vol. 33. Iss. 6. P. 797–816. <https://doi.org/10.1007/s10483-012-1587-6>.
7. Ершов И.А. Сопоставление инструментальных данных о скоростях распространения волн в грунте, амплитудах и периодах для сейсмического микрорайонирования // Труды Института физики Земли. М.: Наука, 1965. Вып. 36. Сейсмическое микрорайонирование. С. 46–60.
8. Egor A.O. Characterization of sub-surface structure, using seismic refraction and multi-channel analysis of surface waves methods in Ajere Ekori Yakurr LGA of cross river state // GSC Advanced Research and Reviews. 2023. Vol. 16. Iss. 1. P. 188–200. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2023.16.1.0311>.
9. Fkirin M.A., Badawy S., El deery M.F. Seismic refraction method to study subsoil structure // Journal of Geology & Geophysics. 2016. Vol. 5. P. 259–265. <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000259>.
10. Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 91–97. <https://doi.org/10.31857/S2686739722601466>. EDN: YHXPNN.
11. Крук П.Н. Опыт использования отечественного программного обеспечения для комплексной интерпретации данных сейсморазведки 2D/3D // Актуальные проблемы нефтегазовой отрасли: сборник докладов науч.-практ. конф. журнала «Нефтяное хозяйство», 2019 г. (г. Санкт-Петербург – Самара – Анапа – Волгоград, 16 марта – 31 октября 2019 г.). М.: ЗАО «Издательство “Нефтяное хозяйство”», 2020. С. 206–209. EDN: MWGBGJ.
12. Сакулина Т.С., Кашубин С.Н., Павленкова Г.А. Глубинные сейсмические зондирования по профилю 1-AP в Баренцевом море: методика и результаты // Физика Земли. 2016. № 4. С. 107–124. <https://doi.org/10.7868/S0002333716040086>. EDN: WALRKJ.
13. Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Инструментальные данные малоглубинной сейсморазведки в расчетах сейсмических жесткостей при сейсмическом микрорайонировании // Уральский геофизический вестник. 2020. Т. 42. № 4. С. 29–35. <https://doi.org/10.25698/UGV.2020.4.5.29>. EDN: VFACZB.
14. Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А., Сергеев К.Ф., Утнасин В.К., Федорченко В.И. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки / отв. ред. А.А. Попов, Г.С. Гнибиденко. М.: Наука, 1978. 130 с.
15. Niederleithinger E., Abraham O., Mooney M. Geophysical methods in civil engineering: overview and new concepts // International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (Berlin, 15–17 September 2015). BAM, Federal Institute for Materials Research and Testing. Режим доступа: https://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/018_niederleithinger_ernst.pdf (дата обращения: 28.11.2024).
16. Баранов С.В., Шебалин П.Н., Воробьева И.А., Сельцкая О.В., Автоматизированная оценка опасности афтершоков землетрясения в Турции 06.02.2023 г., M_w 7.8* // Физика Земли. 2023. № 6. С. 133–141. <https://doi.org/10.31857/S0002333723060042>. EDN: MUXRXQ.
17. Захарченко Е.И., Рудомаха Н.Н., Захарченко Ю.И., Андрейко Н.Г. Инженерные геофизические исследования на площадке изысканий в северной части г. Краснодара // Булатовские чтения: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (г. Краснодар, 31 марта 2021 г.). Краснодар: Изд-во ООО «Издательский Дом – Юг», 2021. Т. 1. С. 54–57. EDN: UJHVUJ.
18. Нерадовский Л.Г. Ошибки распознавания по скорости распространения сейсмической волны геологической природы слоев в мерзлых четвертичных отложениях долины реки Лены // Научный альманах. 2021. № 2-1. С. 72–78. EDN: FVAAGQ.
19. Медведев Е.С. Соотношение размеров зданий и сейсмических свойств грунтов // Труды Института физики Земли. М.: Наука, 1965. Вып. 36. Сейсмическое микрорайонирование. С. 171–174.
20. Гусев А.А., Зобин В.М., Феофилактов В.Д. Определение расчетной балльности и оценка параметров максимальных колебаний грунта площадки строительства на Камчатке // Вопросы инженерной сейсмологии: сб. науч. тр. / отв. ред. С.В. Медведев. М.: Наука, 1980. Вып. 20. С. 44–59.



References

1. Ershov I.A. Assessing seismic hazard for Petropavlovsk-Kamchatsky. In: *Trudy Instituta fiziki Zemli im. O.Yu. Shmidta = Proceedings of the O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth*. Moscow: Nauka; 1984, vol. 25, p. 82-90. (In Russ.).
2. Soupios P.M., Georgakopoulos P., Papadopoulos N., Saltas V., Andreadakis A., Vallianatos F., et al. Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2007;4(1):94-103. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/4/1/0111>.
3. Ershov I.A., Medvedev S.V., Fedotov S.A., Shtenberg V.V. Petropavlovsk-Kamchatsky seismic microzoning. In: Medvedev S.V. (ed.). *Voprosy inzhenernoi seismologii = Problems of engineering seismology*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1965, vol. 10, p. 3-33. (In Russ.).
4. Obare J.O., Mariita N.O., NjengaMburu. Application of geophysical methods in foundation investigation for construction purposes at Olkaria (V) fields, Kenya. *Global Scientific Journals*. 2020;8(3):121-147. Available from: https://globalscientificjournal.com/researchpaper/APPLICATION_OF_GEOPHYSICAL_METHODS_IN_FOUNDATION_INVESTIGATION_FOR_CONSTRUCTION_PURPOSES_AT_OLKARIA_V_FIELDS_KENYA.pdf [Accessed 28th November 2024].
5. Goryainov N.N., Lyakhovitskii F.M. *Seismic methods in engineering geology*. Moscow: Nedra; 1979, 143 p. (In Russ.).
6. Kumar M., Saini R. Reflection and refraction of attenuated waves at boundary of elastic solid and porous solid saturated with two immiscible viscous fluids. *Applied Mathematics and Mechanics. English Edition*. 2012;33(6):797-816. <https://doi.org/10.1007/s10483-012-1587-6>.
7. Ershov I.A. Comparison of instrumental data on ground wave propagation velocities, amplitudes and periods for seismic microzoning. In: *Trudy Instituta fiziki Zemli = Proceedings of the Institute of Physics of the Earth*. Moscow: Nauka; 1965, vol. 36, p. 46-60. (In Russ.).
8. Egor A.O. Characterization of sub-surface structure, using seismic refraction and multi-channel analysis of surface waves methods in Ajere Ekori Yakurr LGA of cross river state. *GSC Advanced Research and Reviews*. 2023;16(1):188-200. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2023.16.1.0311>.
9. Fkirin M.A., Badawy S., El deery M.F. Seismic refraction method to study subsoil structure. *Journal of Geology & Geophysics*. 2016;5:259-265. <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000259>.
10. Shebalin P.N., Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Skorkina A.A. Why are new approaches to seismic hazard assessment required? *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2022;507(1):91-97. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686739722601466>. EDN: YHXPNN.
11. Kruk P.N. Domestic software use experience for complex interpretation of 2D/3D seismic data. In: *Aktual'nye problemy neftegazovoi otrassli: sbornik dokladov nauch.-prakt. konf. zhurnala "Neftyanoe khozyaistvo" 2019 g. = Actual problems of oil industry: collected reports of the scientific and practical conferences held by Oil Industry Journal in 2019*. 16 March – 31 October 2019, Saint Petersburg – Samara – Anapa – Volgograd. Moscow: Izdatel'stvo "Neftyanoe khozyaistvo"; 2020, p. 206-209. (In Russ.). EDN: MWGBGJ.
12. Sakoulina T.S., Kashubin S.N., Pavlenkova G.A. Deep seismic soundings on the 1-AP profile in the Barents sea: methods and results. *Fizika Zemli*. 2016;4:107-124. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0002333716040086>. EDN: WALRKJ.
13. Senin L.N., Senina T.E. Instrumental data of low-depth seismic survey in calculations of seismic rigidity in seismic microzoning. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*. 2020;42(4):29-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.25698/UGV.2020.4.5.29>. EDN: VFACZB.
14. Anosov G.I., Bikkenina S.K., Popov A.A., Sergeev K.F., Utnasin V.K., Fedorchenco V.I. *Kamchatka deep seismic sounding*. Moscow: Nauka; 1978, 130 p. (In Russ.).
15. Niederleithinger E., Abraham O., Mooney M. Geophysical methods in civil engineering: overview and new concepts. In: *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. 15–17 September 2015, Berlin. BAM, Federal Institute for Materials Research and Testing. Available from: https://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/018_niederleithinger_ernst.pdf [Accessed 28th November 2024].
16. Baranov S.V., Shebalin P.N., Vorob'eva I.A., Selyutskaya O.V. Automated assessment of hazards of aftershocks of the M_w 7.8 earthquake in Turkey of February 6, 2023. *Fizika Zemli*. 2023;6:133-141. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002333723060042>. EDN: MUXRXQ.
17. Zakharchenko E.I., Rudomakha N.N., Zakharchenko Yu.I., Andreiko N.G. Engineering geophysical research at the survey site in the northern part city of Krasnodar. In: *Bulatovskie chteniya: materialy V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Readings name of A.I. Bulatov: Proceedings of the 5th International scientific and practical conference*. 31 March 2021, Krasnodar. Krasnodar: Izdatel'skii Dom – Yug; 2021, vol. 1, p. 54-57. (In Russ.). EDN: UJHVUJ.
18. Neradovskii L.G. Errors in recognizing the geological nature of layers in frozen Quaternary sediments of the Lena river valley by the seismic wave propagation velocity. *Science Almanac*. 2021;2-1:72-78. (In Russ.). EDN: FVAAGQ.
19. Medvedev E.S. Correlation of building sizes and seismic properties of soils. In: *Trudy Instituta fiziki Zemli = Proceedings of the Institute of Physics of the Earth*. Moscow: Nauka; 1965, vol. 36, p. 171-174. (In Russ.).
20. Gusev A.A., Zobin V.M., Feofilaktov V.D. Estimated intensity determination and maximum ground vibration parameters assessment at a construction site in Kamchatka. In: Medvedev S.V. (ed.). *Voprosy inzhenernoi seismologii = Problems of Engineering Seismology*. Moscow: Nauka; 1980, vol. 20, p. 44-59. (In Russ.).



Информация об авторах / Information about the authors



Марычева Анастасия Валентиновна,
аспирант,
Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия,
✉ marycheva_av@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-4772-0263>
Anastasia V. Marycheva,
Postgraduate Student,
Scientific Research Geotechnological Centre,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,
✉ marycheva_av@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-4772-0263>



Сидоров Михаил Дмитриевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник,
Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия,
✉ smd1952z@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0000-1642-1529>
Mikhail D. Sidorov,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Researcher,
Scientific Research Geotechnological Centre,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,
✉ smd1952z@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0000-1642-1529>



Пантелеймонова Татьяна Валентиновна,
аспирант,
Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия,
✉ tatiana_686@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-9870-0119>
Tatiana V. Panteleimonova,
Postgraduate Student,
Scientific Research Geotechnological Centre,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,
✉ tatiana_686@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-9870-0119>

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.В. Марычева – разработка концепции, формальный анализ, написание черновика рукописи.

М.Д. Сидоров – научное руководство, редактирование рукописи.

Т.В. Пантелеймонова – разработка концепции, формальный анализ, написание черновика рукописи.

Anastasia V. Marycheva – conceptualization, formal analysis, writing – original draft.

Mikhail D. Sidorov – supervision, writing – editing.

Tatiana V. Panteleimonova – conceptualization, formal analysis, writing – original draft.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.



Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 14.05.2025; одобрена после рецензирования 04.07.2025; принята к публикации 17.09.2025.

The article was submitted 14.05.2025; approved after reviewing 04.07.2025; accepted for publication 17.09.2025.