

УДК 550.34+550.341+550.343

DOI: 10.46698/VNC.2023.36.73.006

Оригинальная статья

Модель очаговой зоны землетрясения и прогноз параметров сильных движений грунта

О.О. Эртелева , Ф.Ф. Аптикаев 

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Россия, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1.
e-mail:ertel@ifz.ru

Статья поступила: 04.08.2023, доработана: 17.11.2023, принята к публикации: 29.11.2023

Резюме: Актуальность работы. Прогноз количественных параметров сейсмического движения грунта, основанный на исследованиях сильных движений грунта – заключительная часть комплекса работ, по оценке сейсмической опасности любой территории. В то же время результаты исследований процессов генерации и распространения сейсмических волн в ближней зоне землетрясений имеют большое значение для физики очага землетрясения, являясь основой для построения адекватной модели очага и происходящих в нем процессов. Закономерности распространения сейсмического волнового поля выражаются в уравнениях связи параметров сейсмических колебаний с характеристиками очага и среды. Эти уравнения могут быть получены как исходя из теоретических положений, имеющихся в современной сейсмологической науке, так и из анализа накопленных данных по сильным движениям грунта. Не требует доказательства, что взаимопроникновение этих двух методов является наиболее плодотворным для развития научного прогресса. Тенденция последних десятилетий при разработке уравнений для прогноза параметров сильных движений грунта – выделение в волновом поле нескольких зон с различными зависимостями от параметров среды и очага. Прогнозные соотношения, получаемые с использованием такого метода, отличает уменьшение разброса оценок параметров колебаний и соответствие эмпирическим данным. При обработке статистических данных с использованием теории размерности и подобия установлено, что в поле сейсмических волн существуют подобные расстояния, на которых величины параметров колебаний подобны. Иными словами, существуют законы масштабирования параметров сейсмических движений грунта. Аналогичное утверждение можно найти и в теоретических работах, посвященных генерации сейсмических волн очагом землетрясения. **Цель работы** – используя теоретические положения о процессах в очаговой области, установить законы генерации и распространения параметров сильных движений грунта с учетом эмпирических данных, разработать модель очаговой области, не противоречащую эмпирическим данным, определить размеры очаговой области землетрясения. **Методы исследования** – статистический анализ эмпирических данных по сильным движениям грунта. **Результаты работы** – предложены уравнения затухания для амплитуд пиковых ускорений грунта в разломной, ближней и дальней зонах; прогнозные уравнения для преобладающих периодов и продолжительности колебаний сильных движений грунта; оценены размеры очаговой области землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение, очаг, параметры сейсмических колебаний, разломная зона, ближняя зона, дальняя зона, подобные расстояния, затухание.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию ИФЗ РАН.

Для цитирования: Эртелева О.О., Аптикаев Ф.Ф. Модель очаговой зоны землетрясения и прогноз параметров сильных движений грунта. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 71-84. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.73.006

DOI: 10.46698/VNC.2023.36.73.006

Original paper

Earthquake source zone model and prediction of strong ground motion parameters

O.O. Erteleva^{ID}, F.F. Aptikaev^{ID}

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
10/1 Bolshaya Gruzinskaya, Moscow 123242, Russian Federation,
e-mail: ertel@ifz.ru

Received: 04.08.2023, revised: 17.11.2023, accepted: 29.11.2023

Abstract: Relevance. Prediction of quantitative parameters of seismic ground motion, based on studies of strong ground motion records, is the final part of the set of works on the seismic hazard assessment of any territory. At the same time, the results of studying the processes of seismic wave's generation and propagation in the near zones of earthquakes are of great importance for the physics of the earthquake source, being the basis for constructing an adequate model of the source and the processes occurring in it. The regularities of propagation of a seismic wave field are expressed in the equations of connection between the parameters of seismic vibrations and the characteristics of the source and the medium. These equations can be obtained both from the theoretical positions available in today's seismological science, and from the analysis of accumulated data on strong ground motion records. It does not require proof that the interpenetration of these two methods is the most fruitful for the development of scientific progress. The trend of recent decades in the development of equations for predicting the parameters of strong ground motions is the identification of several zones in the wave field with different dependences on the parameters of the medium and source. The predictive ratios obtained using this method are distinguished by a decrease in the scatter of estimates of the fluctuation parameters and compliance with empirical data. When processing statistical data using the theory of dimension and similarity, it was found that in the field of seismic waves there are similar distances at which the values of the vibration parameters are similar. In other words, there are laws for scaling the parameters of seismic ground motion. A similar statement can be found in theoretical works devoted to the generation of seismic waves by an earthquake source. **The aim of the work** is – using theoretical provisions on processes in the source area, to establish the laws of generation and propagation of parameters of strong ground movements, taking into account empirical data, to develop a model of the source area that does not contradict empirical data, to determine the size of the earthquake source area. **Research methods** – statistical analysis of empirical data on strong ground motion. **Results of the work** – attenuation equations for the amplitudes of peak ground accelerations in the fault, near- and far-field zones are proposed; predictive equations for the prevailing periods and duration of vibration of strong ground motion; the sizes of the source area of the earthquake were estimated.

Keywords: earthquake, source, parameters of seismic vibrations, fault zone, near-field zone, far-field zone, similar distances, attenuation.

Acknowledgements: *The work was carried out according to the state task of the IPE RAS/*

For citation: Erteleva O.O., Aptikaev F.F. Earthquake source zone model and prediction of strong ground motion parameters. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(4): 71-84. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.73.006

Введение

Из физики известно, что движение любой механической системы описывается тремя параметрами, имеющими размерность массы, пространства и времени. В сейсмологии на основании трех величин, имеющих эти размерности, определяются всевозможные другие характеристики сейсмического движения грунта: смещение,

скорость, ускорение, спектр, продолжительность колебаний и т.д. Для прогноза сейсмических воздействий в инженерной сейсмологии важно знать, как изменяются параметры колебаний грунта с изменением магнитуды, являющейся энергетической характеристикой сейсмических источников. Согласно теории размерностей и подобия, логарифмы всех параметров изменяются пропорционально логарифму энергии [Седов, 1978]. На практике условия подобия не всегда выполнимы, например, масса горных пород в очаге землетрясения остается постоянной, независимо от магнитуды. В таких случаях некоторые параметры будут изменяться по иным законам, которые можно оценить как по теоретическим закономерностям, так и по эмпирическим данным.

Очевиден тот факт, что магнитуда землетрясения и расстояние являются главными факторами, определяющими численное значение параметров колебаний грунта. К настоящему времени разработаны многочисленные уравнения, описывающие процесс генерации и распространения сейсмических волн [Graizer, Kalkan, 2016; Zuccolo et al., 2017; Коновалов и др., 2018; Stafford, 2019; Jaimes, Garsia-Soto, 2020; Gao et al., 2021; Bommer et al., 2022; Фидарова и др., 2023 и др.].

В попытке повысить точность прогноза, кроме магнитуды и расстояния, рассматриваются и другие факторы – грунтовые условия, механизм очага, особенности пути распространения колебаний и т.д. Современные уравнения затухания амплитуд ускорений насчитывают до 10 и более членов [Campbell, 1997; Stafford, 2019; Phung et al., 2020; Voore et al., 2021; Bommer et al., 2022; Keshri, Mohanty, 2023]. Однако, как известно, далеко не всегда сложные зависимости ведут к повышению точности получаемых результатов: оценки каждого члена ведут к накоплению погрешности расчетов за счет естественной неточности входных данных. Указанная проблема характеризуется в терминах эпистемической и алеаторной ошибок результата.

Одним из путей повышения точности прогнозных расчетов количественных характеристик сейсмических колебаний является выделение в волновом поле распространяющихся сейсмических волн нескольких зон, каждая из которых обладает своими зависимостями параметров от магнитуды, механизма очага, расстояния и грунтовых условий. Накопленные многочисленные эмпирические данные подтверждают высказанное рядом исследователей [Trifunac, 1976; Artikaev, Kornichev, 1980] утверждение о том, что затухание амплитуд в ближней и дальней зонах описывается различными законами. При составлении карты ДСР Ставропольского края (ИФЗ, 1996), в работах [Artikaev, Erteleva, 2007; Graizer, Kalkan, 2007] вблизи разлома выделена еще одна зона – разломная, в которой при удалении от разлома амплитуды колебательного движения не уменьшаются, а, наоборот, возрастают. Подобное явление отмечалось в разных регионах, например, при Газлийском землетрясении [Газлийские землетрясения..., 1986; Чернов, 1989], в Греции [Skarlatoudis et al., 2013], на Северном Кавказе [Чернов и др., 2019] и др. Однако, ему либо не придавалось значения, либо оно считалось ошибкой измерения расстояний.

При статистической обработке представительного количества (иногда более тысячи) реальных акселерограмм установлено [Артикаев, 2012], что кривые затухания амплитуд ускорений масштабируются сдвигом по оси расстояний, а не по уровню, как это следует из определения понятия магнитуды. При этом эмпирический закон масштабирования описывается соотношением:

$$\partial(\lg R) / \partial M = 0.33. \quad (1)$$

При этом, подобные амплитуды находятся на подобных (или приведенных (нормированных) к некоему значению R , соответствующему значению магнитуды M) расстояниях R^* , которые в соответствии с формулой (1) определяются соотношением:

$$\lg R^* = \lg R - 0.33 M. \quad (2)$$

В то же время, согласно теории размерности и подобия [Седов, 1987], подобные расстояния R^* определяются в соответствии с энергией источника E :

$$\lg R^* = \lg R - E / 3. \quad (3)$$

Как видим, эмпирический (2) и теоретический (3) законы масштабирования вполне согласуются, однако, по определению, магнитуда и энергия имеют различные размерности. Но при исследованиях зависимости параметров сейсмических колебаний от магнитуды и веса взрывчатых веществ было обнаружено, что магнитуда по поверхностным волнам M пропорциональна весу заряда [Аптикаев, 2012; Ляхов, 1964]. Несоответствие размерностей магнитуды и энергии возникло потому, что определение магнитуды противоречит правилам теории размерностей и подобия: референтное расстояние 100 км выбрано постоянным, независимым от энергии сейсмического источника. Такой выбор был обусловлен тем, чтобы флюктуации амплитуды с расстоянием не зависели от магнитуды и определялись только строением среды. Итак, магнитуда может рассматриваться в качестве энергии источника E .

Тогда закон масштабирования амплитуд сильных движений грунта, описываемый уравнением (3), может быть записан в виде:

$$\lg R^* = \lg R - M / 3. \quad (4)$$

Правило нормирования расстояний, описываемое уравнением (4), вполне согласуется с оценками аналогичных коэффициентов, полученными другими авторами с использованием других методов (см., например, [Садовский и др., 1983; Wells, Coppersmith, 1994]).

Использованные данные

В работе использованы данные о параметрах сильных движений грунта при сейсмических событиях из разных регионов мира с различными механизмами очага, магнитудами, расстояниями и грунтовыми условиями в пунктах регистрации. Магнитуды рассмотренных землетрясений находятся в интервале $2 \leq M_S \leq 8$, эпицентральные расстояния – до 175 км, кратчайшие расстояния до плоскости разрыва – от 0.01 км до 100 км; классификация грунтов по сейсмическим свойствам согласно нормам СП 14.13330.2018.

Методика обработки данных

При обработке имеющихся данных использовались принципы параметризации записей землетрясений, приведенные в работе [Аптикаев, 2012]:

1) Параметры должны отражать основные черты изучаемого процесса, в данном случае важные с точки зрения расчетов на сейсмостойкость.

2) Параметры должны быть попарно независимыми в том смысле, что изменение при расчетах величины одного из параметров не должно вызывать изменения значений других параметров.

Выбранные таким образом параметры называют основными. В качестве таких приняты величины пикового ускорения, преобладающий период и продолжительность колебаний. Ширина импульса, являющаяся мерой продолжительности колебаний, определяется как интервал времени, в течение которого амплитуда огибающей превышает половину величины максимальной амплитуды записи.

По каждой записи оцениваются пиковое ускорение грунта и ширина импульса колебаний. Кроме того, для каждой из имеющихся записей рассчитывается спектр реакции, по которому определяется преобладающий период.

Чтобы учесть влияние таких факторов как механизм очага и тип грунта, данные разделяются на группы по механизмам очага и категориям грунта. В каждой образовавшейся группе отдельно исследуются распределения параметров распространяющихся сейсмических колебаний – строятся аппроксимирующие прямые. На заключительном этапе корреляционные соотношения, установленные для отдельных групп данных, анализируются для выявления влияния типа механизма очага и типа грунта на закономерности изменения характеристик сейсмического волнового фронта с расстоянием от разлома. Одновременно для всех исследуемых параметров определяются соответствующие стандартные отклонения.

Подробное описание данной системы параметров и эмпирического метода интересующийся читатель может найти, например, в монографии [Аптикаев, 2012].

В расчетах использовались приведенные расстояния, определяемые по формуле (4). В результате было установлено, что в каждой зоне, разломной, ближней и дальней, имеют место различные законы зависимости параметров сейсмических колебаний грунта от расстояния, механизма очага и грунтовых условий. Полученные результаты в графическом виде показаны на рисунке 1.

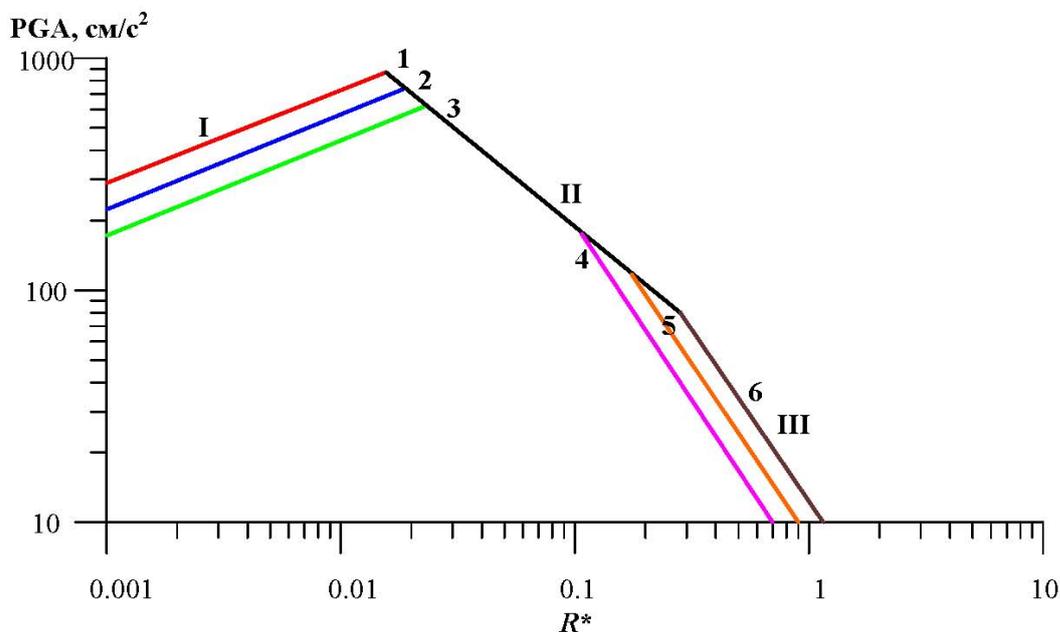


Рис. 1. Закон затухания амплитуд пиковых ускорений грунта (PGA). Условные обозначения:

I – разломная зона, II – ближняя зона, III – дальняя зона; 1 – взброс, 2 – сдвиг, 3 – сброс, 4 – грунты 1 категории, 5 – грунты 2 категории, 6 – грунты 3 и 4 категорий /
 Fig. 1 – PGA attenuation law. Legend: I – fault zone; II – near-field zone, III – far-field zone;
 1 – thrust, 2 – strike-slip, 3 – normal fault, 4 – grounds of 1 category (rock), 5 – grounds of 2 category (intermediate grounds), 6 – grounds of 3 and 4 categories (soft grounds)

Ускорения в разломной зоне.

Чтобы упростить расчеты, наименьшее приведенное расстояние было принято равным $\lg R_0^* = -3.000$. Для $M = 6$ этому значению соответствует 0.1 км. Распределение данных показывает, что возрастание амплитуд происходит до приведенного расстояния R_k^* – границы разломной и ближней зон. Пиковые ускорения на этой границе достигают максимального значения. По эмпирическим данным результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

**Ускорения в разломной зоне /
Peak ground accelerations in the fault zone**

Механизм очага / Focal mechanism	$\lg R_0^*$	PGA_0 , см/с ²	$\lg R_k^*$	$PGA_{\text{макс}}$, см/с ²
Взброс / thrust	- 3.000	290	-1.808	868
Сдвиг / strike-slip	- 3.000	223	-1.733	735
Сброс / normal	- 3.000	172	-1.638	622

В таблице 1 R_0^* – начальное значение приведенного расстояния, R_k^* – конечное значение приведенного расстояния (граница разломной и ближней зон).

Ускорения вычисляются по формуле:

$$\lg PGA = \lg PGA_0 + 0.4 \lg R^* + 1.2 \pm 0.20. \quad (5)$$

Здесь и далее все приведенные оценки относятся к наибольшей амплитуде на горизонтальной компоненте.

Ускорения в разломной зоне зависят от механизма очага и не зависят от грунтовых условий. Резонансные явления, связанные с грунтами, практически отсутствуют.

Ускорения в ближней зоне.

В соседней с разломной ближней зоне ускорения уже затухают по степени 0.63. Процесс затухания ускорений PGA описывается весьма простым уравнением:

$$\lg PGA = 1.8 - 0.63 \lg R^* \pm 0.20 \quad (6)$$

При этом, амплитуды не зависят ни от механизма очага, ни от грунтовых условий. Резонансные явления, связанные с грунтами, практически отсутствуют.

Ускорения в дальней зоне.

Для этой зоны характерно возрастание затухания амплитуд колебаний (см., рисунок 1). В дальней зоне грунтовые условия влияют на уровень амплитуды и на другие параметры сейсмических колебаний. Эмпирические данные аппроксимируются уравнением:

$$\lg PGA = C_2 - 1.4 \lg R^* \pm 0.20, \quad (7)$$

где C_2 – коэффициент, зависящий от типа грунта в точке наблюдения: для грунтов 1-й категории $C_2 = 0.748$, для грунтов 2-й категории $C_2 = 0.944$ и для грунтов 3-й категории $C_2 = 1.140$.

Преобладающий период колебаний в разломной и ближней зонах.

Акселерограммы для разломной и ближней зон обрабатывались совместно. Была проведена процедура, аналогичная примененной при исследовании затуха-

ния пиковых ускорений. При этом, оказалось, что зависимость T_0 от расстояния незначительна, а, следовательно, величина преобладающего периода в разломной и ближней зонах определяется магнитудой события. Полученное в результате уравнение прямой, аппроксимирующей эмпирические данные по преобладающему периоду колебаний в ускорениях, имеет вид:

$$\lg T_0 = M / 6 - 1.55. \quad (8)$$

Эмпирические данные о преобладающих периодах в разломной и ближней зонах, а также аппроксимирующая прямая показаны на рисунке 2.

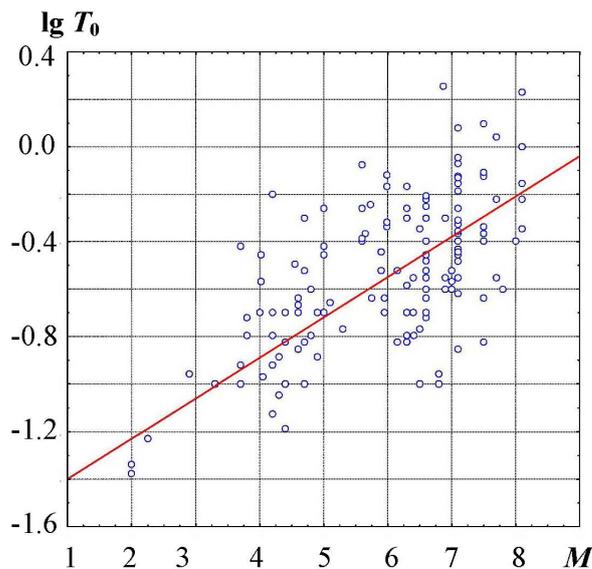


Рис. 2. Зависимость преобладающего периода от магнитуды в разломной и ближней зонах.

Красная линия – аппроксимирующая прямая /

Fig. 2. Dependence of predominant period from earthquake magnitude in fault zone and near-field zone

Преобладающий период колебаний в дальней зоне.

В дальней зоне преобладающий период описывается следующим эмпирическим уравнением:

$$\lg T_0 = M / 6 + 0.25 \lg R^* - 1.73 + C_2 \pm 0.20, \quad (9)$$

где T_0 – преобладающий период ускорений;

R^* – нормированное по магнитуде кратчайшее расстояние до поверхности разлома;

$C_2 = -0.05$ для грунтов 1-й категории, 0.0 для грунтов 2-й категории и 0.1 для грунтов 3-й и 4-й категорий.

В дальней зоне на рыхлых грунтах могут возникать резонансные явления. Поскольку горные породы, слагающие земную кору, в разных регионах мало различаются по сейсмическим свойствам, константы в уравнении (9) относительно стабильны.

Ширина импульса в разломной и ближней зонах.

Продолжительность колебаний может определяться различным образом [SSG-9, 2010; McGuire, Barnhard, 1979]. В большинстве случаев эти определения даются

с нарушением правил размерностей и подобия. Согласно теории размерностей и подобия, длительность колебаний характеризуется шириной импульса t [Аптикаев, 2012]. Эмпирические данные для очаговой зоны показаны на рисунке 3.

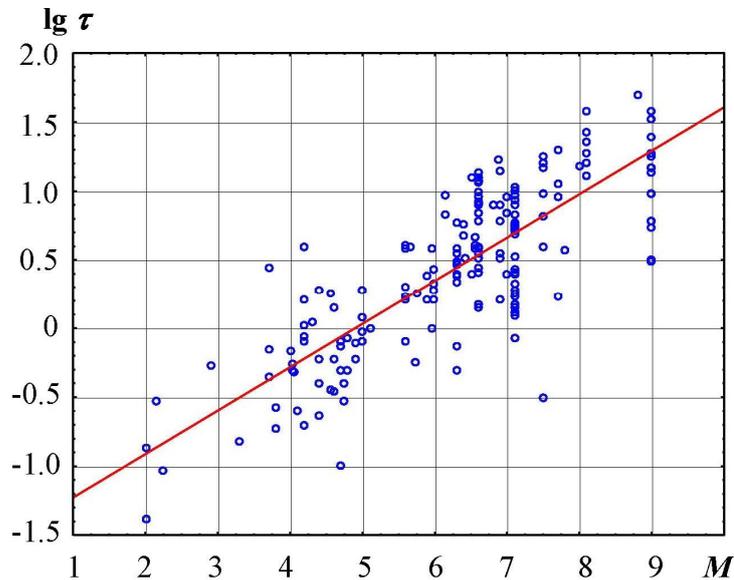


Рис. 3. Зависимость продолжительности колебаний от магнитуды в разломной и ближней зонах.
Красная линия – аппроксимирующая прямая /

Fig. 3. Dependence of vibration duration from earthquake magnitude in fault zone and near-field zone.
Red line is approximating line.

Анализ полученного распределения показал, что зависимость ширины импульса от расстояния в рассматриваемых зонах волнового поля несущественна. Уравнение аппроксимирующей прямой имеет вид:

$$\lg \tau = M / 3 - 1.61 \pm 0.29. \quad (10)$$

Ширина импульса в дальней зоне.

Ширина импульса в дальней зоне может быть описана следующим корреляционным соотношением:

$$\lg \tau = M / 3 - 1.811 + 0.5 \lg R^* + C_2 \pm 0.30, \quad (11)$$

где M – магнитуда землетрясения;

R^* – нормированное кратчайшее расстояние до поверхности разрыва,

C_2 – постоянная, отражающая влияние грунтовых условий: $C_2 = 0.00$ для грунтов 1-ой, $C_2 = 0.15$ – 2-ой и $C_2 = 0.55$ для 3-ей и 4-ой категорий.

Обсуждение результатов

Тенденция последних десятилетий – выделение в волновом поле сейсмических колебаний трех зон с различными затуханиями амплитуд и различными зависимостями параметров колебаний от магнитуды, типа подвижки по разлому, расстояния и грунтовых условий. В результате проведенных исследований было установлено, что для сильных землетрясений интенсивностью 7–9 баллов существуют три зоны, в которых параметры сейсмических колебаний по-разному зависят от магнитуды, механизма очага, расстояния и грунтовых условий.

Анализ распределений эмпирических данных по пиковым ускорениям грунта показал, что в зоне, примыкающей к разлому, – разломной зоне – уровень ускорений с расстоянием возрастает и наблюдается зависимость амплитуды ускорений от механизма очага. В следующей за ней ближней зоне такая зависимость не выявлена. И в разломной, и в ближней зонах существенного влияния грунтовых условий на амплитуду ускорений не обнаружено. Следует заметить, что, тем не менее, сейсмическая интенсивность на рыхлых грунтах возрастает вследствие уменьшения несущей способности грунтов – трещин, просадок и других необратимых деформаций. Непосредственно над разломом, вышедшим на дневную поверхность, сейсмическое воздействие определяется не столько уровнем вибраций, сколько остаточными деформациями.

Объяснить описанные явления можно, если отказаться от плоской модели очага и считать, что очаг землетрясения – некоторый объем среды [Завьялов и др., 2021; Ризниченко, 1976; Stirling et al., 2013; Thingbaijam et al., 2017; Wells, Coppersmith, 1994]. При этом, определяющим фактором величины магнитуды сейсмического события является объем очага землетрясения, а не плотность энергии [Садовский и др., 1983; Певнев, 2021].

До землетрясения в очаге накапливается потенциальная энергия. Процесс землетрясения начинается тогда, когда достигается предельная деформация горных пород в области, включающей будущий разрыв, и накопленная энергия выделяется в виде энергии сейсмических волн. За малый интервал времени после начала движения по разлому малое количество потенциальной энергии переходит в энергию сейсмического движения. С течением времени количество сейсмической энергии возрастает – возрастают и амплитуды колебаний. Далее, в ближней зоне, по лучу амплитуды несколько уменьшаются вследствие геометрического расхождения. Такая модель распространения сейсмического волнового фронта подтверждается значениями затухания, выявленными по анализу эмпирических данных. Как видно из формул (5) и (6), в разломной зоне затухание амплитуд отсутствует, а в ближней протекает по степени меньше 1. Следовательно, и в разломной, и в ближней зонах после возникновения разрыва продолжается выделение сейсмической энергии.

Начиная с границы между ближней и дальней зонами, по эмпирическим данным затухание резко увеличивается. Можно считать, что выделением энергии в дальней зоне можно пренебречь. Эта граница характеризуется уровнем пикового ускорения $PGA \approx 175 \text{ см/с}^2$ на расстоянии $R^* = 0.107$ от поверхности разлома. Эти числовые характеристики границы ближней и дальней зон являются инвариантом, поскольку, как показал анализ, не зависят от магнитуды, расстояния и грунтовых условий. Вариации интенсивности связаны с влиянием продолжительности колебаний. Судя по резкому изменению затухания амплитуд, эта граница соответствует границе очаговой области. Поэтому совокупность разломной и ближней зон можно назвать очаговой зоной и интерпретировать как очаг землетрясения; граница очага землетрясения совпадает с границей ближней и дальней зон.

Выделенная очаговая зона обладает характерными особенностями и по преобладающему периоду, и по продолжительности колебаний. Согласно правилам теории размерностей и подобия, зависимость этих параметров от магнитуды должна быть такой же, как и для расстояний. Однако результаты проведенного исследования противоречат этому положению в очаговой зоне: коэффициент подобия для расстояния составляет $1/3$, для ширины импульса $1/3$, а для преобладающего пери-

ода 1/6. Нарушение условий подобия связано с тем, что выделение сейсмической энергии в пространстве начинается вдоль поверхности разлома, а распространение сейсмической энергии идет только перпендикулярно фронту волны. Обнаружилась независимость периода колебаний и ширины импульса от расстояния. Очевидно, очаговая область, как генератор сейсмических колебаний, колеблется как единое целое. Поэтому относительно малый слой четвертичных отложений мало сказывается на спектре колебаний, излучаемых очагом. Этот факт также соответствует границе очага, совпадающей с границей ближней и дальней зон.

Выводы

С использованием теории размерностей и подобия предложена модель очаговой зоны землетрясения, определены ее размеры.

Вблизи разлома волновое поле распространяющихся сейсмических колебаний по характеристикам распространения и затухания разделяется на 3 зоны (отсчет от поверхности разлома): разломную, ближнюю и дальнюю.

Разломная и ближняя зоны в совокупности образуют очаговую область, которая колеблется как единое целое.

Границей очаговой области является граница между ближней и дальней зонами со средним уровнем ускорения примерно $PGA \approx 175 \text{ см/с}^2$ на расстоянии $R^* = 0.107$ от поверхности разлома, что в среднем соответствует интенсивности 7.5 балла.

Предложены усовершенствованные уравнения затухания для пиковых ускорений, преобладающего периода и продолжительности колебаний.

Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. // Российская акад. наук. Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. – Москва: Наука и образование. 2012. – 175 с.
2. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. / Под ред. Г. А. Мавлянова. – Ташкент: ФАН. 1986. – 368 с.
3. Завьялов А.Д., Зотов О.Д., Гульельми А.В. Новый подход к определению размера очаговой зоны землетрясений. // Тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. (Иркутск, 26 – 30 апреля 2021 г.) – Иркутск: Изд-во ИРУ, 2021. – С. 190–191.
4. Коновалов А.В., Манайчев К.А., Степнов А.А., Гаврилов А.В. Региональная модель затухания сильных движений для о. Сахалин. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2018. – Т. 45. №4. – С. 19–30. DOI: 10.21455/VIS2018.1-2.
5. Ляхов Г.М. Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах. – М.: Недра, 1964. – 216 с.
6. Певнев А.К. Обоснование основных положений деформационной модели подготовки очага корового землетрясения. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – № 1. – С. 104–120. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.34.009.
7. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука, 1976. – С. 9–27.
8. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В. О зависимости энергии землетрясения от объема очага. // Доклады АН СССР. – 1983. – Т. 271. № 3. – С. 598–602.
9. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. / Л.И. Седов. – 10-е изд., доп. – М.: Наука, 1987. – 430 с.
10. Фидарова М.И., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. Связь величины макросейсмической интенсивности с различными показателями инструментальных записей колебаний

грунтовой толщи. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – № 1. – С. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005.

11. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. // Ташкент: ФАН. 1989. – 295 с.

12. Чернов Ю.К., Чернов А.Ю., Читишвили М.И. Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. Часть 2. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – № 3. – С. 161–178. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36753.

13. Aptikaev F., Erteleva O. Features of seismic waves propagation near fault. [Электронный ресурс]. // Proc. XXIV IUGG General Assembly (Perugia, July, 2 – 13, 2007). – Presentation 6374. – USMA. 2007. – ISBN 978-88-95852-25-6.

14. Aptikaev F., Kopnichev Yu. Correlation between seismic vibration parameters and type of faulting. // Proc. VII World Conference on Earthquake Engineering (Istanbul, September 8 – 13, 1980). – Istanbul, Turkey, 1980. – Vol. 1. – pp. 107–110.

15. Bommer J.J., Stafford P.J., Ruigrok E., Rodriguez-Marek A., Ntinalexis M., Kruiver P.P., Edwards B., Dost B., van Elk J. Ground-motion prediction models for induced earthquakes in the Groningen gas field, the Netherlands. // Journal of Seismology – 2022. – Vol. 26. – pp. 1157–1184. DOI:10.1007/s10950-022-10120-w.

16. Boore D.M., Stewart J.P., Skarlatoudis A.A., Seyhan E., Margaris B., Theodoulidis N., Scordilis E., Kalogeras I., Klimis N., Melis N.S. A ground-motion prediction model for shallow crustal earthquakes in Greece. // Bull. Seism. Soc. Am. – 2021. – Vol. V. 111. No. 2. – pp. 857–874. DOI: 10.1785/0120200270.

17. Campbell K.W. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. // Seism. Research Letters. – 1997. – Vol. 68. No. 1. – pp. 154–179. DOI: 10.1785/gssrl.68.1.154.

18. Gao J.-C., Chan C.-H., Lee C.-T. Site-dependent ground-motion prediction equations and uniform hazard response spectra. // Engineering Geology. – 2021. – Vol. 292. No. 106241. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106241.

19. Graizer V., Kalkan E. Summary of the GK15 ground-motion prediction equation for horizontal PGA and 5% damped PSA from shallow crustal continental earthquakes. // Bull. Seism. Soc. Am. – 2016. – Vol. 106. No. 2. – pp. 687–707. DOI: 10.1785/0120150194.

20. Graizer V.M., Kalkan E. Ground Motion Attenuation Model for Peak Horizontal Acceleration from Shallow Crustal Earthquakes. // Earthquake Spectra. – 2007. – Vol. 23. No. 3. – pp. 585–613. – DOI: 10.1193/1.2755949.

21. Jaimes M.A., García-Soto A.D. Updated ground motion prediction model for Mexican intermediate – depth intraslab earthquakes including V/H ratios. // Earthquake Spectra. – 2020. – Vol. 36. No. 3. – pp. 1298–1330. DOI: 10.1177/8755293019899947.

22. Keshri C.K., Mohanty W.K. Next generation ground-motion prediction equations for Indo-Gangetic Plains, India. // J. Earth System Science. – 2023. – Vol. 132. No. 85. – pp. 84–107. DOI:10.1007/s12040-023-02092-3.

23. McGuire R.K., Barnhard T.P. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking: preprint. – 1979. – 17 p.

24. Phung V.-B., Loh C.H., Chao S.H., Chiou B.S.J., Huang B.-S. Ground motion prediction equation for crustal earthquakes in Taiwan. // Earthquake Spectra. – 2020. – Vol. 36. No. 4. – pp. 2129–2164. DOI: 10.1177/8755293020919415.

25. Skarlatoudis A.A., Papazachos C.B., Margaris B.N., Ventouzi C., Kalogeras I. and the EGELADOS Group. Ground-motion prediction equations of intermediate-depth earthquakes in the Hellenic Arc, southern Aegean subduction area. // Bull. Seism. Soc. Am. – 2013. – Vol. 103. No. 3. – pp. 1952–1968. DOI: 10.1785/0120120265.

26. SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations: IAEA Safety Standards Series, STI/PUB/1448. – Vienna. 2010. – 80 p.

27. Stafford P.J. Continuous integration of data into ground-motion models using Bayesian updating. // *Journal of Seismology*. – 2019. – Vol. 23. No. 1. – pp. 39–57. DOI: 10.1007/s10950-018-9792-3.

28. Stirling M., Goded T., Berryman K., Litchfield N. Selection of earthquake scaling relationships for seismic hazard analysis. // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 2013. – Vol. 103. No. 6. – pp. 2993–3011. DOI:10.1785/0120130052.

29. Thingbaijam K.K.S, Martin Mai P, Goda K. New empirical earthquake source-scaling laws. // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 2017. – Vol. 107. No. 5. – pp. 2225-2246. DOI:10.1785/0120170017.

30. Trifunac M.D. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 1976. – Vol. 66. No. 1. – pp. 189–219.

31. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 1994. – Vol. 84. No. 4. – pp. 974–1002.

32. Zuccolo E., Bozzoni F., Lai C. G. Regional low-magnitude GMPE to estimate spectral accelerations for earthquake early warning applications in southern Italy. // *Seism. Research Letters*. – 2017. – Vol. 88. No. 1. – Pp. 61–71. DOI: 10.1785/0220160038.

References

1. Aptikaev F.F. Instrumental seismic intensity scale. Russian Academy of Sciences, Institute of Physics of the Earth named after. O.Yu. Schmidt. Moscow. Science and Education. 2012. 175 p. (In Russ.)

2. Gazli earthquakes of 1976 and 1984 / Ed. G.A. Mavlyanov. Tashkent. FAN. 1986. 368 p. (In Russ.)

3. Zavyalov A.D., Zotov O.D., Guglielmi A.V. A new approach to determining the size of the focal zone of earthquakes. All-Russian conference dedicated to the memory of Prof. S. I. Sherman (Irkutsk, April 26 – 30, 2021). Abstracts. Irkutsk: IRU Publishing House. 2021. pp. 190-191. (In Russ.)

4. Konovalov A.V., Manaychev K.A., Stepnov A.A., Gavrilov A.V. Regional model of strong ground motions attenuation for Sakhalin Island. *Voprosy inzhenernoy seysmologii. Questions of engineering seismology*. 2018. Vol. 45. No. 4. pp. 19–30. DOI: 10.21455/VIS2018.1-2. (In Russ.)

5. Lyakhov G.M. Fundamentals of explosion dynamics in soils and liquid media. Moscow. Nedra. 1964. 216 p. (In Russ.)

6. Pevnev A.K. Substantiation of the main concepts for the deformation model of the crustal earthquake source preparation. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 104–120. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.34.009. (In Russ.)

7. Riznichenko Yu.V. Dimensions of the crustal earthquake source and seismic moment. *Research on the physics of earthquakes*. M.: Nauka, 1976. Pp. 9–27. (In Russ.)

8. Sadovskii M.A., Pisarenko V.F., Steinberg V.V. On the dependence of earthquake energy on the seismic focus volume. *Dokl. Akad. Nauk SSSR (Doklady Akademii Nauk)*. 1983. Vol. 271. No. 3. pp. 598–602. (In Russ.)

9. Sedov L.I. *Methods of similarity and dimension in mechanics*. 10th ed. Moscow. Nauka. 1987. 430 p. (In Russ.)

10. Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Correlation between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of fluctuations in the soil stratum. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13 No. 1. pp. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005. (in Russ.)

11. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantitative assessment of seismic hazard of the territories. Tashkent. FAN. 1989. 295 p. (in Russ.)

12. Chernov Yu.K., Chernov A.Yu., Chitishvili M.I. Models of strong ground motions for probabilistic detailed seismic zoning of the territory of North Ossetia-Alania. Part II. Ge-

ology and Geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 161–178. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36753. (In Russ.)

13. Aptikaev F., Erteleva O. Features of seismic waves propagation near fault. In: Proc. XXIV IUGG General Assembly (Perugia, July, 2 – 13, 2007). Presentation 6374. USMA. 2007. ISBN 978-88-95852-25-6.

14. Aptikaev F., Kopnichev Yu. Correlation between seismic vibration parameters and type of faulting. In: Proc. VII World Conference on Earthquake Engineering (Istanbul, September 8-13, 1980). Istanbul, Turkey, 1980. Vol. 1. pp. 107–110.

15. Bommer J.J., Stafford P.J., Ruigrok E., Rodriguez-Marek A., Ntinalexis M., Kruiver P.P., Edwards B., Dost B., van Elk J. Ground-motion prediction models for induced earthquakes in the Groningen gas field, the Netherlands. *Journal of Seismology* 2022. Vol. 26. pp. 1157–1184. DOI:10.1007/s10950-022-10120-w.

16. Boore D.M., Stewart J.P., Skarlatoudis A.A., Seyhan E., Margaris B., Theodoulidis N., Scordilis E., Kalogeras I., Klimis N., Melis N.S. A ground-motion prediction model for shallow crustal earthquakes in Greece. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2021. Vol. 111. No. 2. pp. 857–874. DOI: 10.1785/0120200270.

17. Campbell K.W. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seism. Research Letters*. 1997. Vol. 68. No. 1. pp. 154–179. DOI: 10.1785/gssrl.68.1.154.

18. Gao J.-C., Chan C.-H., Lee C.-T. Site-dependent ground-motion prediction equations and uniform hazard response spectra. *Engineering Geology*. 2021. Vol. 292. No. 106241. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106241.

19. Graizer V., Kalkan E. Summary of the GK15 ground-motion prediction equation for horizontal PGA and 5% damped PSA from shallow crustal continental earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2016. Vol. 106. No. 2. pp. 687–707. DOI: 10.1785/0120150194.

20. Graizer V.M., Kalkan E. Ground Motion Attenuation Model for Peak Horizontal Acceleration from Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*. 2007. Vol. 23. No. 3. pp. 585–613. DOI: 10.1193/1.2755949.

21. Jaimes M.A., García-Soto A.D. Updated ground motion prediction model for Mexican intermediate – depth intraslab earthquakes including V/H ratios. *Earthquake Spectra*. 2020. Vol. 36. No. 3. pp. 1298–1330. DOI: 10.1177/8755293019899947.

22. Keshri C.K., Mohanty W.K. Next generation ground-motion prediction equations for Indo-Gangetic Plains, India. *J. Earth System Science*. 2023. Vol. 132. No. 85. pp. 84–107. DOI:10.1007/s12040-023-02092-3.

23. McGuire R.K., Barnhard T.P. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking: preprint. 1979. 17 p.

24. Phung V.-B., Loh C.H., Chao S.H., Chiou B.S.J., Huang B.-S. Ground motion prediction equation for crustal earthquakes in Taiwan. *Earthquake Spectra*. 2020. Vol. 36. No. 4. pp. 2129–2164. DOI: 10.1177/8755293020919415.

25. Skarlatoudis A.A., Papazachos C.B., Margaris B.N., Ventouzi C., Kalogeras I. and the EGELADOS Group. Ground-motion prediction equations of intermediate-depth earthquakes in the Hellenic Arc, southern Aegean subduction area. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2013. Vol. 103. No. 3. pp. 1952–1968. DOI: 10.1785/0120120265.

26. SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations: IAEA Safety Standards Series, STI/PUB/1448. Vienna. 2010. 80 p.

27. Stafford P.J. Continuous integration of data into ground-motion models using Bayesian updating. *Journal of Seismology*. 2019. Vol. 23. No. 1. pp. 39–57. DOI: 10.1007/s10950-018-9792-3.

28. Stirling M., Goded T., Berryman K., Litchfield N. Selection of earthquake scaling relationships for seismic hazard analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2013. Vol. 103. No. 6. pp. 2993–3011. DOI:10.1785/0120130052.

29. Thingbaijam K.K.S, Martin Mai P, Goda K. New empirical earthquake source-scaling laws. *Bull. Seism. Soc. Am.* 2017. Vol. 107. No. 5. pp. 2225–2246. DOI:10.1785/0120170017.

30. Trifunac M.D. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1976. Vol. 66. No. 1. pp. 189–219.

31. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1994. Vol. 84. No. 4. pp. 974–1002.

32. Zuccolo E., Bozzoni F., Lai C. G. Regional low-magnitude GMPE to estimate spectral accelerations for earthquake early warning applications in southern Italy. *Seism. Research Letters.* 2017. Vol. 88. No. 1. pp. 61–71. DOI: 10.1785/0220160038.