

УДК 550.34

DOI: 10.46698/16340-1853-5364-b

Оригинальная статья

## Уравнения затухания сейсмической ИНТЕНСИВНОСТИ

Ф.Ф. Аптикаев , О.О. Эртелева 

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

Статья поступила: 31.05.2024, доработана: 22.08.2024, принята к публикации: 23.08.2024

**Резюме: Актуальность работы.** Сейсмическая интенсивность является наиболее точной характеристикой сейсмических воздействий, поскольку она напрямую связана с повреждаемостью строительных объектов. В то же время, повреждаемость объектов определяется параметрами сейсмических воздействий. Поэтому оценка затухания интенсивности весьма важна для проектирования сейсмостойких строительных конструкций. Затухание сейсмической интенсивности с расстоянием оценивается согласно уравнению макросейсмического поля. Недостатками этого метода является: 1) использование гипоцентрального расстояния; 2) описание затухания параметров сейсмических колебаний одним уравнением. По эмпирическим данным в инженерном диапазоне сейсмических воздействий (6 – 9 баллов) выделяются три зоны (разломная, ближняя и дальняя), в каждой из которых параметры сейсмического движения грунта различным образом зависят от магнитуды, механизма очага, расстояния и грунтовых условий. Разработка уравнений затухания интенсивности, лишенных этих недостатков, будет способствовать повышению точности прогнозных оценок ожидаемых сейсмических воздействий. **Цель работы** – исследовать законы затухания сейсмической интенсивности в различных зонах поля колебаний при землетрясениях. **Методы исследования** – статистический анализ эмпирических данных по сильным движениям грунта. **Результаты работы** – предложены уравнения затухания для сейсмической интенсивности в различных зонах волнового поля сейсмических колебаний в зависимости от механизма очага и грунтовых условий. Погрешность оценок интенсивности составляет 0.35 балла для разломной и ближней зон и 0.40 балла для дальней зоны. В разломной зоне интенсивность нарастает, достигая максимума на некотором удалении от разлома, на границе разломной и ближней зон. Затем начинается затухание интенсивности, которое резко усиливается при переходе в дальнюю зону. В очаговой зоне (совокупность разломной и ближней зон) приращение интенсивности происходит вследствие изменения несущей способности грунта.

**Ключевые слова:** сейсмическая интенсивность, пиковое ускорение грунта, продолжительность колебаний, магнитуда землетрясения, механизм очага, расстояние, грунтовые условия.

**Благодарности:** Работа выполнена по госзаданию ИФЗ РАН.

**Для цитирования:** Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Уравнения затухания сейсмической интенсивности. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14 (3): 57-70. DOI: 10.46698/16340-1853-5364-b

DOI: 10.46698/16340-1853-5364-b

Original paper

# Attenuation curves of seismic intensity

F.F. Aptikaev<sup>ID</sup>, O.O. Erteleva<sup>ID</sup>

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

Received: 31.05.2024, revised: 22.08.2024, accepted: 23.08.2024

**Abstract: Relevance.** Seismic intensity is the most accurate characterization of seismic effects, as it is directly related to the damageability of construction objects. At the same time, the damageability of objects is determined by the parameters of seismic impacts. Therefore, the evaluation of intensity attenuation is very important for the design of earthquake-resistant building structures. The attenuation of seismic intensity with distance is estimated according to the macroseismic field equation. The disadvantages of this method are: 1) use of hypocentral distance; 2) description of attenuation of seismic vibration parameters by a single equation. According to empirical data, in the engineering range of seismic impacts (6 – 9 points) three zones (fault, near-field and far-field) are distinguished, in each of which seismic ground motion parameters depend differently on magnitude, focal mechanism, distance and ground conditions. The development of intensity attenuation equations devoid of these disadvantages will improve the accuracy of predictive estimates of expected seismic effects. **The aim** of the paper is to investigate the laws of seismic intensity attenuation in different zones of the vibration field during earthquakes. **Research methods** – statistical analysis of empirical data on strong ground motions. **Results of work** – proposed attenuation equations for seismic intensity in different zones of the wave field of seismic vibrations depending on the source mechanism and ground conditions. The error of intensity estimates is 0.35 for the fault- and near-field zones and 0.40 for the far-field zone. In the fault zone, the intensity increases, reaching a maximum at some distance from the fault, at the boundary of the fault and near-field zone. Then the intensity begins to decay, which sharply intensifies at the transition to the far-field zone. In the source zone (a combination of the fault and near-field zones), the intensity increment occurs due to changes in the bearing capacity of the ground.

**Keywords:** seismic intensity, peak ground acceleration, vibrations duration, earthquake magnitude, focal mechanism, distance, ground conditions.

**Acknowledgments:** *The work was carried out according to the state task of the IPE RAS.*

**For citation:** Aptikaev F.F., Erteleva O.O. Attenuation curves of seismic intensity. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 57-70. DOI: 10.46698/16340-1853-5364-b

## Введение

Сейсмический эффект в любой точке территории, подверженной воздействию землетрясения, оценивается интенсивностью землетрясения. Величина интенсивности зависит, главным образом, от параметров очага – магнитуды события, глубины очага и расстояния до точки наблюдения. Аналитически эта зависимость описывается уравнением макросейсмического поля, учитывающим расхождение волн и их поглощение [von Kövesligethy, 1907; Шебалин, 1957, 1968; Sponheuer, 1960]:

$$I = a_1 M_S - b_1 \lg (H^2 + R^2)^{0,5} - b_2 (H^2 + R^2)^{0,5} + c_1, \quad (1)$$

где  $M_S$  – магнитуда по поверхностным волнам;

$H$ , км – глубина очага;

$R$ , км – эпицентрального расстояние;

$a_1, b_1, b_2, c_1$  – эмпирические коэффициенты.

Оказалось, что влияние поглощения мало по сравнению с влиянием геометрического расхождения. Кроме того, учет поглощения в какой-то мере можно учесть, как и расхождение, степенной функцией. Поэтому формула затухания интенсивности была упрощена без снижения точности оценок [Blake, 1940; Шебалин, 1957, 1968; Sponheuer, 1960]:

$$I = a M_s - b \lg (H^2 + R^2)^{0.5} + c, \quad (2)$$

В работе [Шебалин, 1957] представлено усредненное по миру уравнение макросейсмического поля. Это уравнение широко используется и в настоящее время.

Уравнения для крупных регионов (Дальний Восток, Кавказ, Центральная Европа, Урал, Тянь-Шань, Центральная Азия и др.) и для отдельных землетрясений можно найти в многочисленных работах, например, [Bindi et al., 2011; Джанузаков, 2013; Фролова и др., 2019; Artikov et al., 2020; Ибрагимов и др., 2022].

Накопление эмпирических данных по макросейсмическим эффектам землетрясений позволяет усовершенствовать имеющиеся уравнения макросейсмического поля, повысить их точность и построить модели для малоизученных районов, см., например, [Джанузаков, 2013; Фролова и др., 2019, 2020; Петрова и др., 2020]. В статье [Фролова и др., 2019] указывается, что ошибки оценок интенсивности по таким усовершенствованным моделям снижаются до 0.5 балла.

Некоторые исследователи разрабатывают уравнения макросейсмического поля с коэффициентом затухания, зависящим от глубины очага [Bindi et al., 2011; Artikov et al., 2020]. При этом отмечается улучшение сходимости расчетных и экспериментальных оценок сейсмической интенсивности.

Среди работ, использующих для определения интенсивности количественные параметры колебаний, стоит особо отметить оригинальный подход, развитый А.А. Гусевым с соавторами [Гусев, Шумилина, 1999], – исследование закономерностей макросейсмического поля на основе волновой теории. Ошибка модели заключается в том, что амплитуда и преобладающий период сейсмических колебаний по эмпирическим данным зависят не от всего размера поверхности разрыва, а от его участка, сравнимого с длиной сейсмической волны.

В работе [Соломатин, 2013] отмечены различия в закономерностях спада интенсивности для землетрясений 2 диапазонов магнитуд  $M = 5.75 - 7.4$  и  $M = 7.5 - 8.5$  на примере Курило-Камчатского региона. В результате проведенного анализа автор делает вывод, с которым, безусловно, необходимо согласиться, о том, что экстраполяция данных по слабым землетрясениям в область сильных событий “без учета реальных результатов наблюдений по последним может привести к существенным систематическим ошибкам”. При этом, по данным автора цитируемой работы, в ближней зоне расчетное значение интенсивности может быть занижено примерно на 1 балл.

В нашей стране сейсмическая опасность по традиции задается в баллах. Но пересчет баллов в ускорения сопровождается неприемлемо большими ошибками [Neumann, 1954; Murphy, O'Brien, 1977]. Поэтому делаются попытки связать сейсмическую интенсивность с различными параметрами сейсмического движения грунта [Аптикаев, 2012; Кузин, 2022; Фидарова и др., 2023].

Анализируя имеющиеся в научной литературе публикации по исследованию закономерностей затухания сейсмической интенсивности с расстоянием, следует сделать вывод о том, что общим недостатком существующих на сегодняшний день и уточняемых на основе появления новых эмпирических данных уравнений

макросейсмического поля является, во-первых, использование гипоцентрального расстояния. Между тем, в работе [Campbell, 1981] показано, что наилучшей мерой расстояния при землетрясениях является кратчайшее расстояние до поверхности разрыва. Во-вторых, предполагается, что одним уравнением можно описывать затухание параметров сейсмических колебаний независимо от расстояния.

Многие исследователи отмечают существенные различия в параметрах сейсмического движения грунта в зависимости от расстояния и выделяют две зоны – ближнюю и дальнюю, но границы между зонами оставались не определенными. Использование двух различных функций затухания в различных диапазонах расстояний приведено в работах [Trifunac, 1976; Потапов, Чернов, 2007; Аптикаев, 2012].

Ранее считалось, что механизм очага при заданной магнитуде не может влиять на уровень амплитуды. Но в работе [Аптикаев, Копничев, 1979] было установлено влияние типа подвижки по разлому на амплитуду пикового ускорения при фиксированной магнитуде.

Сейсмические воздействия по традиции задаются в баллах шкалы сейсмической интенсивности. Пересчет баллов в ускорения грунта для объектов массового строительства производится согласно шкале сейсмической интенсивности с учетом продолжительности колебаний. Поэтому оценка затухания интенсивности весьма важна для проектирования сейсмостойких строительных конструкций. В этом заключается **актуальность** изучения затухания сейсмической интенсивности с расстоянием. **Целью** исследования является разработка системы уравнений затухания сейсмической интенсивности для различных зон: разломной, ближней и дальней. **Новизна** работы состоит в том, что разработанные в результате уравнения будут свободны от указанных недостатков, а именно: будет учтена зональность волнового поля сейсмических колебаний, учтены механизм очага и длительность колебаний, а в качестве меры расстояния использовано кратчайшее расстояние до поверхности разлома.

### Использованные данные

В работе, как и в предыдущей статье авторов [Эртелева, Аптикаев, 2023], использованы данные о параметрах сильных движений грунта при сейсмических событиях из разных регионов мира, полученные как из литературных источников, бюллетеней, каталогов, так и на основе цифровых записей сильных движений грунта. Для каждой записи сейсмического события были определены пиковое ускорение и ширина импульса (мера продолжительности колебаний). Интервал магнитуд полученного таким образом набора данных составляет  $2 \leq M_S \leq 8$ , интервал кратчайших расстояний до плоскости разрыва  $0.01 \text{ км} \leq R \leq 100 \text{ км}$ , классификация грунтов по сейсмическим свойствам согласно нормам СП 14.13330.2018.

### Методика обработки данных

Путем статистической обработки имеющегося в распоряжении авторов набора данных были установлены корреляционные соотношения, описывающие закономерности затухания пиковых ускорений и ширины импульса. В каждой из трех зон волнового поля сейсмических колебаний – разломной, ближней и дальней – эти закономерности различны. Подробно процедура обработки и принципы, на которых она основана, представлены в работах [Аптикаев, 2012; Эртелева, Аптикаев, 2023].

Вкратце напомним полученные ранее авторами результаты, использованные в данном исследовании [Аптикаев, 2012; Эртелева, Аптикаев, 2023]. Анализ разра-

ботанных кривых затухания пиковых ускорений позволил сделать вывод о том, что в волновом поле сейсмических колебаний выделяются 3 зоны с различными законами спада амплитуд колебаний. В первой из них амплитуды колебаний возрастают. При этом уровень колебаний зависит от типа механизма очага. Эта зона непосредственно примыкает к разлому землетрясения. Ее предложено называть разломной. Во второй зоне спадание амплитуд колебаний по степени меньше 1. Значит, с учетом геометрического расхождения фронта волны, сейсмические волны пополняются энергией. Закон затухания здесь не зависит от типа грунта и механизма очага. Эту зону предложено называть ближней. В третьей зоне затухание резко усиливается; здесь не происходит выделение энергии. Третью зону – зону с повышенным затуханием, называют дальней.

Заметим, что первоначально, например, в СП 286.1325800.2016, зона, примыкающая к разлому, была названа очаговой, соответственно бытующему определению очага землетрясения. Однако, по эмпирическим данным, оказалось [Эртелева, Аптикаев, 2023], что сейсмическая энергия выделяется и в ближней зоне. Таким образом, в отличие от СП 286.1325800.2016, очаговой зоне соответствует совокупность разломной и ближней зон.

Анализом эмпирических данных при создании инструментальной шкалы сейсмической интенсивности, см., например, [Аптикаев, 2012], было установлено, что интенсивность сейсмических колебаний зависит не только от значения пикового ускорения, но и от ширины импульса  $\tau$  (меры продолжительности колебаний). Ширина импульса определяется, как интервал времени, в течение которого уровень огибающей колебаний превышает половину максимального значения. В результате получено эмпирическое уравнение:

$$I = 2.5 \lg PGA + 1.25 \lg \tau + 1.05 \pm 0.35, \quad (3)$$

где  $I$  – сейсмическая интенсивность в баллах,  
 $PGA$  – пиковое ускорение грунта в  $\text{см}/\text{с}^2$ ,  
 $\tau$  – ширина импульса в секундах.

Учитывая особенности затухания пикового ускорения и ширины импульса в различных зонах волнового поля, а также зависимость сейсмического эффекта от параметров колебаний, см. формулу (3), можно составить эмпирические уравнения для оценки интенсивности землетрясения в каждой из зон.

### Интенсивность в разломной зоне

Используются результаты, полученные ранее в [Эртелева, Аптикаев, 2023] и уточненные в настоящей работе. Ускорения в разломной зоне, согласно проведенным ранее исследованиям, вычисляются по формуле:

$$\lg PGA = \lg PGA_0 + 0.4 \lg R^* + 1.2 \pm 0.20, \quad (4)$$

где  $PGA_0$  – ускорение на поверхности разлома, определенное при статистическом анализе данных по сильным движениям грунта (см. Табл. 1);

$R^*$  – нормированное (подобное) расстояние, которое вычисляется по формуле:

$$\lg R^* = \lg R - M / 3, \quad (5)$$

где  $R$  – кратчайшее расстояние до поверхности разлома,  
 $M$  – магнитуда по поверхностным волнам.

При использовании подобных расстояний ускорения уже не зависят от магнитуды. Как и ранее, здесь и далее все приведенные оценки относятся к наибольшей амплитуде на горизонтальной компоненте.

Напомним, что амплитуды ускорений в разломной зоне зависят от механизма очага и не зависят от грунтовых условий: многие авторы отмечают, что вблизи разлома амплитуды на рыхлых грунтах не выше, чем на скальных [Trifunac, 1976; Campbell, 1981; Chiaruttini, Siro, 1981; Аптикаев, 2012]. Резонансные явления, связанные с грунтами, в этой зоне практически отсутствуют [Lee et al., 2015].

Затухания в разломной и ближней зонах существенно различаются. Поэтому граница между этими зонами легко устанавливается на основании точек пересечения уравнений затухания для соседних зон.

Разломной зоне соответствуют расстояния от начальной точки  $R_0^* = 0.001$  до границы с ближней зоной  $R_1^* = 0.015$ .

Значения ускорений 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 <sup>2</sup> / $PGA_0$ , cm/sec <sup>2</sup>	$\lg R_1^*$	$PGA_{\max}$ , см/с <sup>2</sup> / $PGA_{\max}$ , cm/sec <sup>2</sup>
Взброс / Thrust	- 3	290	- 1.814	870
Сдвиг / Strike-slip	- 3	225	- 1.731	735
Сброс /Reset	- 3	170	- 1.634	620

Ширина импульса  $\tau$  в разломной зоне зависит только от магнитуды события и не зависит от грунтовых условий и расстояния. [Эртелева, Аптикаев, 2023]. Ниже приводятся данные о параметрах сейсмического движения грунта, взятые из этой работы. Учтены теоретические представления, согласно которым незначительно меняются коэффициенты при магнитуде:

$$\lg(\tau, c) = M / 3 - 1.61 \pm 0.29. \quad (6)$$

Используя формулы (4) и (6), а также значения  $PGA_0$  из таблицы 1, из формулы (3) получаем:

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.9 + \Delta I \pm 0.35 \text{ для взбросов,} \quad (7)$$

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.6 + \Delta I \pm 0.35 \text{ для сдвигов,} \quad (8)$$

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.3 + \Delta I \pm 0.35 \text{ для сбросов.} \quad (9)$$

где  $I$  – сейсмическая интенсивность,  
 $M$  – магнитуда землетрясения,  
 $R^*$  – нормированное кратчайшее расстояние до поверхности разлома,  
 $\Delta I$  – приращение сейсмической интенсивности относится только к несущей способности грунта.

**Интенсивность в ближней зоне**

Под ближней зоной в соответствии с работой [Эртелева, Аптикаев, 2023] понимается зона, где потенциальная энергия деформированных горных пород переходит

в энергию сейсмических колебаний. Параметры колебаний в этой зоне зависят ни от характеристик очага, ни от грунтовых условий. Резонансные явления, связанные с грунтами, практически отсутствуют. Ускорения описываются уравнением:

$$\lg \text{PGA} = 1.8 - 0.63 \lg R^* \pm 0.20. \quad (10)$$

Ширина импульса  $\tau$  в ближней зоне, как и в разломной, определяется магнитудой события, не зависит от грунтовых условий и расстояния [Эртелева, Аптикаев, 2023]: для вычисления продолжительности колебаний используется формула (6).

Тогда, аналогично предыдущему, используя формулы (10), (6) и (3) получаем, что интенсивность в ближней зоне описывается формулой:

$$I = 0.417M - 1.575 \lg R^* + 3.54 + \Delta I \pm 0.35. \quad (11)$$

Напомним, что, как и в предыдущем случае, приращение сейсмической интенсивности  $\Delta I$  относится только к несущей способности грунта.

Затухания в ближней и дальней зонах также существенно различаются. Граница между ними устанавливается по пересечению кривых затухания. Она располагается на расстоянии  $R_2^* = 0.17$  от разлома. По степени затухания в этих зонах можно сделать вывод, что в ближней зоне еще выделяется сейсмическая энергия, а в дальней зоне происходит поглощение этой энергии.

#### Интенсивность в дальней зоне

Ускорения грунта в дальней зоне описываются уравнением:

$$\lg \text{PGA} = 1.165 - 1.4 \lg R^* + C \pm 0.20, \quad (12)$$

где  $C = 0.0$  для грунтов 1-й категории;

$C = 0.196$  для грунтов 2-й категории;

$C = 0.392$  для грунтов 3-й категории.

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

$$\lg(\tau, c) = M/3 - 1.977 + 0.5 \lg R^* + C_2 \pm 0.30, \quad (13)$$

где  $C_2$  – постоянная, отражающая влияние грунтовых условий:

$C_2 = 0.00$  для грунтов 1 категории,

$C_2 = 0.15 - 2$  категории и  $C_2 = 0.55$  для 3 и 4 категорий.

Используя формулы (12) и (13), из формулы (3), получаем соотношения, описывающие затухание сейсмической интенсивности в дальней зоне для грунтов разных категорий по сейсмическим свойствам. Для этого примем во внимание, что по анализу эмпирических данных диапазон приведенных расстояний для грунтов 1-ой категории в дальней зоне определяется соотношением:

$$\lg R = -1.77 + M/3. \quad (14)$$

Последнее выражение определяет границу очага. Переход от ближней зоны к дальней происходит плавно, но для простоты выкладок были формально увеличены границы ближней зоны. Ошибки оценки баллов, вызванные этим упрощением, пренебрежимо малы.

Соотношение для оценки интенсивности в дальней зоне имеет вид:

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 2.0 \pm 0.40, \text{ грунты 1-й категории,} \quad (15)$$

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 2.6 \pm 0.40, \text{ грунты 2-й категории,} \quad (16)$$

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 3.4 \pm 0.40, \text{ грунты 3-й и 4-й категорий.} \quad (17)$$

Для грунтов 2 категории диапазон приведенных расстояний в дальней зоне определяется соотношением:

$$\lg R^* \geq -0.398. \quad (18)$$

Для грунтов 3 и 4 категорий диапазон приведенных расстояний в дальней зоне определяется соотношением:

$$\lg R^* \geq -0.046. \quad (19)$$

Соединяя воедино полученные результаты, в графическом виде затухание сейсмической интенсивности в инженерном диапазоне показано на рисунке 1 (для случая  $M_S = 7.0$ ).

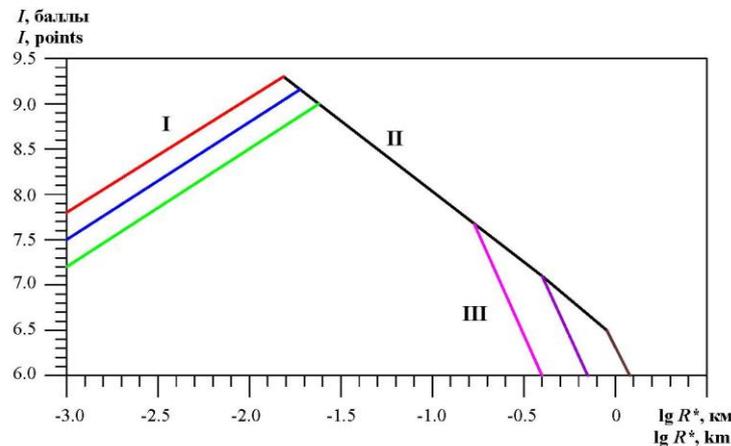


Рис. 1. Затухание сейсмической интенсивности при магнитуде  $M_S = 7.0$ .

Условные обозначения: I – разломная зона, II – ближняя зона, III – дальняя зона.

В разломной зоне: красным цветом изображена кривая затухания интенсивности для взбросов, синим – для сдвигов, зеленым – для сбросов. В дальней зоне розовым цветом изображена кривая затухания интенсивности для грунтов 1-ой категории, фиолетовым цветом – для грунтов 2-ой категории, коричневым – для грунтов 3-ей и 4-ой категорий /

Fig. 1 – Seismic intensity attenuation for earthquake of magnitude  $M_S = 7.0$ .

Legend: I – fault zone; II – near-field zone, III – far-field zone. In the fault zone a red line is the attenuation curve for thrust, blue line – for strike-slip, green line – for normal fault.

In the far-field zone a pink line indicates the attenuation curve for the grounds of 1 category (rock), a violet line – for the grounds of 2 category (intermediate grounds), a brown line – for the grounds of 3 and 4 categories (soft grounds)

## Обсуждение результатов

Полученные в данном исследовании расчетные формулы (7)–(9), (11), (14)–(16) основаны на установленной ранее связи величины интенсивности с пиковым ускорением грунта и шириной импульса (мера продолжительности колебаний) в ускорениях, а также на корреляционных соотношениях, описывающих законы затухания этих количественных характеристик сейсмических колебаний в зонах, выделенных по анализу эмпирических данных в волновом поле сейсмических колебаний.

Заметим, что и другие характеристики сейсмических колебаний – амплитуды скоростей и смещений, соответствующие преобладающие периоды и спектральный

состав, также коррелируются с сейсмической интенсивностью. Поиск таких зависимостей проводился еще в 20 веке. Например, в работе [Плетнев и др., 1975] значение сейсмической интенсивности коррелировалось с пиковым ускорением, длительностью и преобладающим периодом колебаний. В экспериментальных работах Николаева А.В. [Николаев, 1967] было показано, что приращение интенсивности более тесно связано не с амплитудами колебаний, а с прочностными свойствами грунтов. Этот факт находит свое подтверждение и в данном исследовании.

Принципиальное отличие предложенного и реализованного в настоящей работе подхода состоит в учете зональности волнового поля сейсмических колебаний. Параметры сейсмических колебаний в каждой из зон подчиняются своим закономерностям генерации и распространения. Как установлено в данном исследовании, схожие закономерности свойственны и макросейсмическому полю. Так, см. рис. 1, максимальное значение интенсивности наблюдается не на разломе, а на некотором расстоянии от него, как и в случае с пиковым ускорением. Заметим, что в представленной работе не рассматривалась сейсмическая интенсивность, связанная с остаточными деформациями на самом разломе.

В полученных уравнениях учтено влияние грунтовых условий на сейсмическую интенсивность – член  $\Delta I$  – приращение сейсмической интенсивности, определяемое по результатам СМР. Традиционно считается, что под влиянием грунтовых условий меняются амплитуды колебаний, увеличивая или уменьшая сейсмический эффект. В данной работе показано, что в очаговой зоне приращение сейсмической интенсивности относится не к параметрам сейсмических колебаний, а к несущей способности грунтов: (трещины, просадки, разжижение, вибропогружение зданий в грунт). Снижение прочности на срез в несколько раз (в горизонтальной плоскости) происходит при вертикальных колебаниях свыше 0.1 g [Окамото, 1961; Ross et al., 1975]. Учет этого приращения – задача механики грунтов.

В дальней зоне ускорения малы, и грунты редко заметно теряют свою несущую способность. В этой зоне, как показали эмпирические данные, половина приращения интенсивности связана с увеличением амплитуды ускорений, а вторая половина – с увеличением продолжительности колебаний.

Вопрос о том, насколько существенны региональные различия для предложенной системы уравнений интенсивности, тесно связан с вопросом о существовании региональных различий законов затухания ускорений и других параметров колебаний. Разработанные авторами кривые затухания ускорений были применены в различных регионах мира – России, Ирана, Индии, Китая. Во всех случаях различия в оценках ускорений находятся в пределах стандартных отклонений. Следовательно, можно сделать вывод, что установленные закономерности затухания ускорений не связаны с региональными различиями. Такой же вывод можно найти и в работе [Vommer et al., 2010]. Полученные различными авторами региональные различия в уравнениях затухания – результат попыток построить одну кривую для всех зон. Очевидно, что в таком случае эмпирические коэффициенты уравнений определяются количеством данных в различных зонах. Аналогично решается вопрос о региональных различиях и для других параметров колебаний и, следовательно, сейсмической интенсивности.

Если погрешность оценок интенсивности для классических уравнений макросейсмического поля составляет 0.6 балла, то разработка уравнений для отдельных регионов позволила понизить погрешность примерно до 0.5 балла, см., например,

[Соломатин, 2013; Фролова и др., 2019 и др.]. В соответствии с формулами, полученными в данном исследовании, погрешность оценок интенсивности составляет 0.35 балла для разломной и ближней зон и 0.40 балла для дальней зоны. Увеличение погрешности для дальней зоны связано с большим разнообразием исходных данных в этой зоне. Повышение точности оценок сейсмической интенсивности по сравнению с семейством классических уравнений макросейсмического поля достигается как за счет учета влияния продолжительности колебаний (такие попытки известны), так и за счет отдельной оценки этих параметров в различных зонах.

В данной работе был рассмотрен достаточно представительный материал, позволяющий учесть влияние амплитуды ускорения и продолжительности колебаний. Возможно построение и других эмпирических уравнений, например, связывающих сейсмическую интенсивность с мощностью сейсмических колебаний в виде:

$$I = f(\lg \text{PGA} + \lg \text{PGV}). \quad (20)$$

Ожидаемая среднеквадратичная погрешность около 0.3 балла. Еще большую точность можно ожидать от учета энергии сейсмических колебаний вида:

$$I = f(\lg \text{PGA} + \lg \text{PGV} + \lg \tau). \quad (21)$$

Примеры практического применения системы полученных уравнений и сравнение результатов с макросейсмическими данными конкретных сейсмических событий не приводятся в данной работе, так как подобное сравнение (исследоваться должны все 7 уравнений!) потребовало бы значительного увеличения объема статьи и является темой для отдельной публикации.

## Выводы

Применяя статистические методы обработки эмпирических данных и учитывая связь сейсмической интенсивности с величиной пикового ускорения грунта и ширины импульса – меры продолжительности колебаний, разработаны уравнения затухания сейсмической интенсивности в различных зонах: разломной, ближней и дальней с учетом механизма очага и грунтовых условий.

Разломная зона.

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.9 + \Delta I \pm 0.35, \text{ механизм очага взброс,}$$

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.6 + \Delta I \pm 0.35, \text{ механизм очага сдвиг,}$$

$$I = 0.417M + \lg R^* + 7.3 + \Delta I \pm 0.35, \text{ механизм очага сброс.}$$

Ближняя зона.

$$I = 0.417M - 1.575 \lg R^* + 3.54 + \Delta I \pm 0.3.$$

Дальняя зона.

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 2.0 \pm 0.40, \text{ грунты 1-й категории,}$$

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 2.6 \pm 0.40, \text{ грунты 2-й категории,}$$

$$I = 0.417M - 2.875 \lg R^* + 3.4 \pm 0.40, \text{ грунты 3-й и 4-й категорий,}$$

где  $I$  – сейсмическая интенсивность,

$M$  – магнитуда землетрясения,

$\Delta I$  – приращение сейсмической интенсивности.

$R^*$  – нормированное кратчайшее расстояние до поверхности разлома, определяемое по формуле:  $\lg R^* = \lg R - M/3$ , где  $R$  – кратчайшее расстояние до поверхности разлома.

При примененной методике отдельных оценок интенсивности, величина погрешности уменьшилась до 0.35 балла для разломной и ближней зон и 0.40 балла для дальней зоны.

Разработанные уравнения затухания интенсивности являются среднемировыми. При этом описываемые ими закономерности не подвержены региональным различиям.

Структура макросейсмического поля сложнее, чем это принято считать в классической сейсмологии. В разломной зоне происходит не спад, а нарастание интенсивности. Максимум интенсивности должен наблюдаться на некотором удалении от разлома, на границе разломной и ближней зон. Затем начинается затухание интенсивности, связанное с геометрическим расхождением волнового фронта. В дальней зоне затухание сейсмической интенсивности резко возрастает.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что, поскольку в очаговой зоне параметры сейсмического движения грунта практически не зависят от грунтовых условий, приращение сейсмической интенсивности происходит вследствие изменения несущей способности грунта. Следовательно, в практике сейсмостойкого строительства необходима их техническая мелиорация.

Разработанные уравнения затухания сейсмической интенсивности могут быть применены в теоретических исследованиях для развития методов прогноза землетрясений и прогноза сейсмических воздействий. Использование этих уравнений будет способствовать повышению точности прогнозных оценок ожидаемых сейсмических воздействий.

## Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука и образование, 2012. – 175 с.
2. Аптикаев Ф.Ф., Копничев Ю.Ф. Учет механизма очага при прогнозе параметров сильных движений. // Доклады академии наук СССР. – 1979. – Т. 247. № 4. – С. 822–825.
3. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Моделирование связи балл – магнитуда – расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге. // Вулканология и сейсмология. – 1999. – №№ 4-5. – С. 29–40.
4. Джанузаков К.Дж. Региональные особенности затухания интенсивности сотрясений сильных землетрясений Кыргызстана и прилегающих к нему районов. // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – 2013. – № 2. – С. 13 – 18.
5. Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А., Ашуров С.Х. О различиях в оценках сейсмической опасности территории Узбекистана при применении вероятностно-детерминистического и вероятностного подходов. // Проблемы сейсмологии. – 2022. – Т. 4. № 2. – С. 5–18.
6. Кузин И.П. Соотношения между макросейсмической интенсивностью в баллах и параметрами сейсмического воздействия при сильных землетрясениях. // Физика Земли. – 2002. – № 4. – С. 99–106.
7. Николаев А.В. Сейсмические свойства рыхлой среды. // Физика Земли. – 1967. – № 2. – С. 23–31.
8. Окамото Ш. Несущая способность песчаного грунта и горизонтальное давление земли во время землетрясения. // Международная конференция по сейсмостойкому строительству в Сан-Франциско. 1956. Сборник статей. / Пер. с англ. В.А. Быховского. М.: Госстройиздат, 1961. – 367 с.
9. Плетнев К.Г., Роман А.А., Шебалин Н.В. Корреляция между параметрами колебаний и балльностью по данным повторных толчков Дагестанского землетрясения 1970 г. // Бюллетень инженерной сейсмологии. – 1975. – № 9. – С. 5–14.

10. Петрова Н.В., Дягилев Р.А., Габсатарова И.П. Особенности затухания сейсмического эффекта землетрясений Русской платформы и Урала. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2020. – Т. 47. № 4. – С. 5–25.
11. Потапов В.А., Чернов Е.А. Уравнение макросейсмического поля с конвергентным решением. // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. № 8. – С. 881–888.
12. Соломатин А.В. Построение уточненной модели уравнения макросейсмического поля для землетрясений Курило-Камчатского региона. Интерполяционный и регрессионный подходы. // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2013. – Т. 6. № 1. – С. 30–42.
13. 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. – Т. 13. № 1. – С. 59–75.
14. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Петрова Н.В., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Влияние особенностей затухания сейсмической интенсивности на надежность оперативных оценок потерь от землетрясений. // Геоэкология. – 2019. – № 5. – С. 23–37.
15. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Калибровка модели затухания сейсмической интенсивности на примере землетрясений в Албании. // Геоэкология. – 2020. – № 5. – С. 62–77.
16. Шебалин Н.В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании. // Сейсмическое районирование СССР. / Под ред. С.В. Медведева. М.: Наука, 1968. – Глава шестая. – С. 95–111.
17. Шебалин Н.В. Соотношение между балльностью и интенсивностью землетрясений в зависимости от глубины очага. // Бюллетень Совета по сейсмологии. – 1957. – № 4.
18. Эртелева О.О., Аптикаев Ф.Ф. Модель очаговой зоны землетрясения и прогноз параметров сильных движений грунта. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 71–84.
19. Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Models of the macroseismic field earthquakes and their influence on seismic hazard assessment values for Central Asia. // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2020. – Vol. 11. No. 3. – pp. 606–623.
20. Bindi D., Parolai S., Oth A., Abdrakhmatov K., Muraliev A., Zschau J. Intensity Prediction Equations for Central Asia. // *Geophysical Journal International*. – 2011. – Vol. 187. No. 1. – pp. 327–337.
21. Blake A. Mathematical problems in seismology. // *Transactions of the American Geophysical Union*. – 1940.
22. Bommer J.J., Stafford P.J., Akkar S. Current empirical ground-motion prediction equations for Europe and their application to Eurocode 8. // *Bulletin Earthquake Engineering*. – 2010. – Vol. 8. No. 1. – pp. 5–26.
23. Campbell K.W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1981. – Vol. 71. No. 6. pp. 2039–2070.
24. Chiaruttini C., Siro L. The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance, and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy, and the Alpide belt. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1981. – Vol. 71. No. 6. – pp. 1993–2009.
25. Lee V.W., Manić M., Bulajić B., Herak D., Herak M., Stojković M., Trifunac M.D. Microzonation of Banja Luka for performance – based earthquake – resistant design. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – Vol. 78. – pp. 71–88.
26. Murphy J., O'Brien L. The correlation of peak acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1977. – Vol. 67. No. 3. – pp. 877–915.
27. Neumann R. Earthquake intensity and related ground motion. Seattle: University of Washington Press, 1954. – 77 p.
28. Ross G.A., Seed H.B., Migliaccio R.R. Bridge foundation behavior in Alaska Earthquake. // *J. of the Soil Mech. and Found. Div. Proc ASCE (JSMF)*. – 1975. 9B. № SM4, July.

29. Sponheuer W. Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. // Freiburger Forschungshefte. C88. Berlin: Akademie Verlag, 1960. – 117 p.

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. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1976. – Vol. 66. No. 1. – pp. 189–219.

31. von Kövesligethy R. Seismischer Starkgrad und Intensität der Beben. // Beiträge zur Geophys. – 1907. – Vol. VIII. – pp. 22–29.

## References

1. Aptikaev F.F. Instrumental seismic intensity scale. Moscow. Science and Education. 2012. 175 p. (In Russ.)

2. Aptikaev F.F., Kopnichev Yu.F. Taking account of the mechanism of earthquake focus when predicting the parameters of strong movements. Doklady Earth Sciences USSR. 1979. Vol. 247. No. 4. pp. 822 – 825. (In Russ.)

3. Gusev A.A., Shumilina L.S. Fitting empirical macroseismic trends by theoretical relationships based on non-coherently radiating fault model. Vulcanology and Seismology. 1999. Nos. 4-5. pp. 29-40. (In Russ.)

4. Januzakov K.J. Regional features of an attenuation of strong earthquakes intensity in the Kyrgyzstan and its adjacent regions. Bulletin of the Institute of Seismology of NAS KR. 2013. No. 2. pp. 13–18. (In Russ.)

5. Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzayev M.A., Ashurov S.X. About the differences in seismic hazard assessments of the Uzbekistan's territory in the application of probabilistic deterministic and probabilistic approaches. Problems of seismology. 2022. Vol. 4. No. 2. pp. 5–18. (In Russ.)

6. Kuzin I.P. Relationships between macroseismic intensity in points and parameters of seismic impact during strong earthquakes. Physics of the Solid Earth. 2002. No. 4. pp. 99–106. (In Russ.)

7. Nikolaev A.V. Seismic properties of loose medium. Physics of the Solid Earth. 1967. No. 2. pp. 23–31. (In Russ.)

8. Okamoto Sh. Bearing capacity of sandy ground and horizontal earth pressure during an earthquake. In: International Conference on Earthquake Engineering, San-Francisco 1956. Transl. V.A. Bykhovsky. Moscow. Gosstroyizdat. 1961. 367 p. (In Russ.)

9. Pletnev K.G., Roman A.A., Shebalin N.V. Correlation between vibration parameters and intensity according to aftershock data of the 1970 Dagestan earthquake. Bulletin of Engineering Seismology. 1975. No. 9. pp. 5–14. (In Russ.)

10. Petrova N.V., Dyagilev R.A., Gabsatarova I.P. Features of seismic effect attenuation of the Russian platform and Ural earthquakes. Problems of Engineering Seismology. 2020. Vol. 47. No. 4. pp. 5–25. (In Russ.)

11. Potapov V.A., Chernov E.A. A macroseismic equation with a convergent solution. Geology and Geophysics. 2007. Vol. 48. No. 8. pp. 881–888. (In Russ.)

12. Solomatin A.V. The refined model of the macroseismic field for the Kurile – Kamchatka region earthquakes equation definition. Interpolation and regression approaches. Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences. 2013. Vol. 6. No. 1. pp. 30–42. (In Russ.)

13. Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Correlation between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of vibrations in the soil stratum. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 59–75. (In Russ.)

14. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Petrova N.V., Ugarov A.N., Malaeva N.S. Influence of shaking intensity attenuation peculiarities on reliability of earthquake loss estimation in emergency mode. Geoecology. 2019. No. 5. pp. 23–37. (In Russ.)

15. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Ugarov A.N., Malaeva N.S. Calibration of seismic intensity attenuation model by the example of earthquakes in Albania. Geoecology. 2020. No. 5. pp. 62–77. (In Russ.)

16. Shebalin N.V. Procedures of engineering seismological data application for seismic zoning. Seismic zoning of the USSR. Ed. S.V. Medvedev. Moscow. Nauka. 1968. Chapter 6<sup>th</sup>. pp. 95–111. (In Russ.)
17. Shebalin N.V. The relationship between the magnitude and intensity of earthquakes depending on the depth of the source. Bulletin of the Seismology Council. 1957. No. 4. (In Russ.)
18. Erteleva O.O., Aptikaev F.F. Earthquake source zone model and prediction of strong ground motion parameters. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 71–84. (In Russ.)
19. Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Models of the macroseismic field earthquakes and their influence on seismic hazard assessment values for Central Asia. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020. Vol. 11. No. 3. pp. 606–623.
20. Bindi D., Parolai S., Oth A., Abdrakhmatov K., Muraliev A., Zschau J. Intensity Prediction Equations for Central Asia. *Geophysical Journal International*. 2011. Vol. 187. No. 1. pp. 327–337.
21. Blake A. Mathematical problems in seismology. Transactions of the American Geophysical Union. 1940.
22. Bommer J.J., Stafford P.J., Akkar S. Current empirical ground-motion prediction equations for Europe and their application to Eurocode 8. *Bulletin Earthquake Engineering*. 2010. Vol. 8. No. 1. pp. 5–26.
23. Campbell K.W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1981. Vol. 71. No. 6. pp. 2039–2070.
24. Chiaruttini C., Siro L. The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance, and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy, and the Alpide belt. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1981. Vol. 71. No. 6. pp. 1993–2009.
25. Lee V.W., Manić M., Bulajić B., Herak D., Herak M., Stojković M., Trifunac M.D. Microzonation of Banja Luka for performance – based earthquake – resistant design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 78. pp. 71–88.
26. Murphy J., O'Brien L. The correlation of peak acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1977. Vol. 67. No. 3. pp. 877–915.
27. Neumann R. Earthquake intensity and related ground motion. Seattle: University of Washington Press. 1954. 77 p.
28. Ross G.A., Seed H.B., Migliaccio R.R. Bridge foundation behavior in Alaska Earthquake. *J. of the Soil Mech. and Found. Div. Proc ASCE (JSMF)*. 1975. 9B. № SM4, July.
29. Sponheuer W. Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. *Freiberger Forschungshefte*. C88. Berlin: Akademie Verlag. 1960. 117 p.
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. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1976. Vol. 66. No. 1. pp. 189–219.
31. von Kövesligethy R. Seismischer Starkgrad und Intensität der Beben. *Beiträge zur Geophys.* 1907. Vol. VIII. pp. 22–29.