

УДК 550.3

DOI: [10.46698/VNC.2022.74.23.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.74.23.007)

Оригинальная статья

Взаимосвязь величины макросейсмической интенсивности с показателями инструментальных записей Гюбанского землетрясения 2000 г. и Тбилисских землетрясений 2002 г.

В. Б. Заалишвили , **Д. А. Мельков** , **М. И. Фидарова** 

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru

Статья поступила: 06.02.2022, доработана: 04.03.2022, одобрена в печать: 11.03.2022

Резюме: Актуальность работы. Сейсмическое воздействие традиционно оценивают на основе данных инженерного макросейсмического обследования последствий сильных и разрушительных землетрясений. Являясь объективной характеристикой выделенной сейсмической энергии величина макросейсмической интенсивности должна иметь связь с инструментальными параметрами сейсмических колебаний. Для оценки воздействий в ближней зоне землетрясений требуются инструментальные записи. И, хотя в мире в силу развития сетей сильных движений накоплено много записей, на Кавказе имеются только отдельные записи сильных движений, тем более подкрепленные результатами детального макросейсмического обследования. В этой связи записи землетрясений, полученные в 2000, 2002 гг. на территории г. Тбилиси являются уникальными. **Целью** работы является установление энергетических показателей сейсмического воздействия на основе инструментальных записей землетрясений различной интенсивности и энергоемкости различных видов конструкций, проявляющихся в итоговом макросейсмическом проявлении. **Методы работы.** Параметры записей рассчитывались по общепринятым методикам, предложенным различными авторами: интенсивность Ариаса, кумулятивная абсолютная скорость, интенсивность Анга, интенсивность Хаузнера, мера Fajfar, мера полной энергии, площадь реального спектра, а также средневзвешенные частота, период колебаний и продолжительность. Сопоставление результатов выполнялось методами регрессионного анализа. **Результаты работы.** В результате установлено наилучшее соответствие реального проявления землетрясений параметрам, описывающим энергетические характеристики сигнала. При этом рассмотрены различные частотные диапазоны. Все используемые оценки инструментальной интенсивности основаны на горизонтальной компоненте, однако в ближней зоне, как показал анализ записей Тбилисских землетрясений, велико проявление вертикальной составляющей. Вероятно, разрабатываемая мера инструментальной интенсивности должна содержать комбинацию обоих компонент.

Ключевые слова: Гюбанское землетрясение, макросейсмическая интенсивность, интенсивность Анга, интенсивность Хаузнера, мера Fajfar, площадь реального спектра.

Для цитирования: Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Фидарова М. И. Взаимосвязь величины макросейсмической интенсивности с показателями инструментальных записей Гюбанского землетрясения 2000 г. и Тбилисских землетрясений 2002 г. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (1): 89–108. DOI: [10.46698/VNC.2022.74.23.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.74.23.007).

[DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.74.23.007)

Original paper

Correlation between the value of macroseismic intensity and the indicators of instrumental records of the Gouban earthquake of 2000 and the Tbilisi earthquake of 2002

V. B. Zaalishvili , **D. A. Melkov** , **M. I. Fidarova** 

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: vzaal@mail.ru

Received: 06.02.2022, revised: 04.03.2022, accepted: 11.03.2022

Abstract: Relevance. Seismic effect is traditionally assessed based on the data from an engineering macroseismic survey of the consequences of strong and destructive earthquakes. Being an objective characteristic of the released seismic energy, the value of macroseismic intensity should be related to the instrumental parameters of seismic vibrations. Instrumental records are necessary for the assessment of effect in the near zone of earthquakes. Although many records in the world have been accumulated due to the development of strong motion networks, there are only separate records of strong movements in the Caucasus, which are confirmed by the results of a detailed macroseismic survey. In this regard, the records of earthquakes obtained in 2000 and 2002 on the territory of Tbilisi are unique. **Aim.** The aim of the paper is to determine the energy indicators of seismic impact based on the instrumental records of earthquakes of various intensity and power capacity of different types of structures manifested in the final macroseismic effect. **Methods.** Parameters of records were calculated according to generally accepted methods proposed by various authors: Arias intensity, cumulative absolute velocity, Ang intensity, Housner intensity, Fajfar measure, total energy measure, real spectrum area, as well as weighted average frequency, vibration period and duration. Comparison of the results was carried out by the methods of regression analysis. **Results.** As a result, the best correspondence between the real earthquake effects and the parameters describing the energy characteristics of the signal was established. In this case, various frequency ranges are considered. All of the used assessments of instrumental intensity are based on the horizontal component, however, as the analysis of the records of the Tbilisi earthquakes showed, the manifestation of the vertical component is large in the near zone. Probably, the developed measure of instrumental intensity should contain a combination of both components.

Keywords: Gouban earthquake, macroseismic intensity, Ang intensity, Housner intensity, Fajfar measure, area of the real spectrum.

For citation: Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Fidarova M. I. Correlation between the value of macroseismic intensity and the indicators of instrumental records of the Gouban earthquake of 2000 and the Tbilisi earthquake of 2002. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (1): 89–108. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007.

Введение

При расчетах зданий и сооружений на сейсмические воздействия в качестве показателя сейсмического воздействия используется величина ускорения. Исследования инструментальных записей последних лет показывают, что часто разрушительный потенциал сейсмического воздействия не зависит от значений пиковых ускорений грунта. Разрушительный потенциал ускорений не особенно надежен на

самых различных уровнях воздействий. При ускорениях 0,4g (Япония) наблюдались весьма незначительные повреждения и даже при ускорениях 1,8g (Нортридж, США) повреждения были неадекватно малы. С другой стороны при ускорениях 0,1-0,2g разрушения были весьма интенсивными (Япония, 1964; Мексика, 1985 и т. д.).

Целью работы является установление энергетических показателей сейсмического воздействия на основе инструментальных записей землетрясений различной интенсивности и энергоемкости различных видов конструкций, проявляющихся в итоговом макросейсмическом проявлении.

В последние годы делаются попытки при расчетах зданий и сооружений на сейсмические воздействия использовать величины скоростей колебаний грунтов, что, по мнению инженеров, позволяет непосредственно учитывать приходящую кинетическую энергию и ее поглощение исследуемым объектом.

Для оценки воздействий в ближней зоне землетрясений требуются инструментальные записи. И, хотя в мире в силу развития сетей сильных движений накоплено много записей, на Кавказе имеются только отдельные записи сильных движений. В этой связи представляет интерес рассмотреть записи землетрясений, полученные в 2000, 2002 гг. на территории г. Тбилиси. Проявление землетрясений было детально изучено, и записи подкрепляются макросейсмическими данными, которые позволяют выполнить надежное сопоставление макросейсмической интенсивности проявления землетрясений с соответствующими инструментальными данными.

Макросейсмические и инструментальные данные проявления землетрясений различной интенсивности на территории г. Тбилиси

В апреле 2002 г. на территории г. Тбилиси весьма неожиданно произошли т. н. Тбилисские апрельские землетрясения. Как и при предыдущем Гоубанском землетрясении, которое произошло 14 декабря 2000 г., при указанных землетрясениях ощущались сильные вертикальные толчки. Население кавказского региона, характеризующегося умеренной сейсмической активностью и, в частности, Тбилиси, как правило, наиболее часто ощущает проявления относительно удаленных землетрясений, которые характеризуются преобладающим горизонтальным движением (Боржоми, 1970; Дагестан, 1970; Дманиси, 1978; Гавази, 1981; Спитак, 1988; Рача, 1991; Барисахо, 1992 и т. д.) В частности, землетрясение 14 декабря 2000 г. имело эпицентр в окрестностях с. Гоубани и характеризовалось в эпицентре интенсивностью превышающей 6 баллов (рис. 1). В обследованных селах распространены типичные для сельской местности двухэтажные жилые дома. Это позволило надежно сопоставлять проявленный эффект землетрясения. Сейсмический эффект на большей части территории города Тбилиси не превышал 4 балла. В южной части города, т. е. ближе к эпицентру, проявление землетрясения было выше (рис. 2). Несколько домов старой застройки полностью обрушилось (рис. 2с) [Заалишвили и др., 2001; Заалишвили и др., 2014].

Как и при Гоубанском землетрясении ученые-сейсмологи Армении первыми сообщили приблизительное расположение эпицентра к югу от Тбилиси. Землетрясение 11 апреля 2002 г. по имеющимся данным не сопровождалось повреждением или разрушениями. Тем не менее, сотрудниками отдела инженерной сейсмологии Института Строительной Механики и Сейсмостойкости АН Грузии (ИСМИС) по инициативе его руководителя было проведено детальное макросейсмическое обследование последствий землетрясения. В связи с малостью прошедших колебаний, и отсюда сложностью выявления и дифференциации возможных повреждений, использовался опросный метод. Были, опрошены почти 1000 респондентов с

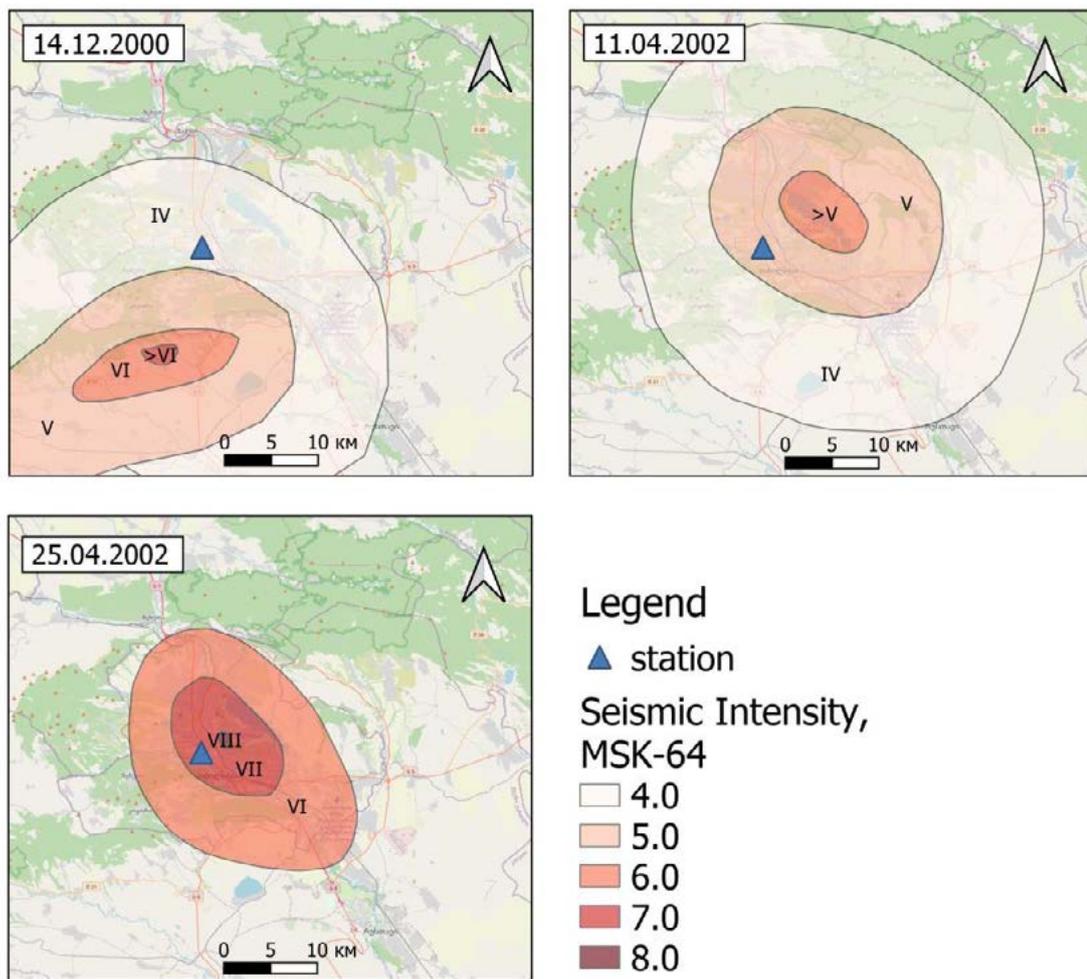


Рис. 1. Результаты макросейсмического обследования эпицентральной зоны Гобанского (14 декабря 2000 г.) и Тбилисских землетрясений (11 апреля 2002 г. и 25 апреля 2002 г.). На основе данных [Заалишвили и др., 2001, 2014; Javahishvili et al., 2004; Материалы..., 2005] / Fig. 1. The results of a macroseismic survey of the epicentral zone of the Gouban (December 14, 2000) and Tbilisi (April 11, 2002 and April 25, 2002) earthquakes. Based on the data [Zaalishvili et al., 2001, 2014; Javahishvili et al.; 2004; Materials..., 2005]

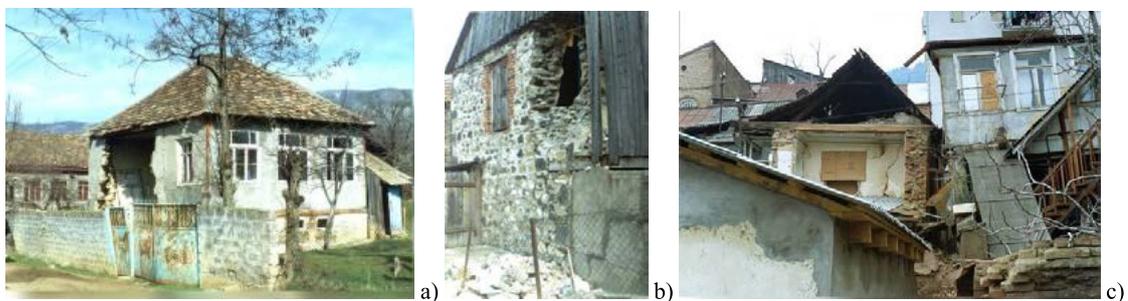


Рис. 2. Типовая застройка и повреждения зданий при Гобанском землетрясении: а) село Гобани, повреждения 4 степени; б) село Джорджиашвили. Дом В. Окуашвили; в) Тбилиси, дом на ул. М. Зичи, повреждение 5 степени [Заалишвили и др., 2014] / Fig. 2. Typical development and structural damage during the Gouban earthquake: a) Goubani village, 4th degree damage; b) Dzhordzhiashvili village. House of V. Okuashvili; c) Tbilisi, house on the M. Zichy street, 5th degree damage [Zaalishvili et al., 2014]

целью оценки их ощущений. И самым главным был вопрос: ощутили или не ощутили респонденты землетрясение и как. Именно эти факторы позволили в относительно короткие сроки, практически, нескольким участникам (среди которых был один из авторов статьи) не только провести рутинное обследование, но и выявить эпицентральною зону такого достаточно слабого землетрясения (обусловившего отсутствие интереса со стороны большинства ученых-инженеров). Направления маршрутов предполагали изучение проявления, как в самом городе, так и за его пределами. Совершенно непонятно, удаление от фактического центра исследуемой площади города в южном и других направлениях, давало устойчивое уменьшение интенсивности. Дальнейшее изучение землетрясения неожиданно привело к пониманию того простого факта, что эпицентр находится непосредственно на территории г. Тбилиси. И, наконец, была установлена эпицентральноя зона, где наблюдался массовый бой посуды, сдвиг тяжелой мебели, поломка оконных стекол и т.п. И об этом вообще отсутствовала информация. По результатам макросейсмического обследования были построены изосейсты землетрясения 11 апреля 2002 года (рис. 1). Анализ изосейст показывает, что эпицентральноя зона землетрясения охватывает северо-западную часть города и приурочена к районам Глдани, Наздаладеви, Чугурети и т.д.

Выявление гипоцентра непосредственно под городом напомнило о т.н. «Тбилисских» землетрясениях позапрошлого века, когда в первой половине 19 столетия в Тбилиси произошел целый ряд заметных землетрясений. После указанного землетрясения, совершенно закономерно, в городе были зарегистрированы афтершоки. При этом имело место совершенно непонятное возрастание активности. Дело доходило до того, что за день происходил ряд весьма ощутимых толчков. Все это дало основание руководителю отдела инженерной сейсмологии В.Б. Заалишвили во вторник 13 апреля 2002 г. на первом же заседании Ученого Совета ИСМИС АН Грузии выступить от имени исследовательской группы с заявлением о прогнозе сильного землетрясения на территории г. Тбилиси. Конечно, при этом не давался точный прогноз времени, но эпицентр предполагался в Тбилиси где – то в пределах эпицентральноя зоны землетрясения 11 апреля 2002 г., а время проявления что-то около месяца. Понятно, ни у кого и в мыслях не было привлекать сюда средства массовой информации, и заявление носило научный или только служебный характер [Заалишвили и др., 2001].

После первого землетрясения прошло две недели и вечером 25 апреля произошло разрушительное землетрясение с преобладающим вертикальным толчком с магнитудой порядка $M=4,5$. В результате землетрясения 25 апреля 2002 г. в Тбилиси погибло 9 человек. В городе землетрясение привело к значительным разрушениям и серьезным повреждениям (рис. 3). Сотни людей осталось без крова. Эпицентр землетрясения был вновь, как и предполагалось, в восточной части города, естественно перекрыв эпицентральною зону землетрясения от 11 апреля 2002 г. (рис. 1). Таким образом, землетрясение от 11 апреля 2002 г. можно рассматривать в качестве форшока.

Макросейсмические данные приведены на рисунке 1с. При этом использовались все данные, включая результаты оперативного обследования, которые впоследствии уточнялись [Javahishvili et al., 2004]. В данной работе использованы общие данные проявления землетрясения, обусловленные расположением очага. Влияние грунтовых условий в данной работе не рассматривалось. В то же время проявление интенсивности происходило путем наложения различных факторов, обусловленных сложным переплетением влияния близко расположенного очага и грунтовыми условиями территории [Заалишвили и др., 2014].

В результате землетрясения 25 апреля 2002 года было серьезно повреждено более 2500 зданий и сооружений. Под руководством В.Б. Заалишвили, по поруче-



Рис. 3. Повреждения зданий при Тбилисском землетрясении 25 апреля 2002 года: а) повреждение колонн здания Института математики; б) Колонна первого этажа ЖБ крупноблочного дома в Надзаладевском районе; с) кирпичное здание больницы по ул. А. Казбеги; d) поврежденная колонна здания Государственного исторического музея [Gabrichidze et al., 2004] /

Fig. 3. Damage to buildings during the Tbilisi earthquake on April 25, 2002: a) damage to the columns of the building of the Mathematical Institute; b) column of the first floor of a reinforced concrete block house in the Nadzaladevsky district c) a brick building of the hospital on the A. Kazbegi street; d) a damaged column of the building of the State Historical Museum [Gabrichidze et al., 2004]

нию Министерства строительства Грузии и руководства ИСМиС АН Грузии, было выполнено обследование зданий и сооружений в центральной части территории г. Тбилиси. В первую очередь, решались неотложные социальные задачи оценки их состояния и необходимости выведения населения в безопасные здания и районы. И уже по результатам обследования строились соответствующие изосейсты. Оперативное обследование зданий также было проведено СБР НССЗ Республики Армения. Было установлено, что наибольшие повреждения получили большей частью малоэтажные здания, более всего в районах Авлабара и Сололаки [Материалы..., 2005].

С наибольшей интенсивностью землетрясение проявилось в выделенной эпицентральной зоне землетрясения, т. е. в восточной части города: улицы Пиросмани, Зиари, Рача, Магаро, Либани, Кетеван Тсамебули, Э. Бежанишвили, Б. Бенделиани, Диди – Джихаиши и другие. Относительно малая глубина очага (около 5 км) предопределила сильное затухание выделяющейся сейсмической энергии за пределами сферического в идеале, а у нас – протяженного вдоль городской застройки очага. Анализ грунтовых условий города, проведенный выше, позволяет приурочить увеличение интенсивности к району старого города, где большая часть поверхностных слоев грунтовой толщи представляет собой насыпные грунты. Неравномерные осадки таких грунтов также сформировали высокий сейсмический эффект и в других районах города (район, заключенный между площадью Свободы, мостом Бараташвили и ул. Л. Асатиани и т. д.). С другой стороны, высокий сейсмический эффект проявился в районе распространения сложного подземного и поверхностного рельефов, что соответствует современным концепциям формирования интенсивности землетрясения [Zaalishvili et al., 2000].

Наиболее тяжелое положение создалось в центральной части города. Здесь расположено много амортизированных зданий постройки конца и даже середины 19 столетия. В основном пострадали двух- и трехэтажные здания, с большими проемами и расположенные на слабых насыпных грунтах (ул. А. Дюма, К. Леселидзе, пл. Хлебная и т. д.). Расположенная здесь же купольная церковь X века также пострадала значительно. Некоторые здания были частично разрушены.

Вертикально преобладающий толчок обусловил нестандартные проявления повреждений. Некоторые уже поврежденные перед землетрясением здания, например, с почти 5 см раскрытием стены первого этажа («отголосок» деревянных конструкций!), в период землетрясения не пострадали вообще. Это было обуслов-

лено тем, что высокочастотные составляющие вертикальных колебаний здесь сильно поглощались. В то же время с многих крыш упали кирпичи дымовых труб, но разрушение происходило не в горизонтальном, а вертикальном направлении. Действительно во многих зданиях дымовые трубы, сложенные кирпичами, характеризовались повреждением верхней кладки без проявления каких-либо повреждений в нижней кладке и т. д.

Основные особенности методологии инженерной сейсмологии сформировались в эпоху, когда большая часть застройки городов представляла собой разношерстную, часто весьма некачественно построенную, однородную совокупность зданий и сооружений. Поэтому проявление сейсмического эффекта логически вполне обуславливалось сейсмологической идеологией, а анализ изосейст позволял вполне уверенно выделять влияние грунтовых условий.

В настоящее время, стремительное развитие урбанизированных территорий приводит к формированию сложной застройки, где старые амортизированные дома непосредственно соседствуют с более поздними постройками и – с современными зданиями. При этом проявление землетрясения может совершенно различаться в пределах нескольких метров.

Для надежного выделения влияния грунтовых условий необходимо учитывать и сроки эксплуатации, техническое состояние, и качество строительства, особенно, для новых зданий и сооружений. Не секрет, что, нередко, новые здания построены с такими отклонениями от проекта и, соответственно, от положений действующих Строительных Норм, что они при первом же относительно сильном землетрясении обречены на значительные повреждения. При этом весьма часто в последние годы и сами проекты могут характеризоваться такими нарушениями. Такие обстоятельства всегда формировали интегральный сейсмический эффект землетрясения. Поэтому анализ данных проявления всегда соседствует с отсеиванием проявлений, обусловленных указанными обстоятельствами. В то же время сейсмические шкалы основаны на использовании в качестве объектов анализа именно амортизированных застроек в большинстве своем без антисейсмических мероприятий.

Таким образом, при анализе проявления землетрясений на урбанизированной территории необходимо весьма внимательное изучение застройки с целью выделения различных аномалий. Апрельские землетрясения произошли в городе, насыщенном не просто амортизированной застройкой, но и нередко уже, практически, саморазрушающейся. При этом, весьма распространено характерное для большинства современных городов мира, явление «подтопления» грунтов, отягощаемое, в свою очередь, характерной для старых городов изначальной их высокой водонасыщенностью. Указанные грунты с сейсмической точки зрения очень часто, особенно в старой исторической части города относятся в лучшем случае к грунтам третьей категории, а нередко и еще худшим грунтам (насыпные, торфяные, илистые и т. д.). Это обстоятельство при наличии здесь же прочных грунтов, обуславливало во все времена в Тбилиси отчетливую дифференциацию проявления землетрясения по грунтовым условиям.

С другой стороны, близость источника или очага землетрясения создает совершенно необычные условия для проявления землетрясения. Так здесь не столь явно выражена дифференциация разрушений. Кроме того, сама особенность очага создала совершенно необычную картину, вытянутую, очевидно, вдоль разрывного нарушения, которое, кстати, не четко выделено. И, наконец, свою роль, сыграла малая глубина очага, обуславлившая формирование весьма локального проявления апрельских землетрясений.

Апрельские землетрясения 2002 года были зарегистрированы сейсмической станцией, расположенной на скальных грунтах в здании Института геофизики АН Грузии (рис. 4). Расположение станции обозначено на рисунке 1, соответствующие

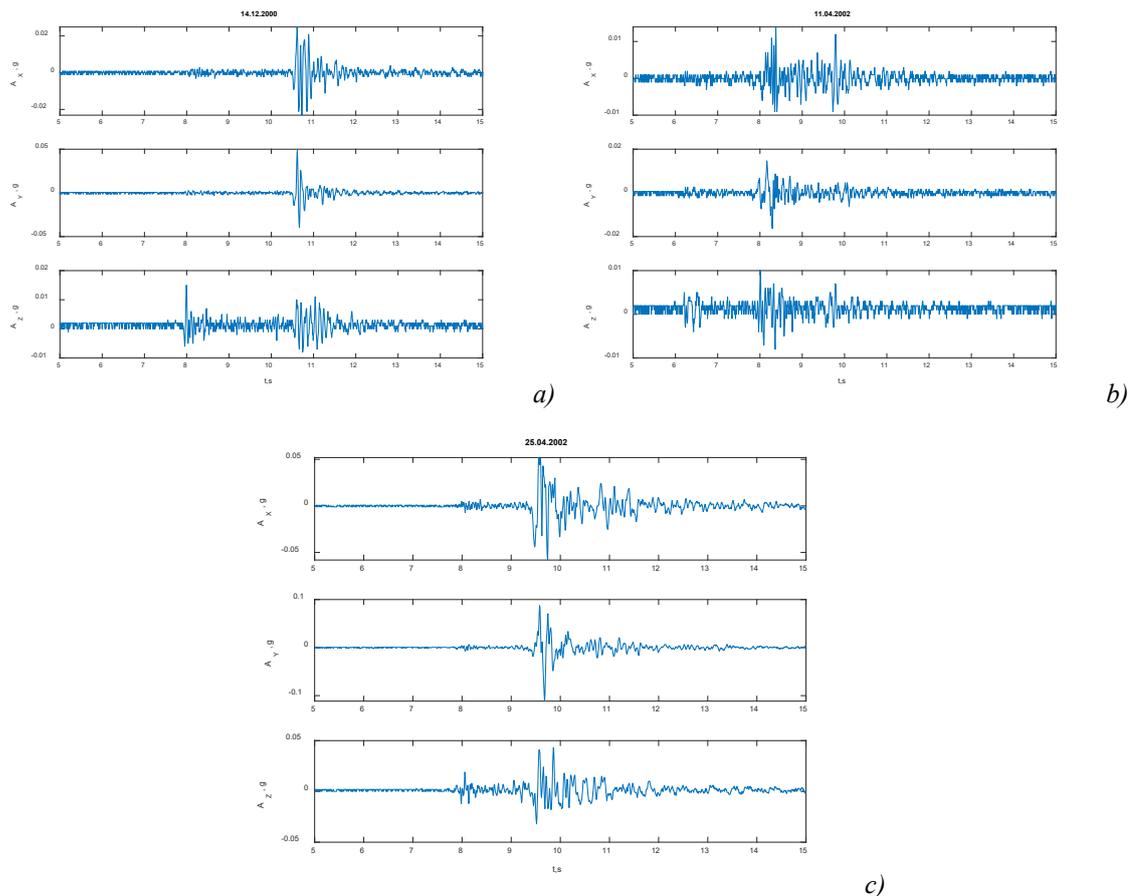


Рис. 4. Акселерограммы Губанского 14 декабря 2000 г. (а) и Тбилисских землетрясений: 11 апреля 2002 г. (б) и 25 апреля 2002 г. (с) /

Fig. 4. Accelerograms of the Gouban earthquake on December 14, 2000 (a) and the Tbilisi earthquakes: April 11, 2002 (b) and April 25, 2002 (c)

эпицентральные расстояния, оцененные по расстояниям от макросейсмического центра до станции приведены в таблице 1, содержащей также параметры землетрясений по данным различных источников.

Параметры сейсмических записей

Оценим параметры, используемые для описания эффекта сейсмических воздействий. Традиционно в качестве такого параметра используется ускорение [Karimzadeh, Askan, 2021]. Инструментальные значения сейсмической интенсивности для ускорения определены из регрессионных моделей для многих регионов и, в первую очередь, с целью быстрой оценки интенсивности сейсмических воздействий после разрушительных землетрясений (например, система ShakeMap в Калифорнии). Много моделей построено также для пиковой скорости. В зависимости от категории объектов в специальных нормах используются скорости и смещения. В американской shake-map инструментальной оценке используются статистические данные для ускорений, скоростей и смещений в зависимости от интенсивности [Wei et al., 2014]. Очевидно, что в разных диапазонах «работает» каждый из этих показателей в силу разного частотного состава. Следующим типом показателя являются спектральные параметры. В работе [Campbell, Vozorgnia, 1994], рассмотрены интенсивность Ариаса и кумулятивная абсолютная скорость. То, что одному и тому же значению сейсмической интенсивности соответствует большой раз-

Таблица 1 / Table 1

Параметры землетрясений / Parameters of earthquakes

Дата и время события по местному времени [Материалы..., 2005] / Event local datetime (UNDP Report) [Materials..., 2005]	Магнитуда, приведенная в (UNDP Report) [Материалы..., 2005] / Magnitude given in (UNDP Report) [Materials..., 2005]	Глубина очага по оперативным данным НССЗ РА / Focus depth according to operational data of NSPS RA	Магнитуда Md по оперативным данным НССЗ РА / Magnitude Md according to operational data of NSPS RA	Дата и время события UTC / UTC Date Time (IRIS)	Mb (IRIS)	Глубина очага (IRIS) / Depth focus (IRIS)	Расстояние до макросейсмического эпицентра, км / Distance to the macroseismic epicenter, km
14.12.2000 19:45	3,6	-	-	2000-12-14 15:45:38.1	3,3	48,7	12,2
11.04.2002 21:38	3,5	2,5	3,4	2002-04-11 16:38:24.1	3,7	10	7,4
25.04.2002 22:41	4,5	2,5	4,3	2002-04-25 17:41:22.44	4,8	10	2,9

брос значений максимальных ускорений известно давно [Шебалин, 1975]. [Karim, Yamazaki, 2002] исследовали связь макросейсмической интенсивности шкалы JMA с пиковыми ускорениями, скоростями и спектральной интенсивностью (SI). В работе [Constantin et al., 2021] приводятся корреляционные соотношения между макросейсмической интенсивностью и пиковыми ускорением и скоростью для землетрясений зоны Вранча. В работе [Androutselis et al., 2020] были исследованы различные параметры для оценки повреждения мостовых сооружений.

В результате анализа можно выделить следующие параметры для оценки инструментальной интенсивности:

1. Кумулятивный квадрат ускорений (модифицированная интенсивность Ариаса, отличается отсутствием множителя $\pi/2g$ [Arias, 1970]):

$$I_A = \int_0^{t_d} a(t)^2 dt, \quad (1)$$

$a(t)$ – акселерограмма;

t_d – эффективная продолжительность землетрясения.

2. Кумулятивная абсолютная скорость (Kennedy, Reed, 1988):

$$I_V = \int_0^{t_d} a(t) dt \quad (2)$$

3. Индекс интенсивности Анга [Ang, 1990]:

$$I_C = (a_{rms})^{3/2} t_d^{1/2}, \quad (3)$$

a_{rms} – среднеквадратическое ускорение:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} a(t)^2 dt}.$$

4. Мера Fajfar [Fajfar, 1990]:

$$I_F = PGV t_d^{1/4} \quad (4)$$

PGV – пиковая скорость

5. Интенсивность Хаузнера [Housner, 1959]:

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dT \quad (5)$$

$S_v(T)$ – спектр псевдоскорости (демпфирование $\xi = 5\%$),

T – период.

6. Индекс полной входной энергии:

$$E_j = \int_0^{t_d} a(t)v(t) dt, \quad (6)$$

$a(t)$ – ускорение,

$v(t)$ – скорость.

7. Площадь реального спектра [Заалишвили, 1986]:

$$S_r = \int A(f) df \quad (7)$$

8. Средневзвешенная частота колебаний [Заалишвили, 1986]:

$$f_{aw} = \frac{\int A(f) \cdot f df}{\int A(f) df} \quad (8)$$

Таблица 2 / Table 2
Инструментальные параметры сейсмических записей / Instrumental parameters of seismic records

Параметр / Parameter	Горизонтальная компонента / Horizontal component			Вертикальная компонента / Vertical component		
	14.12.2000	11.04.2002	25.04.2002	14.12.2000	11.04.2002	25.04.2002
	Пиковое ускорение / Peak acceleration	0.054	0.017	0.114	0.015	0.010
Пиковая скорость / Peak velocity	1.544	0.548	3.453	55.863	52.537	58.500
Пиковое смещение / Peak displacement	19.293	8.199	12.170	1169.474	1056.662	1285.618
Продолжительность колебаний / Period of vibration	17.117	31.344	2.070	36.398	35.383	26.805
Преобладающий период колебаний / Dominant vibration period	0.121	0.177	0.209	0.168	0.206	0.202
Средневзвешенная частота / Weighted average frequency	21.128	26.407	15.074	26.457	27.495	18.041
Период, соответствующий средневзвешенной частоте / Period corresponding to the weighted average frequency	0.047	0.038	0.066	0.038	0.036	0.055
Кумулятивный квадрат ускорений (модифицированная интенсивность Ариаса) / Cumulative square of accelerations (modified Arias intensity)	0.000033	0.000000	0.000164	0.000003	0.000003	0.000027
Кумулятивная абсолютная скорость (Kennedy, Reed, 1988) / Cumulative absolute velocity (Kennedy and Reed, 1988)	0.000508	0.000044	0.001132	0.000153	0.000153	0.000460
Индекс интенсивности Анга (характеристическая интенсивность) (Ang, 1990) / Ang intensity index (characteristic intensity) (Ang, 1990)	0.051517	0.011170	0.061798	0.026277	0.026153	0.051941
Мера Fajfar (1990) / Fajfar measure (1990)	3.140	1.297	4.142	137.21	128.13	133.11
Интенсивность Хаузнера (Housner, 1959) / Housner intensity (Housner, 1959)	1.841	1.454	5.663	0.87	0.86	2.70
Индекс полной входной энергии / Total input energy index	0.007	0.002	0.043	15.61	13.81	17.13
Площадь реального спектра (Заалишвили, 1998) / Real spectrum area (Zaalishvili, 1998)	0.054	0.038	0.113	0.037	0.034	0.070

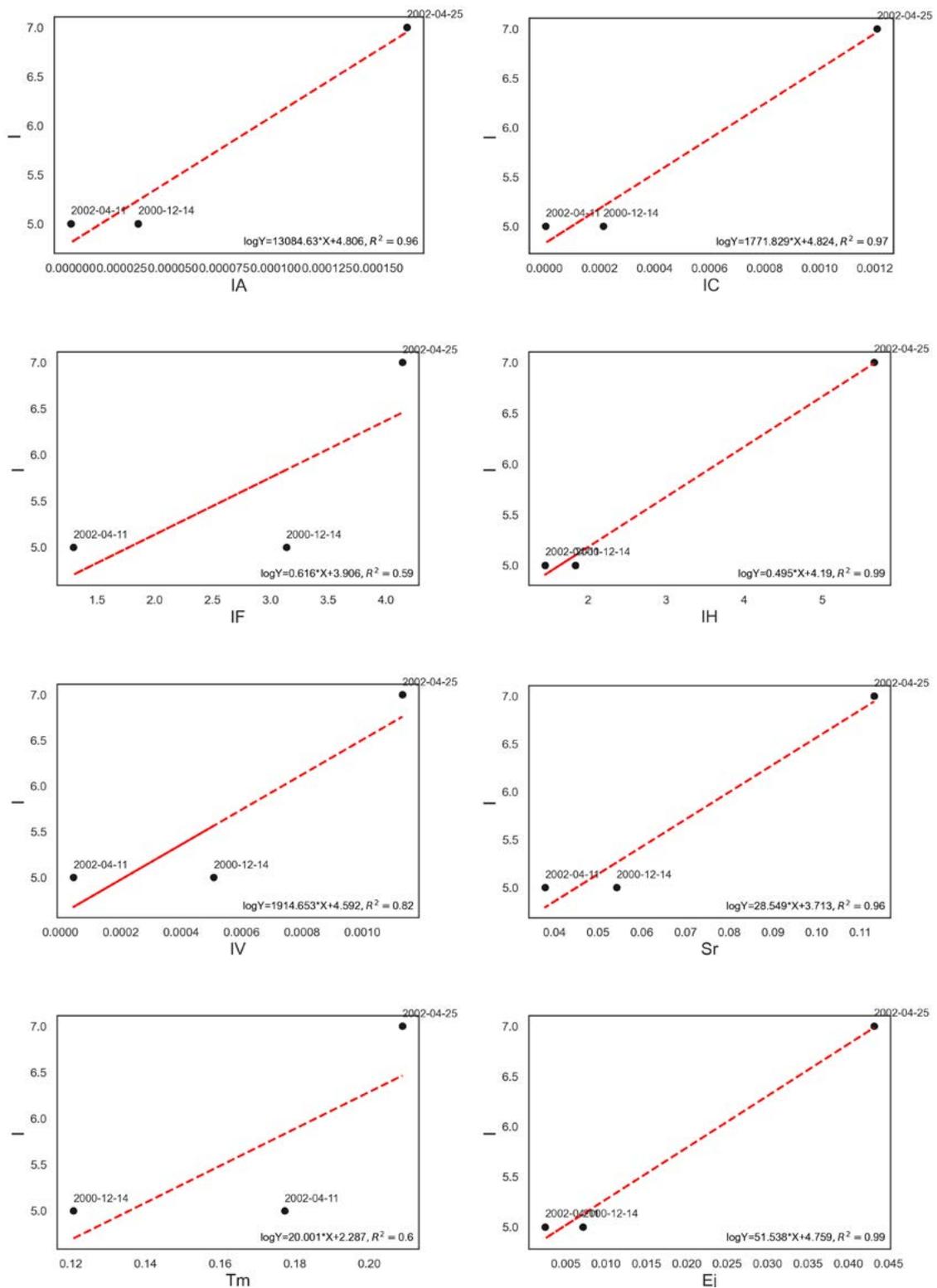


Рис. 5. Соотношение инструментальных параметров оценки интенсивности с макросейсмической интенсивностью (полученные зависимости не являются статистически значимыми и приведены только для иллюстрации общих трендов) /

Fig. 5. Correlation of instrumental parameters for intensity assessment with macroseismic intensity (the obtained dependences are not statistically significant and are given only to illustrate general trends)

9. Преобладающий период колебаний [Rathje et al., 1998]:

$$T_m = \frac{\int A(f)^2 \cdot T dT}{\int A(T) dT}$$

Соответствующие соотношения между рассчитанными параметрами и макросейсмической интенсивностью представлены на рисунке 5. Полученные зависимости не являются статистически значимыми и приведены только для иллюстрации общих трендов. Наилучшее соответствие получено для преобладающего периода колебаний.

Инструментальные параметры можно разделить на амплитудные и спектральные. Макросейсмическая интенсивность оценивается на различные объекты. В связи с этим существенную роль при оценке интенсивности оказывает тип объекта-индикатора, каждый из которых характеризуется собственными частотами и прочностными характеристиками. Для территории Италии исследована связь Интенсивности Хаузнера с макросейсмической интенсивностью в работе [Masi et al., 2019].

Для оценки сейсмических воздействий на устойчивость склонов, при изучении исторических землетрясений использовался преобладающий период [Silva et al., 2017], на основе соответствующих эмпирических данных можно восстановить зоны различной интенсивности. В работе [Wang et al., 2013] предложено корректировать спектральную интенсивность на основе преобладающего периода спектрального ускорения.

Связь интенсивности со спектром акселерограмм исследована в работах Чернова и Соколова [Chernov, Sokolov, 1999]. Для каждой интенсивности шкалы MMI спектральная амплитуда рассматривается в определенном диапазоне репрезентативных частот, которые приведены на рисунке 6 в сравнении с преобладающими частотами. Спектральные особенности отклика на сейсмическое воздействие хорошо описываются спектрами реакции – рис. 7. Хорошо видно, что максимум воздействия с увеличением интенсивности на горизонтальной компоненте ускорений смещается в длиннопериодную область (обозначено пунктиром, соответствующие

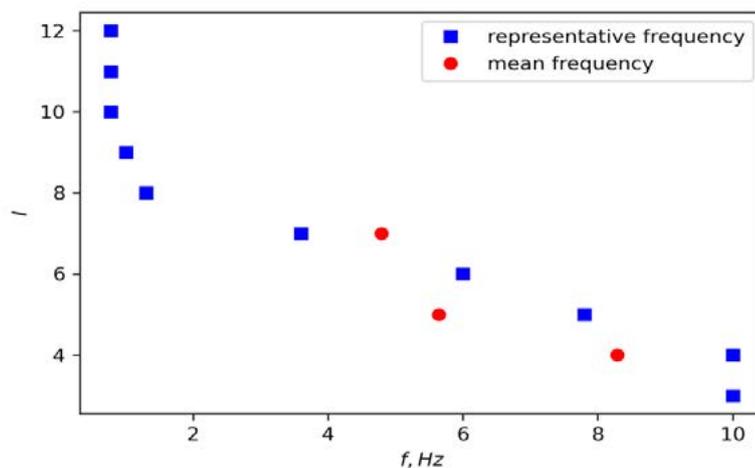


Рис. 6. Репрезентативные частоты, используемые при определении инструментальной интенсивности согласно работе [Chernov, Sokolov, 1999], и средние частоты /

Fig. 6. Representative frequencies used in the determination of instrumental intensity according to [Chernov, Sokolov, 1999], and average frequencies

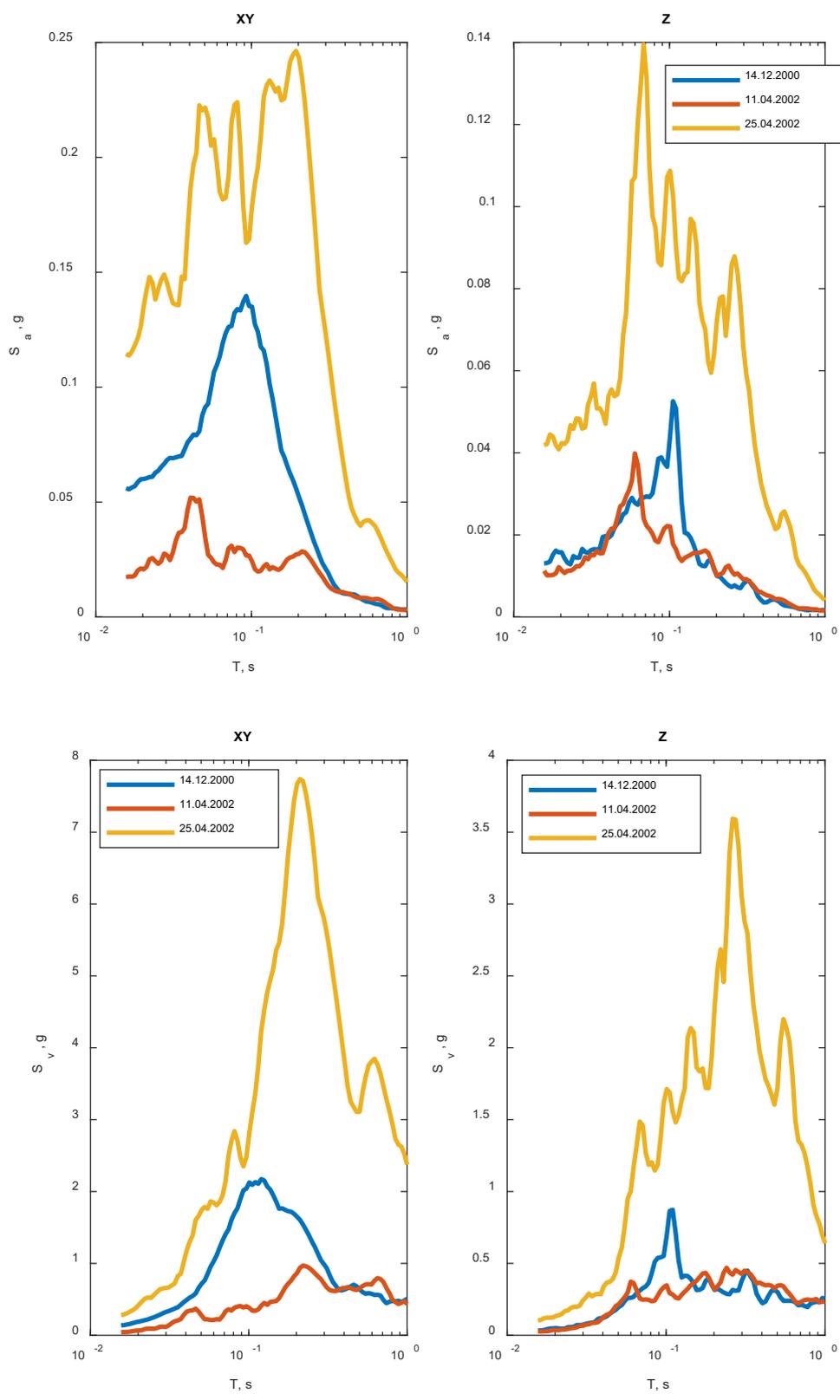


Рис. 7. Спектры реакции: ускорения (а), скорости (б) для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент /

Fig. 7. Response spectra: acceleration (a), velocity (b) for the horizontal (on the left) and vertical (on the right) components

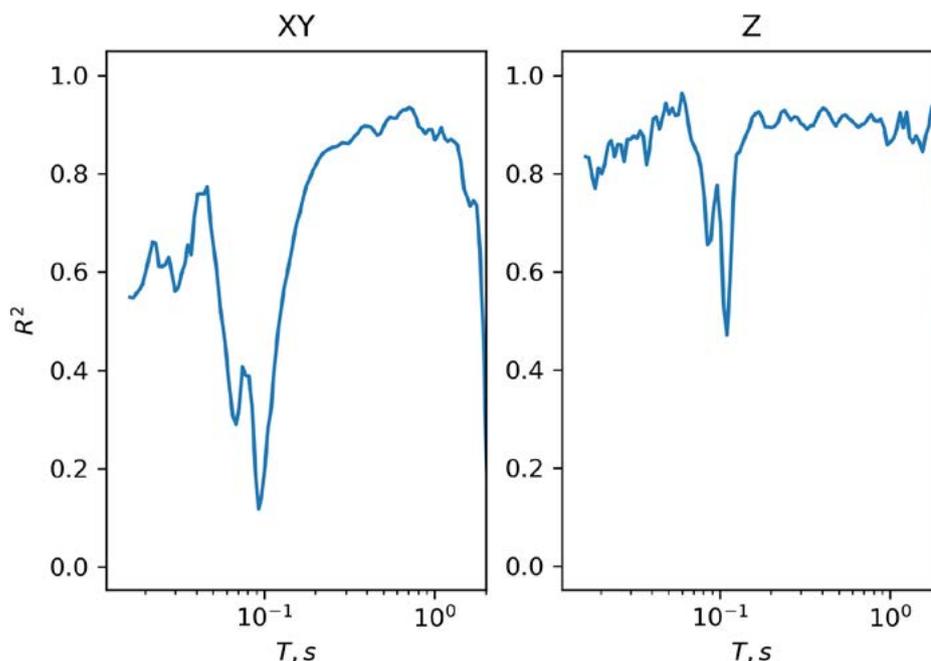


Рис. 8. Величина достоверности аппроксимации спектров реакции и проявленной интенсивности /
Fig. 8. The value of the reliability of the approximation of the response spectra and the manifested
intensity

периоды: 0,04 с, 0,14 с, 0,21 с). На вертикальной же компоненте наблюдается обратный эффект (периоды: 0,06 с, 0,11 с, 0,07 с). Кроме того здесь же можно выделить интервалы периодов, в которых амплитуды воздействия при Тбилисском землетрясении 11 апреля 2002 г. превышают амплитуды Гоубанского землетрясения 2000 г. (отмечены стрелками), а при условии совпадения данных частот с собственной частотой застройки получим соответствие с проявленной интенсивностью.

В методах машинного обучения выбор лучшей модели осуществляется на основе минимизации выбранной метрики (accuracy, precision, recall и др.). Аналогично может быть сформулирована задача поиска частотных диапазонов рассматриваемых спектральных параметров, наилучшим образом коррелирующих с макросейсмической интенсивностью. В качестве простого примера рассмотрим величину достоверности аппроксимации и сопоставим ее значения на различных периодах (рис. 8). Максимумы соответствуют для горизонтальной компоненты 0,04 с и для вертикальной компоненты 0,06 с.

Результаты работы и их обсуждение

Оценка сейсмической интенсивности является мерой эффекта воздействия сейсмических колебаний на различные объекты, и, в первую очередь, здания и сооружения, последствия которых приводят к разрушениям и соответствующим ущербам. В связи с чем макросейсмическая интенсивность есть параметр, напрямую оценивающий сейсмические риски (как статистические распределения степени и количества повреждений зданий различного типа) [Zaalishvili et al., 2020].

Макросейсмическая интенсивность оценивается на различные объекты. В связи с этим существенную роль при оценке интенсивности оказывает тип объекта-индикатора. Естественно что важнейшими такими объектами являются здания и сооружения, каждый из которых характеризуется собственными частотами и прочностными характеристиками. С появлением новых конструктивных решений тре-

буется актуализация макросейсмических шкал, и в этой связи следует отметить, что подобная работа в РФ выполнена в форме нового поколения сейсмической шкалы (ГОСТ) [Артикаев, 2021; Artikaev, Erteleva, 2017; Artikaev et al., 2021]. В работе [Yazgan, 2015], например, предложена методика оценки моделей уязвимости зданий, в которой для классов RC12, RC34 и RC56 рассматривается спектральное ускорение для периодов: 0,15 с, 0,35 с и 0,55 с.

Актуальной остается задача нахождения инструментального параметра (набора параметров), наилучшим образом описывающего макросейсмическую интенсивность. Вероятно, по аналогии с новой шкалой, для каждого типа зданий может быть введена своя мера воздействия, как, например, это сделано в работе [Yazgan, 2015], где используются значения спектра реакции в единицах ускорений для различных периодов.

В работе рассмотрены различные инструментальные показатели сейсмического воздействия по данным землетрясений на территории Тбилиси. Установлено, что наилучшим образом сейсмический эффект описывается энергетическими показателями, такими как кумулятивная скорость (интенсивность Ариаса), площадь реального спектра, площадь спектральной псевдоскорости (интенсивность Хаузнера). С данными показателями тесно связаны такие параметры как преобладающий период и продолжительность колебаний.

Рассмотрено уточнение спектральных параметров – площадей спектров и спектров реакции (для ускорений и скоростей) в различных интервалах периодов. В результате исследований наилучшее соответствие с макросейсмической интенсивностью получено для периодов 0,04-0,05 с и 0,16-1,5 с. Предполагается совпадение воздействия в данных интервалах с собственными периодами застройки. Также следует отметить, что в силу близкого расстояния достаточно большие значения наблюдаются на вертикальной компоненте, что также обусловило заметное отличие реакции застройки от среднестатистических данных, в которых рассматривается максимальное горизонтальное ускорение.

Рассмотренные записи показывают сложность формирования сейсмического поля в ближней зоне землетрясений, любые выводы, в том числе параметры инструментальной оценки макросейсмической интенсивности. В то же время, необходимо отметить, что полученные в данной работе результаты, требуют статистического обоснования. В этой связи совершенно необходимым является развитие сетей сильных движений на Северном Кавказе, в особенности в связи с возрастающими темпами строительства и повышением этажности застройки, сопровождающимися новыми конструктивными решениями.

Для непосредственной оценки разрушительного потенциала различных показателей грунтового движения необходимо рассмотреть их корреляционную взаимосвязь с интенсивностью проявления сейсмического воздействия, т. е. для установления весового вклада различных показателей грунта в формирование чувствительности к сейсмическому воздействию землетрясения, необходимо установить связь сейсмического эффекта землетрясений с соответствующими или сопутствующими показателями инструментальных записей колебаний грунтов. Такой подход к решению основной задачи исследования представляет основную концепцию формирования связи интегрального сейсмического эффекта землетрясения с тем или иным показателем движения грунтов, характеризуемую логической целесообразностью причинно-следственной связи.

Апрельские землетрясения 2002 года в Тбилиси отличались тем, что впервые на постсоветской территории без наличия весьма сильного землетрясения (Спитак, 1988; Рача, 1991) целенаправленно был получен целый набор инструментальных записей ускорений землетрясений в цифровом виде. В то же время, в отличие от Губанского землетрясения 14 декабря 2000 года апрельские землетрясения были

записаны на территории, где прямо под толщей грунтов, слагающих ее, находился очаг достаточно сильного, скорее умеренного землетрясения. Поэтому обработка записей землетрясения представляла, несомненно, большой практический и научный интерес.

В то же время, необходимо отметить, что точность определения важнейших характеристик такого неглубокого землетрясения, а именно, магнитуды, глубины очага и т. д., связана с большими погрешностями и может достигать значительных величин.

С другой стороны, хорошо известно, что эмпирические уравнения макросейсмического поля (Шебакин Н. В., Варазанашвили О. Ш., Папалашвили В. Г. и т. д.), устанавливались, как правило, именно по сильным и, при этом, удаленным землетрясениям. Поэтому для подобных землетрясений, охватывающих большие пространства, точность определения магнитуды или глубины очага, как самостоятельных параметров, вполне удовлетворительна. При этом вполне удовлетворительна и точность определения интенсивности землетрясения.

Для неглубоких землетрясений получаемые результаты, учитывая большой разброс основных исходных параметров, с точки зрения задачи сейсмологии, до некоторой степени также достаточно удовлетворительны. В то же время, никому из сейсмологов не придет в голову определять по ним абсолютное значение интенсивности. Другими словами, связывать количественно весьма неточные исходные сейсмологические данные, обусловленные особенностями неглубокого землетрясения, с проявленной или ожидаемой интенсивностью совершенно неприемлемо.

Также совершенно неприемлемым является анализ абсолютной величины ускорения, полученного инструментальным путем, связывать, а точнее определять или подтверждать по нему количественную величину проявленной интенсивности. Специалистам, работающим в области инженерной сейсмологии, хорошо известно, что корреляция между вышеприведенными и другими параметрами может иметь лишь статистический смысл. Другими словами, большинство эмпирических уравнений справедливо лишь для достаточно большого числа рассматриваемых событий. Таким образом, получение той или иной величины в уравнениях макросейсмического поля имеет явно вероятностный смысл. В то же время, большинство параметров таких событий были получены в скудно инструментальный период (во всяком случае, для Кавказа) и именно для удаленных землетрясений. Отсутствие статистического числа значащих событий происшедших под городом для вертикально распространяющихся волн не позволяет делать тех или иных количественных выводов.

Выводы

1. Апрельские землетрясения 2002 года в Тбилиси характеризуются тем, что впервые на постсоветской территории без наличия весьма сильного землетрясения (Спитак, 1988; Рача, 1991) целенаправленно был получен целый набор инструментальных записей ускорений землетрясений в цифровом виде и проведено макросейсмическое обследование территории с плотной застройкой.

2. В ближней зоне разрушительного землетрясения в спектральном составе сейсмического воздействия проявилась предварительная вертикальная высокочастотная (ВЧ) составляющая, значительно превышающая по амплитуде т. н. «основной» сигнал на всех трех составляющих.

3. Появление большой амплитуды ВЧ составляющей сигнала сопутствует неупругим явлениям в среде и выявляется на ближних расстояниях от источника. На это указывают результаты исследований записей в ближней зоне сильных землетрясений и также специальных экспериментов.

4. Рассмотрены различные инструментальные показатели сейсмического воздействия по данным землетрясений на территории Тбилиси. Установлено, что наилучшим образом сейсмический эффект описывается энергетическими показателями, такими как: кумуля-

тивная скорость (интенсивность Ариаса), площадь реального спектра, площадь спектральной псевдоскорости (интенсивность Хаузнера). С данными показателями тесно связаны такие параметры как преобладающий период и продолжительность колебаний.

Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. О вероятности превышения воздействий в строительных нормах. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11 (3). – С. 55-62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005
2. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование по данным искусственного возбуждения колебаний грунтовой толщи. // Автореф. канд. дисс. – Тб., 1986. – 21 с.
3. Заалишвили В.Б., Одишария А.В., Тимченко И.Э., Отинашвили М.Г., Гогмачадзе С.А., Заалишвили З.В. Инженерное макросейсмическое обследование эпицентральной зоны землетрясения 14 декабря 2000 г. // *Теория сооружений и сейсмостойкость*. ИСМИС им. К.С. Завриева АН Грузии, №2. – Тб., 2001. – С. 51-59.
4. Заалишвили В.Б., Одишария А.В., Тимченко И.Э., Отинашвили М.Г., Гогмачадзе С.А., Заалишвили З.В. Инженерное макросейсмическое обследование эпицентральной зоны землетрясения 14 декабря 2000 г. // *Геология и Геофизика Юга России*. – 2014. – Т. 4. №1. – С. 30-38.
5. Материалы Тбилисского землетрясения 25 апреля 2002 года. Академия наук Грузии. Институт строительной механики и сейсмостойкости им. К.С. Завриева. – Тб., 2005. – 268 с.
6. Шебалин Н.В. Об оценке сейсмической интенсивности. // *Сейсмическая шкала и методы оценки сейсмической интенсивности*. – М.: Наука, 1975.
7. Androutselis T., Sarwar M.T., Eker U., Anastasopoulos P.C., Sakellariadis L., Agalianos A., & Anastasopoulos I. Real-Time Seismic Damage Assessment of Various Bridge Types Using a Nonlinear Three-Stage Least Squares Approach. // *Journal of Infrastructure Systems*. – 2020. – Vol. 26 (3). – Article 04020019. DOI: 10.1061/(asce)is.1943-555x.0000551
8. Ang A.H.-S. Reliability bases for seismic safety assessment and design. Proc. 4th U. S. // National Conf. Earth Eng., EERI, Palm Spring. – 1990. – Vol. 1. – pp. 29-45.
9. Aptikaev F.F., & Erteleva O.O. A New Generation Russian Seismic Scale. // *Seismic Instruments*. – 2017. – Vol. 53 (2). – pp. 146-154. DOI: 10.3103/s0747923917020025
10. Aptikaev F.F., Erteleva O.O., & Tokmulina G.M. Correlation between the Points of Different Seismic Intensity Scales. // *Seismic Instruments*. – 2021. – Vol. 57 (1). – pp. 75-87. DOI: 10.3103/s0747923921010035
11. Arias A. A measure of earthquake intensity, in *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. // R.J. Hansen (Editor). MIT Press, Cambridge, Massachusetts. – 1970. – pp. 438-483.
12. Campbell K.W., Bozorgnia Y. Empirical analysis of strong ground motion from the 1992 Landers, California, earthquake. – *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1994. – Vol. 84. No. 3. – pp. 573-588.
13. Chernov Yu.K., and Sokolov V.Yu. Correlation of seismic intensity with Fourier acceleration spectra. // *Phys. Chem. Earth*. – 1999. – Vol. 24 (6). – pp. 523-528.
14. Constantin A.P., Moldovan I.A., Partheniu R., Grecu B., & Ionescu C. Correlations between macroseismic intensity values and ground motion measures of Vrancea (Romania) sub-crustal earthquakes. // *Romanian Journal of Physics*. – 2021. – Vol. 66 (5-6). – Article 808.
15. Fajfar P. Elastic and Inelastic Design Spectra. // Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, vol. 2. – 1995. – pp. 1169-1178
16. Gabrichidze G., Lomidze G., Mukhadze T., Odisharia A., Timchenko I. April 2002 epicentral earthquake in Tbilisi, Georgia. // 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B. C., Canada August 1-6, 2004. Paper No. 1063.
17. Housner G.W. Behavior of structures during earthquakes. // *J. Eng. Mech. Div. ASCEI*. – 1959. – Vol. 85. – pp. 109-129.
18. Javahishvili et al. the Tbilisi earthquake of April 25, 2002 in the context of the seismic hazard of the Tbilisi urban area Article in *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* September. // *Boll. Geof. Teor. Appl.* – 2004. – Vol. 45. – pp. 169-185
19. Karim K.R., & Yamazaki F. Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters. // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. – 2002. – Vol. 31 (5). – pp. 1191-1212. DOI: 10.1002/eqe. 158

20. Karimzadeh S., & Askan A. Collection of microseismic intensity data: a model for Turkey. // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – Vol. 14 (5). – Article 396. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06812-1>
21. Masi A., Chiauzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2020. DOI:10.1007/s10518-019-00782-2
22. Rathje E.M., Abrahamson N.A., and Bray J.D. Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions. // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 1998. – Vol. 124. – pp. 150-159.
23. Silva P.G., Elez J., Giner-Robles J.L., Rodriguez-Pascua M.A., Perez-Lopez R., Roque-ro E., Martinez-Grana A. ESI-07 ShakeMaps for instrumental and historical events in the Betic Cordillera (SE Spain): An approach based on geological data and applied to seismic hazard. // *Quaternary International*. – 2017. – Vol. 451. – pp. 185-208. DOI: 10.1016/j.quaint.2016.10.020
24. Wang Y.S., Li X.J., & Zhou Z.H. A new instrumental measure of epicentral shaking intensity in Western China. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2013. – Vol. 11 (4). – pp. 913-924. DOI: 10.1007/s10518-013-9428-5
25. Wei Li, Shanyou Li, Liang Li, and Jinglong Han Computational Research on Seismic Intensity Based on Ground Motion Parameters. // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 838-841. – pp. 1595-1599.
26. Yazgan U. Empirical seismic fragility assessment with explicit modeling of spatial ground motion variability. // *Engineering Structures*. – 2015. – Vol. 100. – pp. 479-489. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.06.027
27. Zaalishvili V.B., Gogmachadze S.A. Geomorphological aspects of earthquake intensity effect in highlands. *Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction*. Kluwer academic Publishers. – Dordrecht/Boston/ London, 2000. – pp. 137-144.
28. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G, Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2020. – Vol. 10. No. 3. – pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

References

1. Aptikaev F.F. An exceedance probability of the influence in the Building Code. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 55-62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005 (In Russ.)
2. Zaalishvili V.B. Seismic microzonation according to the data of artificial excitation of vibrations of the soil stratum. Thesis of Cand. diss. Tbilisi, 1986, 21 p. (In Russ.)
3. Zaalishvili V.B., Odisharia A.V., Timchenko I.E., Otinashvili M.G., Gogmachadze S.A., Zaalishvili Z.V. Engineering macroseismic survey of the epicentral zone of the earthquake occurred on December 14, 2000. Theory of structures and seismic resistance. ISMEE named after K. S. Zavriev of the Academy of Sciences of Georgia, No. 2. Tbilisi, 2001, pp. 51-59. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Odisharia A.V., Timchenko I.E., Otinashvili M.G., Gogmachadze S.A., Zaalishvili Z.V. Engineering macroseismic survey of epicentral area of the earthquake on 14 December 2000. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2014. Vol. 4. No. 1. pp. 30-38. (In Russ.)
5. Materials of the Tbilisi earthquake on April 25, 2002. Academy of Sciences of Georgia. Institute of Structural Mechanics and Earthquake Engineering named after K. S. Zavriev. Tbilisi, 2005. 268 p. (In Russ.)
6. Shebalin N.V. On the assessment of seismic intensity. Seismic scale and methods for assessing seismic intensity. Moscow: Nauka, 1975. (In Russ.)
7. Androutselis T., Sarwar M.T., Eker U., Anastasopoulos P.C., Sakellariadis L., Agalianos A., & Anastasopoulos I. Real-Time Seismic Damage Assessment of Various Bridge Types Using a Nonlinear Three-Stage Least Squares Approach. *Journal of Infrastructure Systems*. 2020. Vol. 26 (3). Article 04020019. DOI: 10.1061/(asce)is.1943-555x.0000551
8. Ang A.H.-S. Reliability bases for seismic safety assessment and design. Proc. 4th U. S. National Conf. Earth Amg., EERI, Palm Spring. 1990. Vol. 1. pp. 29-45.

9. Aptikaev F.F., & Erteleva O.O. A New Generation Russian Seismic Scale. *Seismic Instruments*. 2017. Vol. 53 (2). pp. 146-154. DOI: 10.3103/s0747923917020025
10. Aptikaev F.F., Erteleva O.O., & Tokmulina G.M. Correlation between the Points of Different Seismic Intensity Scales. *Seismic Instruments*. 2021. Vol. 57 (1). pp. 75-87. DOI: 10.3103/s0747923921010035
11. Arias A. A measure of earthquake intensity, in *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. R. J. Hansen (Editor). MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 1970. pp. 438-483.
12. Campbell K. W., and Bozorgnia Y. Empirical analysis of strong ground motion from the 1992 Landers, California, earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1994. Vol. 84. No. 3. pp. 573-588.
13. Chernov Yu. K., and Sokolov V. Yu. Correlation of seismic intensity with Fourier acceleration spectra. *Phys. Chem. Earth*. 1999. Vol. 24 (6). pp. 523-528.
14. Constantin A. P., Moldovan I. A., Partheniu R., Grecu B., & Ionescu C. Correlations between macroseismic intensity values and ground motion measures of Vrancea (Romania) subcrustal earthquakes. *Romanian Journal of Physics*. 2021. Vol. 66 (5-6). Article 808.
15. Fajfar P. Elastic and Inelastic Design Spectra. *Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, vol. 2. 1995. pp. 1169-1178
16. Gabrichidze G., Lomidze G., Mukhadze T., Odisharia A., Timchenko I. April 2002 epicentral earthquake in Tbilisi, Georgia. *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B. C., Canada August 1-6, 2004*. Paper No. 1063.
17. Housner G. W. Behavior of structures during earthquakes. *J. Eng. Mech. Div. ASCEI*. 1959. Vol. 85. pp. 109-129.
18. Javahishvili et al. the Tbilisi earthquake of April 25, 2002 in the context of the seismic hazard of the Tbilisi urban area Article in *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* September. *Boll. Geof. Teor. Appl.* 2004. Vol. 45. pp. 169-185
19. Karim K. R., & Yamazaki F. Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2002. Vol. 31 (5). pp. 1191-1212. DOI: 10.1002/eqe. 158
20. Karimzadeh S., & Askan A. Collection of microseismic intensity data: a model for Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14 (5). Article 396. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06812-1>
21. Masi A., Chiauzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020. DOI:10.1007/s10518-019-00782-2
22. Rathje E. M., Abrahamson N. A., and Bray J. D. Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1998. Vol. 124. pp. 150-159.
23. Silva P. G., Elez J., Giner-Robles J. L., Rodriguez-Pascua M. A., Perez-Lopez R., Roque-ro E., Martinez-Grana A. ESI-07 ShakeMaps for instrumental and historical events in the Betic Cordillera (SE Spain): An approach based on geological data and applied to seismic hazard. *Quaternary International*. 2017. Vol. 451. pp. 185-208. DOI: 10.1016/j. quaint. 2016.10.020
24. Wang Y. S., Li X. J., & Zhou Z. H. A new instrumental measure of epicentral shaking intensity in Western China. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2013. Vol. 11 (4). pp. 913-924. DOI: 10.1007/s10518-013-9428-5
25. Wei Li, Shanyou Li, Liang Li, and Jinglong Han Computational Research on Seismic Intensity Based on Ground Motion Parameters. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 838-841. pp. 1595-1599.
26. Yazgan U. Empirical seismic fragility assessment with explicit modeling of spatial ground motion variability. *Engineering Structures*. 2015. Vol. 100. pp. 479-489. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2015.06.027
27. Zaalishvili V. B., Gogmachadze S. A. Geomorphological aspects of earthquake intensity effect in highlands. *Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction*. Kluwer academic Publishers. Dordrecht/Boston/ London, 2000. pp. 137-144.
28. Zaalishvili V. B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G, Melkov D. A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.