

# Оценка сейсмических воздействий на южном склоне Большого Кавказа (Азербайджан) по сценарным землетрясениям: параметры и модели ускорения перемещения грунта

*Г. Р. Бабаев, С. Т. Агаева, Т. Т. Исмаил-заде, И. Б. Муради,  
Я. Н. Алиев, 2019*

Институт геологии и геофизики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан  
Поступила 25 марта 2019 г.

Оцінено параметри сценарних землетрусів для детерміністичної оцінки сейсмічної небезпеки південного схилу Великого Кавказу (Азербайджан). В історичному минулому у досліджуваному регіоні відбувалися сильні землетруси. Серія відчутних і сильних землетрусів, що сталися за останні роки на південному схилі Великого Кавказу в межах території Азербайджану в Балакане (14.10.2012,  $M=5,6$ ; 29.06.2014,  $M=5,3$ ); Загаталі (07.05.2012,  $M=5,7$ ; 18.05.2012,  $M=5,0$ ; 05.06.2018,  $M=5,5$ ); Шеки ("рій" землетрусів 05.02.2004,  $M=3,2+4,6$ ); Шеки-Огуз (04.09.2015,  $M=5,9$ ); Габалі (04.10.2014,  $M=5,0$ ); Ісмаїлі (05.02.2019,  $M=5,2$ ), показує зростання сейсмічної активності цього регіону і ще раз доводить необхідність і актуальність продовження досліджень з оцінювання сейсмічної небезпеки. Для сценарних землетрусів різної віддаленості побудовано середні спектри реакції (при 5%-му згасанні) коливань поверхні ґрунту, оцінено максимальні горизонтальні прискорення переміщення ґрунту за максимальної можливої магнітуди, побудовано серії моделей пікових прискорень переміщень ґрунту і відповідної інтенсивності за бальною шкалою MSK-64, а також карту розподілу амплітуди посилення сейсмічної хвилі. Порівняльний аналіз дає змогу припустити, що посилення амплітуди хвилі виникає внаслідок резонансних процесів, тобто пухкіші шари ґрунту впливають на збільшення амплітуди сейсмічної хвилі внаслідок різниці імпедансів цих шарів і твердіших порід. Збільшення інтенсивності сейсмічності спостерігається на ділянках з пропластками слабкоцементованих піщано-глинистих відкладів, хоча існують шари пісковиків, вапняків і піщаних мергелів різної потужності. Показано, що переміщення ґрунту не є одновимірними і не орієнтовані чітко за напрямком на сейсмічне джерело.

**Ключові слова:** сценарний землетрус, південний схил Великого Кавказу, максимальні прискорення, посилення амплітуди сейсмічної хвилі.

**Введение.** Землетрясение — одно из самых разрушительных и неизбежных природных катастроф. В последние годы наблюдается заметное повышение сейсмической активности, которое наносит серьезный урон инфраструктуре и является причиной многочисленных людских потерь. В качестве примера можно привести целый ряд сильных землетрясений, произошедших в мире за 2007—2018 гг.: Испания (2010,  $M=6,3$ ), США, Калифорния

(2010,  $M=7,2$ ), Курильские острова (2007,  $M=8,0$ ), Чили (2007,  $M=7,7$ ; 2010,  $M=8,8$ ; 2014,  $M=8,4$ ; 2015,  $M=8,3$ ), Турция (2010,  $M=6$ ), Гаити (2010,  $M=7,1$ ), Индонезия (2009,  $M=7,6$ ; 2016,  $M=7,8$ ), Полинезия, острова Самоа (2009,  $M=8,1$ ), Грузия (2009,  $M=5,9$ ), Италия (2009,  $M=6,3$ ; 2016,  $M=6,2$ ), Греция (2008,  $M=6,4$ ), Китай (2008,  $M=7,9$ ), Суматра (2007,  $M=8,3$ ; 2012,  $M=8,6$ ), Пакистан (2011,  $M=7,0$ ), Япония (2011,  $M=9,0$ ), Непал (2015,  $M=8,0$ ), Таджикистан (2015,

$M = 7,2$ ), Эквадор (2016,  $M = 7,8$ ), Румыния (2016,  $M = 7,0$ ), Иран (2017,  $M = 7,2$ ), Мексика (2017,  $M = 7,1$ ), Афганистан (2018,  $M = 6,1$ ), Япония (2018,  $M = 6,1$ ), Индонезия (2018,  $M = 7,5$ ) и другие сильные землетрясения, которые могут послужить примером этому.

Разрушительные последствия сильных землетрясений и гибель людей еще раз доказывают, что человечество в целом бесцельно перед этой природной катастрофой, несмотря на то, что в последние годы при оценке сейсмической опасности сейсмологи во многих странах мира применяют новые современные методы и научные подходы. Исследования в этом направлении совершенствуются, и интерес ученых к этой актуальной проблеме возрастает.

В историческом прошлом в исследуемом регионе произошло несколько сильных и разрушительных землетрясений, явившихся причиной существенных экономических потерь, а также многочисленные ощутимые землетрясения (427,  $M \sim 6,7$ ; 1667,  $M = 6,9$ ; 1669,  $M = 5,7$ ; 1842,  $M \sim 4,5$ ; 1828,  $M = 5,7$ ; 1859,  $M = 5,9$ ; 1872,  $M = 5,7$ ; 1902,  $M = 6,9$ ; 1960,  $M \sim 4,5$ ; 1981,  $M \sim 5,5$ ; 2012,  $M \sim 5,6$ ; 2014,  $M \sim 4,5$ ) [Agayeva, Babayev, 2009; Telesca et al., 2013; Babayev et al., 2014, 2017; Бабаев и др., 2017; Telesca et al., 2017]. Большая часть землетрясений фиксируется в восточной части южного склона Большого Кавказа: самые сильные землетрясения с магнитудой  $M = 6,9$  произошли в окрестностях городов Шамахи и Исмаиллы, землетрясения с магнитудой  $M = 4,5 \div 5,5$  — вблизи городов Шеки и Балакен. Землетрясения, произошедшие здесь в 2012 г., подтверждают вышесказанное. В результате активного развития инфраструктуры в Азербайджане (развитие химической, нефтегазовой промышленности и т. д.), интенсивного процесса урбанизации, недостаточного урегулирования окружающей среды и увеличения плотности населения значительно повысилась сейсмическая опасность. До настоящего времени в исследуемом регионе характерные особенности и классификация геологических опасностей не были достаточно изучены

с позиции применения современных методик с интегрированным анализом.

Цель настоящего исследования — вероятностная и детерминистская оценка сейсмической опасности в сейсмоактивных зонах южного склона Большого Кавказа (Балакен-Загатальской, Шеки-Габалинской; Шамахи-Исмаиллинской) за период времени 1902—2018 гг. с привлечением современных методов и подходов.

**Сейсмотектоника.** Современная структура Кавказа сформировалась на альпийском этапе тектогенеза в пространственных пределах, охватывающих южный край Евразийского континента и северный край Южно-Азербайджанского сегмента Центрально-Иранского микроконтинента (микроплиты, квазиplatformы) [Alizadeh et al., 2016]. С тектонической точки зрения регион Большого Кавказа располагается в зоне коллизии Аравийской и Евразийской плит [Mckenzie, 1972; Şengör et al., 1985; Philip et al., 1989; Reilinger et al., 2006]. Сейсмогенные структуры региона систематизируются в результате постоянного непрерывного движения Аравийской плиты в северо-северо-восточном направлении и обуславливают образования горной цепи и тектонических разломов [Геология ..., 2005]. Территория Азербайджана охватывает восточную часть Кавказского сегмента Средиземноморского складчатого пояса, характерной чертой строения земной коры которой, как и Кавказа в целом, является ее тектоническая неоднородность, выраженная в сложном соотношении составляющих его структурно-формационных единиц с различным литолого-стратиграфическим разрезом, характером деформаций и историей геологического развития [Alizadeh et al., 2016]. В схеме тектонического районирования Азербайджана складчатая система Большого Кавказа является одной из главных структур первого порядка [Исмаил-Заде и др., 2008; Геология Азербайджана, 2015]. Эта система — центральное звено Средиземноморского складчатого пояса. На западе и востоке она простирается до ограничивающих ее морей (Черного и Каспийского)

и переклиально замыкается на Таманском и Абшеронском полуостровах [Alizadeh et al., 2016]. В пределах южного склона Большого Кавказа выделяются сложные тектонические зоны и структуры [Геология ..., 2005, 2015].

**Сейсмоактивные зоны южного склона Большого Кавказа.** Азербайджанская часть южного склона Большого Кавказа по геологическому строению и пространственному распределению сильных землетрясений, по инструментальным и макросейсмическим данным состоит из следующих сейсмоактивных зон: Балакен-Загатальская, Шеки-Габалинская, Шамахи-Исмаиллинская (рис. 1).

*Балакен-Загатальская сейсмоактивная зона* располагается на крайнем северо-западе азербайджанской части Большого Кавказа. Землетрясения здесь чаще всего возникают при сильных дагестанских и грузинских землетрясениях, которые вызывают возбуждение местных очагов [Ага-

мирзоев, 1987]. Первые сведения о землетрясениях в этой зоне датируются 1853 г. По инструментальным и макросейсмическим данным характерной особенностью Балакен-Загатальской сейсмоактивной зоны является большая частота землетрясений из одной и той же очаговой зоны и их слабая интенсивность. Более половины произошедших здесь землетрясений имеют малую энергетическую величину ( $K$ ), большинство из них ощущается в одном или двух населенных пунктах с интенсивностью не более 4–5 баллов. В этой зоне известно только одно сильное землетрясение, произошедшее в 02.09.1936 с 7-балльным эффектом, названное в литературе "Загатальским" [Малиновский, 1940]. Анализ инструментального и макросейсмического материала показывает, что эпицентры всех местных землетрясений в этой зоне расположены по трем параллельным линиям широтного простирания [Агамирзоев, 1987].

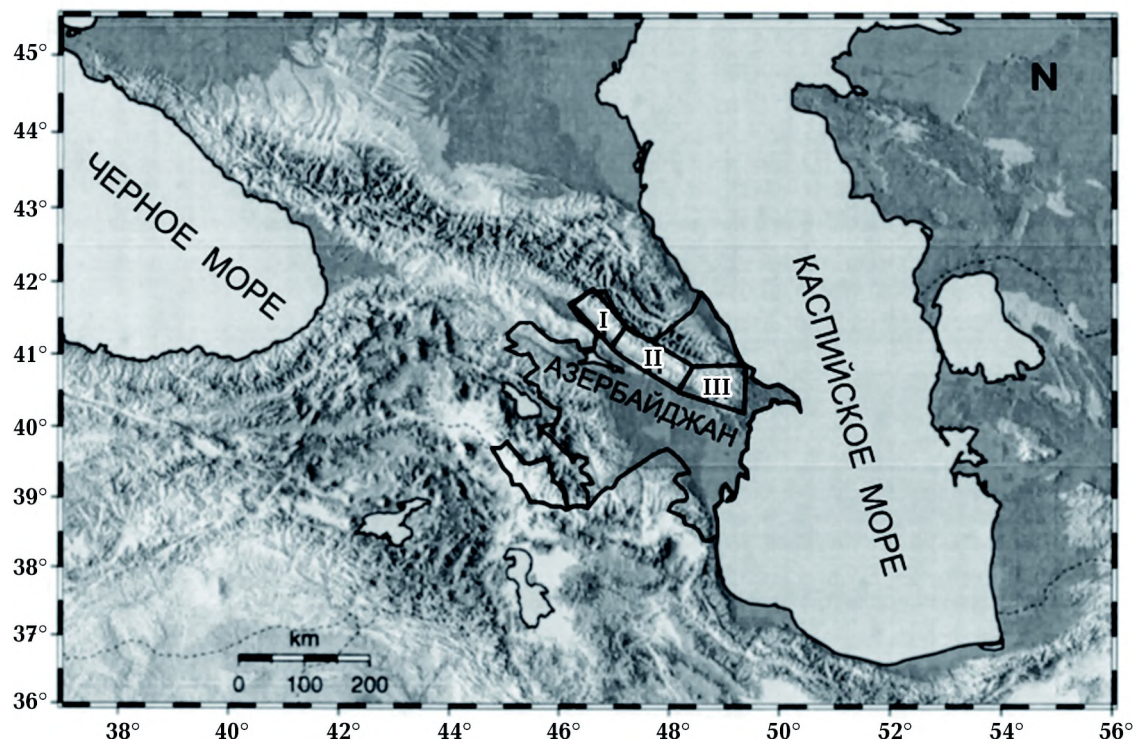


Рис. 1. Районирование южного склона Большого Кавказа (Азербайджан) (I — Балакен-Загатальская; II — Шеки-Габалинская; III — Шамахи-Исмаиллинская) по [Агамирзоев, 1987; Агаева, 1999; Агаева, Babayev, 2009; Кадиров и др., 2013].

*Шеки-Габалинская сейсмоактивная зона* вытянута в широтном направлении и располагается в 50—60 км восточнее Балакен-Загатальской зоны. По сохранившимся макросейсмическим сведениям в этой зоне известны землетрясения с 1875 г. По данным Н. В. Малиновского, до 1828 г. в пределах Шеки-Габалинской сейсмоактивной зоны произошло около 35 землетрясений из местных очагов со слабым сейсмическим эффектом [Малиновский, 1940]. С максимальной интенсивностью в 7 баллов землетрясения происходили в 1903, 1928, 1953, 1963 гг. Землетрясения 1903 и 1928 г. имели узколокальный характер и затухали, не выходя за пределы Шекинского района.

*Шамахи-Исмаиллинская сейсмоактивная зона* по распределению сильных землетрясений, инструментальным и макросейсмическим данным отличается высокой сейсмической активностью. Уникальной особенностью поверхностной структуры Шамахи-Исмаиллинской сейсмоактивной зоны являются сложно построенные тектонические покровы и перекрытия [Исмаил-Заде и др., 2008; Геология Азербайджана, 2015]. Удаленные катастрофические землетрясения ощущаются в собственно Шамахинской зоне и Исмаиллинской подзоне [Агамирзоев, 1987] с интенсивностью не более 5—6 баллов. Несмотря на то, что с 1902 г. собственные очаги этой зоны порождают землетрясения интенсивностью не более 6—7 баллов, за исторический период высокая сейсмическая активность Шамахи-Исмаиллинской сейсмоактивной зоны предопределяется собственными потенциальными очагами, генерирующими землетрясения 8—9 баллов (землетрясения 1667, 1859, 1872, 1902 гг.) [Абих, 1862; Агаева, 1999; Agayeva, Babayev, 2009].

**Методика исследований.** В последние годы изучение новых современных методов оценки сейсмической опасности находится в центре внимания сейсмологов, и интерес к исследованиям в этом направлении возрастает. Две основные мировые тенденции, разработанные на основе ве-

роятностных и детерминистских теорий, модифицируются новыми дополнениями и подходами, обогащаются и модернизируются элементами сейсмического мониторинга. В представленном исследовании были использованы два модифицированных метода оценки сейсмической опасности путем применения элементов неопределенностного подхода и на основе теории квазивероятности [Peresan et al., 2011; Zuccolo et al., 2011].

Основными параметрами здесь являются инструментальные данные землетрясений (магнитуда, эпицентральное расстояние, глубина очага землетрясения), физические и динамические свойства грунта. Применяя их и вычисляя максимальную амплитуду ускорения грунтов слоев фундамента, рассчитывают максимальные амплитуды колебаний земной поверхности, корреляционное сравнение которой сейсмической интенсивностью осуществляется по общепринятой международной шкале [Trifunac, Brady, 1975].

Механизм построения сценария землетрясения является ключевым для оценки сейсмической опасности посредством применения детерминистского подхода. Прежде всего, такие сценарии позволяют точно оценить величину землетрясения (или землетрясений) и масштаб (степень) сейсмических катастроф, которые могут произойти в будущем. Для подготовки успешного сценария для исследуемого региона необходимо наряду с информацией о сейсмологических параметрах определенных выбранных сейсмических событий и возможных эффектах этих событий учитывать все сейсмические свойства региона, а также литологический состав пород слоев грунта, как глубоких, так и приповерхностных. Другими словами, хороший сценарий должен включать в себя интегрированный комплекс геологических, геофизических, топографических, геоморфологических и сейсмических данных, информацию о разломах для визуального мониторинга возможных последствий землетрясения и характеристики сейсмического воздействия исследуемо-

го района [Бабаев, 2017]. Крайне важно исследовать и собрать точную предварительную информацию для подготовки сейсмического сценария, т. е. каталог сейсмических событий, происходящих во время исторических и инструментальных наблюдений с целью дальнейшего правильного выбора сценарных землетрясений.

Метод исследования включает в себя рассмотрение сейсмогенерирующих элементов, позволяющий определить величины распределения максимального ускорения и интенсивности для каждой ячейки квадратной сетки. В данном расчете участвовало 46 квадратных ячеек сеток с шагом в среднем  $10 \times 10 \text{ км}^2$ , составляющих площадь исследуемой территории (рис. 2). В представленном исследовании границы изучаемого региона оконтурены согласно "Схеме тектонического районирования территории Азербайджанской Республики" [Исмаил-Заде и др., 2008; Геология Азербайджана, 2015].

Очень важным для подготовки сейсмического сценария является сбор и подготовка достоверной исходной информации: каталогов сейсмических событий как за

период инструментальных наблюдений, так и исторических событий. Была сделана выборка землетрясений, соответствующая исследуемой территории из общего каталога землетрясений, произошедших на территории Азербайджана по данным Республиканского центра сейсмологической службы (РЦСС) НАН Азербайджана (табл. 1).

Всего за выбранный интервал времени с 2003 по 2018 гг. на исследуемой территории произошло 2924 землетрясения (см. табл. 1), из них 2400 слабых землетрясений с магнитудой  $M_L < 3,5$ ; 524 умеренных и сильных землетрясений с магнитудой  $M_L \geq 3,5$ .

По материалам и данным [Исмаил-Заде и др., 2008; Геология Азербайджана, 2015; Alizadeh et al., 2016], была проведена классификация грунтовых толщ азербайджанской части южного склона Большого Кавказа по литологии и выделены типичные грунтовые толщи исследуемой площади (табл. 2).

С помощью программы SHAKE были подсчитаны значения усиления амплитуды сейсмических волн, проходящих че-

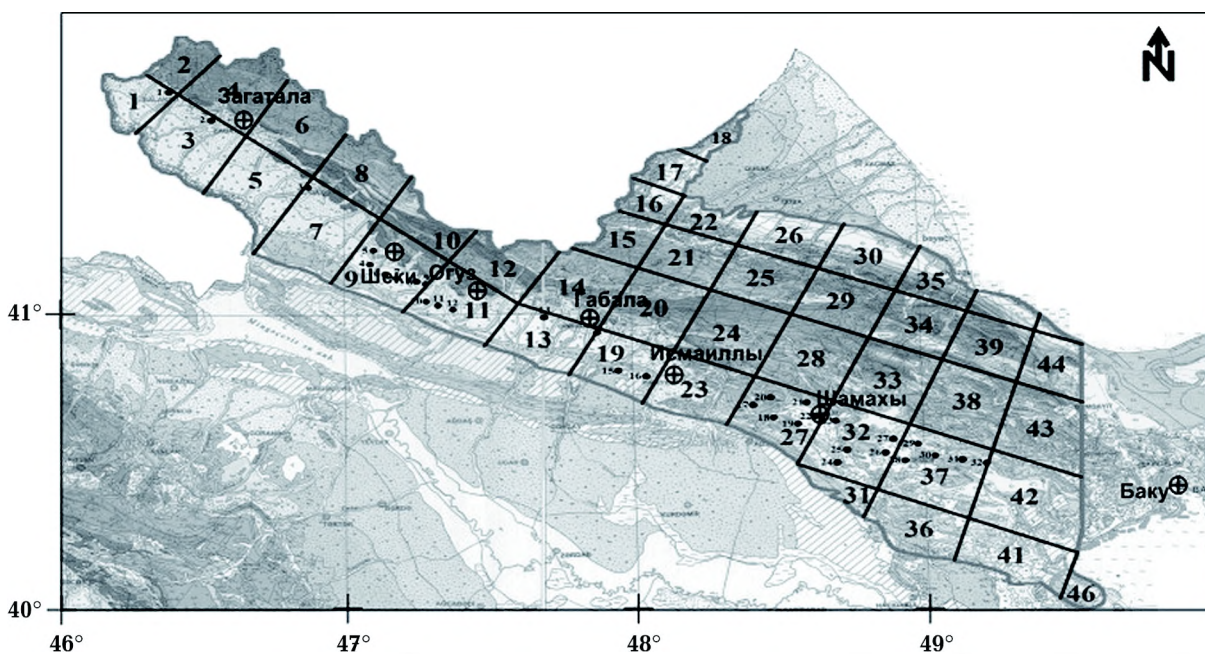


Рис. 2. Площадь исследуемой территории, покрытая квадратной сеткой. Картой-основой была принята геологическая карта Азербайджана 2008 г. в масштабе  $M 1 : 500\,000$ .

Т а б л и ц а 1. Выборка землетрясений по магнитудам за 2003—2018 гг.

Год	$M_L < 3,5$	$M_L \geq 3,5$	$H$ , км	Всего
2003	305	22	2—60	327
2004	148	31	3—59	179
2005	95	24	1—62	119
2006	107	19	2—59	126
2007	92	41	3—60	133
2008	116	28	3—61	114
2009	115	27	3—60	142
2010	201	36	2—60	237
2011	210	24	3—60	234
2012	192	49	2—60	241
2013	205	28	2—60	233
2014	210	24	2—60	234
2015	206	31	2—60	237
2016	120	53	2—60	173
2017	57	46	2—60	103
2018	51	41	6—23	92
Итого:	2400	524	—	2924

рез грунтовые толщи для типичной литологии. При подсчете был использован средний тип грунта горизонтальной линейной среды [Аптикаев, Шебалин, 1988].

Для того чтобы рассчитать ожидаемую (вероятностную) максимальную амплитуду ускорения сотрясений грунта слоев фундамента, для каждой ячейки квадратной сетки используются следующие формулы (1), (2) [Аптикаев, Копничев, 1979].

Для удаленных событий:

$$\begin{aligned} \text{Lg } A_p &= 0,80M - 2,3\text{Lg } R + 0,80, \\ A &< 160 \text{ см/с}^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Для близких событий:

$$\begin{aligned} \text{Lg } A_p &= 0,28M - 0,8\text{Lg } R + 1,7, \\ A &\geq 160 \text{ см/с}^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $A_p$  — максимальное ускорение, Гал;  $M$  — магнитуда;  $R$  — гипоцентрально расстояние, км.

В результате были построены результативные сеточные модели распределения максимального ускорения колебаний грунта на поверхности по макросейсмическим параметрам сценарных землетрясений. В этой части исследования сейсмический эффект землетрясения оценивался на основе использования двух независимых параметров: макросейсмической интенсивности и пикового (максимального) ускорения колебаний грунта. Преимущество заключается в том, что метод позволяет в компактной форме представлять большие массивы исходной информации, легко проводить суммарный учет сопоставления многих характеристик, а также привлекать к анализу математические методы исследования [Бабаев, 2017]. Анализ материалов дает возможность обнаружить черты сходства и различия сейсмических районов.

Для исследуемой территории в качестве элемента оценки сейсмической опасности была использована зависимость между магнитудой землетрясения и протяженностью очаговых зон, а также рассмотрены и проанализированы различные математические формулы, отражающие зависимость между протяженностью очаговых зон и магнитудой сильных землетрясений, произошедших в различных регионах мира. Сравнение протяженности очаговых зон, определенных на основе различных данных, отражающее зависимость между протяженностью очаговых зон и магнитудой сильных землетрясений, произо-

шедших в различных регионах мира, показывает, что они полностью согласуются между собой [Маммадли, 2007].

**Сценарные землетрясения.** По характерным особенностям сейсмоактивных зон, которые выражаются в периодическом повторении сильных землетрясений в одних и тех же районах, были выбраны четыре сценарных землетрясений. Первое (близкое к зоне исследования) Гянджинское — разрушительное землетрясение, произошедшее в г. Гяндже в 1139 г.; второе (местное, подразумевается в зоне исследования) Шамахинское — катастрофическое землетрясение, произошедшее в г. Ша-

**Т а б л и ц а 2.** Типичные грунтовые толщи азербайджанской части южного склона Большого Кавказа и их динамические особенности

Возраст	Литология	$V_P$ , км/с	$V_S$ , км/с	Плотность, кг/см <sup>3</sup>	Amp
Кайнозой, голоцен (современные отложения)	Аргиллиты, известняки, мергель, песчаники	1,50	0,35	1,9	1,10
Кайнозой, четвертичная система, верхний плейстоцен	Тонкослоистый песчаник	3,30	2,02	2,35	0,53
Кайнозой, четвертичная система, нижний плейстоцен	Аргиллиты и песчаники	2,10	0,50	2,00	0,95
Кайнозой, неогеновая система	Доломиты, мергель, песчаники	2,67	0,88	1,98	0,75
Кайнозой, палеогеновая система	Известняки, алевролиты, мергель	2,23	0,69	1,87	0,83
Мезозой, меловая система	Песчаники, алевролиты, глинистые сланцы	3,93	1,63	2,38	0,58
Мезозой, юрская система	Алевролит, мергель	4,18	1,82	2,49	0,55

Примечание: Amp — фактор усиления амплитуды сейсмической волны (amplification factor).

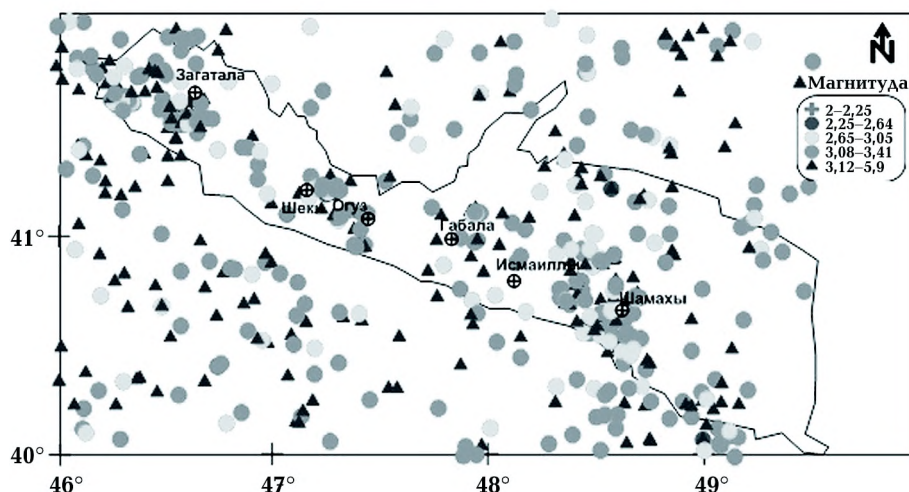


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений за период 2003—2018 гг.

махе в 1902 г.; третье (местное — в зоне исследования) Шеки-Огузское — сильное землетрясение, произошедшее между г. Шеки и г. Огуз в 2015 г.; четвертое (местное — в зоне исследования) Загатальское — сильное землетрясение, произошедшее в г. Загатала в 2018 г. Краткое описание каждого выбранного сценарного землетрясения приводится ниже.

**Гянджинское (Гей-Гельское) землетрясение 1139 г.** Координаты эпицентра — 40,3 с. ш., 46,3 в. д., магнитуда 6,8 (ориентировочно), глубина очага 15 км, интенсивность сотрясений в эпицентре около 9 баллов. Гянджинское землетрясение стало первым сейсмическим событием в Азербайджане, последствия которого изучались на достаточно высоком научном уровне. В эпицентре интенсивность сотрясений достигала, по современным оценкам, 9 баллов. Летописные данные, приведенные в ряде публикаций, свидетельствуют о катастрофическом землетрясении в районе горы Алгарак (ныне Кяпяз) и сильном землетрясении в Гяндже [Бюс, 1948]. Разрушается г. Гянджа. Погибает много людей. Землетрясение сопровождается густым туманом, покрывающим горы и поля. В районе горы Кяпяз происходят сильные обвалы, оползни и изменения рельефа. Эпицентр этого события отнесен к району оз. Гейгель.

**Шамакинское землетрясение 13 февраля 1902 г.** Координаты эпицентра — 40,7 с. ш., 48,6 в. д., магнитуда 6,9 (ориентировочно), глубина очага 15 км, интенсивность сотрясений в эпицентре 8—9 баллов. Шамакинское землетрясение 13 февраля 1902 г. стало в Азербайджане одним из крупнейших сейсмических событий в XX ст. Число жертв в г. Шамахе точно не указано, во многих источниках ошибочно повторяются цифры, сообщенные В. Н. Вебером, только для окрестных сел (86 убитых и 60 раненых). Число жертв в Шамахе несомненно было большим (в некоторых источниках более 1000 человек) [Вебер, 1903].

**Шеки-Огузское землетрясение 4 сентября 2015 г.** Координаты эпицентра землетрясения — 41,0 с. ш., 47,0 в. д., эпицентр землетрясения находился в 29 км юго-восточнее г. Шеки, на границе между г. Шеки и г. Огуз (рис. 3), магнитуда землетрясения составила 5,9, землетрясение произошло на глубине 13 км, где сила толчков составила 7 баллов, в ближайших населенных пунктах ощущались толчки до 5—6 баллов. Сильное землетрясение привело к серьезным последствиям в Огузском районе Азербайджана.

**Загатальское землетрясение 5 июня 2018 г.** Сильное землетрясение с магнитудой 5,5 произошло 05.06.2018 г. в 22:40 по местному времени в 16 км к югу от



г. Загаталы (см. рис. 3) (41,5 с. ш., 46,7 в. д.). Землетрясение произошло на глубине 10 км. В эпицентре сила толчков составила 6 баллов. В окрестностях она ощущалась в пределах 3—5 баллов.

На основе каталога составлена карта эпицентров для исследуемой территории (см. рис. 3). Землетрясения происходили на различных глубинах в пределах 2—60 км.

Как видно из рис. 3, в основном активными с высокой плотностью эпицентров являются Загатальская и Шамахинская сейсмоактивные зоны. Эти зоны характеризуются умеренными и сильными землетрясениями с магнитудой  $M_L = 3,42 \div 5,9$ . Менее выражена Шекинская зона, здесь преобладают, в основном, землетрясения с магнитудой  $M_L = 3,06 \div 3,41$ .

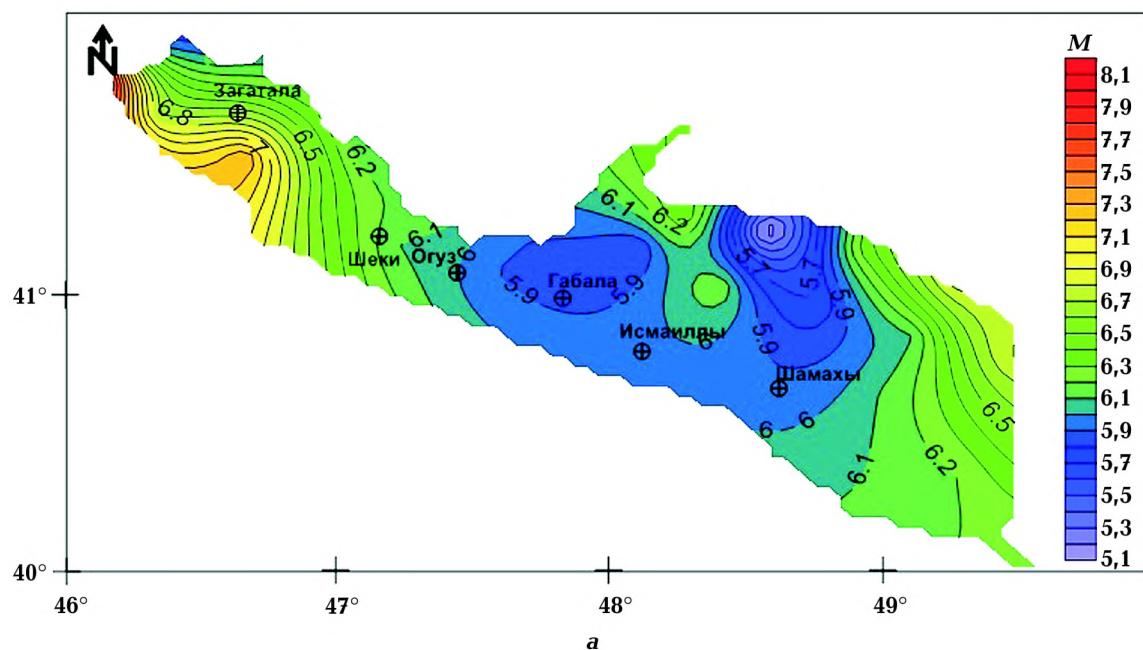
**Результаты моделирования.** Результативные модели, отражающие опасность, — это, в основном, сценарии ожидаемых сильных подвижек в значениях максимального ускорения грунта и интенсивности соответственно. Интегрированные численные модели, построенные на основе эмпирического подхода, вычисляются по существующим общепринятым формулам и программным обеспечениям, а также согласно предположениям, анализу реальных условий среды и макросейсмических данных сильных и ощутимых землетрясений. Для визуального наблюдения изменения интенсивности используется корреляционная взаимосвязь параметров сильных колебательных движений со шкалой интенсивности МСК-64, что позволит спрогнозировать сейсмическую интенсивность исследуемой территории для планомерных мероприятий и будущей оценки с целью уменьшения уровня сейсмического бедствия. Макросейсмические интенсивности остаются удобным параметром для оценки ущерба от землетрясений. В результате на исследуемой территории анализируются максимальные амплитуды ускорений сотрясений грунта и распределение интенсивности землетрясений, и с этой точки зрения производится оценка сейсмической

опасности. В этом случае применение элементов неопределенного метода заключается в построении сценарных моделей землетрясений на основе макросейсмических данных и записей сейсмических колебаний [Zuccolo et al., 2011]. На различных этапах исследования по указанной методике были построены карты распределения расчетных максимальных магнитуд (рис. 4, а), максимального ускорения смещения грунта (МУГ, PGA) зоны исследования от Гянджинского землетрясения 1139 г. (рис. 5, а), Шамахинского землетрясения 1902 г. (рис. 5, б), Шеки-Огузского 2015 г. (рис. 5, в), Загатальского землетрясения 2018 г. (рис. 5, г) и проведен сравнительный анализ с картой (см. рис. 4) расчетной интенсивности в баллах шкалы MSK-64 (рис. 4, б) и с картой усиления сейсмических колебаний грунтовыми толщами (рис. 7, см. ниже).

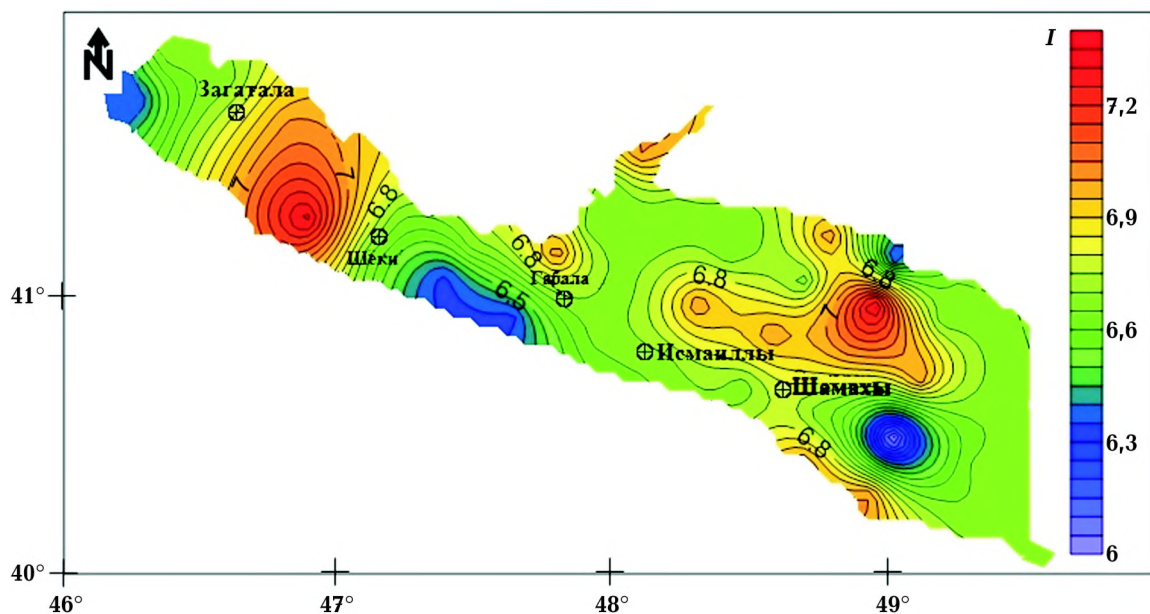
На рис. 4, а приводится карта распределения расчетных магнитуд, построенная согласно зависимости между протяженностью очаговых зон исследуемой территории [Кангарли, 2003] и магнитудой, используя эмпирические корреляционные зависимости [Ризниченко, 1974; Utsi, 1961; Шебалин, 1968; Губин ..., 1974; Bonilla et al., 1984; Уломов, 1993; Маммадди, 2007]. Карта иллюстрирует магнитуду, которую способен генерировать каждый разлом различной протяженности в исследуемой зоне. Протяженность разломов подсчитывалась по программе ArcGIS 10.0 [ArcGIS Desktop: Release 10. Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2011, Redlands].

Как видно из рис. 4, а, максимальная магнитуда наблюдается в Загатальской и Шамахи-Исмаиллинской зонах. В Загатальской зоне могут происходить землетрясения с магнитудой  $M_{\max} = 7,3$ , в Шамахи-Исмаиллинской — с магнитудой  $M_{\max} = 6,9$ . Территория между г. Шеки и г. Исмаиллы характеризуется меньшими значениями магнитуды  $M_{\max} = 5,9 \div 6,1$ .

Согласно рис. 5, а пиковые амплитуды горизонтальной компоненты ускорений  $A_{\max} = 140 \div 145$  Гал ( $\text{см}/\text{с}^2$ ) сейсмических воздействий от Гянджинского землетря-



а



б

Рис. 4. Карта распределения расчетных магнитуд (а) и расчетной интенсивности (б).

сения 1139 г. отмечены в Загатальской зоне. По карте распределения расчетных магнитуд ( $M_{\max}$ ) эти значения соответствуют участку с магнитудой  $M_{\max} = 7,3$  в районе г. Загатала. В Загатальской зоне по карте распределения расчетной интенсивности эти значения соответствуют интенсивности  $I = 7,2$  (см. рис. 4, б). Низкие значения максимального ускорения грунта

наблюдаются в Шамахи-Исмаиллинской зоне (г. Шамахи характеризуется значениями максимального ускорения колебаний грунта 40—50 см/с<sup>2</sup>).

Пиковые амплитуды горизонтальной компоненты ускорений  $A_{\max} = 420 + 440$  см/с<sup>2</sup> сейсмических воздействий от Шамахинского землетрясения 1902 г. отмечены в Шамахинской зоне (см. рис. 5, б). По кар-

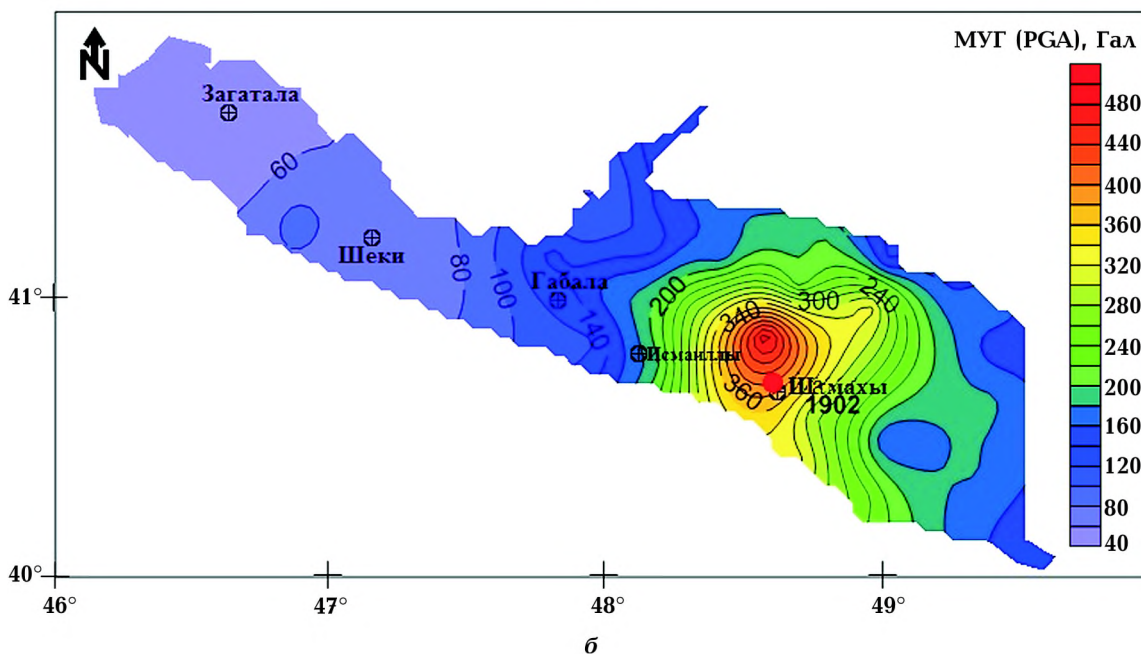
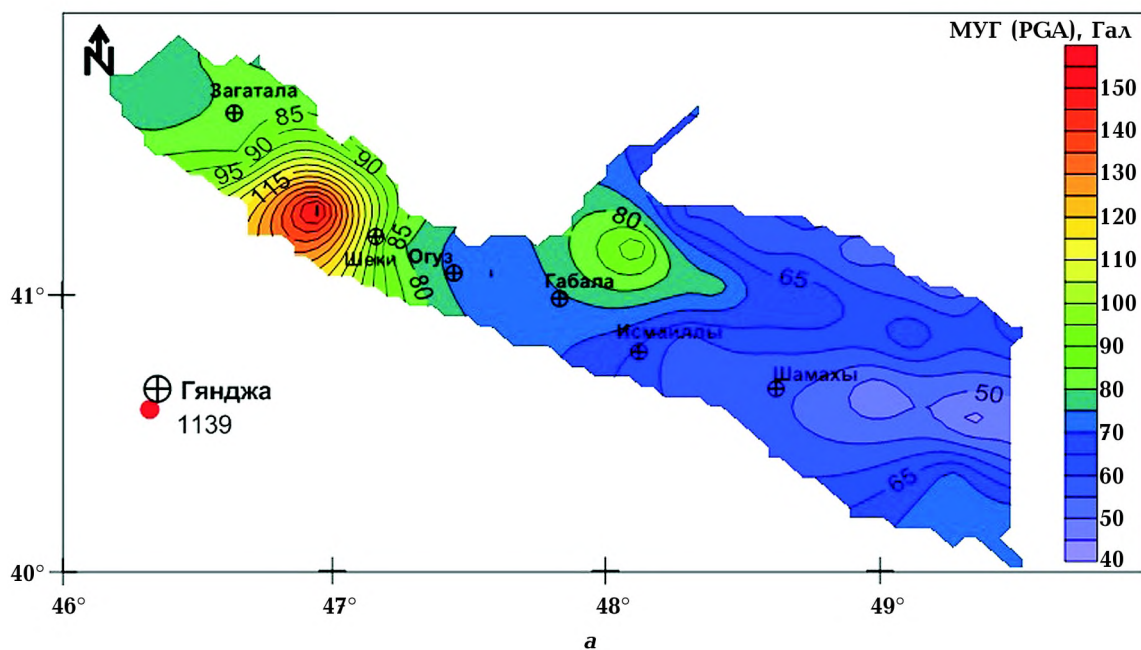
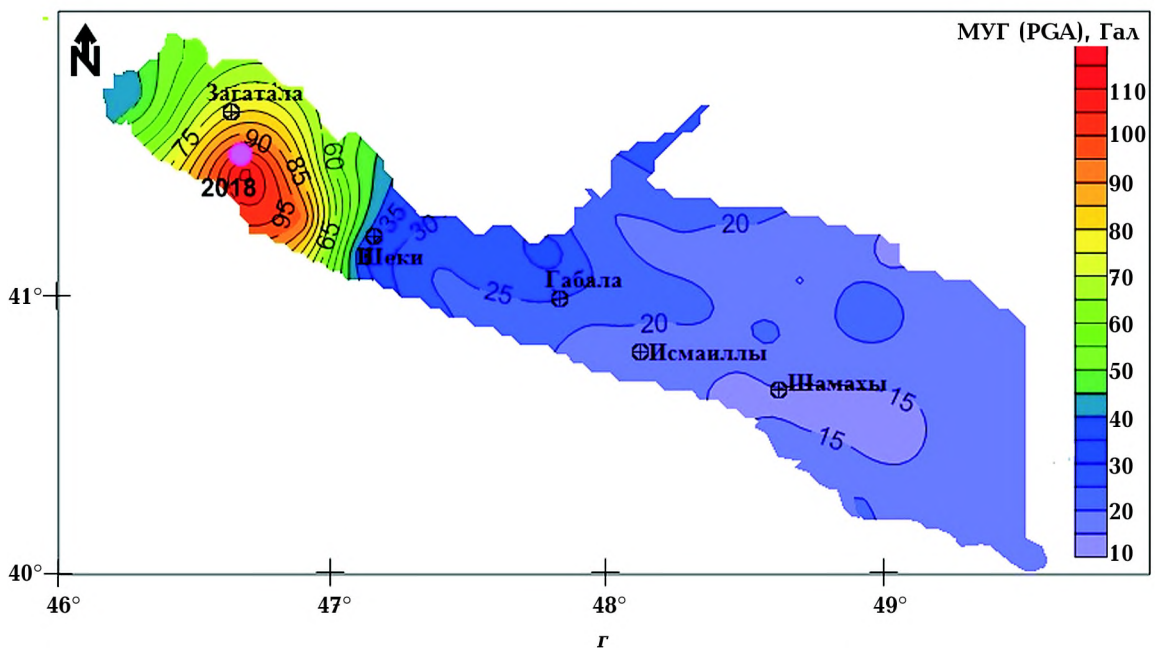
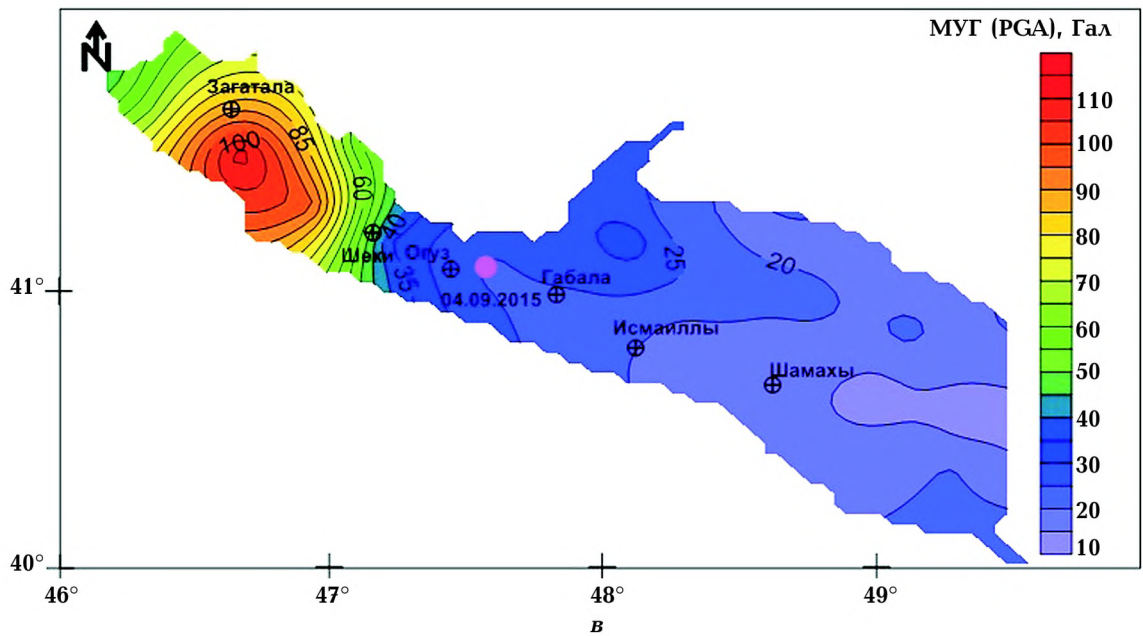


Рис. 5. Карта сейсмического эффекта от Гянджинского землетрясения 1139 г. (а), Шамахинского землетрясения 1902 г. (б) (красный кружок — эпицентр землетрясения), Шеки-Огузско-

те распределения расчетных магнитуд ( $M_{\max}$ ) значения ускорений соответствуют участку с магнитудой  $M_{\max} = 6,9$  в районе г. Шамахи. По карте распределения расчетной интенсивности эти значения соответствуют интенсивности  $I = 6,9 + 7,2$  (см. рис. 4, б). Низкие значения максимального ускорения грунта наблюдают-

ся в Загатальской зоне ( $40 \text{ см/с}^2$ ), в Шекинской подзоне ( $60\text{—}80 \text{ см/с}^2$ ), в г. Габала и его окрестностях максимальное ускорение колебаний грунта достигает значения  $140 \text{ см/с}^2$ .

Пиковые амплитуды горизонтальной компоненты ускорений  $A_{\max} = 25 + 35$  Гал сейсмических воздействий от Шеки-Огузско-



го землетрясения 2015 г. (в) (розовый кружок — эпицентр землетрясения) и Загаталяского землетрясения 2018 г. (г) в значениях максимального ускорения колебания грунта (МУГ, PGA).

го землетрясения 2015 г. отмечены в Шеки-Габалинской зоне (см. рис. 5, в). По карте распределения расчетных магнитуд ( $M_{\max}$ ) (см. рис. 4, а) эти значения ускорений соответствуют участку с магнитудой  $M_{\max} = 5,9$  на территории г. Огуз.

Пиковые амплитуды горизонтальной компоненты ускорений  $A_{\max} = 95 \div 100 \text{ см/с}^2$

сейсмических воздействий от Загаталяского землетрясения 2018 г. отмечены в Загаталяской зоне (см. рис. 5, г). По карте распределения расчетных магнитуд ( $M_{\max}$ ) (см. рис. 4, а) эти значения соответствуют участку с магнитудой  $M_{\max} = 7,3$ . В Загаталяской зоне по карте распределения расчетной интенсивности (см. рис. 4, б) эти

значения соответствуют интенсивности  $I = 7,2$ . Низкие значения максимального ускорения грунта 20—30 см/с<sup>2</sup> наблюдаются на значительной по площади территории, начиная от Шекинской включительно до Шамахи-Исмаиллинской зоны (в г. Шамахи и его окрестностях значения варьируют в пределах 10—15 см/с<sup>2</sup>).

Для визуального наблюдения изменения интенсивности используется корреляционная взаимосвязь параметров сильных колебательных движений со шкалой интенсивности МСК-64, что позволяет прогнозировать сейсмическую интенсивность исследуемой территории для плановых мероприятий и будущей оценки с целью уменьшения уровня сейсмического бедствия. По карте распределения расчетной интенсивности (см. рис. 4, б) на фоне преобладания на исследуемой территории участков с интенсивностью  $I = 6,6$  выделяются две зоны с высокой интенсивностью: Загатальская характеризуется интенсивностью  $I = 7,2$ ; Шамахинская — интенсивностью  $I = 6,9 + 7,2$ . В Шамахинской зоне, в юго-восточном направлении от г. Шамахи, наблюдается участок с относительно пониженной интенсивностью  $I = 6,3$ .

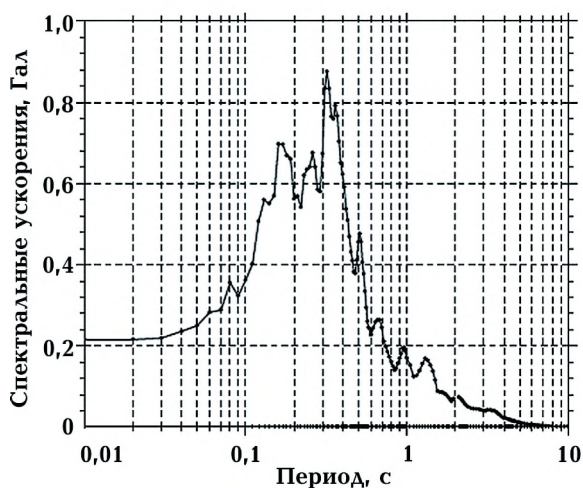


Рис. 6. Спектры реакции (при 5%-ном затухании) колебаний для вариантов сценарного землетрясения.

На рис. 6 показаны спектры реакции (для затухания  $D = 5\%$ ), рассчитанные для сценарного землетрясения  $M 6,3$ .

По результатам исследования литологических особенностей была построена карта усиления сейсмических колебаний грунтовыми толщами (рис. 7). Сравнительный анализ позволяет сделать предположение, что усиление возникает вследст-

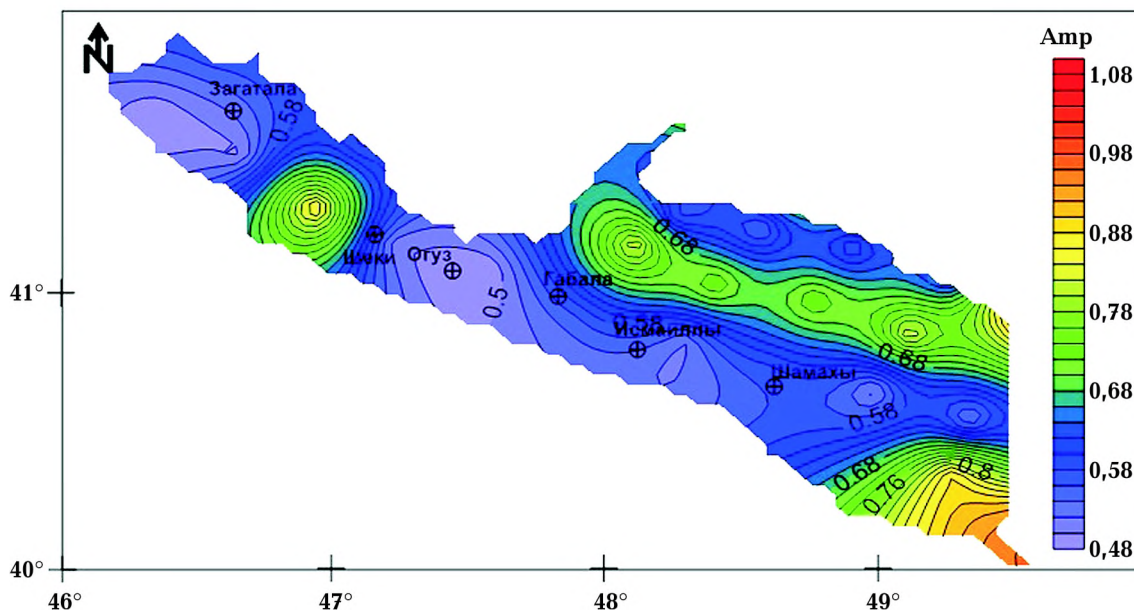


Рис. 7. Карта усиления сейсмических колебаний грунтовыми толщами.

вие резонансных процессов, т. е. более рыхлые слои грунта оказывают воздействие на увеличение амплитуды сейсмической волны вследствие разности импедансов этих слоев и более твердых пород.

**Заключение.** С литологической точки зрения увеличение интенсивности сейсмичности наблюдается в областях с пропластками слабоцементированных песчано-глинистых отложений, хотя существуют слои песчаников, известняков и песчаных мергелей различной мощности. Такие области выявлены в западной (Загатала—Шеки), северной (Шамахи—Исмаиллы) и восточной частях исследуемого региона. Эти области зон характеризуются высокими значениями коэффициента усиления амплитуды сейсмической волны по сравнению с другими зонами исследуемой территории. Коэффициент усиления амплитуды колеблется в диапазоне 0,88—1,00, принимая наибольшие (максимальные) значения в западной и восточной зонах исследуемой территории. Одной важ-

ной особенностью исследований является уменьшение коэффициента усиления амплитуды до 0,48 между западной и восточной (главным образом, центральной части) областями и в то же время увеличение коэффициента усиления до 0,78 в широтном направлении северной части исследуемой территории. Учитывая макросейсмические параметры сильного землетрясения, произошедшего в Гяндже в 1139 г., рассчитанные максимальные ускорения сотрясений грунтов от Загатала-Шекинской и Исмаиллы-Шамахинской зон варьируют в диапазоне от 40 до 140 Гал соответственно. Согласно макросейсмическим параметрам Загатальского землетрясения, произошедшего в 2018 г., рассчитанные значения максимальных ускорений сотрясений грунта колеблются от 95 до 10 Гал в том же направлении. Такое резкое уменьшение значения ускорений грунта вероятно связано с эффектом демпфирования грунта в вышеупомянутых направлениях.

### Список литературы

- Абих Г.В. Землетрясения в Шемахе и Эрзеруме в мае 1859 г. В сб.: *Записки Кавказского Отдела Императорского Русского географического общества*. Тифлис, 1862, Книга V, С. 1—19.
- Агаева С.Т. Поля упругих напряжений сейсмогенных структур южного склона Большого Кавказа (в пределах Азербайджана): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Баку, 1999, 150 с.
- Агамирзоев Р.А. Сейсмоструктура Азербайджанской части Большого Кавказа. Баку: Элм, 1987, 118 с.
- Аптикаев Ф., Копничев Ю. Учет механизма очага землетрясения при прогнозе параметров сильных движений. *Докл. АН СССР*. 1979. Т. 247. № 4. С. 822—825.
- Аптикаев Ф.Ф., Шебакин Н.В. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта. Исследования по сейсмической опасности. *Вопросы инженерной сейсмологии*. 1988. № 29. С. 98—108.
- Бабаев Г.Р. Моделирование сильных колебаний грунта территории города Баку по микросейсмическим данным и параметрам ощутимых сценарных землетрясений: Дис. ... д-ра по наукам о Земле. Баку, 2017, 265 с.
- Бабаев Г.Р., Ахмедова Э.В., Кадилов Ф.А. Анализ напряженно-деформированного состояния Кавказского региона (Азербайджан) по векторам максимальных горизонтальных напряжений и с использованием программ проекта "World Stress Map". *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 3. С. 26—39. doi: <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i3.2017.104026>.

- Бюс Е.И. Сейсмические условия Закавказья. Ч. 1. Хронология землетрясений в Закавказье. Тбилиси: Изд-во АН Груз. ССР, 1948, 304 с.
- Вебер В.Н. Шемахинское землетрясение 31.01.1902 г. Труды геол. комитета СПб, 1903.
- Геология Азербайджана. Т. IV. Тектоника. Гл. ред. В. Е. Хаин, ак. А. А. Ализаде. Баку: Нафта-пресс, 2005, 506 с.
- Геология Азербайджана. Под ред. А. А. Ализаде, Т. 2, Раздел 3 "Тектоника". Баку, Элм, 2015, С. 192—213.
- Губин И.Е. Сейсмогенные разрывы и их значение для сейсморайонирования. *Геотектоника*. № 6. 1974. С. 29—40.
- Исмаил-Заде А.Д., Кангарли Т.Н., Коробанов В.В., Мустафаев Г.В., Нариманов А.А., Рустамов М.И. Геологическая карта Азербайджана. Масштаб 1 : 500 000. Объяснительная записка. Баку, 2008, 85 с.
- Кадиров Ф.А., Кадыров А.Г., Бабаев Г.Р., Агаева С.Т., Мамедов С.К., Гарагезова Н.Р., Сафаров Р.Т. Сейсмическое районирование южного склона Большого Кавказа по фрактальным особенностям землетрясений, напряженному состоянию и по данным GPS скоростей. *Физика Земли*. 2013. № 4. С. 111—119.
- Кангарли Т.Н. Тектоническая расслоенность структурно-вещественных комплексов азербайджанской части Большого Кавказа. *Оценка сейсмической опасности и риска в нефтегазоносных областях: Тез. докл. Междунар. конф. посвящ. 100-летию Шемахинского землетрясения*. Баку, 2003, С. 218—219.
- Малиновский Н.В. Материалы по сейсмическому изучению Азерб. ССР. Баку: Изд-во Азерб. фил. АН ССР, 1940, 62 с.
- Маммадли Т.Я. Слабая сейсмичность территории Азербайджана и ее связь с современной геодинамикой: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Баку, 2007, 350 с. (на азерб. языке).
- Ризниченко Ю.В. Геолого-геофизические данные решения проблемы сейсмической опасности. В сб.: Материалы конференции по изучению сейсмичности и глубинного строения Азербайджана. Баку: Элм, 1974, С. 3—19.
- Шебалин Н.В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании. В кн.: *Сейсмическое районирование СССР*. Москва: Наука, 1968, С. 95—111.
- Уломов В.И. Глобальная упорядоченность сейсмогеодинамических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений. В сб.: *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии*. Вып. 1. Москва: Изд-во ОИФЗ РАН, 1993, С. 24—44.
- Agayeva, S. T., & Babayev, G. R. (2009). Analysis of earthquake focal mechanisms for Greater and Lesser Caucasus applying the method of World Stress Map: *Proc. of the Geology Institute Azerbaijan National Academy of Sciences* (pp. 40—44). Baku: Nafta-Press.
- Alizadeh, A. A., Guliyev, I. S., Kadirov, F. A., & Eppelbaum, L. V. (2016). *Geosciences of Azerbaijan. Vol. I: Geology*. Springer International Publishing, 340 p. doi: 1007/978-3-319-27395-2.239.
- Babayev, G., Tibaldi, A., Bonali, F., & Kadirov, F. (2014). Evaluation of earthquake-induced strain in promoting mud eruptions: the case of Shamakhi—Gobustan—Absheron areas, Azerbaijan. *Natural hazards*, 72(2), 789—808. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1035-5>.
- Babayev, G., Gadirov, F., Agayeva, S., & Ismail-Zade, T. (2017). Assessment of seismic processes in the southern slope of the Greater Caucasus (Azerbaijan): *Proc. of AASSA NAS KR Regional Workshop "Science, State, Structures and Public Joint Efforts to Reduce the Risks and Consequences of Earthquakes"*, Bishkek, Kirgizistan, October (pp. 25—30). "Printhouse" Publishing House.
- Bonilla, M. G., Mark, R. K., & Lienkaemper, J. J. (1984). Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length and surface fault displacement. *Bulletin of Seismology Society of American*, 74, 2379—2411.

- McKenzie, D.P. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 30(2), 109—185. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>.
- Peresan, A., Zuccolo, E., Vaccari, F., Gorshkov, A., Panza, G.F. (2011). Neo-deterministic seismic hazard and pattern recognition techniques: Time-dependent scenarios for North-Eastern Italy. *Pure and Applied Geophysics*, 168(3-4), 583—607. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0166-1>.
- Philip, H., Cisternas, A., Gvishiani, A., & Gorshkov, A. (1989). The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics*, 161(1-2), 1—21. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90297-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90297-7).
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, Sh., Ergintav, S., Cakmak, R., ... Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical research*, 111(B5), B05411. <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>.
- Şengör, A.M.C., Görür, N. & Taroplu, F. (1985). Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In: Bøddle, K.T. & Chrýstýe-Blýck, N. (Eds.), *Strike-Slip Faulting and Basin Formation* (pp. 227—264). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publications, 37.
- Telesca, L., Kadirov, F., Yetirmishli, G., Safarov, F., Babayev, G., & Ismaylova, S. (2017). Statistical analysis of the 2003—2016 seismicity of Azerbaijan and surrounding areas. *Journal of Seismology*, 21(6), 1467—1485. doi: <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9677-x>.
- Telesca, L., Lovallo, M., Babayev, G., & Kadirov, F. (2013). Spectral and informational analysis of seismicity: an application to the 1996—2012 seismicity of Northern Caucasus-Azerbaijan part of Greater Caucasus-Kopet Dag Region. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(23), 6064—6078. doi: 10.1016/j.physa.2013.07.031.
- Trifunac, M.D., & Brady A.G. (1975). On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of ground motion records. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(1), 139—162.
- Utsi, T. (1961). Statistical study of occurrence of aftershocks. *Geophysical Magazine*, 30, 521—605.
- Zuccolo, E., Vaccari, F., Peresan, A., & Panza, G.F. (2011). Neo-Deterministic and Probabilistic Seismic Hazard Assessments: A Comparison over the Italian Territory. *Pure and Applied Geophysics*, 168(1-2), 69—83. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0151-8>.

## Seismic effect assessment of the southern slope of Greater Caucasus (Azerbaijan) based on the earthquake scenarios: ground parameters and acceleration models

**G.R. Babayev, S.T. Agayeva, T.T. Ismail-zade, I.B. Muradi,  
Ya.N. Aliyev, 2019**

In this paper, earthquake scenarios parameters were assessed for deterministic seismic hazard of the southern slope of Greater Caucasus (Azerbaijan). Historically, there occurred strong earthquakes in the studied region. Series of soft and strong earthquakes occurred for the recent years on the southern slope of Greater Caucasus in Azerbaijan in Balakan (14.10.2012,  $M = 5,6$ ; 29.06.2014,  $M = 5,3$ ); Zagatala (07.05.2012,  $M = 5,7$ ;



18.05.2012,  $M=5,0$ ; 05.06.2018,  $M=5,5$ ); Sheki (earthquake swarm 05.02.2004,  $M=3,2 \div 4,6$ ); Sheki-Oguz (04.09.2015,  $M=5,9$ ); Gabala 04.10.2014,  $M=5,0$ ); Ismailli (05.02.2019,  $M=5,2$ ) demonstrates the increase of seismic activity in the given region and proves once again the necessity and actuality of continuation of the seismic hazard assessment researches. For earthquake scenarios of various distances, average response spectrum (5 % attenuation) of surface ground fluctuation was plotted, peak ground acceleration were assessed at the maximum magnitude, series of peak ground acceleration models were simulated at respective MSK-64 intensity, and also amplification factor distribution map. The comparative analysis allows presuming that amplification occurs due to the resonance processes, that is, softer soils produce seismic wave amplitude amplification as a result of impedance differences of those layers and harder rocks. Seismic intensity increase is observed in the sites with soft-cemented sand-clayey soils, although with sandstones, limestone and sandy marlstone of various thicknesses. It is demonstrated that ground displacements are various and not obviously oriented towards seismic source.

**Key words:** scenario earthquake, the southern slope of the Greater Caucasus, maximum accelerations, amplification of the seismic wave amplitude.

## References

- Abikh, G.V. (1862). Earthquakes in Shemakha and Erzurum in May 1859. In *Notes of the Caucasian Department of the Imperial Russian Geographical Society* (Book V, pp. 1—19). Tiflis (in Russian).
- Agayeva, S. (1999). *Fields of elastic stresses of seismogenic structures of the southern slope of the Greater Caucasus (within Azerbaijan)*: Candidate's thesis. Baku, 150 p. (in Russian).
- Agamirzoyev, R.A. (1987). *Seismotectonics of the Azerbaijan part of the Greater Caucasus*. Baku: Elm, 118 p. (in Russian).
- Aptikaev, F., & Kopnichev, Yu. (1979). Accounting for the mechanism of the earthquake source when predicting the parameters of strong motions. *Doklady AN SSSR*, 247(4), 822—825 (in Russian).
- Aptikaev, F.F., & Shebalin, N.V. (1988). Refinement of correlations between the level of macroseismic effect and dynamic parameters of soil movement. Seismic hazard studies. *Voprosy inzhenernoy seismologii*, (29), 98—108 (in Russian).
- Babayev G.R. (2017). *Modeling of strong ground fluctuations in the territory of the city of Baku according to microseismic data and parameters of tangible scenario earthquakes*: Doctor's thesis. Baku, 265 p. (in Russian).
- Babayev, G.R., Akhmedova, E.V., & Kadirov, F.A. (2017). Analysis of stress-strain state of Caucasus region (Azerbaijan) on the basis of maximum horizontal stress vectors and World Stress Map. Application technique. *Geofizicheskiy zhurnal*, 39(3), 26—39. doi: <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i3.2017.104026> (in Russian).
- Byus, E.I. (1948). *Seismic conditions of Transcaucasia. Part 1. Chronology of earthquakes in Transcaucasia*. Tbilisi: Publishing House of the Academy of Sciences of the Georgian SSR, 304 p. (in Russian).
- Weber, V.N. (1903). Shemakha earthquake of January 31, 1902. *Proc. of the St. Petersburg Geological Committee* (in Russian).
- Khain, V.E., Alizade, Ak.A. (Eds.). (2005). *Geology of Azerbaijan, Vol. IV. Tectonics*. Baku: Nafta Press (in Russian).
- Alizade, Ak.A. (Ed.). (2015). Tectonics. In *Geology of Azerbaijan* (Vol. 2, Section 3, pp. 192—213). Baku, Elm (in Russian).
- Gubin, I.E. (1974). Seismogenic fractures and their significance for seismic zoning. *Geotektonika*, (6), 29—40 (in Russian).
- Ismail-Zade, A.D., Kangarli, T.N., Korobanov, V.V., Mustafaev, G.V., Narimanov, A.A., & Rustamov, M.I. (2008). *Geological map of Azerbaijan. Scale 1 : 500,000. Explanatory note*. Baku, 85 p. (in Russian).

- Kadirov, F.A., Kadyrov, A.G., Babayev, G.R., Agayeva, S.T., Mamedov, S.K., Garagezova, N.R., & Safarov, R.T. (2013). Seismic zoning of the southern slope of Greater Caucasus from the fractal parameters of the earthquakes, stress state, and GPS velocities. *Fizika Zemli*, (4), 111—119 (in Russian).
- Kangarli, T.N. (2003). Tectonic stratification of structural-material complexes of the Azerbaijani part of the Greater Caucasus. *Assessment of seismic hazard and risk in oil and gas bearing areas: Report Theses of the International Conference on the 100<sup>th</sup> anniversary of the Shamakhi earthquake* (pp. 218—219). Baku (in Russian).
- Malinovskiy, N.V. (1940). Materials on the seismic study of the Azerbaijan SSR. Baku: Publ. House of the Azerbaijan Branch of the Academy of Sciences of the USSR, 62 p. (in Russian).
- Mammadli, T.Ya. (2007). *Weak seismicity of the territory of Azerbaijan and its connection with modern geodynamics*: Doctor's thesis. Baku, 350 p. (in Azeri).
- Riznichenko, Yu.V. (1974). Geological and geophysical data for solving the problem of seismic hazard. In *Proc. of the conference on the study of seismicity and the deep structure of Azerbaijan* (pp. 3—19). Baku: Elm (in Russian).
- Shebalin, N.V. (1968). Methods of using engineering seismological data in seismic zoning. In *Seismic zoning of the USSR* (pp. 95—111). Moscow: Nauka (in Russian).
- Ulomov, V.I. (1993). Global ordering of seismic-geodynamic structures and some aspects of seismic zoning and long-term earthquake prediction. In *Seismicity and seismic zoning of Northern Eurasia* (is. 1, pp. 24—44). Moscow: Publ. House of the Institute of Physics of the Earth RAS (in Russian).
- Agayeva, S.T., & Babayev, G.R. (2009). Analysis of earthquake focal mechanisms for Greater and Lesser Caucasus applying the method of World Stress Map: *Proc. of the Geology Institute Azerbaijan National Academy of Sciences* (pp. 40—44). Baku: Nafta-Press.
- Alizadeh, A.A., Guliyev, I.S., Kadirov, F.A., & Eppelbaum, L.V. (2016). *Geosciences of Azerbaijan. Vol. I: Geology*. Springer International Publishing, 340 p. doi: 1007/978-3-319-27395-2.239.
- Babayev, G., Tibaldi, A., Bonali, F., & Kadirov, F. (2014). Evaluation of earthquake-induced strain in promoting mud eruptions: the case of Shamakhi—Gobustan—Absheron areas, Azerbaijan. *Natural hazards*, 72(2), 789—808. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1035-5>.
- Babayev, G., Gadirov, F., Agayeva, S., & Ismail-Zade, T. (2017). Assessment of seismic processes in the southern slope of the Greater Caucasus (Azerbaijan): *Proc. of AASSA NAS KR Regional Workshop "Science, State, Structures and Public Joint Efforts to Reduce the Risks and Consequences of Earthquakes"*, Bishkek, Kirgizistan, October (pp. 25—30). "Printhouse" Publishing House.
- Bonilla, M.G., Mark, R.K., & Lienkaemper, J.J. (1984). Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length and surface fault displacement. *Bulletin of Seismology Society of American*, 74, 2379—2411.
- McKenzie, D.P. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 30(2), 109—185. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>.
- Peresan, A., Zuccolo, E., Vaccari, F., Gorshkov, A., Panza, G.F. (2011). Neo-deterministic seismic hazard and pattern recognition techniques: Time-dependent scenarios for North-Eastern Italy. *Pure and Applied Geophysics*, 168(3-4), 583—607. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0166-1>.
- Philip, H., Cisternas, A., Gvishiani, A., & Gorshkov, A. (1989). The Caucasus: An actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics*, 161(1-2), 1—21. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90297-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90297-7).
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, Sh., Ergintav, S., Cakmak, R., ... Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical research*, 111(B5), B05411. <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>.

- Şengör, A. M. C., Görür, N. & Taroplu, F. (1985). Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In: Bøddle, K. T. & Chrýstýe-Blýck, N. (Eds.), *Strike-Slip Faulting and Basin Formation* (pp. 227—264). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publications, 37.
- Telesca, L., Kadirov, F., Yetirmishli, G., Safarov, F., Babayev, G., & Ismaylova, S. (2017). Statistical analysis of the 2003—2016 seismicity of Azerbaijan and surrounding areas. *Journal of Seismology*, 21(6), 1467—1485. doi: <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9677-x>.
- Telesca, L., Lovallo, M., Babayev, G., & Kadirov, F. (2013). Spectral and informational analysis of seismicity: an application to the 1996—2012 seismicity of Northern Caucasus-Azerbaijan part of Greater Caucasus-Kopet Dag Region. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(23), 6064—6078. doi: [10.1016/j.physa.2013.07.031](https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.07.031).
- Trifunac, M. D., & Brady A. G. (1975). On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of ground motion records. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(1), 139—162.
- Utsi, T. (1961). Statistical study of occurrence of aftershocks. *Geophysical Magazine*, 30, 521—605.
- Zuccolo, E., Vaccari, F., Peresan, A., & Panza, G. F. (2011). Neo-Deterministic and Probabilistic Seismic Hazard Assessments: A Comparison over the Italian Territory. *Pure and Applied Geophysics*, 168(1-2), 69—83. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0151-8>.