
ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.1:551.252

**КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ
ИНТЕНСИВНОСТИ НА БАЛКАНАХ
(ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ХОРВАТИИ 2020 г.)**

© 2021 г. Н. И. Фролова^{1,*}, И. П. Габсатарова^{2,**}, С. П. Суцев^{3,***}, А. Н. Угаров³,
Н. С. Малаева¹

¹ Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

² Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба РАН” (ФИЦ ЕГС РАН),
Ленина пр., д. 189, Обнинск, Калужская обл., 249035 Россия

³ Московский государственный технический университет им. Баумана (МГТУ),
2-я Бауманская ул., д. 5, Москва, 105005 Россия

*E-mail: frolovanina7@gmail.com

** E-mail: ira@gsras.ru

***E-mail: garo@esrc.ru

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

После доработки 29.05.2021 г.

Принята к публикации 09.06.2021 г.

Проведены исследования, направленные на калибровку параметров модели макросейсмического поля в одной из зон на Балканах по материалам землетрясений 2020 г. в Хорватии. Зона расположена в пределах континентального района Хорватии, находящегося на границе Динаридов и Южной части Паннонского бассейна, входящих в Альпийско-Гималайский сейсмоактивный пояс. При исследовании производилось сравнение наборов параметров макросейсмического поля, полученных при калибровке модели в другом районе этого пояса, расположенном на Кавказе и имеющем схожие черты тектонического развития. Для более точной оценки последствий землетрясений рассматривались оперативные сообщения нескольких сейсмологических центров, а для учета направленности излучения и выбора сейсмогенного разлома земной коры — механизмы очагов. Выполнен сравнительный анализ наблюдаемых и расчетных значений сейсмической интенсивности, полученных с помощью системы “Экстремум”. Полученные результаты калибровки дополнили Базу данных, используемую для эффективной оперативной оценки последствий землетрясений, и будут применяться системой “Экстремум” при возникновении разрушительных землетрясений в районе Балканского полуострова.

Ключевые слова: оперативные оценки потерь в случае землетрясений, калибровка модели макросейсмического поля, районы аналоги, Альпийско-Гималайский сейсмоактивный пояс, информационная система “Экстремум”

DOI: 10.31857/S0869780921050040

ВВЕДЕНИЕ

25 лет минуло со дня смерти Николая Виссарионовича Шебалина — Ученого, посвятившего свою яркую творческую научную деятельность исследованию макросейсмического поля и очагов сильных землетрясений мира. Высокосейсмичные Балканы относятся к числу районов, в которых под его руководством выполнен научный проект ЮНДП/ЮНЕСКО “Исследование сейсмичности Балканского региона”, составлены каталоги исторических (до 1901 г.) и относительно современных землетрясений 1901–1970 гг., а также уникальный Атлас карт изосейст сильней-

ших землетрясений Балканского региона. Анализ собранных макросейсмических данных позволил выявить закономерности затухания в регионе и определить границы подзон с квазиустойчивыми параметрами макросейсмического поля. Полученные результаты востребованы и в настоящее время, в частности, хорватскими сейсмологами при анализе сейсмичности и описании макросейсмического эффекта от сильных землетрясений на территории Хорватии и ее окружения [26, 29]. Добавим, что в других регионах Евразии, развитием установленного закона затухания на данных современных землетрясений и калибровкой его

параметров занимаются многие российские исследователи, назовем лишь несколько последних работ [9, 10, 12, 5, 6, 16]. Эти исследования обеспечивают выполнение калибровки математических моделей, позволяющих с высокой точностью прогнозировать параметры макросейсмического поля в зависимости от координат эпицентра и магнитуды. По координатам подтверждается факт попадания эпицентра в зону, для которой заблаговременно в процессе калибровки вычислены параметры затухания, включающие коэффициенты уравнения Н.В. Шебалина, зависящие от расстояния и направления от эпицентра до точки наблюдения. Зависимость затухания от направления на точку позволяет формировать анизотропное поле интенсивностей, достаточно детально описывающее реальные сейсмические проявления.

В работе [12] описаны результаты исследования, направленные на калибровку системы на основе анализа параметров сильных землетрясений в 2019 г. в другом районе Балкан – Албании. Была показана приемлемость применения при моделировании макросейсмического поля в оперативном режиме одинаковых параметров математической модели для районов-аналогов Альпийско-Гималайского пояса (отдельных зон на Кавказе и Балканах), выделенных на основе общих сеймотектонических признаков. Такая возможность позволяет считать близкими по своим значениям коэффициенты закона затухания, отношение большой и малой осей эллиптических изосейст высших баллов и ориентацию макросейсмического поля, заданную азимутом оси вытянутости изосейст. Сделан вывод, что необходимо продолжение работ по калибровке макросейсмического поля, а также по установлению зон-аналогов со схожими сеймотектоническими условиями, что, несомненно, будет способствовать формализации и ускорению процесса использования макросейсмической информации в службах МЧС для эффективного расчета возможных потерь от сильных землетрясений в реальном масштабе времени.

В 2020 г. вновь зафиксирована активизация уже в северной части Балканской зоны, где произошло два сильных землетрясения в Хорватии: 22 марта с $M = 5.5$ и интенсивностью VII–VIII баллов по шкале MSK [35]; 29 декабря с $M = 6.3$, при котором колебания грунта достигали интенсивности VIII–IX баллов по шкале EMS [36]. Оба землетрясения стали причиной значительных разрушений народнохозяйственных объектов. Первое из названных землетрясений произошло в густонаселенном районе, вблизи г. Загреб – столицы Хорватии. Второе, еще более сильное по магнитуде землетрясение, произошло южнее, но также в обжитой континентальной части Хорватии, где длительное время не происходило столь

сильных землетрясений. Оба землетрясения детально описаны, что позволило использовать их для калибровки системы “Экстремум” в Балканской зоне.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Территория Хорватии принадлежит широкой пограничной зоне между Африкой и Евразией, на которую влияет конвергенция Африканской и Евразийской плит. В рассматриваемой геотектонической зоне расположено несколько отдельных структур: Паннонский бассейн, Восточные Альпы, Динариды, переходная зона между Динаридами и Адриатической платформой, а также сама Адриатическая платформа [13]. Сейсмическая активность на стыке Адриатического, Альпийско-Паннонского и Динарского блоков, вероятно, вызвана независимым движением Адриатической микроплиты. Континентальная часть Хорватии занимает территорию самой западной части Динаридов и южной части Паннонского бассейна.

Опубликован представительный ряд работ, отражающих проявления сейсмичности в Хорватии [26, 28–30, 33–35 и др.]. В табл. 1 перечислены сильнейшие землетрясения, а также указаны параметры изосейст ряда исторических землетрясений (эллиптичность (сжатие) и азимут простирания большой оси) по [37, 38], которые важны при калибровке и будут использованы в настоящей работе.

Из обширного материала приведем необходимый короткий обзор, который показывает значимость работ в этом районе. В проявлении сейсмичности на территории Хорватии выделяются несколько сейсмоактивных зон: “Загреб”, “Ново-Место-Кршко”, “Карловац-Метлика” и “Покупско-Петринья”. Среди них в связи с проявлением активизации в 2020 г. наиболее интересны две – “Загреб” (1 на рис. 1) и “Покупско-Петринья” (2 на рис. 1). Самая важная из них – сейсмическая зона Загреба, охватывает горы Медведница и собственно г. Загреб с прилегающими территориями. Эпицентры сильнейших землетрясений в этой зоне в основном расположены на северо-западных склонах гор Медведница.

Сильнейшее землетрясение, известное как “Великое землетрясение в Загребе”, произошло 9 ноября 1880 г. недалеко от Кашины, в деревне Планина. Это было первое землетрясение в Хорватии, для которого значение очаговой глубины (16 км) было определено на основе макросейсмических исследований. Анализ эффектов землетрясения позволил определить эпицентральной интенсивность (VIII MSK–64). Макросейсмиче-

Таблица 1. Сильнейшие землетрясения в Хорватии (с XVII в. по 2019 г.) по данным сейсмологической службы Хорватии и [33, 34]

Дата	Место	Магнитуда	Интенсивность MSK	Эллиптичность ϵ , сжатие k , азимут ζ по [37, 38]*
6 апреля 1667	Дубровник	—	IX–X	—
9 ноября 1880	Загреб	6.3	VIII	—
2 июля 1898	Триль	—	IX	—
17 декабря 1905	Загреб	<4.6	—	$\epsilon = 0.873, k = 1.145, \zeta = 48^\circ$
2 января 1906	Загреб	5.8	—	$\epsilon = 0.695, k = 1.438, \zeta = 169^\circ$
8 октября 1909	Покупле	5.8	VIII	$\epsilon = 0.749, k = 1.335, \zeta = 149^\circ$
12 марта 1916	Винодол	5.8	VIII	$\epsilon = 0.664, k = 1.506, \zeta = 142^\circ$
27 марта 1938	Новиград-Подравски	5.6	VIII	$\epsilon = 0.823, k = 1.215, \zeta = 88^\circ$
29 декабря 1942	Имотски	6.2	VIII–IX	$\epsilon = 0.999, k = 1.001, \zeta = 11^\circ$
11 января 1962	Макарска	6.1	VIII–IX	$\epsilon = 0.938, k = 1.066, \zeta = 99^\circ$
13 апреля 1964	Диль Гора	5.7	VIII	$\epsilon = 0.740, k = 1.351, \zeta = 162^\circ$
5 сентября 1996	Стон Слано	6.0	VIII	—

* в статье приводятся сведения за период с 1901 по 1995 гг.

ский эффект от землетрясения хорошо задокументирован из-за значительного материального ущерба. Из 3670 зданий (в Загребе в то время было около 30 тыс. жителей) все были повреждены, а около 13% полностью разрушены. В Атласе [40] приведена карта с изосейстами балльности этого землетрясения. Через 140 лет после Великого Загребского землетрясения в районе г. Загреб и произошло землетрясение 22 марта 2020 г. [35], информация по которому использована нами для задачи калибровки системы “Экстремум”.

Другая интересующая нас сейсмическая зона — Покупско-Петринская, простирающаяся с севера на юг (2 на рис. 1) почти перпендикулярно Загребской зоне. Сильнейшее событие — Покупское землетрясение, произошедшее 8 октября 1909 г. с эпицентром в 9 км севернее г. Покупско, — одно из самых известных землетрясений не только в Хорватии, но и во всей Европе. Его магнитуда определена как $M = 5.8$, глубина очага $h = 14$ км, а вызванные им эффекты были оценены с максимальной интенсивностью VIII MSK-64. До конца 1910 г. произошло еще более 50 афтершоков этого землетрясения, самый сильный из которых имел магнитуду $M = 5.3$, после 1910 г. других землетрясений, превышающих $M = 4.5$, не было зафиксировано.

Покупское землетрясение — одно из немногих исторических землетрясений, которые регулярно упоминаются в учебниках по сейсмологии и других книгах по истории науки, поскольку его изучение привело к важным открытиям, которые стали поворотным моментом в понимании землетрясений и их последствий, а также строения Земли. Анализируя землетрясение, известный хорватский ученый и геофизик Андрия Мохоро-

вичич доказал существование скачка скорости продольных сейсмических волн на границе, отделяющей земную кору от мантии Земли (граница Мохоровичича).

ПРОЦЕДУРА КАЛИБРОВКИ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ И УЧЕТ ТИПА МАГНИТУДЫ СОБЫТИЯ

В настоящей статье для калибровки параметров модели макросейсмического поля используется ранее разработанная авторами процедура [9, 11, 12], предусматривающая подбор приемлемых, устойчивых для рассматриваемой территории значений параметров математической модели затухания сейсмической интенсивности. В качестве таких параметров предложено использовать:

— коэффициенты уравнения b, v, c макросейсмического поля [14]:

$$I = bM - v \log \sqrt{\Delta^2 + h^2} + c, \quad (1)$$

где Δ — эпицентральное расстояние, км; h — глубина очага, км; M — магнитуда землетрясения (инструментально определенное значение M_s или пересчитанное из других оценок);

— отношение большой и малой осей эллиптических изосейст высших баллов, названное коэффициентом сжатия k ;

— угол, задающий ориентацию макросейсмического поля, в частности, азимут большой оси эллипса вытянутости изосейст.

Калибровка является итерационным и довольно сложным циклическим процессом, включающим уточнение границ зон и вычисление для них приемлемых квазистабильных параметров, по-

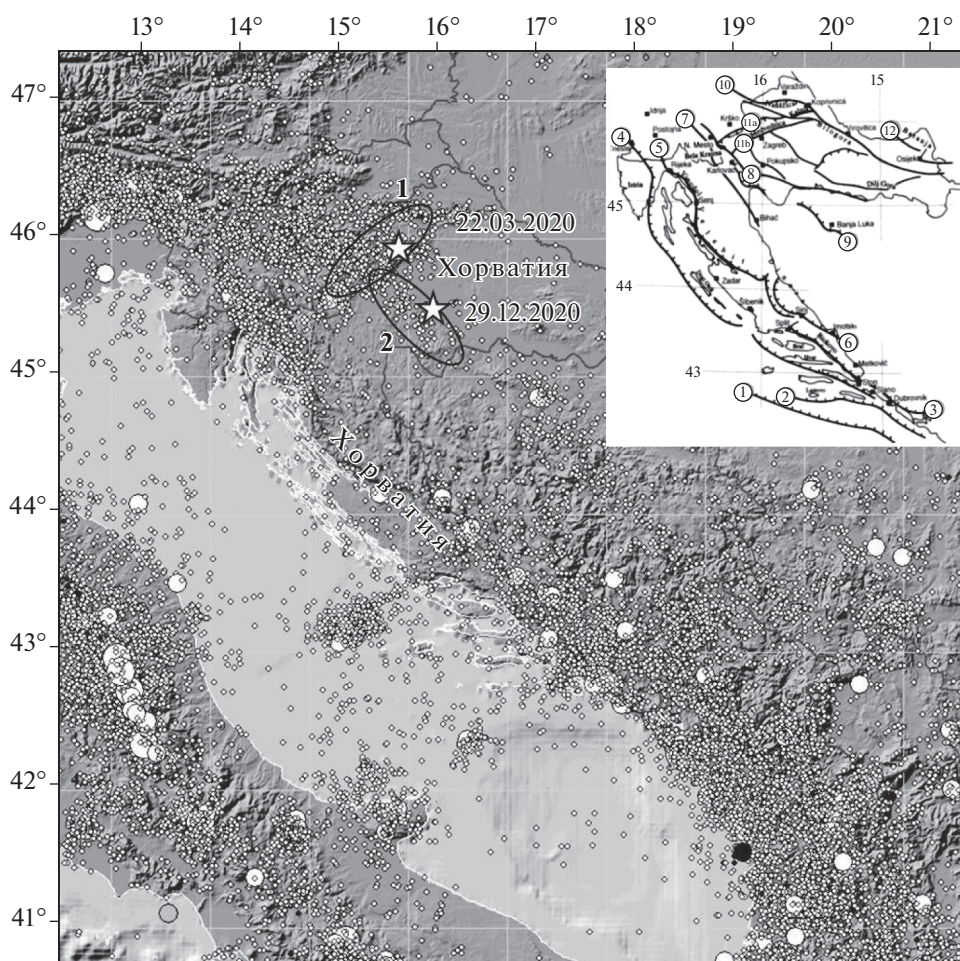


Рис. 1. Сейсмичность Хорватии и прилегающих областей по данным ФИЦ ЕГС РАН и NEIC USGS. Условные обозначения: белые круги – эпицентры землетрясений: маленькие – $M \leq 5.5$, большие – с $M \geq 6$; черные эллипсы – сейсмические зоны: 1 – “Загреб”, 2 – “Покупско-Петринья”; звездочки – сильнейшие землетрясения 22 марта 2020 г. и 29 декабря 2020 г., исследуемые в настоящей статье. На врезке представлена схема глубинных разломов на территории Хорватии по [34]: 1 – Адриатический, 2 – Дубровниковский, 3 – Мозор-Биоковский; 4 – Триесто-остров Дуги-Оток; 5 – Рийека-Велебит; 6 – Синьи-Имостски; 7 – Фелла-Сава-Хрономели-Бихас; 8 – Южный краевой разлом Паннонской впадины; 9 – Банья-Лука; 10 – Периадриатис-Драва; 11 – зона разломов гор Медведница; а – Брезик-Кризевский; б – Загребский; 12 – Баранья.

этому по мере накопления данных о новых событиях калибровочные действия должны повторяться.

Ранее авторами были изучены особенности затухания для отдельных зон на территории РФ и сопредельных стран [10–12]. Для территории Кавказа для калибровки использовались сведения об ощутимости 32 сильных землетрясений с $I \geq 6$ баллов по шкале MSK-64 за период 1966–2012 гг. В процессе калибровки определялись координаты населенных пунктов, рассчитывались удаления пунктов от макросейсмических эпицентров, строились графики затухания. Для каждого землетрясения рассчитаны индивидуальные параметры макросейсмического поля, которые впоследствии использовались для вычисления средних параметров для зоны. При определении

ориентации макросейсмического поля и коэффициентов сжатия эллипса k в качестве основы использовалась информация с карты ОСР-97 о доменах и сейсмолинеаментах [1, 8].

В результате исследований были установлены стабильные параметры макросейсмического поля для района, границы которого включают территорию Дагестанского клина с продолжением на северо-запад от 48°E до 45.5°E . Для выделенной зоны рекомендован следующий набор стабильных параметров поля: $b = 1.5$; $v = 3.62$; $c = 3.16$; $k = 1.6$; ориентация поля в соответствии с полем разломов.

Выполненные с использованием полученных параметров поля контрольные расчеты для Дагестанского (14.05.1970 г.) и Курчалойского (11.10.2008 г.) землетрясений показали эффектив-

ность калибровки моделей ИС “Экстремум” [11]. В целом, погрешность в определении интенсивности не превысила 0.3–0.5 балла. Значения погрешностей ΔI_{cp} в прогнозировании интенсивности от контрольных землетрясений варьировало от 0.1 на эпицентральных расстояниях меньше 25 км и до 0.3 на расстояниях более 100 км.

В статье [12] представлена возможность использования полученных откалиброванных параметров макросейсмического поля для района на Кавказе, входящего в Альпийско-Гималайский сейсмоактивный пояс, для районов-аналогов со схожими сеймотектоническими условиями. Применение полученного для Кавказа набора откалиброванных параметров поля при расчете последствий землетрясений 26.11.2019 г. в Албании, имеющего схожие черты тектонического развития, показало целесообразность использования подхода, основанного на выявлении районов-аналогов, в качестве первого итерационного шага для повышения надежности оперативных оценок потерь в случае сильного землетрясения.

Для исследования применимости полученных стабильных параметров поля на Кавказе к другой территории, принадлежащей к Альпийско-Гималайскому поясу, выполнены расчеты последствий землетрясения 22 марта и 29 декабря 2020 г. в Хорватии. При анализе результатов особое внимание было уделено правильному учету типа магнитуд, рассчитываемых различными службами в оперативном режиме [3], и используемым в системе “Экстремум” для оперативной оценки последствий.

Особенно остро эта проблема встает при расчетах макросейсмической интенсивности в конкретных населенных пунктах с использованием уравнения макросейсмического поля от землетрясений умеренных магнитуд ($M = 5.0 \pm 0.5$). Это обусловлено тем, что, как установлено в [31] и представлено в части 3 Руководства обсерваторской практики [21], при таких магнитудах наблюдаются существенные отклонения зависимости M_s в соотношении с ML и M_w , определяемые в последние годы в сейсмологических центрах при оперативной обработке. Рассмотрим несколько подробнее этот вопрос.

Напомним, что в расчете макросейсмической интенсивности $I(M, \Delta, h)$ с использованием уравнения макросейсмического поля Н.В. Шебалина изначально заложены оценки магнитуд по поверхностной волне (современное название M_s). В исследованиях по калибровке, как правило, основываются на довольно сильных землетрясениях ($M_s \geq 6.0$), так как именно они вызывают разрушительный эффект. Но бывают случаи, когда при неглубоком залегании очага землетрясения с $M = 5.0–5.5$ достигают интенсивности в VII и более

баллов. Как раз такое характерно для Загребской зоны Хорватии.

На современном этапе во многих европейских региональных сейсмологических центрах распространена количественная мера силы землетрясения через использование локальной магнитуды ML , введенной Рихтером [39] и широко используемой при условии учета затухания энергии сейсмических волн конкретно для определенного района. В [19] на основе параметрического анализа Европейского интегрированного архива данных (EIDA) подтверждено более сильное затухание для сетей, работающих в районе Средиземного моря, таких как итальянские и греческие сети, по сравнению с сетями, расположенными в континентальной Европе. Случайные эффекты, зависящие от сети, позволили количественно оценить межсетевую изменчивость для разных сетей, работающих в одном регионе или стране. Наблюдаемая межсетевая изменчивость находится в пределах ± 0.2 магнитудных единицы.

Поскольку ML часто вычисляется сейсмологическими обсерваториями для измерения размеров местных землетрясений, она появляется в эмпирических соотношениях для преобразований, применяемых для создания каталогов с однородной магнитудной оценкой, особенно для таких приложений, как оценка сейсмической опасности [25]. Хотя локальная магнитуда ML была введена как эмпирический параметр, не представляющий каких-либо конкретных характеристик источника, было показано, что она связана с падением напряжения и скоростью разрушения [22] и масштабируется в зависимости от энергии [32, 33]. Таким образом, ML вызвала интерес в недавних исследованиях, посвященных изменчивости движения грунта, поскольку она лучше, чем моментная магнитуда M_w , отражает высокочастотную изменчивость сотрясений грунта для землетрясений средней силы [18, 20, 23].

Заметим, что в мировой практике со времен проекта Global Seismic Hazard Assessment Program для оценки сейсмической опасности все чаще используется моментная магнитуда M_w , рассчитываемая через сейсмический момент [17].

Применительно к Хорватии в работе [27] проведено исследование по установлению связи между значениями магнитуд ML и M_w . Установлено, что между ними в среднем существует линейная (почти 1:1) зависимость, и это облегчает работы по составлению каталога по какой-либо одной унифицированной магнитуде — ML или M_w .

Однако, для наших задач, решение которых основано на использовании уравнения макросейсмического поля Н.В. Шебалина (1), необходимо перевести эти магнитуды в магнитуду по поверхностной волне M_s . Для сильных землетрясений с $8 \geq M_w \geq 6$ на основе установленного Канамори

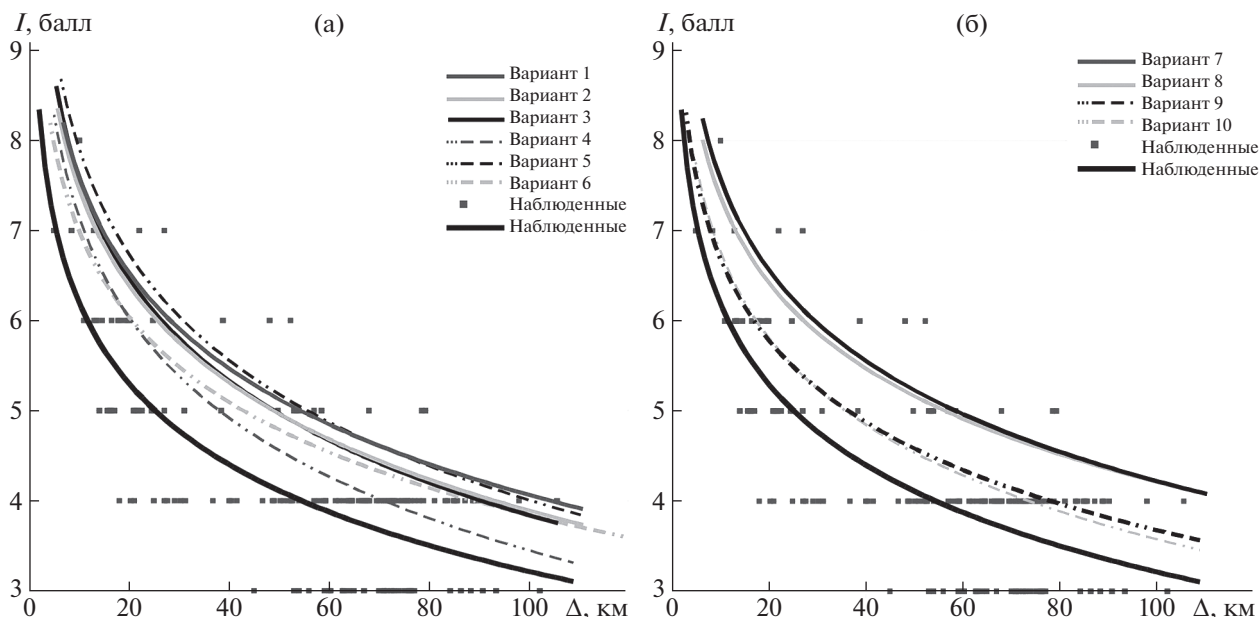


Рис. 2. Сравнение расчетной и наблюдаемой интенсивностей: а – варианты 1–6; б – варианты 7–10 (см. табл. 2).

соотношения расхождения между M_s и M_w незначительны, и ими можно пренебречь. Этого нельзя сказать про землетрясения умеренной силы ($5 \geq M_w \geq 3$). Воспользуемся снова принципом аналогии для одного из районов Альпийско-Гималайского комплекса – Кавказа. В названном регионе по спектрам землетрясений умеренных и слабых магнитуд определяются сейсмические моменты M_0 и рассчитываются значения M_w [2]. В этой работе найдено соотношение между шкалами M_w и M_s для Кавказа в интервале магнитуд M_s от 2.2 до 7.3. В работе использовались данные каталогов GCMT за 1976–2014 гг. (<http://www.globalcmt.org/>) для моментных магнитуд, Геологической службы США NEIC (<http://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php>) для магнитуд по поверхностным волнам, а также каталога с определением энергетических классов K_p и спектральных магнитуд M_w для отдельных слабых землетрясений с $3.8 \leq M_s \leq 5.1$ в регионе Северного Кавказа. Получено соотношение:

$$M_w = (0.876 \pm 0.102)M_s + 0.774 \pm 0.441, \quad (2)$$

$$R \approx 0.865, (2.2 \leq M_s \leq 5.3),$$

где R – коэффициент корреляции.

Оно показывает, что $M_s = 4.8$ при $M_w = 5.0$. Однако, авторы статьи, отдавая себе отчет о недостаточности представительной выборке для уверенного анализа, оставляют за собой право улучшения этой зависимости после накопления материала по исследуемому району. В нашем же исследовании мы воспользуемся этой формулой при моделировании последствий землетрясения 22 марта 2020 г. в Хорватии.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 22 МАРТА 2020 ГОДА

Для исследования применимости полученных ранее стабильных параметров поля для района-аналога на Кавказе к территории, принадлежащей к Альпийско-Гималайскому поясу, выполнены расчеты последствий землетрясения 22.03.2020 г. в Хорватии. В табл. 2 приведены варианты исходных данных для расчета последствий с помощью системы “Экстремум”. Расчеты выполнялись для параметров события, определенных разными сейсмологическими службами, и параметров макросейсмического поля по [11, 12, 40, 41]. В качестве коэффициента сжатия k использовалось значение 1.5, как максимальное из значений, установленное здесь [37, 38]. Рассматривались разные ориентации поля в соответствии с решением механизма очага по данным сейсмологических служб: 263° (в соответствии с <https://earthquake.usgs.gov>; [32]; <http://mseism.gsras.ru>) и 57° (в соответствии с <http://www.globalcmt.org>). Расчетные значения интенсивности сравнивались с наблюдаемыми значениями, опубликованными на сайте Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/event-page/us70008dx7-/dyfi/intensity>).

На рис. 2а приведены результаты расчета интенсивности сотрясений I для параметров очага по данным:

- Российской службы ЕГС РАН (<http://mseism.gsras.ru>) – вариант 1;
- Европейской сейсмологической службы (<https://www.emsc-csem.org>) – вариант 2;

Таблица 2. Варианты исходных данных для расчета последствий землетрясения в Хорватии 22.03.2020 г.

№	Параметры события	Коэффициенты уравнения макросейсмического поля	Ориентация поля и коэффициент сжатия k
1	45.98; 15.99° E; $m_b = 5.5$; $h = 10$ км, http://mseism.gsras.ru	$b = 1.5$; $v = 4$; $c = 3.8$; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	263° , $k = 1.5$
2	45.87°N; 16.02°E; $M_w = 5.4$; $h = 10$ км, https://www.emsc-csem.org	Те же	Те же
3	45.9°N; 15.97°E; $M_w = 5.4$; $h = 10$ км, https://earthquake.usgs.gov	— “ —	— “ —
4	45.85°N; 15.95°E; $M = 5.1$; $h = 8.83$ км, http://terremoti.ingv.it/en/event/24134961	— “ —	— “ —
5	45.8773°N, 16.0208°E; $ML = 5.5$, $h = 8.83$ км, https://www.pmf.unizg.hr	— “ —	— “ —
6	45.79°N; 16.07°E; $M_s = 5.3$; $h = 12$ км, Global CMT Catalog	— “ —	— “ —
7	45.8773°N, 16.0208°E; $ML = 5.5$, $h = 8.83$ км, https://www.pmf.unizg.hr	$b = 1.8$; $v = 3.5$; $c = 1.4$; Балканский регион ($h \leq 10$ км) [40, 24]	— “ —
8	Те же	Те же	57° ; $k = 1.5$
9	45.85°N; 15.95°E; $M = 5.1$; $h = 8.83$ км, http://terremoti.ingv.it/en/event/24134961	— “ —	263° ; $k = 1.5$
10	Те же	Те же	57° ; $k = 1.5$
11	45.8773°N, 16.0208°E; $ML = 5.5$, $h = 8.83$ км, https://www.pmf.unizg.hr	$b = 1.52$; $v = 3.62$; $c = 3.16$; Откалибро- ванные для зоны на Кавказе [11]	263° ; $k = 1.5$
12	45.85°N; 15.95°E; $M = 5.1$; $h = 8.83$ км; http://terremoti.ingv.it/en/event/24134961	Те же	Те же
13	Те же	$b = 1.5$; $v = 3.5$; $c = 3.0$; Шебалин — по умолчанию [15]	— “ —
14	45.79°N; 16.07°E; $M_s = 5.3$; $h = 12$ км, http://www.globalcmt.org	$b = 1.5$; $v = 4.5$; $c = 4.5$; Балканский регион ($h > 10$ км) [40, 24]	— “ —
15	45.8773°N, 16.0208°E; $M_s = 5.0$, $h = 8.83$ км, https://www.pmf.unizg.hr	$b = 1.5$; $v = 4$; $c = 3.8$; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	— “ —
16	Те же	$b = 1.52$; $v = 3.62$; $c = 3.16$; откалибро- ванные для зоны на Кавказе [11]	— “ —
17	45.85°N; 15.95°E; $M = 5.0$, $h = 8.83$ км http://terremoti.ingv.it/en/event/24134961	$b = 1.5$; $v = 4$; $c = 3.8$; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	— “ —
18	Те же	$b = 1.52$; $v = 3.62$; $c = 3.16$; откалибро- ванные для зоны на Кавказе [11]	— “ —
19	45.79°N; 16.07°E; $M_s = 5.3$; $h = 12$ км, http://www.globalcmt.org	Те же	— “ —

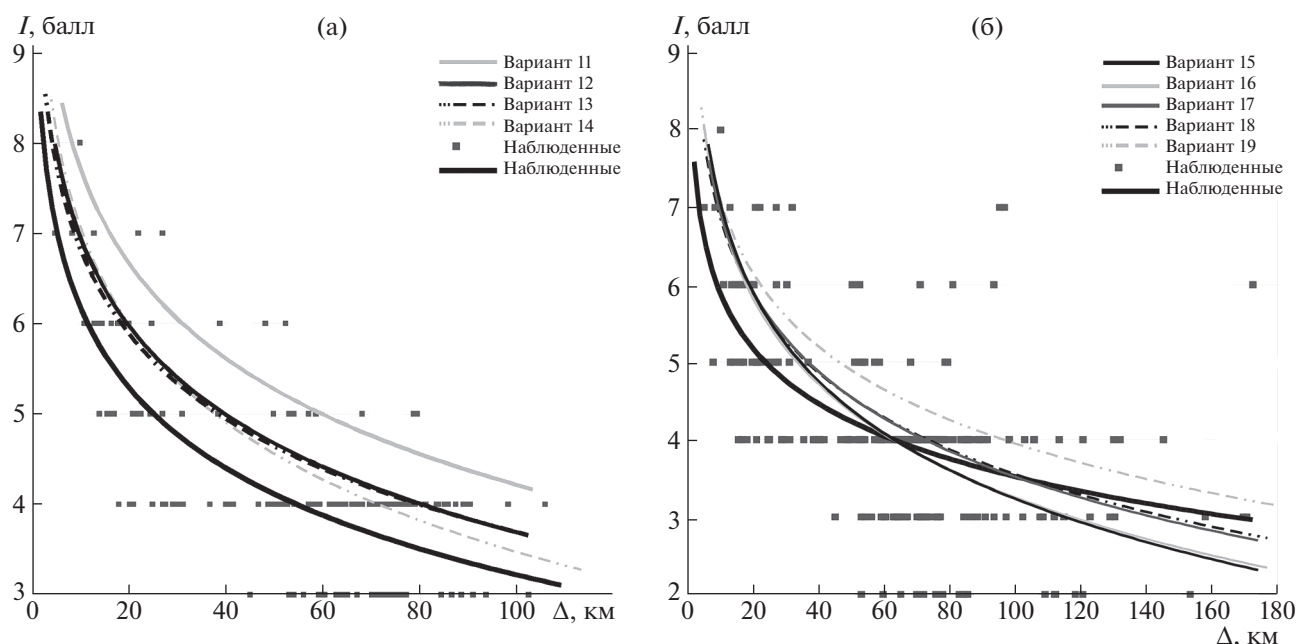


Рис. 3. Сравнение расчетной и наблюдаемой интенсивностей: а – варианты 11–14; б – варианты 15–19 (см. табл. 2).

– Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov>) – вариант 3;

– Сейсмологической службы Италии (<http://terremoti.ingv.it>) – вариант 4;

– Сейсмологической службы Хорватии (<https://www.pmf.unizg.hr>) – вариант 5;

– по данным каталога GCMT (<http://www.globalcmt.org>) – вариант 6.

Расчеты выполнены для обобщенных региональных коэффициентов макросейсмического поля для Центральной Юго-Восточной Европы [41] при $k = 1.5$, ориентации изосейст под углом 263° в соответствии с решением механизма очага Геологической службой США (<https://earthquake.usgs.gov>).

Во всех вариантах наблюдается завышение расчетных значений интенсивности по сравнению со значениями интернет-интенсивности, определяемой по информации об осязательности землетрясения на основе заполненных жителями интерактивных анкет на сайте Геологической службы США. На расстояниях до 40 км превышение составляет 0.1–0.3 балла, на больших расстояниях достигает 1 балла. Наименьшее расхождение наблюдается при использовании параметров сейсмологической службы Италии (вариант 4). Использование в расчетах региональных коэффициентов поля для Балканского региона для событий с глубинами $h \leq 10$ км по-прежнему дает завышение расчетных значений, которые при использовании параметров очага по данным сейсмологической службы Италии на всех эпи-

центральных расстояниях варьируют от 0.1 до 0.3 балла.

Ориентация под углом 57° в соответствии с решением механизма очага по GCMT и под углом 263° практически не влияет на результаты (рис. 26). При использовании региональных параметров поля для района-аналога на Кавказе [11] и коэффициентов уравнения для Балканского региона для событий с $h > 10$ км [40] расчетные значения интенсивности не превышают 0.1–0.3 балла, а на дальних расстояниях расхождения уменьшаются (рис. 3а). Как отмечалось ранее, систематическое завышение расчетных интенсивностей может быть связано с типом магнитуды, определяемым разными службами. Поэтому произведен пересчет магнитуд M_w и M_L в M_s . На рис. 3б показаны зависимости расчетных и наблюдаемых интенсивностей для пересчитанных магнитуд M_s .

На расстояниях менее 60 км по-прежнему сохраняется незначительное превышение расчетных значений, более 60 км – незначительное занижение. Наилучшая сходимость получена при использовании откалиброванных параметров поля для района аналога на Кавказе и параметров очага Сейсмологической службы Хорватии (вариант 16) и Сейсмологической службы Италии (вариант 18).

Анализ результатов показывает влияние параметров, определенных разными службами, и целесообразность использования пересчитанных значений M_s магнитуд. Довольно часто службы используют другие магнитуды (M_w , M_L , m_b) и/или не указывают тип. Поскольку в уравнении

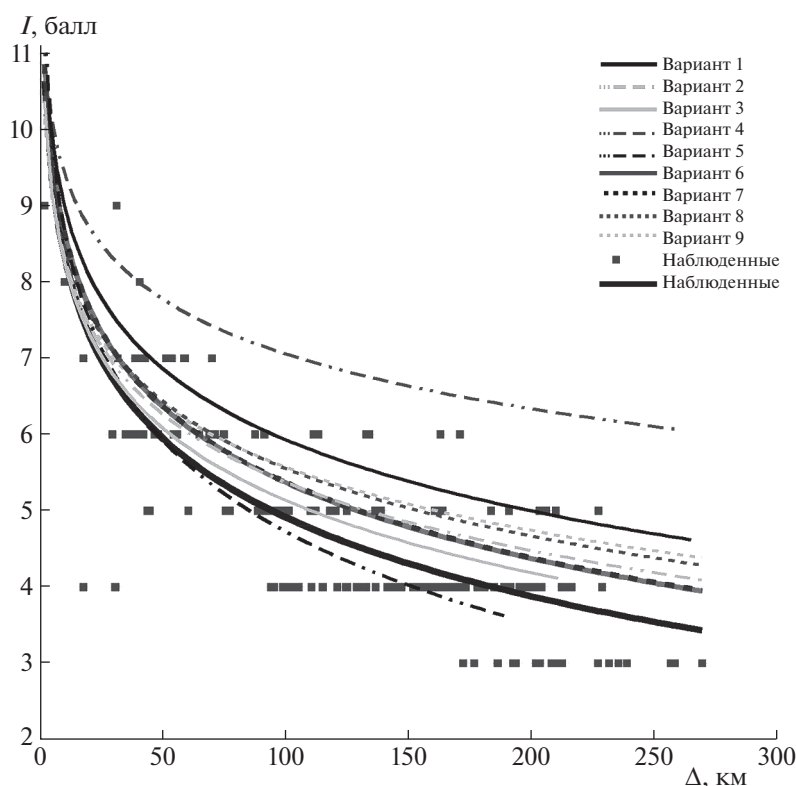


Рис. 4. Сравнение расчетной и наблюдаемой интенсивностей: варианты 1–9 (см. табл. 3).

Н.В. Шебалина (1) используется M_s , то требуется уточнение и пересчет магнитуд.

В целом, можно отметить, что откалиброванные коэффициенты для района-аналога на Кавказе и коэффициенты, предложенные Шебалиным для Центральной и Юго-Восточной Европы (вариант 17), могут успешно применяться для оперативной оценки последствий в Хорватии.

Кроме того, в случае отсутствия данных из региональной службы Хорватии в оперативном режиме, можно вполне воспользоваться данными Сейсмологической службы Италии, которая, как выяснилось в процессе подготовки статьи, представляет параметры землетрясений не только собственно территории Италии, но и обширной, окружающей ее территории, причем делает это оперативно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29 ДЕКАБРЯ 2020 ГОДА

Аналогичные исследования применимости полученных стабильных параметров поля для района-аналога на Кавказе к другой территории, принадлежащей к Альпийско-Гималайскому поясу, также выполнены для землетрясения 29 декабря 2020 г. в Хорватии. В табл. 3 приведены варианты исходных данных для расчета послед-

ствий с помощью системы “Экстремум”. Расчеты выполнялись для параметров события, определенных разными сейсмологическими службами, и параметров макросейсмического поля по [12, 40, 41]. В качестве коэффициента сжатия k использовались значения от 1.5 до 2.0; рассматривались разные ориентации поля: вдоль разломов и в соответствии с решением механизма очага по данным сейсмологических служб. Расчетные значения интенсивности также сравнивались с наблюдаемыми значениями интернет-интенсивности, опубликованной на сайте Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov>).

На рис. 4 приведены результаты расчета интенсивности сотрясений I для параметров очага по данным: ЕГС РАН (<http://mseism.gsras.ru>) – вариант 1, и Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov>) – варианты 2–9. Расчеты выполнены для региональных коэффициентов макросейсмического поля по [11, 41, 40, 24] при $k = 2$ и 1.5, ориентации изосейст вдоль разломов и в соответствии с решением по GCMT.

При использовании параметров очага, полученных в Геологической службе США NEIC, хорошее согласие наблюдаемых и расчетных интенсивностей на расстояниях до 200 км получено для вариантов 3 и 4. При использовании коэффициентов поля для Центральной и Юго-Восточной

Таблица 3. Варианты исходных данных для расчета последствий землетрясения в Хорватии 29.12.2020 г.

№	Параметры события	Коэффициенты уравнения макросейсмического поля	Ориентация поля и коэффициент сжатия k
1	45.560°N; 16.170°E; $M = 6.7$; $h = 10$ км, http://mseism.gsras.ru	$b = 1.52$; $v = 3.62$; $c = 3.16$; откалиброванные параметры для зоны на Кавказе [11]	Вдоль разломов; $k = 2$
2	45.422°N; 16.225°E; $M = 6.4$; $h = 10$ км, https://earthquake.usgs.gov	Те же	Те же
3	Те же	$b = 1.5$; $v = 4$; $c = 3.8$; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	— “ —
4	Те же	$b = 1.5$; $v = 4.5$; $c = 4.5$; Балканский регион ($h > 10$ км) [40, 24]	— “ —
5	Те же	$b = 1.5$; $v = 3.5$; $c = 4.5$; Балканский регион ($h \leq 10$ км) [40, 24]	— “ —
6	— “ —	$b = 1.52$; $v = 3.62$; $c = 3.16$; откалиброванные параметры для зоны на Кавказе [11]	$\zeta = 49^\circ$ * $k = 2$
7	— “ —	Те же	$\zeta = 224^\circ$ ** $k = 2$
8	— “ —	— “ —	$\zeta = 132^\circ$ ***; $k = 2$
9	— “ —	— “ —	$\zeta = 132^\circ$ ***; $k = 1.5$
10	45.4002°N, 16.2187°E, $M = 6.2$; $h = 11.5$ км, https://www.pmf.unizg.hr	— “ —	$\zeta = 132^\circ$ ***; $k = 2$
11	Те же	— “ —	$\zeta = 132^\circ$ ***; $k = 1.5$
12	— “ —	$b = 1.5$; $v = 4$; $c = 3.8$; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	Те же
13	— “ —	$b = 1.5$; $v = 4.5$; $c = 4.5$; Балканский регион ($h > 10$ км) [40, 24]	— “ —
14	45.38°N; 16.21°E; $M_s = 6.4$; $h = 12$ км, http://www.globalcmt.org	$b = 1.52$; $v = 3.62$; $c = 3.16$; откалиброванные параметры для зоны на Кавказе [11]	— “ —
15	Те же	$b = 1.5$; $v = 4$; $c = 3.8$; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	— “ —
16	— “ —	$b = 1.5$; $v = 4.5$; $c = 4.5$; Балканский регион ($h > 10$ км) [40, 24]	— “ —

* <https://ingvterremoti.com/2020/12/29/terremoto-mw-6-2-in-croazia-29-dicembre-2020-ore-1219/>** <https://earthquake.usgs.gov>*** <http://www.globalcmt.org>

Европы (вариант 3) на расстояниях больше 150 км наблюдается незначительное превышение расчетной интенсивности. Использование коэффициентов уравнения поля для Балканского региона при $h > 10$ км (вариант 4) дает незначительное занижение расчетных значений в том же диапазоне расстояний. При использовании откалиброванных параметров поля для зоны на Кавказе [11] и разных ориентаций поля: вдоль разломов (вариант 2) и под углом 49° в соответствии с решением механизма очага Итальянской службой (вариант 6) получены незначительные по сравнению с вариантом 3 превышения расчетных интенсивностей на расстояниях до 150 км. Увеличение разницы между расчетными и наблюдаемыми значениями

интенсивности отмечено в вариантах 8 и 9 при использовании ориентации поля под углом 132° в соответствии с решением механизма очага по GCMT. Наибольшее расхождение расчетных и наблюдаемых интенсивностей при использовании параметров ГС США получено в варианте 5 при использовании параметров поля для Балканского региона при $h \leq 10$ км.

При использовании в расчетах параметров события, определенных Хорватской сейсмологической службой (<https://www.pmf.unizg.hr>), наблюдаемые и расчетные интенсивности хорошо согласуются на расстояниях до 100 км (рис. 5а). При этом использовались параметры уравнения поля для Центральной и Юго-Восточной Европы (ва-

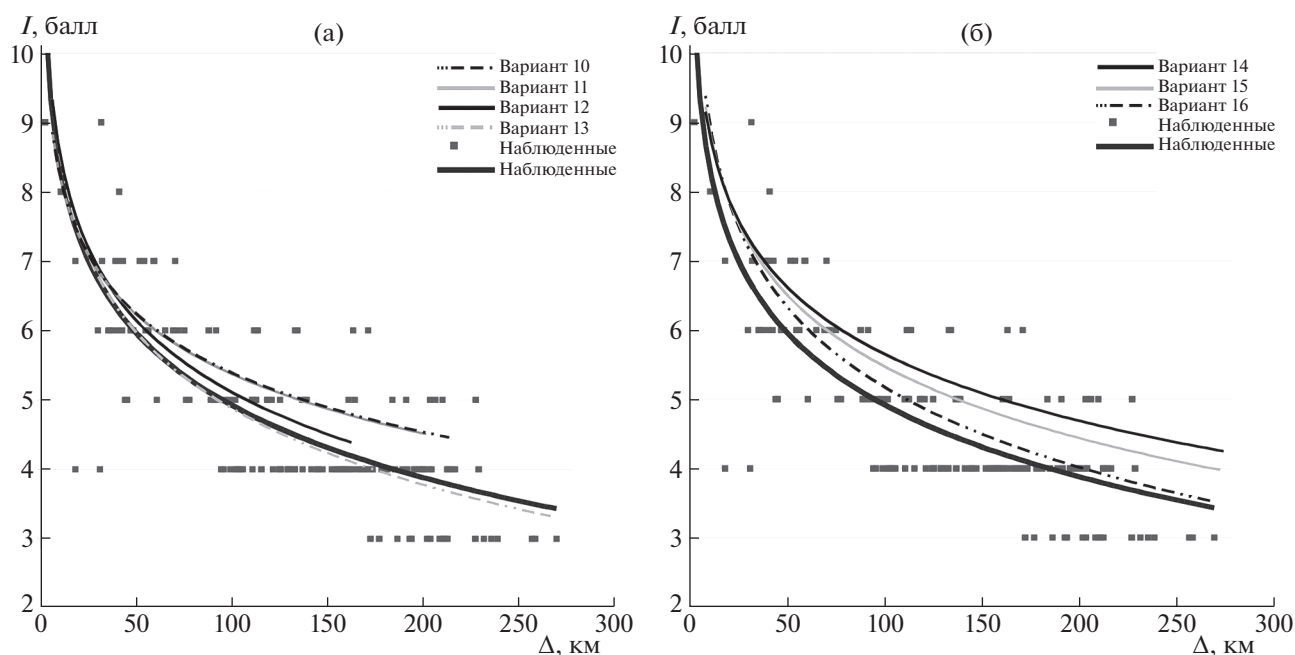


Рис. 5. Сравнение расчетной и наблюдаемой интенсивностей: а – варианты 10–13; б – варианты 14–16 (см. табл. 3).

риант 12), для Балканского региона при $h > 10$ км (вариант 13), откалиброванных параметров для Кавказа (варианты 10–11). На больших эпицентральных расстояниях для вариантов 10 и 11 наблюдается завышение оценок, не превышающее 0.5 балла.

Как правило, наиболее точные параметры события с небольшим запозданием дает каталог GСMT. На рис. 5б показаны результаты расчета с параметрами GСMT для трех наборов коэффициентов уравнения макросейсмического поля. На расстояниях до 60 км оценки по вариантам 14–16 довольно близкие. На больших расстояниях наилучшее согласие получено для варианта 16 при использовании уравнения для Балканского региона при $h > 10$ км.

Анализ выше приведенных зависимостей позволяет сделать вывод о важности применения точных параметров события местной службой в случае их наличия. При использовании обобщенных коэффициентов поля Н.В. Шебалина (1) [41] и откалиброванных параметров поля, полученных для района-аналога на Кавказе [11, 12], сходимость расчетных и наблюдаемых значений интенсивностей хорошая. Следует отметить отсутствие влияния k и ориентации поля изосейст, что можно объяснить равномерной и большой плотностью населения в рассматриваемом районе.

Вывод о применимости параметров поля (1) для оперативной оценки последствий в рассматриваемом регионе подтверждается данными о наблюдаемом эффекте в наиболее пострадавших населенных пунктах (табл. 4), опубликованных

на сайтах Геологической службы США и Global Disaster Alert and Coordination System (<https://www.gdacs.org>).

Таким образом, калибровка моделей системы “Экстремум” позволяет в близком к реальному масштабу времени получить оценки возможной интенсивности и ущерба в населенных пунктах и наиболее пострадавших районах. Результаты расчета представляются в виде таблиц с указанием названия населенных пунктов, их координат, численности жителей, возможной интенсивности, вероятности разных степеней повреждения застройки и средней степени повреждения для населенного пункта в целом. На рис. 6 показана визуализация последствий землетрясения 29.12.2020 г. в соответствии с вариантом № 13 (см. табл. 3). Значками разного размера показаны населенные пункты с разной численностью населения, разные оттенки серого – средняя степень повреждения застройки: 1 – $d_{cp} = 1$; 2 – $d_{cp} = 2$; 3 – $d_{cp} = 3$; 4 – $d_{cp} = 4$; 5 – $d_{cp} = 5$; 6 – нет повреждений. Для сравнения на рис. 7 приведены результаты предварительной оценки интенсивности хорватскими специалистами путем автоматической обработки данных вопросников и последующей обработки полевых наблюдений. При сравнении рис. 6 и 7 видно, что расчетные значения интенсивностей, полученные в течение 20–30 минут после определения параметров события ЕГС РАН, совпадают с наблюдаемыми, полученными по откликам жителей на сайте Хорватской сейсмологической службы и по данным обработки полевых наблюдений.

Таблица 4. Расчетные и наблюдаемые интенсивности в наиболее пострадавших населенных пунктах во время землетрясения в Хорватии 29.12.2020 г.

Населенный пункт	Расчетные интенсивности I по разным вариантам (см. табл. 3)								Наблюдаемые I	
	№ 3	№ 4	№ 6	№ 10	№ 11	№ 12	№ 14	№ 15	I^*	I^{**}
Петриня	9.35	9.55	9.25	8.41	8.48	8.57	8.57	8.63	IX	VIII
Сисак	8.88	9.02	8.92	7.67	7.83	7.84	7.96	7.00	VIII	VII
Глина	8.58	8.68	8.66	7.94	8.07	8.12	6.42	8.55	VII	
Брест	9.19	9.36	9.13	8.35	8.43	8.51	8.51	8.57		VIII
Загреб	6.09	5.88	6.26	6.62	6.57	6.45	6.80	6.67	VI–VII	VI

*<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/-eventpage/us6000d3zh/dyfi/responses>

**<https://www.gdacs.org>

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе подтверждена возможность применения параметров макросейсмического поля, полученных в процессе калибровки на Кавказе [11], в пределах его предположительного аналога – района Балканского полуострова. Оба района принадлежат к сейсмоактивному Альпийско-Гималайском поясу и, по мнению авторов, имеют сочетание тектонических структур, которое приводит к подобному затуханию значений интенсивности в точках макросейсмического поля, используемого для расчетов ожидаемых потерь.

Получена хорошая сходимость расчетных и наблюдаемых значений интенсивности I для землетрясения 22.03.2020 г. в Хорватии (рис. 8) при использовании откалиброванных параметров поля для зоны на Кавказе и параметров события по данными Итальянской (вариант 12) и Хорватской (16) сейсмологических служб.

Для землетрясения 29.12.2020 г. в Хорватии наименьшие невязки получены (рис. 9) при использовании откалиброванных параметров поля для зоны на Кавказе (варианты 2 и 6), а также при использовании коэффициентов поля, предложенных Н.В. Шебалиным для Центральной и

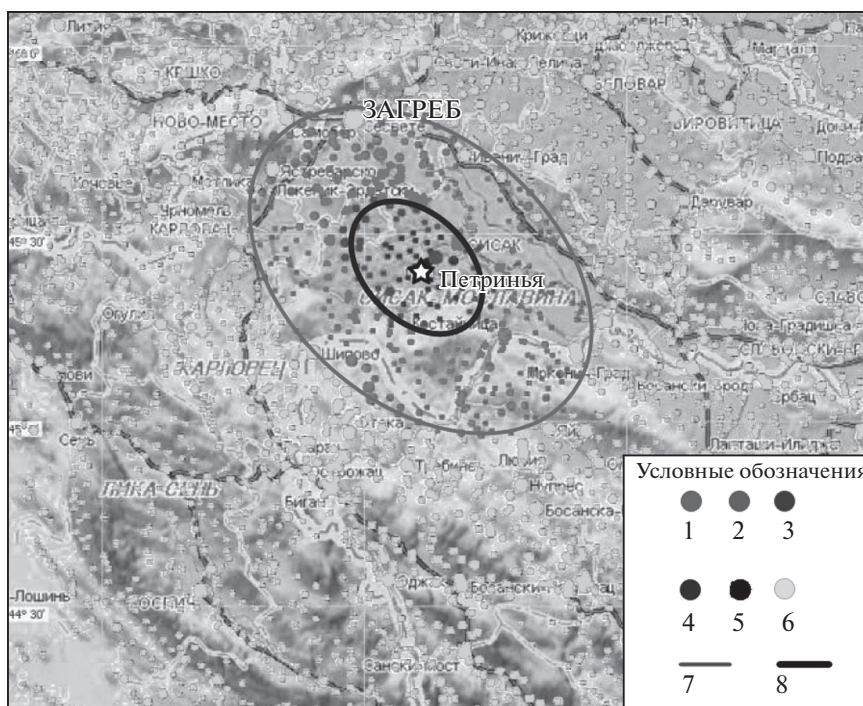


Рис. 6. Моделирование последствий землетрясения 29.12.2020 г. в оперативном режиме с помощью системы “Экстремум” (вариант 13, см. табл. 3). 1 – d_1 , 2 – d_2 , 3 – d_3 , 4 – d_4 , 5 – d_5 , 6 – нет повреждений, 7 – граница зоны слабых повреждений (d_1), 8 – граница зоны сильных повреждений (d_3).

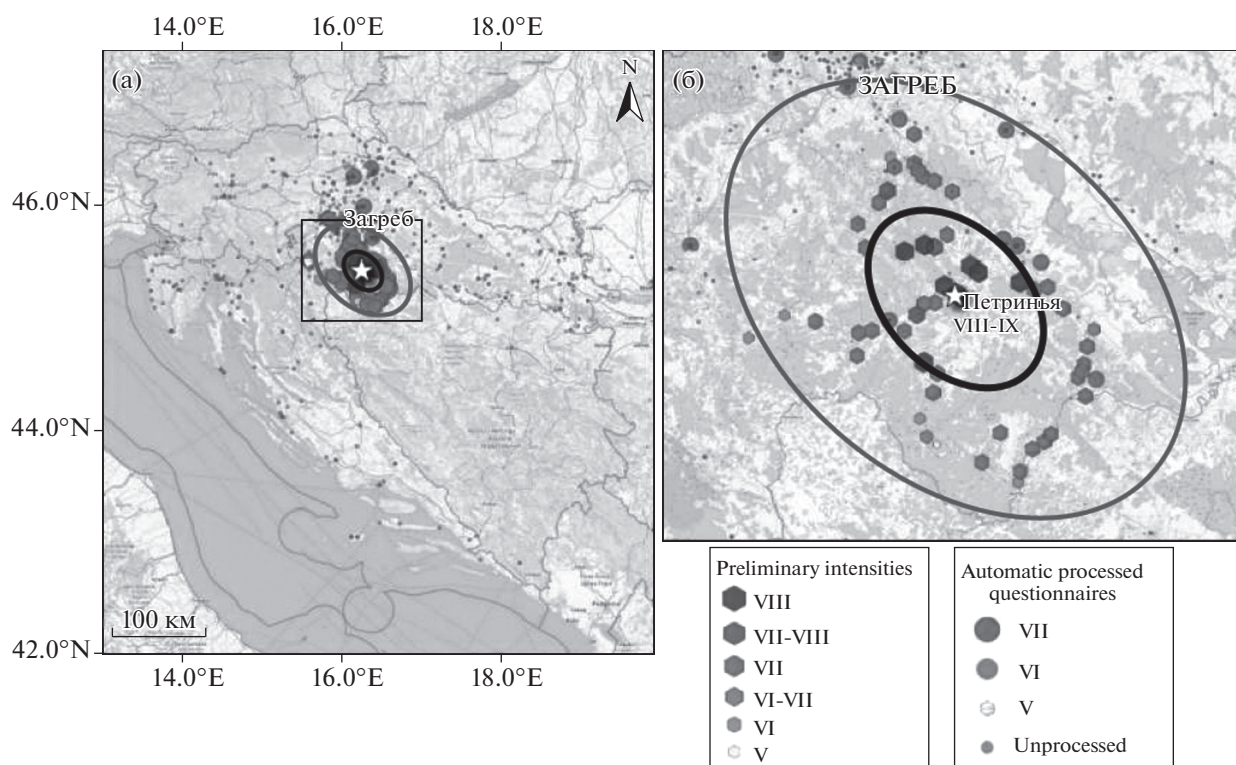


Рис. 7. а – Предварительная карта интенсивностей землетрясения 29.12.2020 г.: кружки – автоматическая обработка данных вопросников, шестиугольники – обработка полевых наблюдений; б – район Петриньи, прямоугольник на (а) по [36].

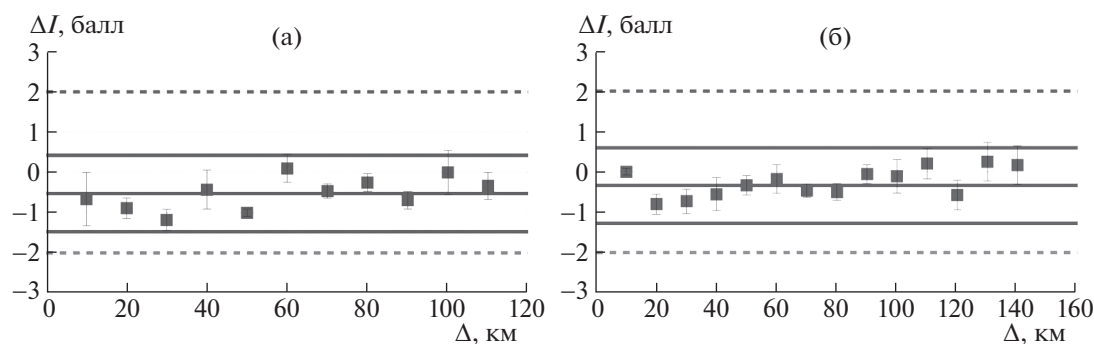


Рис. 8. Сравнение наблюдаемых и расчетных ΔI_{sp} для землетрясения 22.03.2020 г.: а – вариант 12, б – вариант 16. Невязки расчетных и наблюдаемых значений интенсивности I_i ; медианные значения показаны серыми точками.

Юго-Восточной Европы и для Балканского региона с $h > 10$ км (варианты 12 и 13).

В ранее выполненном исследовании [12], касающемся землетрясений в Албании, было подтверждено выделение в Балканском регионе двух зон с одинаковыми квазиустойчивыми параметрами макросейсмического поля, границы которых были получены в работах Н.В. Шебалина 70-х годов прошлого века (рис. 10).

Показано, что параметры поля в этих зонах пригодны для дальнейшего использования в ИС

“Экстремум” для оценки ожидаемых потерь применительно к Хорватии. Зона 1 (см. рис. 10) описывает структуры прибрежных Динарид, включая прибрежную часть Хорватии, Черногории и Албании. Зона 2 (см. рис. 10) включает континентальную часть, охватывающую значительную часть территорий Хорватии, Боснии и Герцеговины и Сербии. Эти территории густо заселены, что находит отражение в распределении элементов макросейсмического поля по предварительным сообщениям с мест ошутимости землетрясений –

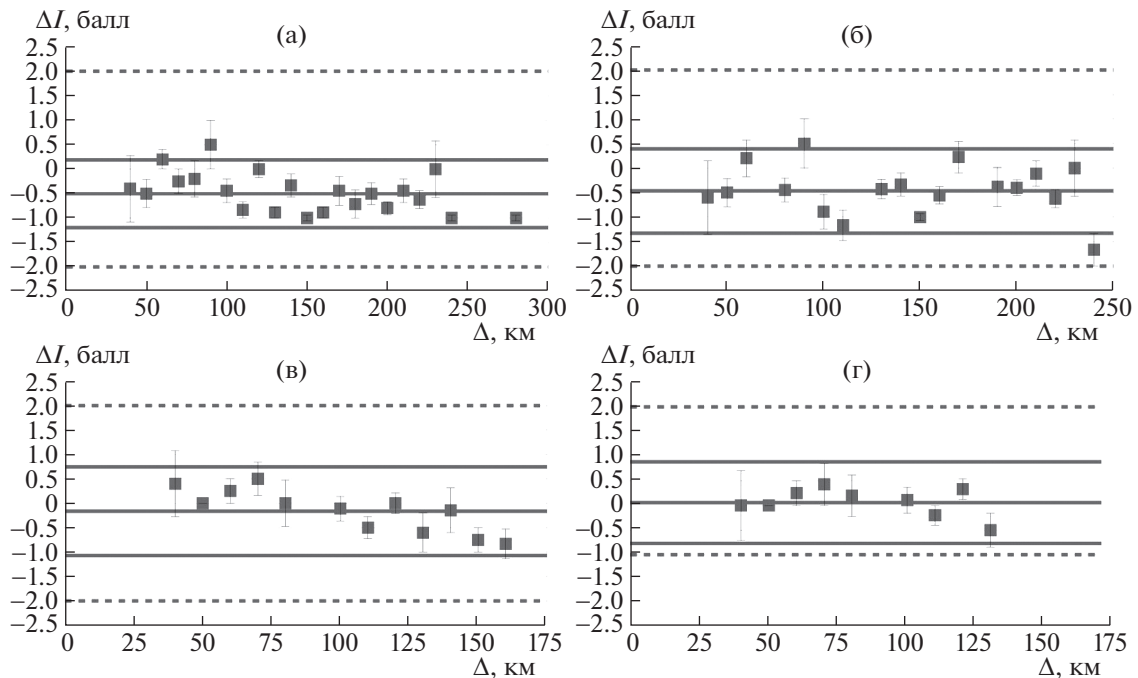


Рис. 9. Сравнение наблюдаемых и расчетных ΔI для землетрясения 29.12.2020 г.: а – вариант 2, б – вариант 6, в – вариант 12, г – вариант 13. Невязки расчетных и наблюдаемых значений интенсивности I_i ; медианные значения показаны серыми точками.

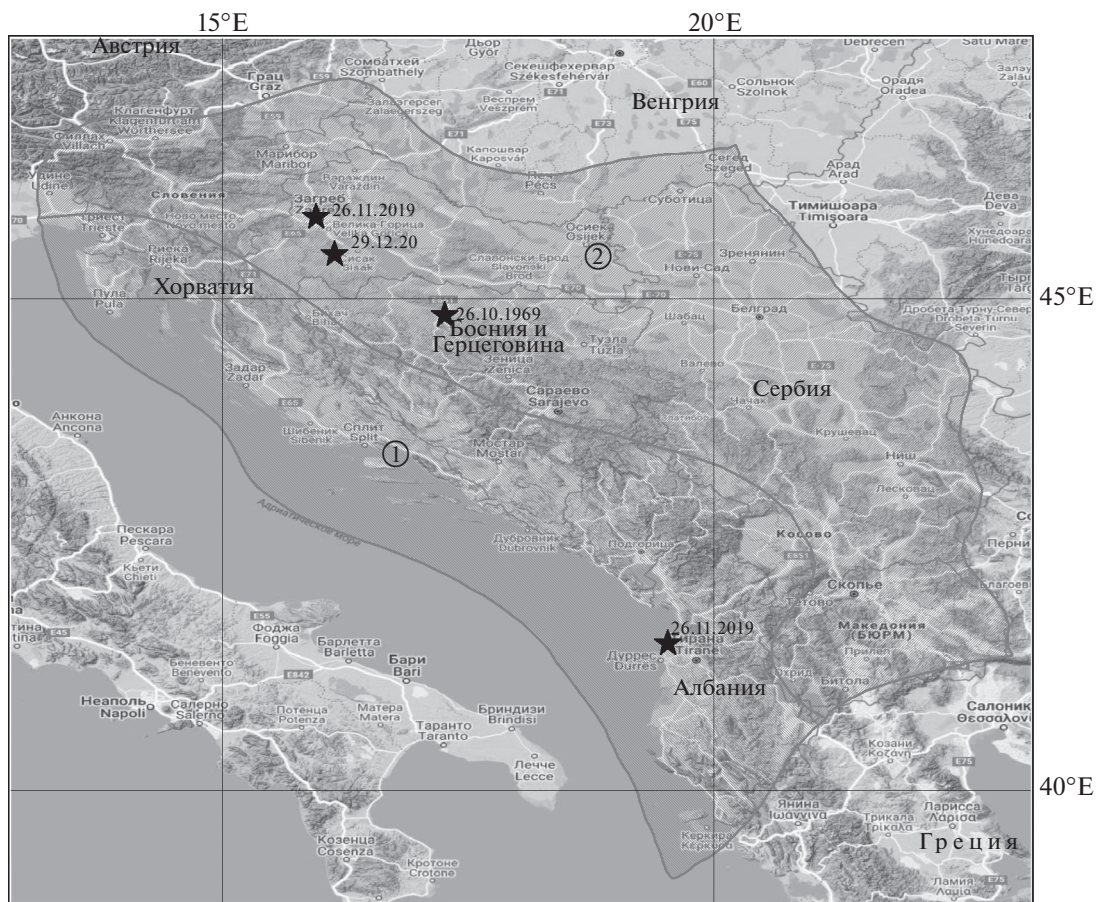


Рис. 10. Зоны на территории Балканского региона с квазиустойчивыми параметрами макросейсмического поля для моделирования последствий в режиме времени близком к реальному по [12, 40].

оно, как правило, имеет изометричную форму. Этот факт делает неактуальным учет коэффициента вытянутости изосейст k , т.е. малозначимым в задаче калибровки для этой области. Это можно видеть по результатам, представленным на рис. 2–5.

Таким образом, установлено различие в наборе значимых параметров, характеризующих макросейсмическое поле кроме коэффициентов уравнения в прибрежных и континентальных районах: в условиях Албании учет коэффициента вытянутости изосейст k был признан значимым, а в континентальной области значимость его снизилась.

Исследования авторов в Хорватии показывают, что в ближней зоне ($\Delta < 100$ км) уравнения дают близкий результат, т.е. наблюдается хорошая сходимость расчетных и наблюдаемых данных по интенсивности сотрясений в баллах. На больших расстояниях ($\Delta \geq 100$ км) результаты значимо расходятся (см. рис. 2–5).

При определении устойчивых параметров поля для землетрясений, находящихся в зоне 2 (см. рис. 10), также как в [12], проявилось значительное влияние глубины очага h .

Особое значение при определении устойчивых параметров поля для землетрясений, находящихся в обеих зонах и имеющих магнитуды $M \leq 5.5$, имеют учет типа магнитуды, определенной в оперативном режиме в том или ином сейсмологическом центре и пересчет в значение магнитуды по поверхностной волне, для которой построено уравнение затухания макросейсмического поля.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Показана возможность успешного моделирования макросейсмического поля для районов-аналогов, выделенных на основе общих сеймотектонических признаков. При успешной реализации такой возможности близкими становятся коэффициенты закона затухания (1) и отношение большой и малой осей эллиптических изосейст высших баллов, а также ориентация макросейсмического поля, заданная азимутом оси вытянутости изосейст.

2. На примере районов-аналогов, выделенных на Кавказе и Балканском регионе, выполнено моделирование и оценка точности вычисления ожидаемой сейсмической интенсивности I с использованием ИС “Экстремум”. Показано, что в случае использования параметров модели макросейсмического поля, откалиброванной по данным о хорошо изученных событиях на Кавказе, были получены приемлемые для оперативных служб оценки параметров макросейсмического поля для выделенных районов-аналогов Балканского региона. Величина погрешности при вери-

фикации макросейсмической модели в Балканском регионе не превышает 0.3 балла.

3. Подтверждена целесообразность поиска зон-аналогов для районов с редкими сейсмическими событиями и необходимость итераций, уточняющих параметры калибровки при возникновении нового сильного и разрушительного сейсмического события хотя бы в одном из районов-аналогов.

4. Описание всех обследованных событий должно попадать в специальную базу данных [4, 9], содержащую не только карты изосейст, но и параметры наблюдаемого эффекта в виде списка населенных пунктов отдельных районов, точек с координатами и баллами.

5. В ходе очередной калибровочной итерации возможны как дробление, так и укрупнение аналогичных районов. Минимальные размеры района ограничены точностью определения координат эпицентра землетрясения, максимальные – допустимой величиной погрешности оценки интенсивностей.

6. Для успешного проведения дальнейших работ по калибровке моделей макросейсмического поля ИС “Экстремум” необходимо создание и своевременное пополнение базы знаний о последствиях землетрясений. Представляется важным международное сотрудничество в области обработки “больших данных” (Big Data) и создание распределенной базы знаний о физических и социально-экономических последствиях прошлых сильных землетрясений в рамках проектов ООН/КОДАТА с указанием границ зон аналогов. Примером такого сотрудничества могут служить исследования Н.В. Шебакина в Балканском регионе, результаты которых актуальны и в настоящее время.

Очевидно, что продолжение работ по калибровке макросейсмического поля, а также по установлению зон-аналогов со схожими сеймотектоническими условиями будет способствовать формализации и ускорению процесса использования макросейсмической информации в службах МЧС для эффективного расчета возможных потерь от сильных землетрясений и скорейшего принятия решения о проведении поисково-спасательных и других неотложных работ.

Авторы благодарят проф. Снежану Маркусич за предоставление инструментальных данных о параметрах очага землетрясения 22 марта 2020 г. и обсуждение результатов исследования. Также авторы выражают признательность коллективу Центра исследований экстремальных ситуаций за их вклад в развитие системы “Экстремум” и коллегам из ФИЦ ЕГС РАН за плодотворное сотрудничество.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР

№ г.р. АААА-А19-119021190077-6, государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075-01304-20 и проекта МГТУ им. Баумана № 075-11-2019-087 от 18.12.2019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондорская Н.В., Горбунова И.В., Киреев И.А., Вандышева Н.В. Унифицированный каталог землетрясений Северной Евразии с древнейших времен до 1995 г. URL: <http://www.scgis.ru> System of data bases. IJPE RAS, 1996.
2. Лутиков А.И., Габсатарова И.П. Соотношение между моментной магнитудой MW и магнитудой по поверхностным волнам MS для Кавказского региона и сопредельных территорий // Геофизические исследования. 2016. Т. 17. № 1. С. 29–36.
3. Петрова Н.В., Михайлова Р.С. Проблемы единой магнитудной классификации землетрясений Кавказ-Копетдагской сейсмоактивной зоны // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Десятой междунар. сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2015. С. 257–262.
4. Петрова Н.В., Диденко В.И., Морозова А.Д. Разработка базы данных “Сильные и ощутимые землетрясения России и сопредельных стран” // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Тр. Седьмой научно-техн. конф. / Отв. ред. Д.В. Чебров. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 191–196. URL: <http://www.emsd.ru/conf2019lib/mlib2.html>
5. Петрова Н.В., Дягилев Р.А., Габсатарова И.П. Особенности затухания сейсмического эффекта землетрясений Русской платформы и Урала // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 4. С. 5–25. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.4-1>
6. Радзиминович Я.Б., Гилева Н.А., Середкина А.И., Мельникова В.И. Джиргинское землетрясение 27 апреля 2014 г. с $K_p = 13.3$, $M_w = 4.9$, $I_0 = 7$ (Северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 23 (2014). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. С. 307–316. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.31>.
7. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Ред. В.И. Уломов, Н.С. URL: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog.pdf>.
8. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1: 8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
9. Фролова Н.И., Угаров А.Н. База знаний о сильных землетрясениях как инструмент повышения надежности оперативных оценок потерь // Геоэкология. 2018. № 6. С. 1–18.
10. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Использование макросейсмических данных для повышения надежности оперативных оценок потерь на примере землетрясений стран СНГ. Матер. XIII Междунар. сейсмологической школы. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 292–297.
11. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Петрова Н.В., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Влияние особенностей затухания сейсмической интенсивности на надежность оперативных оценок потерь от землетрясений // Геоэкология. 2019. № 5. С. 23–37.
12. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С. Калибровка модели затухания сейсмической интенсивности на примере землетрясений в Албании // Геоэкология. 2020. № 5. С. 62–77. <https://doi.org/10.31857/S0869780920050033>
13. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. М.: Научный мир, 2001. 606 с.
14. Шебалин Н.В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 95–121.
15. Шебалин Н.В. Опорные землетрясения и уравнения макросейсмического поля // Новый Каталог сильных землетрясений на территории СССР (с древнейших времен до 1975 г.). М.: Наука, 1977. С. 20–30.
16. Шулаков Д.Ю. Уточнение сейсмической опасности для района г. Перми // Горное эхо. 2020. № 3 (80). С. 92–98. <https://doi.org/10.7242/echo.2020.3.18>.
17. Basham P., Giardini D. Technical guidelines for global seismic hazard assessment // Ann. Geofis. 1993. V. XXXVI. № 3–4. P. 15–20.
18. Bindi D., Spallarossa D., Picozzi M., Scafidi D., Cotton F. Impact of magnitude selection on aleatory variability associated with GroundMotion Prediction Equations: Part I. Local, energy, and moment magnitude calibration and stress-drop variability in central Italy // Bull. Seism. Soc. Am., 2018. № 108 (3A). P. 1427–1441.
19. Bindi D., Zaccarelli R., Strollo A., Giacomo D. Harmonized local magnitude attenuation function for Europe using the European Integrated Data Archive (EIDA) // Geophys. J. Int., 2019. № 218. P. 519–533.
20. Bindi D., Picozzi M., Spallarossa D., Cotton F., Kotha S.R. Impact of magnitude selection on aleatory variability associated with Ground Motion Prediction Equations: Part II. Analysis of the between event distribution in central Italy // Bull. Seism. Soc. Am., 2019. № 109 (1). <https://doi.org/10.1785/0120180239>
21. Bormann P. (ed). IASPEI New manual of seismological observatory practice (NMSOP). Geo Forchungs Zentrum, Potsdam. Bormann P., Baumbach M., Bock G., Grosser H., Choy G., Boatwright J. Chapter 3. Seismic Sources and Source Parameters. 2012. 94 p.
22. Deichmann N. Theoretical basis for the observed break in ML/Mw scaling between small and large earthquakes // Bull. Seism. Soc. Am., 2017. № 107 (2). P. 505–520.

23. *Deichmann N.* Why does ML scale 1:1 with 0.5log Es? // *Seimol. Res. Lett.*, 89, 2018, 2249–2255. <https://doi.org/10.1785/0220180121>
24. Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region. UNDP Project Executed by UNESCO in Association with UNDRO (RER/79/014). Working Group A. SEISMOLOGY, SEISMOTECTONICS, SEISMIC HAZARD AND EARTHQUAKE PREDICTION. Final Report. Athens, December 1982. 157 p.
25. *Grunthal G. & Wahlstrom R.* The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium // *J. Seismol.*, 2012. № 16. P. 535–570.
26. *Herak M., Herak D., Stipevic J.* Seismology in Croatia, 2015–2018 // *Geofizika*. 2019. V. 36. № 2. P. 217–224.
27. *Herak M.* Conversion between the local magnitude (ML) and the moment magnitude (Mw) for earthquakes in the Croatian Earthquake Catalogue // *Geofizika*. 2020. V. 37. № 2. P. 197–211. <https://doi.org/10.15233/gfz.2020.37.10>
28. *Ivančić I., Herak D., Markušić S., Sović I., Herak M.* Seismology in Croatia in the period 1997–2001 // *Geofizika*. 2001–2002. V. 18–19. № 2. P. 17–29.
29. *Ivančić I., Herak D., Sović I., Herak M.* Seismology in Croatia in the period 2002–2005 // *Geofizika*. 2006. V. 23. № 2. P. 87–103.
30. *Ivančić I., Herak D., Herak M., Allegretti I., et al.* Seismicity of Croatia in the period 2006–2015 // *Geofizika*, 2018. V. 35. № 1. P. 69–98. <https://doi.org/10.15233/gfz.2018.35.2>
31. *Kanamori H.* Magnitude Scale and Quantification of Earthquakes // *Tectonophysics*. 1983. № 93. P. 185–199. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90273-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90273-1)
32. *Kanamori H., Hauksson E., Hutton L.K., Jones L.M.* Determination of earthquake energy release and ML using TERRAScope // *Bull. seism. Soc. Am.*, 1993. № 83. P. 330–346.
33. *Markušić S., Herak D., Ivančić I., Sović I., et al.* Seismicity of Croatia in the period 1993–1996 and the Ston-Slano earthquake of 1996 // *Geofizika*. 1998. V. 15. UDC 550.342.2.
34. *Markušić S. and Herak M.* Seismic zoning of Croatia // *Natural Hazards*. 1999. № 18. P. 269–285.
35. *Markušić S., Stanko D., Korbar T., Belić N., et al.* The Zagreb (Croatia) M5.5 Earthquake on 22 March 2020 // *Geosciences*. 2020. № 10. P. 252. <https://doi.org/10.3390/geosciences10070252>
36. *Markušić S., Stanko D., Penava D., Ivančić I., et al.* Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020 // Preliminary Multidisciplinary Research. Remote Sens. 2021. № 13, 1095. <https://doi.org/10.3390/rs13061095>
37. *Papazachos C. and Papaioannou Ch.* The macroseismic field of the Balkan area // *Journal of Seismology*. 1997. 1: 181–201.
38. *Papazachos C. and Papaioannou Ch.* Further information on the macroseismic field in the Balkan area // *Journal of Seismology*. 1998. 2: 363–375.
39. *Richter C.* An instrumental earthquake magnitude scale // *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1935. № 25. P. 1–32.
40. *Shebalin N.V., Karnik V., Had'ievski D.* (eds) Catalogue of earthquakes. Part I, 1901–1970, Part II, prior to 1901, Part III, Atlas of isoseismal maps. UNDP/UNESCO Survey of the seismicity of the Balkan region, Skopje. 1974.
41. *Shebalin N.V., Leydecker G., Mokrushina N.G., Tatevossian R.E., Erteleva O.O., Vassiliev V.Yu.* Earthquake Catalogue for Central and Southeastern Europe 342 BC – 1990 AD. Final Report to Contract ETNU – CT93-0087

CALIBRATION OF SEISMIC INTENSITY ATTENUATION MODEL FOR THE BALKAN REGION (THE 2020 EARTHQUAKES IN CROATIA)

N. I. Frolova^{a, #}, I. P. Gabsatarova^{b, ##}, S. P. Suchshev^{c, ###}, A. N. Ugarov^c, and N. S. Malaeva^a

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^b *Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Lenina pr., 189, Obninsk, Kaluga region, 249035 Russia*

^c *Moscow State Technical University named after Bauman, 2-ya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia*

[#] *E-mail: frolovanina7@gmail.com*

^{##} *E-mail: ira@gsras.ru*

^{###} *E-mail: Sersan150@mail.ru*

The paper describes the results of studies aimed at calibration of the parameters of the macroseismic field model in one of the zones in the Balkans based on the data of the 2020 earthquakes in Croatia. The zone is located within the continental region of Croatia, on the border of the Dinarids and the southern part of the Pannonian Basin, which are a part of the Alpine-Himalayan seismic belt. The calibrated parameters of the macroseismic field model obtained for another region of this belt, located in the Caucasus, which manifest the similar features of tectonic development, were used for comparison. In order to increase the reliability of near real time earthquake loss estimations, the paper analyzes the alert messages from several seismological centers, focal mechanisms for taking into account the direction of radiation and the choice of a seismogenic fault in the Earth's crust. Simulated intensities obtained with “Extremum” System application were compared with reported ones. The obtained calibration results supplemented the database used for earthquake

consequences simulation in emergency mode, and will be used for near real time loss estimations with the “Extremum” system application in the case of destructive earthquakes in the Balkan Peninsula region.

Keywords: near real time earthquake loss estimates, damaging earthquake, macroseismic field model calibration, the Alpine-Himalayan seismic active belt, region analogs, Information System “Extremum”

REFERENCES

1. Kondorskaya, N.V., Gorbunova, I.V., Kireev, I.A., Vandyshcheva, N.V. *Unifitsirovannyi katalog zemletryasenii Severnoi Evrazii s drevneishikh vremen do 1995 g.* [Special earthquake catalogue of Northern Eurasia from ancient times through 1995]. N.V. Kondorskaya, V.I. Ulomov, Eds. URL: <http://www.scgis.ru> System of data bases. JIPE RAS, 1996. (in Russian)
2. Lutikov, A.I., Gabsatarova, I.P. *Sootnoshenie mezhdru momentnoi magnitudoi MW i magnitudoi po poverkhnostnym volnam MS dlya Kavkazskogo regiona i sopredel'nykh territorii* [Relationship between moment magnitude MW and surface wave magnitude MS for the Caucasus region and adjacent territories]. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 29–36. (in Russian)
3. Petrova, N.V., Mikhailova, R.S. *Problemy edinoi magnitudnoi klassifikatsii zemletryasenii Kavkaz-Kopetdag-skoj seismoaktivnoi zony* [Problems of a unified magnitude classification of earthquakes in the Caucasus-Kopetdag seismic zone]. In: *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Proc. Tenth Int. Seismological School. A.A. Malovichko, Ed.-in-Chief. Obninsk: FITs EGS RAS, 2015, pp. 257–262. (in Russian)
4. Petrova, N.V., Didenko, V.I., Morozova, A.D. *Razrabotka bazy dannykh “Sil'nye i oshchutimye zemletryaseniya Rossii i sopredel'nykh stran”* [Development of the database “Strong and moderate earthquakes occurred in Russia and adjacent countries”]. In: *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoring Dal'nego Vostoka Rossii* [Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East]. Proc. the 7th scientific and technical conference. D.V. Chebrov, Ed.-in-chief. Obninsk, GS RAS, 2019, pp. 191–196. <http://www.emsd.ru/conf2019lib/mlib2.html> (in Russian)
5. Petrova, N.V., Dyagilev, R.A., Gabsatarova, I.P. *Oso-bennosti zatukhaniya seismicheskogo effekta zemletryasenii Russkoi platformy i Urala* [Features of attenuation of the seismic effect of earthquakes in the Russian platform and the Urals]. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2020, vol. 47, no. 4, pp. 5–25. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.4-1> (in Russian)
6. Radziminovich, Ya.B., Gileva, N.A., Seredkina, A.I., Mel'nikova, V.I. Dzhirga earthquake on April 27, 2014 with $K_p = 13.3$, $M_w = 4.9$, $I_0 = 7$ (Northern Pribaikalia). In: *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii* [Earthquakes of Northern Eurasia]. 2014, issue 23. Obninsk: FRC EGS RAS, 2020, pp. 307–316. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.31>. (in Russian)
7. *Spetsializirovannyi katalog zemletryasenii dlya zadach obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossiiskoi Federatsii* [Specialized catalog of earthquakes for general seismic zoning of the Russian Federation territory]. V.I. Ulomov, N.S. Medvedeva, Eds. URL: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog.pdf> (in Russian)
8. Ulomov, V.I., Shumilina, L.S. *Komplekt kart obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossiiskoi Federatsii – OSR-97. Ob'yasnitel'naya zapiska i spisok gorodov i naselennykh punktov, raspolozhennykh v seismopasnykh raionakh* [Set of maps OSR-97-A, B, C of review seismic zoning of the Russian Federation territory – OSR-97. Scale 1: 8 000 000. Explanatory note and list of cities and settlements located in earthquake prone areas]. Moscow, OIFZ, 1999, 57 p. (in Russian)
9. Frolova, N.I., Ugarov, A.N. *Baza znaniy o sil'nykh zemletryasenyakh kak instrument povysheniya nadezhnosti operativnykh otsenok poter'* [Knowledge base about past earthquakes as a tool to increase the reliability of near real time loss estimation]. *Geoekologiya*, 2018, no. 6, pp. 1–18. (in Russian)
10. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Ugarov, A.N., Malaeva, N.S. *Ispol'zovanie makroseismicheskikh dannykh dlya povysheniya nadezhnosti operativnykh otsenok poter' na primere zemletryasenii stran SNG* [The use of macroseismic data to improve the reliability of operational estimates of losses by the example of earthquakes in CIS countries]. Proc. XIII Int. seismological school “Modern methods of processing and interpretation of seismological data”. A.A. Malovichko, Ed.-in-Chief. Obninsk, EGS RAN, 2018, pp. 292–297. (in Russian)
11. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Petrova, N.V., Ugarov, A.N., Malaeva, N.S. *Vliyanie osobennostei zatukhaniya seismicheskoi intensivnosti na nadezhnost' operativnykh otsenok poter' ot zemletryasenii* [Influence of shaking intensity attenuation peculiarities on reliability of earthquake loss estimation in emergency mode]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 23–37. (in Russian)
12. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Ugarov, A.N., Malaeva, N.S. *Kalibrovka modeli zatukhaniya seismicheskoi intensivnosti na primere zemletryasenii v Albanii* [Seismic intensity attenuation model calibration by the example of earthquakes in Albania]. *Geoekologiya*, 2020, no. 5, pp. 62–77. <https://doi.org/10.31857/S0869780920050033>. (in Russian)
13. Khain, V.E. *Tektonika kontinentov i okeanov* [Tectonics of continents and oceans]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2001, 606 p.
14. Shebalin, N.V. *Metody ispol'zovaniya inzhenerno-seismologicheskikh dannykh pri seismicheskoi raionirovani* [Procedures of engineering seismological data application for seismic zoning]. In: *Seismicheskoe raionirovanie SSSR* [Seismic zoning of the USSR]. Moscow, Nauka, 1968, pp. 95–121. (in Russian)
15. Shebalin, N.V. *Opornye zemletryaseniya i uravneniya makroseismicheskogo polya* [Reference earthquakes and

- macroseismic field equations]. *Novyi katalog sil'nykh zemletryasenii na territorii SSSR (s drevneishikh vremen do 1975 g)* [New catalogue of strong earthquakes for the USSR territory from ancient times till 1975]. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 20–30. (in Russian)
16. Shulakov, D.Yu. *Utochnenie seismicheskoi opasnosti dlya raiona g. Permi* [Verification of seismic hazard for the area of Perm]. *Gornoe ekho*, 2020, no. 3 (80), pp. 92–98. DOI: 10.7242/echo.2020.3.18. (in Russian)
 17. Basham, P., Giardini, D. Technical guidelines for global seismic hazard assessment. *Ann. Geofis.*, 1993, vol. XXXVI, no 3–4, pp. 15–20.
 18. Bindi, D., Spallarossa, D., Picozzi, M., Scafidi, D. & Cotton, F. Impact of magnitude selection on aleatory variability associated with Ground Motion Prediction Equations: Part I. Local, energy, and moment magnitude calibration and stress-drop variability in central Italy. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2018, no. 108 (3A), pp. 1427–1441.
 19. Bindi, D., Zaccarelli, R., Strollo, A., Giacomo, D. Harmonized local magnitude attenuation function for Europe using the European Integrated Data Archive (EIDA). *Geophys. J. Int.*, 2019, no. 218, pp. 519–533.
 20. Bindi, D., Picozzi, M., Spallarossa, D., Cotton, F. & Kotha, S.R. Impact of magnitude selection on aleatory variability associated with Ground Motion Prediction Equations: Part II. Analysis of the between event distribution in central Italy. *Bull. seism. Soc. Am.*, 2019, no. 109 (1). DOI:10.1785/0120180239
 21. Bormann, P. (ed). IASPEI New manual of seismological observatory practice (NMSOP). Geo Forschungs Zentrum, Potsdam. Bormann, P., Baumbach, M., Bock, G., Grosser, H., Choy, G., Boatwright, J. Chapter 3. Seismic Sources and Source Parameters. 2012, 94 p.
 22. Deichmann, N. Theoretical basis for the observed break in ML/Mw scaling between small and large earthquakes. *Bull. seism. Soc. Am.*, 2017, no. 107 (2), pp. 505–520.
 23. Deichmann, N. Why does ML scale 1:1 with 0.5log Es? *Seimol. Res. Lett.*, 2018, no. 89, pp. 2249–2255. <https://doi.org/10.1785/0220180121>
 24. Earthquake risk reduction in the Balkan region. UNDP project executed by UNESCO in association with UNDRO (RER/79/014). Working Group A. Seismology, seismotectonics, seismic hazard and earthquake prediction. Final Report. Athens, December 1982, 157 p.
 25. Grunthal, G. & Wahlstrom, R. The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. *J. Seismol.*, 2012, no. 16, pp. 535–570.
 26. Herak, M., Herak, D., Stipcevic, J. Seismology in Croatia, 2015–2018. *Geofizika*, 2019, vol. 36, no. 2, pp. 217–224.
 27. Herak, M. Conversion between the local magnitude (ML) and the moment magnitude (Mw) for earthquakes in the Croatian Earthquake Catalogue. *Geofizika*, 2020, vol. 37, no. 2, pp. 197–211. <https://doi.org/10.15233/gfz.2020.37.10>.
 28. Ivancić, I., Herak, D., Markušić S., Sović I., Herak, M. Seismology in Croatia in the period 1997–2001. *Geofizika*, 2001–2002, vol. 18–19, no. 2, pp. 17–29.
 29. Ivancić, I., Herak, D., Sović I., Herak, M. Seismology in Croatia in the period 2002–2005. *Geofizika*, 2006, vol. 23, no. 2, pp. 87–103.
 30. Ivančić, I., Herak, D., Herak, M., Allegretti, I., et al. Seismicity of Croatia in the period 2006–2015. *Geofizika*, 2018, vol. 35, no. 1, pp. 69–98. <https://doi.org/10.15233/gfz.2018.35.2>.
 31. Kanamori, H. Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*, 1983, no. 93, pp. 185–199. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90273-1](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(83)90273-1)
 32. Kanamori, H., Hauksson, E., Hutton, L.K. & Jones, L.M. Determination of earthquake energy release and ML using TERRAScope. *Bull. seism. Soc. Am.*, 1993, no. 83, pp. 330–346.
 33. Markušić, S., Herak, D., Ivancić, I., Sović, I., et al. Seismicity of Croatia in the period 1993–1996 and the Ston-Slano earthquake of 1996. *Geofizika*, 1998, vol. 15, UDC 550.342.2.
 34. Markušić, S. and Herak, M. Seismic zoning of Croatia. *Natural Hazards*, 1999, no. 18, pp. 269–285.
 35. Markušić, S., Stanko, D., Korbar, T., Belić N., et al. The Zagreb (Croatia) M5.5 earthquake on 22 March 2020. *Geosciences*, 2020, no. 10, pp. 252. <https://doi.org/10.3390/geosciences10070252>.
 36. Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivancić, I., et al. Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020. *Preliminary Multidisciplinary Research. Remote Sens.*, 2021, no. 13, p. 1095. <https://doi.org/10.3390/rs13061095>
 37. Papazachos, C. & Papaioannou, Ch. The macroseismic field of the Balkan area. *Journal of Seismology*, 1997, no. 1, pp. 181–201.
 38. Papazachos, C. & Papaioannou, Ch. Further information on the macroseismic field in the Balkan area. *Journal of Seismology*, 1998, no. 2, pp. 363–375.
 39. Richter, C. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1935, no. 25, pp. 1–32.
 40. Shebalin, N.V., Karnik, V., Had'ievski, D. (eds) Catalogue of earthquakes. Part I, 1901–1970, Part II, prior to 1901, Part III, Atlas of isoseismal maps. UNDP/UNESCO Survey of the seismicity of the Balkan region, Skopje. 1974.
 41. Shebalin, N.V., Leydecker, G., Mokrushina, N.G., Tatevossian, R.E., Erteleva, O.O., Vassiliev, V.Yu. Earthquake Catalogue for Central and Southeastern Europe 342 BC – 1990 AD. Final Report to Contract ETNU –CT93-0087. 1998.