

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 4 / 2018



УДК 550.34

DOI:10.23671/VNC.2018.4.20158

МОДЕЛИ СЕЙСМИЧНОСТИ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО ДЕТАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ РСО-АЛАНИЯ

© 2018 Ю. К. Чернов, д. ф.-м. н., проф., В. Б. Заалишвили, д. ф.-м. н., проф.,
Б. В. Дзеранов, к. г.-м. н.

Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi_ras@mail.ru

В рамках исследований по созданию нового альбома вероятностных карт детального сейсмического районирования территории РСО-Алания разработан ряд моделей региональной и локальной сейсмичности района. Модели в вероятностной форме описывают места (зоны) возникновения потенциально опасных для изучаемой территории землетрясений, максимальные возможные магнитуды этих землетрясений, размеры, механизмы и ориентацию очагов, повторяемость землетрясений разных магнитуд во времени, распределение очагов землетрясений по глубине. Исследования проведены с использованием большого объема сейсмостатистических, макросейсмических, сейсмотектонических, инструментальных и других данных. Модели позволяют повысить точность и детальность прогнозных оценок на региональном и локальном уровнях, т. к. более полно учитывают особенности пространственно-временного распределения потенциально опасных очагов землетрясений, а также представляют итоговую информацию в виде, необходимом для ее дальнейшего включения в вероятностный анализ сейсмической опасности (probabilistic seismic hazard analysis – PSHA).

Ключевые слова: детальное сейсмическое районирование, сейсмическая опасность, сильные землетрясения, зоны ВОЗ, сейсмический режим, вероятные сейсмические воздействия.

Введение

Геофизическим институтом ВНЦ РАН в 2017 г. начата разработка новой Карты детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. В рамках данной программы разработана новая (позволяющая получать более точные и детальные оценки) технология вероятностного прогнозирования наиболее важных характеристик опасных сейсмических воздействий. Подробное описание этой технологии дано в работе [Чернов, 2017]. Здесь же приведем ее основные положения. Согласно данной технологии вероятностный анализ сейсмической опасности (probabilistic seismic hazard analysis – PSHA) строится на основе расчетов с использованием формулы полной вероятности. При этом условная вероятность задается функцией распределения рассматриваемого параметра сейсмического воздействия при единичном событии (землетрясении) с заданными характеристиками (магнитуда, удаленность, механизм и др.), а безусловная вероятность – описывает неопределенность в возникновении такого землетрясения в данном месте в заданный промежуток времени.

Данная расчетная схема реализуется на базе моделей, которые можно разделить на две группы – модели сейсмичности (задают безусловную вероятность) и модели сильных движений (задают условную вероятность). В данной работе рассмотрены

модели первой группы, описывающие: а) вероятные места (зоны) возникновения потенциально опасных для изучаемой территории землетрясений (зоны ВОЗ); б) максимальные возможные магнитуды (M_{max}) этих землетрясений; в) размеры, механизмы и ориентацию очагов; г) повторяемость землетрясений разных магнитуд во времени; д) распределение очагов землетрясений по глубине.

Исходные материалы и методика анализа данных

Информационная база исследований сформирована с использованием всех доступных сейсмологических, геолого-геофизических, макросейсмических, инженерно-геологических и других данных по исследуемому району, а также по некоторым другим сейсмоактивным районам мира со сходными природными условиями (подробнее их описание дано ниже, применительно к каждому типу из разрабатываемых моделей).

При этом анализировались:

- материалы о геологическом строении района (о стратиграфии глубинных отложений, об общем тектоническом строении, геоморфологические данные);
- данные о сеймотектонических условиях района и разработанные ранее различными авторами варианты зон ВОЗ;
- региональные и локальные данные о пространственном расположении и повторяемости во времени очагов землетрясений разных магнитуд, а также других параметрах сейсмического режима исследуемой территории РСО-Алания и прилегающих районов;
- данные о размерах, ориентации и механизмах очагов землетрясений исследуемого района;
- результаты по оценкам региональной и локальной сейсмичности, полученные ранее при выполнении работ по ОСР, ДСР, СМР в данном регионе;
- литературные и фондовые данные о макросейсмических проявлениях сильных землетрясений в различных геологических условиях исследуемого района;

При обработке исходных данных использовались методы математической статистики – корреляционный, регрессионный и дисперсионный анализы, метод проверки статистических гипотез, а также метод геологических аналогий.

Комплексному анализу подвергнут район, включающий в себя территорию РСО-Алания и прилегающие участки на расстояниях до 150 км. Размеры (~325 км × 325 км) и расположение (симметричный квадрат вокруг территории РСО-Алания) рассматриваемого района выбраны таким образом, чтобы обеспечить учет возможных воздействий от всех потенциально опасных для расчетных точек очагов землетрясений. Максимальные расстояния, на которых учитываются возможные очаги землетрясений, составляют ~150 км. Более далекие землетрясения даже с максимально возможными в данном регионе магнитудами ($M_{max}=7,0$) с большой вероятностью не могут вызвать сильных ($I>6$ баллов *MSK*) сотрясений на изучаемой территории Республики Северная Осетия-Алания.

Применен вариант оценки вероятных сейсмических воздействий для точечных объектов [Чернов, 1989]. Точечными объектами в данном случае являются расположенные по сетке квазиоднородные элементарные участки, на которые разбит весь вышеуказанный район. Каждый элементарный участок территории (с учетом глубины сейсмогенерирующего слоя) для описания региональной и локальной сейсмичности характеризуется следующими параметрами:

- значениями магнитуд потенциально опасных землетрясений, очаги, а точнее центры тяжести очагов которых могут возникать под данным участком, от минимальной M_{min} до максимальной M_{max} ;
- размерами, механизмами и ориентацией в пространстве очагов потенциально опасных землетрясений разных магнитуд;
- распределением землетрясений разных магнитуд по глубине очагов;
- повторяемостью, то есть средним числом землетрясений разных магнитуд в единицу времени;

Размеры элементарных участков на поверхности земли для всей территории приняты одинаковыми и равными 5 км'5 км, что обеспечивает достаточную детальность и точность расчетов [Чернов, 1989]. В качестве сейсмогенерирующего пространства рассматривался слой земной коры мощностью до 40 км.

Вышеуказанные характеристики тесно связаны с региональными и местными особенностями сейсмичности и сейсмогеологического строения изучаемой территории и являются необходимыми исходными данными для построения описанных ниже моделей сейсмичности.

Результаты и обсуждение.

Зоны ВОЗ. Определение зон ВОЗ и максимально возможных в них магнитуд землетрясений является сложной задачей, страдающей большой неопределенностью. В российской практике эта задача решается на основе комплексного анализа имеющихся сейсмологических и геолого-геофизических данных [Сейсмическое..., 1980; Аптикаев и др., 1986; Штейнберг и др., 1993; Комплект карт..., 1999].

Зоны ВОЗ для рассматриваемого района достаточно полно изучались при построении карт ОСР территории Северного Кавказа [Сейсмическое..., 1980; Уломов, 1995; Комплект карт..., 1999], ДСР Ставропольского края [Составление карты..., 1996], а также исследований, проведенных ИГЭ РАН [Отчет..., 2007, 2008], ОИФЗ РАН [Рогожин, 2007; Отчет..., 2015].

В настоящее время для исследуемой территории РСО-Алания и прилегающих районов имеется карта зон ВОЗ, разработанная в рамках построения действующей карты ОСР-97. Подробное описание методики и результатов построения данной карты зон ВОЗ приведены в [Ulovov et al., 1999]. Здесь мы ограничимся кратким изложением этого материала.

В качестве зон ВОЗ предложена модель, предусматривающая три основных структурных элемента – линеаменты, домены и отдельные очаги землетрясений – линеаментно-доменно-фокальная или ЛДФ – модель. При разработке данной модели использован большой фактический материал, включающий различные каталоги землетрясений, карты новейшей тектоники, карты активных разломов, механизмов очагов и другие данные.

Согласно данной модели линеаменты – это линейно вытянутые объемные области, обычно приуроченные к крупным разломам. Возникающие здесь очаги сильных землетрясений тяготеют к центральным частям (осям) линеаментов. По мере удаления от осевой зоны вероятность возникновения крупных очагов падает. Линеаменты разделены по величине возможной в их пределах M_{max} . Домены – это объемные распределенные по площади относительно однородные в сейсмогеологическом отношении сейсмогенерирующие структуры. В пределах домена в горизонтальном направлении вероятность возникновения очагов землетрясений прини-

мается одинаковой. Домены также ранжированы по величине M_{max} .

Разделение линеamentных и доменных зон по величине M_{max} проведено с использованием различных способов – на основе их протяженности и ширины, по характеристикам сейсмического режима, по палеосейсмологическим, археологическим и историческим данным, по пространственно-временному распределению афтершоков имевших здесь место крупных землетрясений, по величине сейсмодислокаций и другим параметрам. На данный момент применительно к исследуемой территории РСО-Алания данная ЛДФ – модель является одной из самых обоснованных и надежных и поэтому она принята за основу для дальнейших расчетов при производстве детального вероятностного анализа сейсмической опасности данного региона.

На рисунке 1 приведена используемая нами в дальнейших построениях карта зон ВОЗ. Эта карта представляет собой несколько видоизмененный нами (без существенной потери точности) соответствующий фрагмент карты зон ВОЗ по версии ОСР-97. Видоизменение состоит в том, что здесь в целях удобства дальнейших расчетов в явном виде выделены осевые и боковые подзоны линеamentных зон. Осевые и боковые подзоны различаются уровнями вероятности возникновения разрешенных в данной зоне ВОЗ магнитуд землетрясений. Так, например, принято, что вероятности возникновения землетрясений с магнитудой M_{max} в осевой подзоне в два раза выше, чем в боковой. Разница в вероятностях возникновения землетрясений с магнитудами меньшими, чем M_{max} в этих двух подзонах постепенно снижается при уменьшении величины M , сходя на нет для землетрясений малых магнитуд. Ширина боковых зон принята в два раза большей, чем осевых. что в сочетании с соответствующими законами повторяемости (подробнее см. далее) в целом соответствует рекомендациям работ [Уломов, 1995; Ulomov et al. 1999].

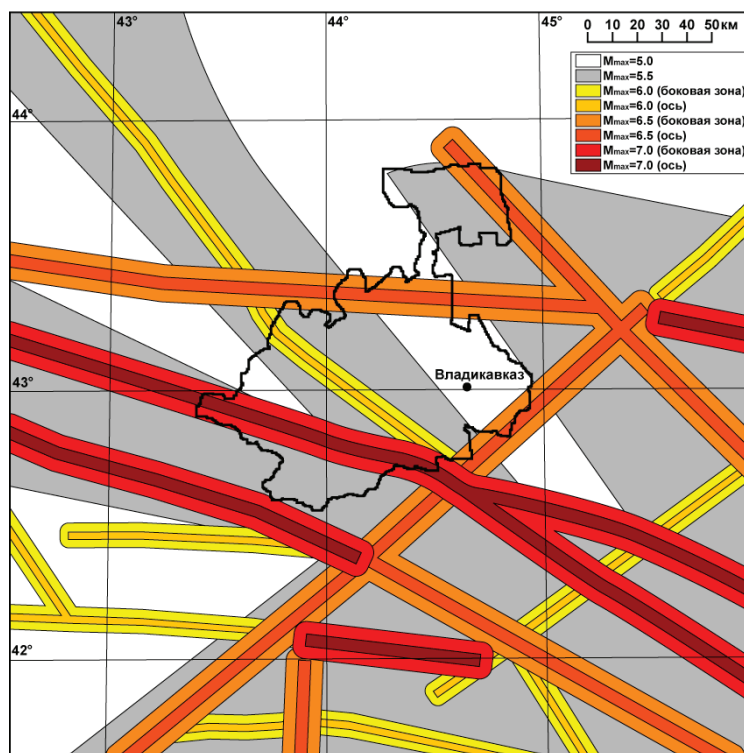


Рис. 1. Зоны ВОЗ (по версии ОСР-97). Жирным черным цветом показана граница территории РСО-Алания.

Преобладающие механизмы очагов. Под «механизмом очага» землетрясения в данном случае понимается тип подвижки в очаговой области – сдвиг, взброс или сброс, а также комбинации этих основных типов. Кроме того, оценивается ориентация в трехмерном пространстве поверхности основного разрыва, по которому происходит подвижка в очаге.

Из-за ограниченности прямых определений механизмов очагов по данным инструментальной регистрации дополнительно привлечены геолого-геофизические данные, на основе которых осуществлено выделение зон ВОЗ в работах [Арефьев, 2001; Составление карты..., 1996; Комплект карт..., 1999; Уломов, 1995; Рогожин, 2007; Отчет..., 2015]. Согласно выводам этих работ, в данном регионе в зонах ВОЗ, связанных с активными разломами «продольного», или «близширотного» простирания более вероятны взбросовые и взбросо-сдвиговые механизмы очагов. В зонах ВОЗ, связанных с разломами «поперечного», или «близмеридионального», простирания более вероятны сдвиговые механизмы подвижки. «Продольные» зоны ВОЗ, потенциально более опасные, сосредоточены, в основном, в южной и центральной части территории РСО-Алания и прилегающих районов. По мере продвижения на север их значение уменьшается и возрастает относительная роль «поперечных» структур. Разделение на «сдвиговый» и «взбросовый» механизмы подвижки является условным. В реальности правильнее говорить о преобладании «сдвиговой» или «взбросовой» компоненты в общем перемещении бортов разрыва при землетрясении. Кроме того, в пределах и «продольных» и «поперечных» зон ВОЗ возможны землетрясения с иным, чем вышеуказанные «наиболее вероятные» механизмы очагов. Тип подвижки, по-видимому, определяется ориентацией площадки будущего разрыва по отношению к направлению регионального сжатия.

Учитывая вышеизложенное, принято, что потенциально опасные для изучаемой территории РСО-Алания очаги землетрясений имеют смешанный взбросо-сдвиговый механизм подвижки без преобладания сдвиговой или взбросовой компонент. По данным работ [Сейсмическое..., 1980; Составление карты..., 1996; Арефьев, 2001] падение потенциально опасных разрывных зон варьирует от 40-50° до близ-вертикального.

Эти представления используются далее для выбора параметров расчетной модели, описывающей ориентацию в пространстве очагов землетрясений разных магнитуд, потенциально опасных для изучаемой территории.

Повторяемость землетрясений. До последнего времени детальные количественные модели повторяемости землетрясений разных магнитуд в формате, предусмотренном используемой в настоящем исследовании расчетной схемой [Чернов, 2017], для изучаемого района не разрабатывались. Это связано, прежде всего, с недостаточностью сейсмостатистических данных и, как следствие, невозможностью прямого применения стандартных процедур определения параметров сейсмического режима [см., например, Сейсмическое..., 1980]. Первая попытка таких построений предпринята для района г. Спитак (северная Армения), а также северной части рассматриваемой территории [Chernov, Sokolov, 1996; Оценка..., 1998]. Подобные оценки затем были выполнены для некоторых других территорий Кавказа и Предкавказья [Чернов, 2006; 2010; 2016]. Настоящая работа продолжает исследования в данном направлении.

Из-за недостатка данных, *необходимых* для корректного статистического расчета количеств землетрясений \bar{N} (M) во всем диапазоне потенциально опасных

магнитуд ($M=3-7$) и на достаточно длительном интервале времени, в настоящем исследовании были применены комбинированные способы оценок с использованием непосредственных статистических подсчетов количества землетрясений разных магнитуд, а также геолого-геофизических критериев сейсмичности, методов геологических аналогий и экстраполяций. При этом использованы схемы зон ВОЗ (см. рис. 1), каталоги исторических землетрясений Кавказа, данные о сейсмической активности и графиках повторяемости, полученные ранее для разных территорий Кавказа при ОСР [Сейсмическое..., 1980; Комплект карт..., 1999], ДСР [Составление карт..., 1996]; СМР [Аверьянова и др., 1996; Оценка..., 1998] и другие материалы.

Для непосредственного определения статистики землетрясений и построения соответствующего рекуррентного соотношения $\bar{N}(\bar{M})$ использованы два основных первоисточника – каталог Геофизического института ВНИИ РАН и база данных из [Составление..., 1996]. Эти база данных и каталог включают в себя все основные первоисточники и являются на сегодняшний день достаточно полными и достоверными.

Оценки $P_{M=m}[N=n]$ [см. Чернов, 2017 выражение (8)], по этим двум первоисточникам выполнены в несколько этапов. На первом этапе построена модель повторяемости для относительно большой (но, в то же время, представительной для района РСО-Алания с точки зрения общих сейсмотектонических условий) территории. Выбрана территория в границах $40,5^\circ - 45,5^\circ N$ и $40^\circ - 46,5^\circ E$. Произведены разные варианты подсчетов количества землетрясений разных магнитуд – за весь период (~600 лет), за последние 150 лет, за последние 40 лет и др. При подсчетах все землетрясения сгруппированы по магнитудам – с $\bar{M}=2,5$ (2,25-2,74); с $\bar{M}=3,0$ (2,75-3,24); с $\bar{M}=3,5$ (3,25-3,74); с $\bar{M}=4,0$ (3,75-4,24); с $\bar{M}=4,5$ (4,25-4,74); с $\bar{M}=5,0$ (4,75-5,24); с $\bar{M}=5,5$ (5,25-5,74); с $\bar{M}=6,0$ (5,75-6,24); с $\bar{M}=6,5$ (6,25-6,74); с $\bar{M}=7,0$ (6,75-7,24). Однако, как указано в (Составление..., 1996), из-за пропусков в регистрации землетрясений в прошлом такие оценки для длительного интервала времени занижены. Размеры таких пропусков оценены в (Составление..., 1996). С учетом этих оценок и рекомендаций из [Разработка..., 2004] нами рассчитаны поправочные коэффициенты к первичным оценкам. Так, например, для $\bar{M}=4$ эти коэффициенты приняты равными 1,40 для периода 150 лет и 1,17 – для периода 40 лет. Для магнитуд с $\bar{M}=3$ за последние 150 лет принят повышающий коэффициент 10,0 (90% пропусков), а для магнитуд $\bar{M}=2$ – коэффициент 50,0 (98% пропусков). В итоге получено соотношение:

$$\lg \bar{N} = -0,862\bar{M} + 1,984 \quad (1)$$

Выражение (1) показывает средние количества землетрясений (\bar{N}), приведенные к площади 1000 км^2 и времени 1 год и справедливы для магнитуд с шагом $\Delta M=0,5$. Соответствующие по магнитудным оценкам $\lg \bar{N}$ приведены в таблице 1.

В этой же таблице приведены несколько подобных оценок, полученных ранее другими авторами. В некоторых из этих оценок рекуррентные соотношения $\bar{N}(\bar{M})$ получены по статистическим выборкам, сгруппированным по магнитуде с шагом $\Delta M=1,0$. В таких случаях эти оценки пересчитывались при помощи стандартных процедур логарифмически линейной аппроксимации и интерполяции в значения, соответствующие группированию $\Delta M=0,5$. Пересчет осуществлялся в предположении, что на один интервал $\Delta M=0,5$ приходится в среднем в два раза меньше землетрясений, чем на интервал $\Delta M=1,0$ [Разработка..., 2004]. Поэтому, принятые в рас-

четах значения $\overline{N}(\overline{M})$ (для $\Delta M=0,5$) примерно в два раза ниже, чем первоначальные оценки, рассчитанные для интервалов $\Delta M=1,0$. Такая оценка завышена на $\approx 13\%$. Однако такая консервативная оценка на данном этапе представляется оправданной, так как обеспечивает дополнительный «запас прочности» (в смысле снижения вероятности недооценки сейсмической опасности).

Таблица 1.

Варианты оценок средних чисел (\overline{N}) землетрясений разных магнитуд (\overline{M}) для района в границах $40,5^\circ - 45,5^\circ N$ и $40^\circ - 46,5^\circ E$ и для смежных территорий. Приведено к площади $S = 1000$ кв. км и времени $t = 1$ год

\overline{M}	$lg \overline{N}$							
	Настоящее исследование	[Комплект..., 1999]	[Аверьянова и др., 1996]	[Чернов, 2016]	Годзиховская	[Chernov, Sokolov, 1996]	[Отчет..., 2008]	Средневзвешенные значения
2,5	-0,063	-0,256	-0,171	-0,171	-0,242	-0,289	-0,289	-0,281
3,0	-0,54	-0,705	-0,602	-0,602	-0,744	-0,724	-0,724	-0,730
3,5	-1,033	-1,158	-1,268	-1,539	-1,247	-1,153	-1,016	-1,178
4,0	-1,464	-1,592	-1,706	-2,021	-1,75	-1,602	-1,494	-1,632
4,5	-1,895	-2,027	-2,144	-2,454	-2,252	-2,051	-1,971	-2,080
5,0	-2,326	-2,461	-2,582	-2,886	-2,754	-2,499	-2,449	-2,527
5,5	-2,757	-2,896	-3,02	-3,319	-3,257	-2,947	-2,927	-2,975
6,0	-3,188	-3,33	-3,458	-3,751	-3,76	-3,395	-3,405	-3,423
6,5	-3,619	-3,765	-3,898	-4,184	-4,263	-3,844	-3,882	-3,871
7,0	-4,05	-4,199	-4,334	-4,616	-4,765	-4,292	-4,36	-4,318

По приведенным в таблице 1. отдельным оценкам рассчитаны средневзвешенные значения. При этом оценкам по версии настоящих исследований и ОСР-97, как наиболее обеспеченным статистически приписаны веса равные 2, остальным версиям – веса равные 1.

В результате получено выражение:

$$lg \overline{N} = -0,898 \overline{M} + 1,968 \quad (2)$$

В выражении (2) обозначения те же, что и в выражении (1)

Это выражение является базовым для дальнейших построений. В графическом виде это соотношение показано на рисунке 2.

На втором этапе полученные для всего района значения $\overline{N}(\overline{M})$ пересчитаны в значения $\overline{N}(\overline{M})$ отдельно для каждой из выделенных зон ВОЗ (см. рис. 1) Пересчет осуществлялся двумя способами, описанными в работе [Чернов, 1989]. В качестве окончательных приняты значения $\overline{N}(\overline{M})$, являющиеся огибающими разных способов расчета (т.е. принят консервативный вариант оценки). При этом рассмотрены два варианта оценок. В первом, общая (т.е. без разделения на осевую и боковую подзоны) ширина линеаментов с $M_{max}=7,0$ составляет 15 км, с $M_{max}=6,5-12$ км и с $M_{max}=6,0-10$ км. Во втором, более консервативном, принято, что ширина линеаментов с $M_{max}=7,0$ и $6,5$ одинакова и равна 15 км. В таблице 2 приведены результирующие оценки $\overline{N}(\overline{M})$ для разных зон ВОЗ, рассчитанные по второму варианту. Эти оценки, как более осторожные, приняты в дальнейших расчетах.

Таблица 2.

Средние числа (\bar{N}) землетрясений разных магнитуд (\bar{M}) в зонах ВОЗ с разными M_{max} . Расчет по карте зон ВОЗ в версии ОСР-97. Район в пределах $40,5^\circ - 45,5^\circ N$ и $40^\circ - 46,5^\circ E$ (приведено к площади $S = 1000$ кв. км и времени $t = 1$ год). Без разделения линеаментов на осевые и боковые подзоны

\bar{M}	$lg \bar{N}$				
	Зоны ВОЗ с $M_{max}=5,0$	Зоны ВОЗ с $M_{max}=5,5$	Зоны ВОЗ с $M_{max}=6,0$	Зоны ВОЗ с $M_{max}=6,5$	Зоны ВОЗ с $M_{max}=7,0$
2,5	-0,277	-0,277	-0,277	-0,277	-0,277
3,0	-0,726	-0,726	-0,726	-0,726	-0,726
3,5	-1,175	-1,175	-1,175	-1,175	-1,175
4,0	-1,624	-1,624	-1,624	-1,624	-1,624
4,5	-2,073	-2,073	-2,073	-2,073	-2,073
5,0	-2,522	-2,522	-2,522	-2,522	-2,522
5,5	-	-2,79	-2,76	-2,76	-2,76
6,0	-	-	-2,936	-2,936	-2,936
6,5	-	-	-	-3,07	-3,07
7,0	-	-	-	-	-3,122

Так как в принятых моделях зон ВОЗ предусмотрено разделение линеаментных зон ВОЗ на осевые и боковые подзоны с разной вероятностью возникновения в них землетрясений (см. выше), данные таблицы 2 соответствующим образом пересчитаны. Результаты приведены в таблице 3.

На третьем этапе были построены модели \bar{N} (\bar{M}) в пределах всех выделенных зон ВОЗ для каждого из элементарных участков $5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$ (см. выше). При этом следуя работе [Чернов, 1989], нами принято, что каждая из зон ВОЗ квазиоднородна с точки зрения возможности генерации землетрясений. Поэтому, значения \bar{N} (\bar{M}) на каждом элементарном участке зоны ВОЗ изменятся, по сравнению со значениями из таблиц 2-3 пропорционально отношению площади выбранного элементарного участка (25 км^2) к площади $S=1000$ кв. км. Результаты расчетов для зон ВОЗ с $M_{max}=7,0$ в графическом виде показаны на рисунке 2.

Оценки для зон ВОЗ с меньшими M_{max} получаются из графиков на рисунке 2 отсечением соответствующей правой части.

Сравнивая наклон базовых графиков повторяемости для рассматриваемого района Кавказа с аналогичными оценками для других районов Кавказа, Центральной Азии, Сахалина, Алжира можно видеть, что они не выходят за рамки обычных соотношений и близки к средним оценкам для многих районов мира. По уровню сейсмической активности землетрясений малых магнитуд рассматриваемый район близок к Восточному Узбекистану, а также району Спитака, в 1,3-1,5 раза ниже, чем Сахалин и несколько выше, чем районы Грозного и Газли. По частоте возникновения более крупных землетрясений с $M \geq 5,5$ сходен с районами Грозного и Северного Алжира и в 2-4 раза ниже, чем Газлийский район и район Сахалина [Сейсмическое..., 1980; Чернов, 1989; Chernov, Sokolov, 1996; Аверьянова и др., 1996; Оценка..., 1999].

Важно подчеркнуть, что базовые для всего изучаемого района (табл. 1) и производные от них (табл. 2-3 и рис. 2) оценки в значительной мере выполнены на осно-

Таблица 3.

Средние числа (\bar{N}) землетрясений разных магнитуд (\bar{M}) в зонах ВОЗ с разными M_{max} . Расчет по карте зон ВОЗ в версии ОСР-97. Район в пределах $40,5^\circ - 45,5^\circ N$ и $40^\circ - 46,5^\circ E$ (приведено к площади $S = 1000$ кв. км и времени $t = 1$ год). С разделением на осевые (без скобок) и боковые (в скобках) подзоны

\bar{M}	$lg \bar{N}$				
	Зоны ВОЗ с $M_{max}=5,0$	Зоны ВОЗ с $M_{max}=5,5$	Зоны ВОЗ с $M_{max}=6,0$	Зоны ВОЗ с $M_{max}=6,5$	Зоны ВОЗ с $M_{max}=7,0$
2,5	-0,277	-0,277	-0,277	-0,277	-0,277
3,0	-0,726	-0,726	-0,726	-0,726	-0,726
3,5	-1,175	-1,175	-1,175	-1,175	-1,175
4,0	-1,624	-1,624	-1,624	-1,624	-1,624
4,5	-2,073	-2,073	-2,073	-2,073	-2,073
5,0	-2,522	-2,522	-2,522	-2,522	-2,522
5,5	-	-2,79	-2,76	-2,76	-2,76
6,0	-	-	-2,870 -3,019	-2,870 -3,019	-2,870 -3,019
6,5	-	-	-	-2,920 (-3,200)	-2,920 (-3,200)
7,0	-	-	-	-	-2,946 (-3,298)

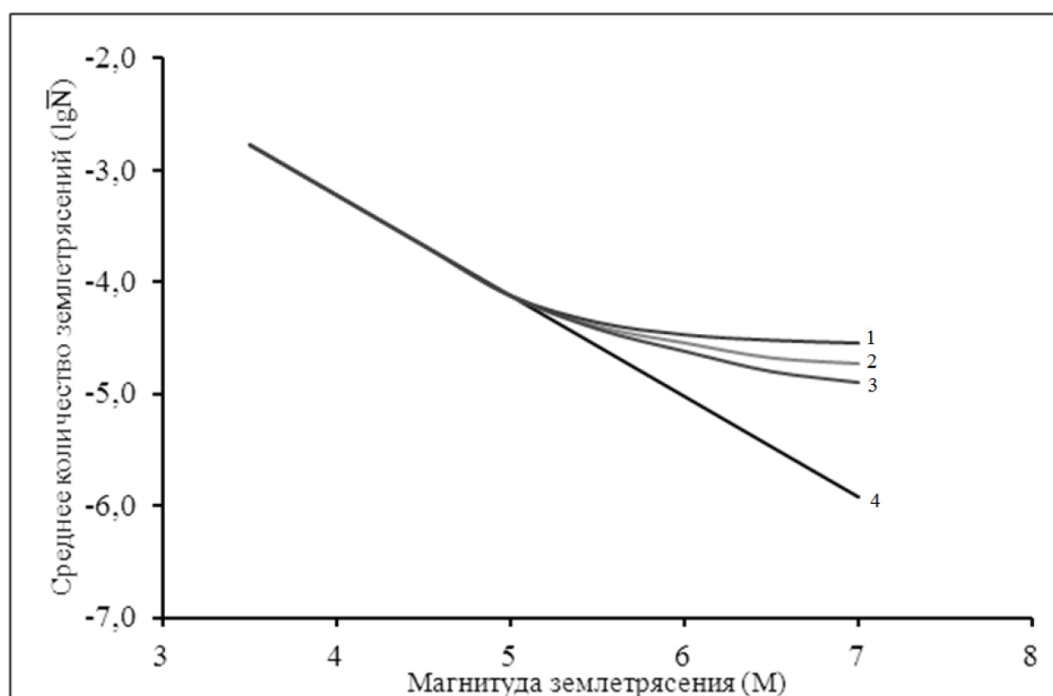


Рис. 2. Средние количества землетрясений (\bar{N}) разных магнитуд (\bar{M}). Расчет по карте зон ВОЗ в версии ОСР-97. Район в пределах $40,5^\circ - 45,5^\circ N$ и $40^\circ - 46,5^\circ E$ (приведено к площади элементарных участков $5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$, и времени $t=1$ год). 1 и 2 – для зон ВОЗ с разными M_{max} с разделением на осевые и боковые подзоны, соответственно; 3 – для зон ВОЗ с разными M_{max} , без разделения на осевые и боковые подзоны; 4 – средние по району без разделения на зоны ВОЗ с разными M_{max}

Таблица 4.

Вероятности возникновения землетрясений разных магнитуд (\bar{M}) на разных глубинах (H) для исследуемого района (в примерных границах $40,0^\circ - 46,5^\circ N$ и $39,0^\circ - 47,0^\circ E$).

H (км)	Относительная частота (вероятность)				
	$\bar{M}=3,0$	$\bar{M}=4,0$	$\bar{M}=5,0$	$\bar{M}=6,0$	$\bar{M}=7,0$
3,0	0,05	0,03	0	0	0
5,0	0,2	0,15	0,06	0,01	0
10,0	0,24	0,29	0,2	0,18	0,23
15,0	0,19	0,16	0,25	0,31	0,31
20,0	0,19	0,19	0,24	0,26	0,28
30,0	0,12	0,15	0,17	0,21	0,14
40,0	0,01	0,03	0,08	0,03	0,04

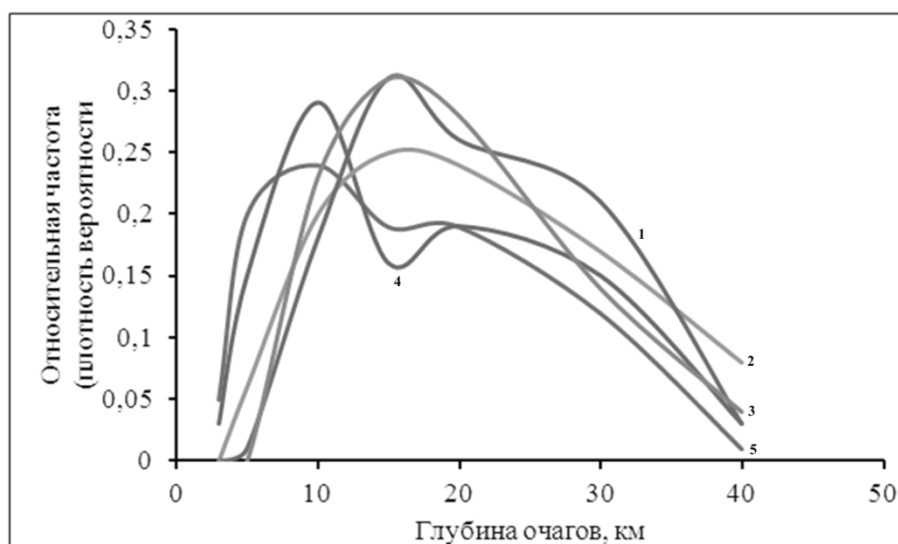


Рис. 3. Эмпирические функции плотности вероятности распределения по глубине потенциально опасных для изучаемой территории РСО-Алания очагов землетрясений разных магнитуд: 1 – для $\bar{M}=6,0$; 2 – для $\bar{M}=5,0$; 3 – для $\bar{M}=7,0$; 4 – для $\bar{M}=4,0$; 5 – для $\bar{M}=3,0$.

ве анализа сейсмичности южной, более активной части рассматриваемого района. Применение этих оценок ко всей территории может привести к некоторому завышению (консерватизму) последующих оценок сейсмических воздействий, в которые будет заложен определенный «запас прочности». Такой подход (также как и в вышеописанном случае построения базового соотношения $\bar{N}(\bar{M})$) представляется оправданным в условиях дефицита исходной информации.

Распределение очагов землетрясений по глубине. Анализ данных сейсмологических наблюдений показывает, что потенциально опасные очаги землетрясений в кавказском регионе возникают в земной коре на глубине 3-40 км [см. Сейсмическое..., 1980; Составление карт..., 1996; Новый каталог..., 1977; Уломов, 1995; Чернов, 2006].

Статистические построения, выполненные в рамках настоящего исследования по Каталогу землетрясений, разработанному в Геофизическом институте ВНИИ РАН (вариант 1) подтверждают и детализируют этот вывод. Для повышения надежности определений дополнительно использованы (варианты 2 и 3, соответственно) результаты наших предыдущих оценок для районов п. Кудепста и г. Кисловодска [Чернов, 2006], а также (вариант 4) – для района г. Спитак [Chernov, Sokolov, 1996]. Принятые оценки рассчитаны как средневзвешенные значения, где варианту 1 придан вес 2, остальным 1. Результаты в цифровом и графическом виде приведены в таблице 4 и на рисунке 3.

В дальнейших расчетах вероятности $P_{M=m} [H=h]$ из [Чернов, 2017, выражение (7)] берутся по таблице 4 и рисунку 3.

Геометрические параметры потенциально опасных очагов. Из-за недостатка данных натуральных наблюдений для оценки размеров потенциально опасных для изучаемой территории РСО-Алания очагов землетрясений нами использовались зависимости длины L и площади главного разрыва в очаге от магнитуды M_S , из работы [Штейнберг, 1986]:

– для очагов со сдвиговым типом подвижки:

$$\begin{aligned} \lg L &= 0,63 M_S - 2,75 \\ \lg S &= 1,07 M_S - 4,79 \end{aligned} \quad (3)$$

– для очагов со взбросовым типом подвижки

$$\begin{aligned} \lg L &= 0,45 M_S - 1,54 \\ \lg S &= 0,86 M_S - 3,12 \end{aligned} \quad (4)$$

где L – длина очага в км; S – площадь очага в км²; M_S – магнитуда землетрясения, определяемая по поверхностным волнам.

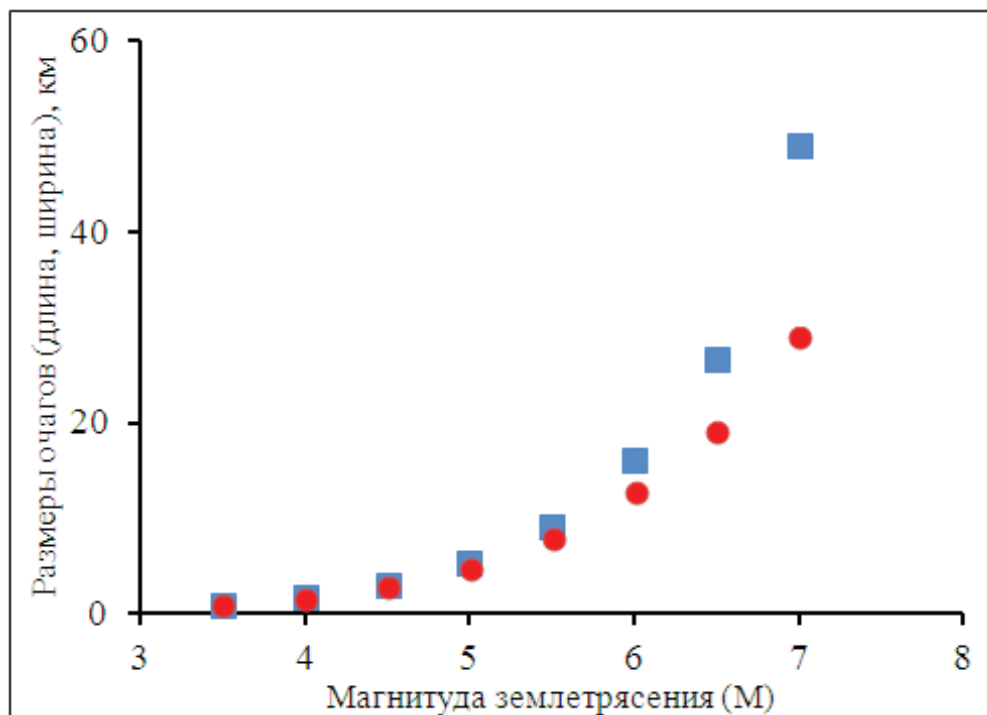


Рис. 4. Размеры (длина – квадрат и ширина – кружок) очагов потенциально опасных для территории РСО-Алания землетрясений.

Дополнительно использовались также зависимости $\bar{L}, \bar{S}(M)$ из работы [Wells, Coppersmith, 1994], оценки С. С. Арефьева [2001], В. И. Уломова [1995] и Н. В. Шейбалина [1977], а также наши определения [Чернов, 1989].

Очаги землетрясений (точнее плоскости главных разрывов в очагах) моделируются в виде площадок имеющих форму эллипса.

Размеры потенциально опасных очагов землетрясений, принятые в дальнейших расчетах, в графическом виде приведены на рисунке 4.

Ориентация потенциально опасных очагов задавалась по данным определений механизмов очагов (см. выше). Для землетрясений со взбросо-сдвиговым типом подвижки принято, что длинные стороны площадок главных разрывов в очагах всех землетрясений ориентированы горизонтально, а в поперечном направлении площадки наклонены под углом $\approx 60^\circ$ к горизонтальной поверхности.

Для землетрясений небольших магнитуд в расчетной модели предусмотрена произвольная азимутальная ориентация очагов. Для более крупных ($M=6-7$) допускается отклонение основного разрыва в очаге от направления соответствующей зоны ВОЗ (линеаменты на рис. 1) на 30° .

Заключение

Подводя итог выполненным исследованиям можно резюмировать следующее:

1. Для изучаемой территории Республики Северная Осетия-Алания разработан усовершенствованный комплекс моделей, позволяющий на количественном уровне описывать основные характеристики сейсмического режима и очаговой сейсмичности в формате, необходимом для дальнейших вероятностных оценок сейсмической опасности в рамках детального сейсмического районирования данной территории.

2. Разработанный комплекс моделей позволяет повысить точность и детальность прогнозных оценок за счет более полного учета региональных и локальных факторов, определяющих сейсмогенерирующие свойства рассматриваемого объема геологической среды, включая оценки магнитуд, механизмов, геометрических размеров, ориентации в пространстве и вероятности возникновения каждого из потенциально опасных для изучаемой территории очагов землетрясений.

3. Разработанные модели сейсмичности в достаточной мере отражают имеющийся по исследуемому району объем сейсмогеологических данных. В то же время они относительно просто могут корректироваться и адаптироваться к поступающей новой информации, что делает их удобными в технологическом отношении.

Литература

1. Аверьянова В. Н., Баулин Ю. И., Кофф Г. Л. и др. Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного. Минстрой России. – М. – 1996. – 107 с.
2. Аптикаев Ф. Ф., Ибрагимов Р. Н., Кнауф В. М. и др. Методические рекомендации по детальному сейсмическому районированию (проект). // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 27. – М.: Наука, 1986. – С. 184-206.
3. Арефьев С. С. Эпицентральные наблюдения и геодинамические модели очагов сильных землетрясений. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности «Геофизика». – М.: ОИФЗ РАН, 2001. – 446 с.
4. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Объяснительная записка и список городов и населенных

пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. Министерство науки и технологий, Российская Академия наук, Объединенный Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – М. – 1999. – 57 с.

5. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. // Под редакцией Н. М. Кондорской и Н. В. Шебалина. – М.: Наука, 1977. – 535 с.

6. Отчет об инженерно-сейсмологических исследованиях на объекте: «Жилой комплекс с бассейном, подземными гаражами и кафетерием по ул. Мира-Шмидта в г. Геленджик Краснодарского края» // Фонды ООО «Инжгеопроект». – Кисловодск. – 2007. – 45 с.

7. Отчет по теме: Проведение геофизических исследований на площадке проектируемого объекта «Комплекс жилых домов микрорайоне «Кудепста-3» в г. Сочи // Фонды ИГЭ РАН. – М. – 2008. – 77 с.

8. Отчет о выполнении работ по теме: «Расчет сейсмических воздействий и определение исходной сейсмичности» // Рук. Е. А. Рогожин. Фонды ИФЗ РАН. – М. – 2015. – 67 с.

9. Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска аварийной системы водоснабжения г. Ставрополя // Науч. рук. и отв. исп. Ю. К. Чернов. Фонды СК ИГЦ Госстроя РФ. – Ставрополь – Пятигорск. – Март 1998 г. – 109 с.

10. Оценка возможных сейсмических воздействий на участке строительства гидроузла Тилездит в Алжире // Науч. рук. и отв. исп. Ю. К. Чернов. Фонды СК ИГЦ Госстроя РФ. – Ставрополь. – Октябрь 1999 г. – 65 с.

11. Разработка комплексной методики оценки вероятных сейсмических воздействий, сейсмической опасности и сейсмического риска (на примере районов Северного Кавказа и Сахалина // Науч. рук. Ю. К. Чернов. Отчет о НИР. Фонды СК ИГЦ Госстроя РФ. – Ставрополь. – 2004. – 251 с.

12. Рогожин Е. А. Зоны ВОЗ и их характеристики для территории Республики Северная Осетия-Алания / Инновационные технологии для устойчивого развития горных территорий: Материалы Международной конференции VI. 28-30 мая 2007 г. – Владикавказ: Терек, 2007. – С. 283.

13. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. // Отв. ред. В. И. Бунэ, Г. П. Горшков. – М.: Наука, 1980. – 307 с.

14. Составление карты детального сейсмического районирования территории Ставропольского края // Научн. рук. Г. А. Соболев. Отв. исп. А. Я. Сидорин. Отчет о результатах хозяйственных работ. Том 1-6. ОИФЗ РАН им. О. Ю. Шмидта. – М. – 1996.

15. Уломов В. И. Об основных положениях и технических рекомендациях по созданию новой карты сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сборник научных трудов «Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии». Вып. 2-3. – М. – 1995. – С. 9-26.

16. Чернов Ю. К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. – Ташкент: Изд-во «ФАН», 1989. – 295 с.

17. Чернов Ю. К. Опыт уточнения сейсмической опасности отдельных территорий в Ставропольском крае с учетом новых требований СНиП и мировой практики // Инженерная геология. Вып. 1. – М. – 2006. – С. 23-35.

18. Чернов Ю. К. Задание вероятных сейсмических воздействий для инженерных целей // Труды V общероссийской конференции изыскательских организаций

«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» 17-18 декабря 2009 г. ОАО ПНИИИС. – М. – 2010. – С. 122-127.

19. Чернов Ю. К., Чернов А. Ю. Вероятностные модели сейсмических воздействий для прогнозирования сейсмической опасности в инженерных целях // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 2. – С. 116-128.

20. Чернов А. Ю. Геоэкологическая оценка сейсмической опасности и риска на примере застраиваемых территорий центрального Предкавказья // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Ставрополь. – 2016. – 163 с.

21. Шебалин Н. В. Параметры очага землетрясения и параметры сейсмического эффекта. Некоторые корреляционные связи // В кн. Сейсмическое микрорайонирование. – М.: Наука, 1977. – С. 30-36.

22. Штейнберг В. В. Параметры колебаний при сильных землетрясениях // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 27. – М.: Наука, 1986. – С. 7-22.

23. Штейнберг В. В., Сакс М. В., Аптикаев Ф. Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. – М.: Наука, 1993. – С. 5-94.

24. Chernov Yu. K. and Sokolov V. Yu.. Probabilistic Assessments of the Seismic Hazard in Northern Armenia (Spitak Region) // Earthquake spectra. – May 1996. – Vol. 12. N 2. Pp. 199-216.

25. Ulomov V. I. et al. Seismic hazard of Northern Eurasia // The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. – December 1999. – Vol. 42. N 6. – Pp. 1023-1038.

26. Wells D. L., Coppersmith K. J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seim. Soc. Am. – 1994. – Vol. 84. N 4. – Pp. 974-1002.

SEISMICITY PATTERNS FOR A DETAILED PROBABILISTIC SEISMIC ZONING OF THE NORTH OSSETIA-ALANIA TERRITORY

© 2018 Yu. K. Chernov, Sc. Doctor (Phys.-Math.), Prof., V. B. Zaalishvili, Sc. Doctor (Phys.-Math.), Prof., B. V. Dzeranov, Sc. Candidate (Geol.-Min.)

Geophysical institute VSC RAS, Russia, 362002, RNO-Alania, Vladikavkaz, Markov Str., 93 a, e-mail: cgi_ras@mail. ru

A number of models of regional and local seismicity of the region have been developed within the framework of research on the creation of a new album of probabilistic maps of detailed seismic zoning of the RNO-Alania territory. Models in probabilistic form describe the place (zone) of occurrence of potentially dangerous earthquakes for the study area, the maximum possible magnitude of these earthquakes, the size, mechanisms and orientation of the foci, the frequency of earthquakes of different magnitudes in time, the distribution of earthquake foci in depth. Research conducted using large volume seismostatistics, macroseismic, seismotectonic, instrumental and other data. The models make it possible to increase the accuracy and detail of predictive estimates at the regional and local levels, as they take into account more fully the features of the spatial and temporal distribution of potentially dangerous earthquake foci, and also provide the final information in the form necessary for its further inclusion in the probabilistic seismic hazard analysis – PSHA.

Keywords: detailed seismic zoning, seismic hazard, strong earthquakes, possible sources of earthquakes zones, seismic regime, probable seismic effects.

References

1. Aver'janova V. N., Baulin Ju. I., Koff G. L. i dr. Kompleksnaja ocenka sejsmicheskoi opasnosti territorii g. Groznogo [Comprehensive seismic hazard assessment of the territory of Grozny]. Minstroj Rossii. M. 1996. 107 p. (in Russian)
2. Aptikaev F. F., Ibragimov R. N., Knauf V. M. i dr. Metodicheskie rekomendacii po detal'nomu sejsmicheskomu rajonirovaniju (proekt) [Guidelines for detailed seismic zoning (project)]. Voprosy inzhenernoj sejsmologii. Issue 27. M. Nauka, 1986. Pp. 184-206. (in Russian)
3. Aref'ev S. S. Jepicentral'nye nabljudenija i geodinamicheskie modeli ochagov sil'nyh zemletrjasenij [Epicentral observations and geodynamic models of strong earthquakes sources]. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora fiziko-matematicheskikh nauk po special'nosti "Geofizika". M. OIFZ RAN, 2001. 446 p. (in Russian)
4. Komplekt kart obshhego sejsmicheskogo rajonirovanija territorii Rossijskoj Federacii OSR-97 [A set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation OSR-97]. Ob#jasnitel'naja zapiska i spisok gorodov i naselennyh punktov, raspolozhennyh v sejsmoopasnyh rajonah. Ministerstvo nauki i tehnologij, Rossijskaja Akademija nauk, Ob#edinennyj Institut fiziki Zemli im. O. Ju. Shmidta. M. 1999. 57 p. (in Russian)
5. Novyj katalog sil'nyh zemletrjasenij na territorii SSSR s drevnejshih vremen do 1975 g. [New catalog of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975]. Pod redakciej N. M. Kondorskoj i N. V. Shebalina. M. Nauka, 1977. 535 p. (in Russian)

6. Otchet ob inzhenerno-sejsmologicheskikh issledovanijah na ob#ekte: «Zhiloi kompleks s bassejnom, podzemnymi garazhami i kafeteriem po ul. Mira-Shmidta v g. Gelendzhik Krasnodarskogo kraja» [Report on engineering and seismological studies at the facility: “Residential complex with a swimming pool, underground garages and a cafeteria on Mira-Schmidt street in the city of Gelendzhik Krasnodar Territory”]. Fondy OOO “Inzhgeoproekt”. Kislovodsk. 2007. 45 p. (in Russian)

7. Otchet po teme: Provedenie geofizicheskikh issledovanij na ploshhadke proektiruемого ob#ekta «Kompleks zhilyh domov mikrorajone «Kudepsta-3» v g. Sochi [Report on the topic: Carrying out geophysical research at the site of the designed project “Residential building complex of “Kudepsta-3” micro-district in Sochi]. Fondy IGJE RAN. M. 2008. 77 p. (in Russian)

8. Otchet o vypolnenii rabot po teme: «Raschet sejsmicheskikh vozdeystvij i opredelenie ishodnoj sejsmichnosti» [Report on the implementation of work on the topic: “The calculation of seismic impacts and determination of the initial seismicity”]. Ruk. E. A. Rogozhin. Fondy IFZ RAN. M. 2015. 67 p. (in Russian)

9. Ocenka sejsmicheskoi opasnosti i sejsmicheskogo riska avarijnoj sistemy vodosnabzhenija g. Stavropolja [Assessment of seismic hazard and seismic risk of the emergency water supply system of the city of Stavropol]. Nauch. ruk. i otv. isp. Ju. K. Chernov. Fondy SKIGC Gosstroja RF. Stavropol’ – Pjatigorsk. Mart 1998. 109 p. (in Russian)

10. Ocenka vozmozhnyh sejsmicheskikh vozdeystvij na uchastke stroitel’stva gidrouzla Tilezdit v Alzhire [Assessment of possible seismic effects on the construction site of the Tilezdit hydroelectric complex in Algeria]. Nauch. ruk. i otv. isp. Ju. K. Chernov. Fondy Fondy SKIGC Gosstroja RF. – Stavropol’. Oktjabr’ 1999. 65 p. (in Russian)

11. Razrabotka kompleksnoj metodiki ocenki verojatnyh sejsmicheskikh vozdeystvij, sejsmicheskoi opasnosti i sejsmicheskogo riska (na primere rajonov Severnogo Kavkaza i Sahalina [Development of a comprehensive methodology for assessing of probabilistic seismic effects, seismic hazard and seismic risk (using the example of the North Caucasus and Sakhalin)]. Nauch. ruk. Ju. K. Chernov. Otchet o NIR. Fondy SK IGC Gosstroja RF. – Stavropol’. 2004. 251 p. (in Russian)

12. Rogozhin E.A. Zony VOZ i ih harakteristiki dlja territorii Respubliki Severnaja Osetija-Alanija [PSS zones and their characteristics for the territory of the Republic of North Ossetia-Alania]. Innovacionnye tehnologii dlja ustojchivogo razvitija gornyh territorij: Materialy Mezhdunarodnoj konferencii VI. 28-30 maja 2007. Vladikavkaz: Terek, 2007. 283 p. (in Russian)

13. Sejsmicheskoe rajonirovanie territorii SSSR. Metodicheskie osnovy i regional’noe opisanie karty 1978g. [Seismic zoning of the USSR. Methodical bases and regional description of the map of 1978]. Otv. red. V.I. Bunje, G.P. Gorshkov. M. Nauka, 1980. 307 p. (in Russian)

14. Sostavlenie karty detal’nogo sejsmicheskogo rajonirovanija territorii Stavropol’skogo kraja [Constructing of detailed seismic zoning map of the territory of the Stavropol Territory]. Nauchn. ruk. G.A. Sobolev. Otv. isp. A. Ja. Sidorin. Otchet o rezul’tatah hozdogovornyh rabot. Vol. 1-6. OIFZ RAN im. O. Ju. Shmidta. M. 1996. (in Russian)

15. Ulomov V.I. Ob osnovnyh polozhenijah i tehniceskikh rekomendacijah po sozdaniju novej karty sejsmicheskogo rajonirovanija territorii Rossijskoj Federacii [On the main provisions and technical recommendations for creating a new map of

seismic zoning of the territory of the Russian Federation]. Sbornik nauchnyh trudov «Sejsmichnost' i sejsmicheskoe rajonirovanie Severnoj Evrazii». Issue 2-3. M. 1995. Pp. 9-26. (in Russian)

16. Chernov Ju. K. Sil'nye dvizhenija grunta i kolichestvennaja ocenka sejsmicheskoj opasnosti territorij [Strong ground motion and quantitative assessment of seismic hazard of territory]. Tashkent: Izd-vo «FAN», 1989. 295 p. (in Russian)

17. Chernov Ju. K. Opyt utochnenija sejsmicheskoj opasnosti otdel'nyh territorij v Stavropol'skom krae s uchetom novyh trebovanij SNIp i mirovoj praktiki [Experience in clarifying the seismic hazard of individual territories in the Stavropol Territory taking into account the new requirements of the SNIp (construction rules and regulations) and world practice]. Inzhenernaja geologija. Issue 1. M. 2006. Pp. 23-35. (in Russian)

18. Chernov Ju. K. Zadanie verojatnyh sejsmicheskikh vozdeystvij dlja inzhenernyh celej [Setting possible seismic effects for engineering purposes]. Trudy V obshherossijskoj konferencii izyskatel'skih organizacij «Perspektivy razvitija inzhenernyh izyskanij v stroitel'stve v Rossijskoj Federacii» 17-18 dekabrya 2009 g. OAO PNIIS. M. 2010. Pp. 122-127. (in Russian)

19. Chernov Ju. K., Chernov A. Ju. Verojatnostnye modeli sejsmicheskikh vozdeystvij dlja prognozirovanija sejsmicheskoj opasnosti v inzhenernyh celjah [Probabilistic models of seismic effects for seismic hazard prognosis for engineering purposes]. Geologija i geofizika Juga Rossii. 2017. No. 2. Pp. 116-128. (in Russian)

20. Chernov A. Ju. Geojekologicheskaja ocenka sejsmicheskoj opasnosti i riska na primere zastraivaemyh territorij central'nogo Predkavkaz'ja [Geocological assessment of seismic hazard and risk on the example of built-up areas of the central Ciscaucasia]. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk. Stavropol'. 2016. 163 p. (in Russian)

21. Shebalin N. V. Parametry ochaga zemletrjasenija i parametry sejsmicheskogo jeffekta. Nekotorye korrelyacionnye svjazi [Earthquake focal parameters and seismic effect parameters. Some correlations]. V kn. Sejsmicheskoe mikrorajonirovanie. M. Nauka, 1977. Pp. 30-36. (in Russian)

22. Shtejnberg V. V. Parametry kolebanij pri sil'nyh zemletrjasenijah [Vibration parameters in case of strong earthquakes]. Voprosy inzhenernoj sejsmologii. Issue 27. M. Nauka, 1986. Pp. 7-22. (in Russian)

23. Shtejnberg V. V., Saks M. V., Aptikaev F. F. i dr. Metody ocenki sejsmicheskikh vozdeystvij (posobie) [Methods for assessing seismic effects (manual)]. Voprosy inzhenernoj sejsmologii. Issue 34. M. Nauka, 1993. Pp. 5-94. (in Russian)

24. Chernov Yu. K. and Sokolov V. Yu. Probabilistic Assessments of the Seismic Hazard in Northern Armenia (Spitak Region) // Eartheuake spektra. – May 1996. – Vol. 12. N 2. Pp. 199-216.

25. Ulomov V. I. et al. Seismic hazard of Northern Eurasia // The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. – December 1999. – Vol. 42. N 6. Pp. 1023-1038.

26. Wells D. L., Coppersmith K. J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seim. Soc. Am. – 1994. – Vol. 84. N 4. – Pp. 974-1002.