

ДИНАМИКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ В ВЕРХОЯНЬЕ И СИЛЬНОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ В ЯКУТИИ 14 ФЕВРАЛЯ 2013 г.

Уломов В.И.¹, Перетокин С.А.², Медведева Н.С.¹, Данилова Т.И.¹, Имаева Л.П.³, Акатова К.Н.¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, ulomov@ifz.ru

² НП "Экологический центр рационального освоения природных ресурсов", npecropr@yandex.ru

³ Институт земной коры Сибирского отделения РАН, imaeva@crust.irk.ru

Введение

Создание в 1991-1997 гг. комплекта вероятностных нормативных карт ОСР-97 (А, В, С, D) вместо одной, традиционно детерминистской, карты общего сейсмического районирования территории СССР явилось сменой парадигмы оценки сейсмической опасности и положило начало динамическому сейсмическому районированию, характеризующему развитие сейсмической опасности во времени [8]. Новый комплект карт, пришедший на смену ОСР-97, выполнен на основе актуализированной базы сейсмологических и геолого-геофизических данных и представлен более широким набором карт ОСР-2012, территории Российской Федерации.

Сейсмическая опасность оценивается максимальными сейсмическими воздействиями, которые могут возникнуть на данной площади и быть превышены с заданной вероятностью в течение заданного интервала времени [1, 3, 5, 8]. Основой таких исследований является вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО). Динамика сейсмической опасности обуславливается особенностями сейсмического режима территории и периодом повторяемости землетрясений разных магнитуд. Важным звеном в исследованиях по динамическому сейсмическому районированию является определение местоположения потенциальных очагов землетрясений (ПОЗ), наиболее опасных для конкретных населенных пунктов и строительных объектов. Одним из приёмов идентификации ПОЗ может быть деагрегация кумулятивных данных о повторяемости сейсмических воздействий, полученных методом ВАСО. Другим важным фактором в исследованиях по долгосрочному прогнозу сейсмической опасности стало изучение пространственно-временного и энергетического (магнитудного) развития региональных сейсмогеодинамических процессов [4, 6].

Основными инициаторами идей и разработчиками методов ВАСО в нашей стране следует признать С.В.Медведева (1947), Г.А.Гамбурцева (1955), Ю.В.Ризниченко (1965), В.И.Кейлис-Борока (1973) и А.А.Гусева с коллегами (1984-1995). За рубежом методологию ВАСО внедрил в строительную практику К.А.Корнелл (США, 1968). Модифицированная А.А.Гусевым технология ВАСО была применена нами при сейсмическом районировании ОСР-97 и ОСР-2012 [1, 3, 8], а также при участии в международной программе оценки глобальной сейсмической опасности – Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) и создании первой мировой карты [9].

Результаты ВАСО представлены на картах ОСР-97 и ОСР-2012 максимальной расчетной сейсмической интенсивностью I (баллы) со средней её повторяемостью один раз за T лет. Вероятность P возникновения и возможного превышения таких сейсмических воздействий в течение t лет вычисляется по формуле $P = 1 - \exp(-t/T)$.

Так, при $T = 100$ лет и $t = 50$ лет P составит 39,35%; при $T = 500$ лет и $t = 50$ лет $P = 9,52$ ($\approx 10\%$); при $T = 1000$ лет и $t = 50$ лет $P = 4,88$ ($\approx 5\%$); при $T = 2500$ лет и $t = 50$ лет $P = 1,98$ ($\approx 2\%$) и т.д. При $t \ll T - P = t/T$.

Комплект нормативных карт ОСР-97 позволил впервые в строительной практике оценивать сейсмическую опасность территорий на четырёх уровнях – А, В, С и D, соответствующих вероятностям P возможного превышения указанных на них ожидаемых максимальных сейсмических воздействий в течение 50-летних интервалов времени: $P=10\%$ (карта А), $P=5\%$ (карта В), $P=1\%$ (карта С) и $P=0.5\%$ (карта D). Указанные величины P соответствуют периодам T повторяемости сейсмических воздействий в среднем один раз за 500, 1000, 5000 и 10000 лет. Первые три карты, предназначенные для гражданского и промышленного строительства, вошли в СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах». Карта ОСР-97-D используется в атомной отрасли.

Постепенное освоение проектировщиками и строителями применения не одной, а комплекта вероятностных карт, выявило необходимость ещё более дифференцированного подхода к оценке сейсмической опасности. Так, в комплект карт ОСР-2012 были добавлены две новые карты, рассчитанные на периоды повторяемости сейсмических воздействий $T=100$ и 2500 лет [3, 5].

Комплект актуализированных карт ОСР-2012 был разработан и создан в 2009-2012 гг. по заданию Министерства регионального развития Российской Федерации и в соответствии с федеральной целевой программой (ФЦП) «Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации на 2009 - 2018 годы». Ответственным исполнителем работ был определён Производственный и научно-исследовательский институт инженерных изысканий в строительстве (ОАО ПНИИИС). По взаимной договорённости руководства, головным соисполнителем стал Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (ИФЗ РАН). В исследованиях принимали участие и другие академические и отраслевые институты, перечень которых и имена делегированных ими специалистов, вошли в состав Рабочей группы ОСР-2012 и указаны в публикациях и в подписях ко всем созданным картам [3, 5].

Динамика сейсмической опасности в Верхоянье

Как и принято в практике сейсмического районирования, каждое новое крупное землетрясение инициирует анализ его соответствия ранее выполненной прогнозной оценке сейсмической опасности места возникновения этого события. Таким событием в регионе 4.4 явилось землетрясение с магнитудой $M=6.9$, случившееся в Верхоянском сейсмоактивном регионе 14 февраля 2013 г., т.е. после составления новых карт ОСР-2012.

Верхоянский регион является одним из основных в системе сейсмической регионализации Северной Евразии, используемой при общем сейсмическом районировании территории Российской Федерации – ОСР-97 [8], при создании карты районирования Северной Евразии в составе мировой карты глобальной сейсмической опасности – GSHAP [9], а также при составлении карт ОСР-2012 [3, 5]. Этот регион во всех публикациях фигурирует под номером 4.4.

Сейсмичность Верхоянского региона обусловлена сейсмогеодинамическим взаимодействием Евроазиатской и Североамериканской литосферных плит. Сведения о сейсмическом режиме региона 4.4, в сопоставлении с другими регионами на территории России, приведены в работах [3, 8] и в других публикациях авторов. Методология ОСР-97 и её преемственность в ОСР-2012 описана в [1, 3, 5-8]. Методика исследований динамики сейсмического процесса, предшествующего крупным землетрясениям, изложена в ряде статей, в том числе в [4, 6].

Благодаря совершенствованию технологии расчётов, актуализации исходной модели зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ) и другим новациям, в том числе более густой треугольной опросной сетки для вычисления сейсмических воздействий на земной поверхности, комплект новых карт позволяет получать наиболее полную и детальную информацию о прогнозируемой сейсмической опасности на территории страны в долгосрочном плане. Как уже отмечено выше, комплект ОСР-2012 содержит шесть карт, характеризующих шесть уровней оценок сейсмической опасности (А, В, С, D, E, F), рассчитанных для значений вероятностей $P\%$ 39, 10, 5, 2, 1 и 0.5 возможного превышения (или непревышения с вероятностью 61, 90, 95, 98, 99 и 99,5%) указанного на этих картах сейсмического эффекта на средних грунтах (грунты 2-й категории, по С СНиП II-7-81*) в течение 50-летних интервалов времени, что соответствует периодам T повторяемости сейсмических воздействий в любом пункте соответствующих сейсмических зон в среднем один раз за 100 (карта А), 500 (карта В), 1000 (карта С), 2500 (карта D), 5000 (карта E), 10000 (карта F) лет и сближает нормативы этих карт с международными стандартами.

На рис. 1 приведены фрагменты комплекта карт ОСР-2012 для наиболее сейсмоактивной части территории Республики Саха-Якутия и Магаданской области. Как и следует из ВАСО, сейсмическая опасность возрастает с увеличением интервала времени T лет. Эллипсом условно оконтурено местоположение очага землетрясения 14.02.2013 г. с $M=6.9$ и его афтершоков. Рис. 2 иллюстрирует динамику сейсмической опасности в эпицентральной области этого землетрясения на основе оценок, полученных по картам ОСР-97 и ОСР-2012. В англоязычных публикациях такие графики называются Seismic Hazard Curves и строятся по результатам ВАСО, рассчитанным непосредственно для заданного пункта, обычно не сопровождаясь построением карт для большой территории, как это принято в нормативных документах в нашей стране.

Как видно на рис. 2, оценки ОСР-2012 в эпицентре произошедшего землетрясения несколько выше оценок, даваемых картами ОСР-97. Это объясняется тем, что в актуализированной модели зон ВОЗ, созданной для ОСР-2012, были уточнены не только местоположение и сегментация активных разломов, но и магнитуда аппроксимирующих их сейсмолинеаментов (СЛ). Для части СЛ, на основе изучения региональной сейсмогеодинамики, была повышена максимальная возможная магнитуда, по сравнению с моделью зон ВОЗ в ОСР-97. Так, сейсмолинеамент, у западного окончания которого

возникло землетрясение с $M=6.9$, за два года до этого было аргументировано переведён из категории $M_{max}=6.0\pm 0.2$ в ОСР-97 в категорию $M_{max}=7.0\pm 0.2$ в модели зон ВОЗ для ОСР-2012 [2, 3].

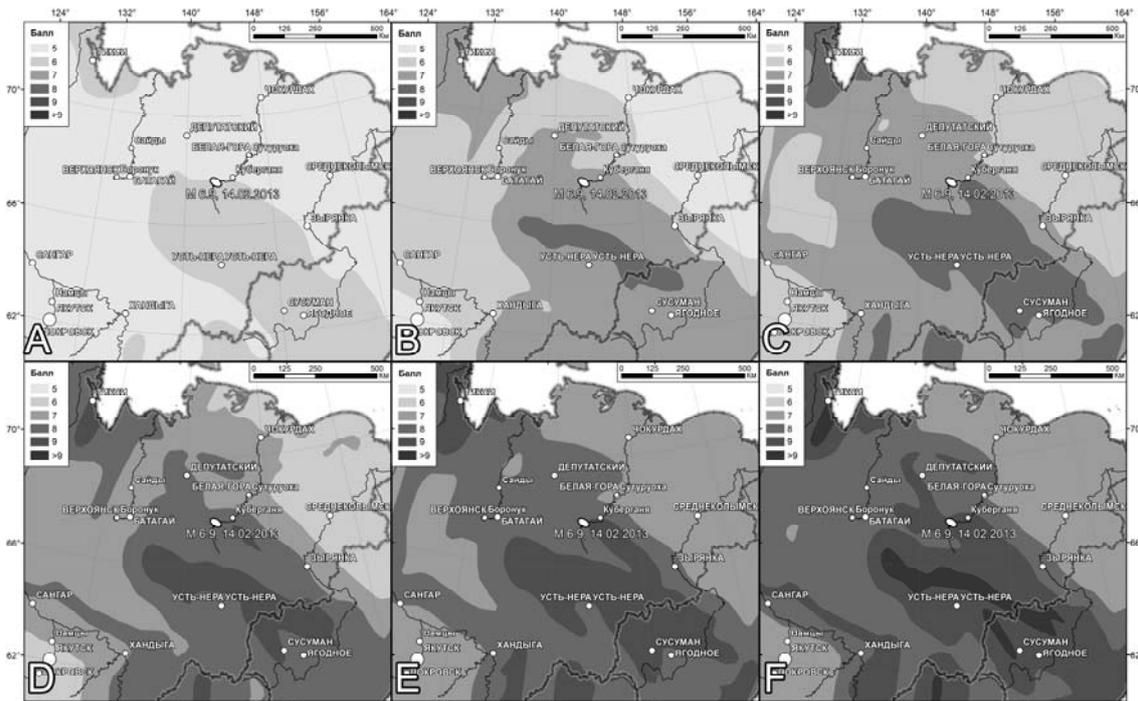


Рис. 1. Фрагменты карт ОСР-2012 (А, В, С, D, E, F) для территории Республики Саха-Якутия, запада Магаданской области и севера Хабаровского края (показаны административные границы между ними).

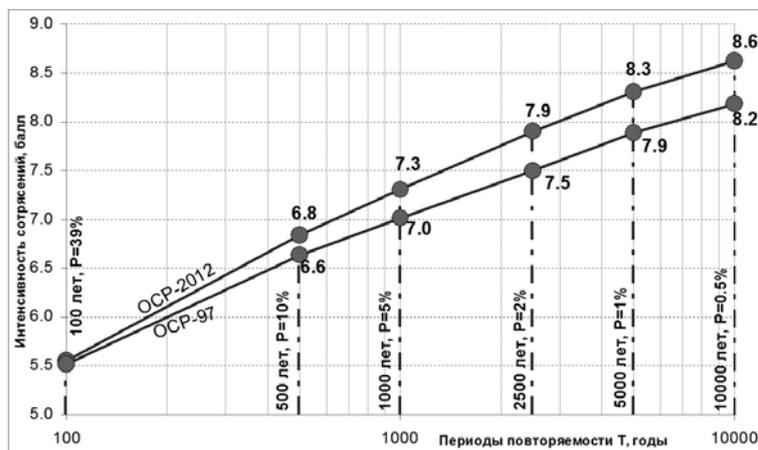


Рис. 2. Графики динамики сейсмической опасности для района эпицентра землетрясения 14.02.2013 г.

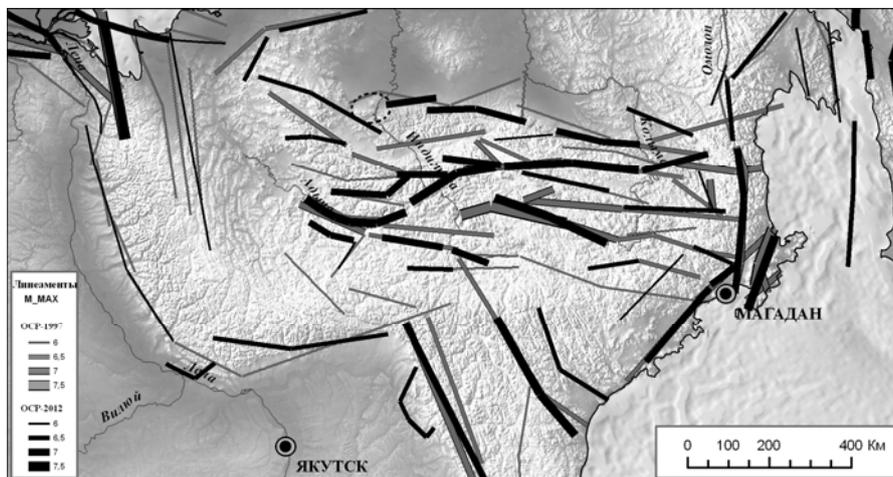


Рис. 3. Сейсмолинеаменты разных M_{max} в моделях зон ВОЗ при создании карт ОСР-97 и ОСР-2012.

На рис. 3 пунктиром оконтурена эпицентральная область землетрясения с $M=6.9$. На рис. 4 сопоставлены размеры площадей разной балльности на картах ОСП-97 и ОСП-2012 в процентном отношении ко всей площади территории Российской Федерации. Как видно, общая картина сейсмичности территории страны на картах ОСП-2012 в целом сохранилась. Однако изменилась конфигурация зон и уменьшились площади высоких значений сейсмических воздействий.

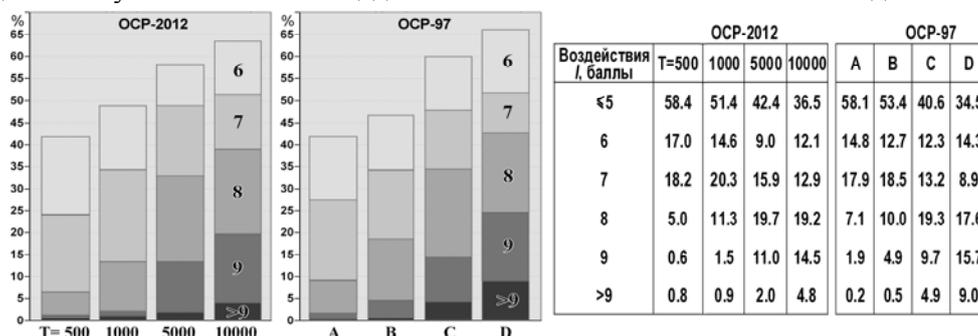


Рис. 4. Площади зон разной балльности по ОСП-97 и ОСП-2012 в процентах к площади России.

Динамика сейсмической активности

На рис. 5 приведены графики динамики сейсмичности на территории региона 4.4, построенные по методике, применяемой авторами во многих своих публикациях [4, 6 и др.]. Все магнитуды, приведенные к M_s , определяемым по поверхностным волнам, представлены с шагом 0.5 в интервалах ± 0.2 единицы магнитуд. По оси абсцисс отложены порядковые номера землетрясений в их хронологической последовательности, по оси ординат – годы их возникновения.

Для всех графиков вычислены уравнения прямолинейных отрезков линий тренда, характеризующих степень равномерности развития сейсмического процесса. В этих уравнениях коэффициенты при n указывают на средний период повторяемости соответствующих сейсмических событий, а свободный член в уравнениях – на год начала расчёта графиков. Коэффициент корреляции R^2 характеризует степень надёжности полученной информации.

Согласно концепции, все отклонения от аппроксимирующего прямолинейного графика рассматриваются как аномальные. Увеличение крутизны графиков соответствует замедлению сейсмического процесса, вплоть до полных затиший, а их выполаживание – его активизации.

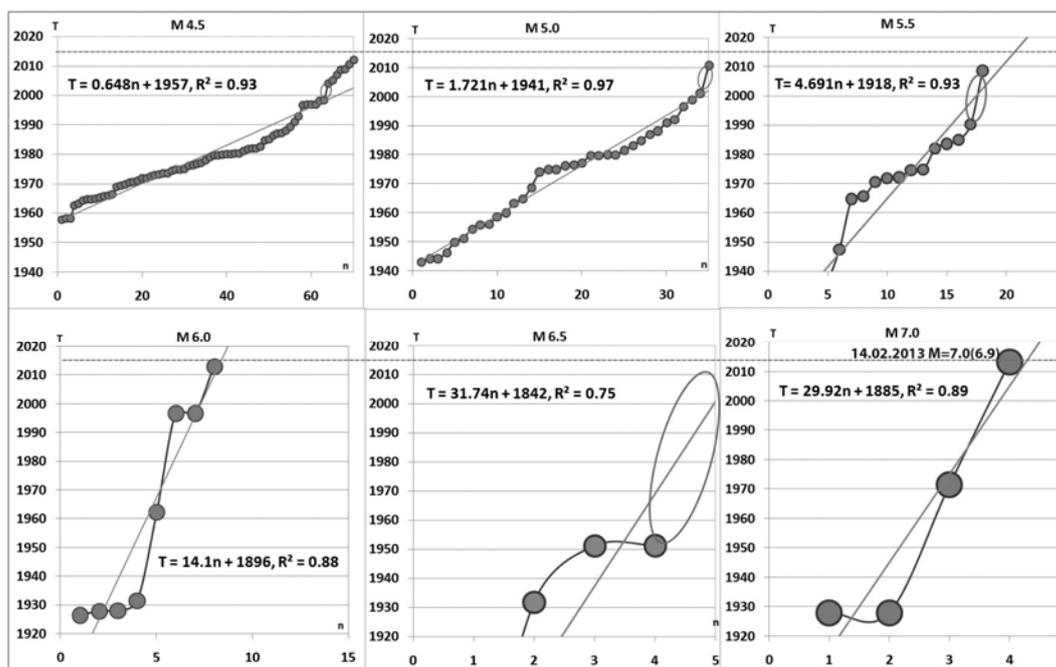


Рис. 5. Графики накопления сейсмических событий разных магнитуд на территории региона 4.4.

Примечательно, что такие относительные затишья в развитии сейсмического процесса, помеченные на рис. 5 эллипсами, наблюдаются на большинстве приведённых графиков перед сильным землетрясением 14 февраля 2013 г., момент возникновения которого показан горизонтальной пунктирной линией. Такие затишья обычно рассматриваются, как и в этом случае, в

качестве прогностических признаков подготовки очередного крупного землетрясения (приостановка движения по разломам из-за образования зацепов, запаривание динамики прилегающей области [4]).

Заключение

С созданием вместо традиционно одной детерминистской карты общего сейсмического районирования территории нашей страны целого набора карт ОСР-97 [8] и ОСР-2012 [5] появились новые возможности изучения динамики сейсмической опасности. В частности, оказалось рациональным применение в практике проектирования и сейсмостойкого строительства к одним и тем же строительным сооружениям не одной, как прежде, а двух и большего числа карт, предназначенных для обеспечения сейсмостойкости объектов разных категорий ответственности. Появились категории, так называемых, проектных (ПЗ) и максимальных расчётных землетрясений (МРЗ). Первые представляют собой нижний уровень ожидаемых сейсмических воздействий, которые могут повредить, но не приостановить функционирование объекта. Для верхнего уровня (МРЗ), учитывающего возможность возникновения более сильного, хотя и редкого сейсмического события, расчет ведется с учетом возможных неупругих деформаций сооружения, способных вывести его из строя, но не допускающих полного разрушения и гибели людей. Периоды повторяемости T для ПЗ и МРЗ выбираются в зависимости от степени ответственности и типов сооружений.

Картирование сейсмической опасности на всей территории Российской Федерации, выполненное в ОСР-2012 по единой методике и на однородном материале, позволяет избежать возможных искажений при детальном сейсмическом районировании (ДСР) и микрорайонировании (СМР) локальных площадей и отдельных пунктов.

Сильное землетрясение с $M=6.9$, произошедшее 14 февраля 2013 г. в Якутии указало на реалистичность актуализированной модели зон ВОЗ комплекта карт ОСР-2012. В эпицентральной области этого землетрясения, расположенной на территории Абыйского улуса Республики Саха (Якутия), сейсмические сотрясения достигали 7-8 баллов.

В тектоническом отношении местоположение сейсмического очага приурочено к западному флангу Илин-Тасского дизъюнктива, который трассируется по границе сочленения Илин-Тасского антиклинория с Индигиро-Зырянским прогибом вплоть до р. Индигирка [2]. Механизм очага Абыйского (или Илин-Тасского) землетрясения согласуется с сейсмогеодинамикой зоны, характеризующейся интенсивным сжатием со стороны Колымо-Омолонского супертеррейна. По данным полевых исследований, в рассматриваемом районе происходит накопление значительных тектонических напряжений, способствующих активизации сеймотектонических процессов. Генеральное направление геодинамического воздействия определяет пространственное положение изосейст местных землетрясений, которые оказываются вытянутыми поперек структурных элементов в направлении северо-восток – юго-запад по азимуту в интервале 50° - 85° .

Список литературы

1. Гусев А.А., Павлов В.М., Шумилина Л.С. Новый подход к расчетам повторяемости сейсмического воздействия с целью построения карт сейсмического районирования // Современная сейсмология: достижения и проблемы. Научная конференция РФФИ, НГК РФ, ИС РАН по проблемам международного десятилетия по уменьшению опасности стихийных бедствий. М. 7-9 октября 1998 г. 26 с.
2. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сеймотектонический анализ Яно-Индигирского сегмента зоны Черского // Физика Земли, 2011. № 12 С. 1-14.
3. Уломов В.И. Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе Единой информационной системы "Сейсмобезопасность России" // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 39, № 1. С. 5 – 38.
4. Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений // Физика Земли. 1993. № 4. С. 43-53.
5. Уломов В.И., Богданов М.И. Новый комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2012) // Инженерные изыскания, 8, 2013. С. 8-17.
6. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе // Физика Земли, №7, 2007. С. 31– 45.
7. Уломов В.И., Перетокин С.А. О развитии методов общего сейсмического районирования территории Российской Федерации для создания карт ОСР-2012 // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири: доклады научного симпозиума. Хабаровск, 2010. С. 177 – 181.
8. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации - ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ. 1999. 57 с.
9. Ulomov V.I. and the Working Group of the GSHAP Region 7. Seismic hazard of northern Eurasia. // Annali Geofis. Vol. 42. 1999. P. 1023 – 1038.