

УДК 624.042.3:621.87

О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЕМ СЕЙСМООПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ

Т. В. Золина

Астраханский инженерно-строительный институт (Россия)

В процессе эксплуатации промышленного здания, оборудованного мостовыми кранами большой грузоподъемности, его несущая способность постепенно снижается из-за накопления в узловых сопряжениях конструкций дефектов и повреждений, возникающих вследствие воздействия на каркас различных сочетаний внешних нагрузок, в том числе неучтенных при проектировании фактических боковых сил. При оценке остаточного эксплуатационного ресурса таких зданий необходимо учитывать сейсмическое воздействие, так как любые экстремальные нагрузки всегда ухудшают ситуацию. В настоящее время в соответствии с комплектом карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации для объектов повышенной ответственности, к которым относятся производственные объекты со стационарно установленными грузоподъемными механизмами, с учетом слабых водонасыщенных грунтов, которые преобладают на территории Астраханской области, сейсмичность площадки строительства должна быть повышена на 1–2 балла.

***Ключевые слова:** одноэтажное промышленное здание, мостовые краны, сейсмическое воздействие, остаточный эксплуатационный ресурс, надежность, долговечность.*

During operation of an industrial building, equipped with overhead cranes for heavy-duty, its carrying capacity decreases gradually due to the accumulation defects in the node of the adjacent construction and damage, resulting from exposure to the framework of various combinations of external loads, including unaccounted in the design of the actual lateral forces. In assessing the residual operational resource of such buildings, we should take into account the seismic action, as any extreme loads always make things worse. Currently, according to a set of maps of general seismic zoning of the Russian Federation for the objects of increased responsibility, which include facilities with permanently installed hoisting devices, taking into account the weak saturated soils, which predominate in Astrakhan region, the seismicity of the construction site must be increased by 1–2 points.

Key words: *single-storey industrial building, overhead cranes, seismic influence, residual operational resource, reliability, durability.*

Землетрясения как колебания земной поверхности в основном возникают в результате естественных процессов, но могут возникнуть и в результате деятельности людей, связанной прежде всего с получением из недр Земли тех или иных природных ресурсов. Такие землетрясения принято называть техногенными.

Естественные землетрясения известны давно и на протяжении долгого времени люди пытались бороться с ними с целью уменьшения их разрушительных последствий. Техногенные землетрясения появились относительно недавно и в среде ученых и инженеров появился термин «вызванная сейсмичность». И естественные и техногенные землетрясения способны нанести значительный материальный ущерб и принести человеческие жертвы.

Астраханская область в соответствии с картами сейсмического районирования, разработанными в нашей стране в 40–70-е годы прошлого века, относилась к разряду асейсмических территорий. Причем, сначала эти карты базировались на исторических сведениях о землетрясениях, имевших место в тех или иных районах страны. Позже, с введением карт общего сейсмического районирования ОСР-78, информация стала более достоверной, так как была построена не только на статистических данных о реальных землетрясениях, но и на основе данных сейсмогеодинамических исследований. Данные карты ОСР-78 легли в основу СНиП II-7-81 «Строительство в сейсмических районах» в качестве приложения с указанием населенных пунктов с прогнозируемой сейсмичностью и повторяемостью сейсмических воздействий.

Однако, землетрясения, произошедшие в 80-е годы прошлого века в Армении и Казахстане, когда было зафиксировано несоответствие фактической интенсивности землетрясений по сравнению с прогнозными предположениями в 2–3 балла, заставили провести дополнительные научные исследования в области сейсмического районирования.

В результате данных исследований появились новые карты общего сейсмического районирования ОСР-97, которые отличались от карты ОСР-78 учетом вероятностного характера сейсмических воздействий. В них

в соответствии с международной шкалой MSK-64 указана расчетная сейсмическая интенсивность в баллах для средних грунтовых условий и трех степеней сейсмической опасности (А, В, С).

В частности, в список населенных пунктов, расположенных в сейсмически опасных районах, вошли девять городов и поселков Астраханской области, где прогнозируются возможные землетрясения с интенсивностью 6 баллов и вероятностью 5 % в течение 50 лет (карта В), и четырнадцать городов и поселков с интенсивностью 6–7 баллов и вероятностью 1 % в течение 50 лет (карта С). Причем карты В и С рекомендуется применять при проектировании и строительстве объектов повышенной ответственности, к каким безусловно относятся производственные объекты со стационарно установленными грузоподъемными механизмами [14], то есть одноэтажные промышленные здания, оборудованные мостовыми кранами большой грузоподъемности.

Следует помнить, что карта ОСР-97, как и все предыдущие, дает значения приблизительной сейсмической опасности [15]. Более точное значение прогнозируемых сейсмических воздействий может быть определено на основании сейсмического микрорайонирования на конкретных площадках строительства, результаты которого зависят от местных особенностей грунтов – литологического состава, физико-механических свойств, геологического строения, гидрогеологических условий и др.

В результате такого микрорайонирования конкретные площадки строительства могут иметь балльность, отличающуюся от балльности, определенной картами ОСР-97. Это значит, что на конкретной площадке строительства может появиться участок с измененной на один и более балл балльностью. В [13] указывается: для особо ответственных зданий и сооружений, строящихся в районах с сейсмичностью 6 баллов на площадках строительства с грунтами III категории по сейсмическим свойствам, расчетную сейсмичность следует принимать равной 7 баллам.

В частности, на территории Астраханской области преобладают слабые водонасыщенные грунты, относящиеся к III категории грунтов по сейсмическим свойствам [13], поэтому сейсмичность многих площадок строительства в данном регионе в различных городах и поселках должна быть повышена на 1–2 балла.

Как уже указывалось, кроме естественных причин, землетрясения могут быть обусловлены техногенными факторами – наиболее известны землетрясения, спровоцированные добычей нефти и газа. Такие землетрясения были многократно зарегистрированы и на территории РФ, и за рубежом [10, 11]. В подобной ситуации необходимо постоянное наблюдение за меняющейся сейсмоопасностью территории с целью принятия правильных технических решений.

Становится очевидным, что в таких условиях более правильным является проектирование и строительство объектов, которые гарантированно будут устойчивыми при воздействии прогнозируемого землетрясения.

В отношении объектов, которые уже эксплуатируются длительное время, особенно это касается производственных зданий с грузоподъемными механизмами, при оценке их остаточного ресурса рекомендуется учитывать сейсмические воздействия даже в сейсмически не опасных районах, так как любые экстремальные воздействия всегда усугубляют ситуацию [2].

Следует помнить, что для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации любого промышленного объекта необходим постоянный мониторинг его технического состояния.

В процессе эксплуатации любого промышленного здания, особенно оборудованного мостовыми кранами большой грузоподъемности, несущая способность его конструкций постепенно снижается из-за накопления в узловых сопряжениях несущих конструкций дефектов и повреждений, возникающих вследствие воздействия на каркас различных сочетаний внешних нагрузок, в том числе неучтенных при проектировании, каковыми, в первую очередь, являются фактические боковые силы, вовлекающие промышленное здание в колебательный процесс и имеющие значительно большее значение, чем ожидается в соответствии с [12], и что подтверждается проведенными исследованиями [1, 6–8].

В качестве примера, иллюстрирующего необходимость учета сейсмических воздействий при оценке остаточного эксплуатационного ресурса, приведем результаты расчета каркаса судокорпусного цеха (СКЦ) Астраханского судостроительного производственного объединения, имеющего два пролета по 30 м, высоту 22 м, шаг поперечных рам 12 м, уровень головки рельса 18 м, длину 228 м, мостовые краны грузоподъемностью 50 т, на получение характеристик безопасности и оценки остаточного ресурса.

Для здания СКЦ дважды – в 1986 и 1996 гг. – была произведена оценка его технического состояния и произведены замеры динамических параметров.

На всех этапах оценки технического состояния с помощью программного комплекса DINCIB-new [5] определялись частоты и формы собственных колебаний здания. На исходном этапе (в 1986 г.) частота колебаний по первой форме была равна $4,13 \text{ с}^{-1}$; через 10 лет эксплуатации она стала равной $3,94 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, ее изменение через 10 лет эксплуатации составило 5,5 %, что не превышает 10 %, установленных нормами [3], в соответствии с которыми в случае, если динамические характеристики здания снижаются более, чем на 10 % в сравнении с исходными, здание подлежит обязательному внеплановому обследованию.

Учитывая взаимосвязанность жесткости и частоты колебаний, можно спрогнозировать для рассматриваемого здания временной интервал, при наступлении которого частота колебания уменьшится на 10 %. Для здания

СКЦ при изменении частоты колебания по первой форме на 10 % она будет иметь значение, равное $3,71 \text{ с}^{-1}$.

В результате расчета были получены значения изгибающих моментов и нормальных напряжений, возникающих в колоннах каркаса при восприятии зданием действующих нагрузок, в том числе и сейсмической. На рис. 1 показаны значения нормальных напряжений при сейсмическом воздействии для начального этапа эксплуатации (1986 г.), через 10 лет (1996 г.), когда было проведено повторное обследование технического состояния конструкций СКЦ и определены изменившиеся частоты колебаний, обусловленные снижением горизонтальной жесткости каркаса, и на прогнозируемом этапе, когда частота колебания в сравнении с исходным значением на начальном этапе снизится на 10 % и будет необходимо внеплановое обследование технического состояния конструкций.

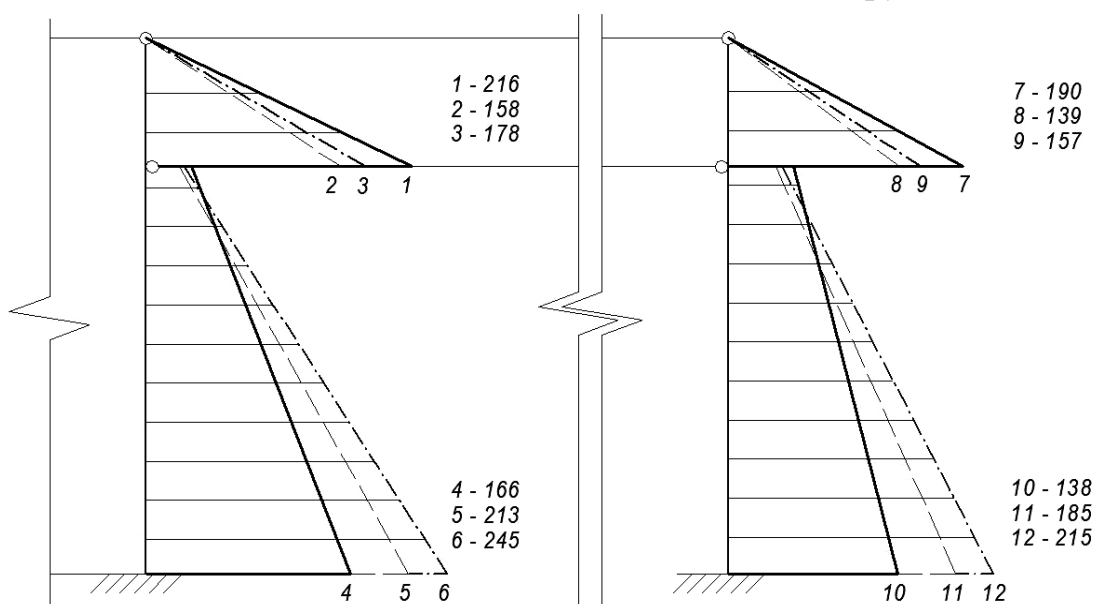


Рис. 1. Эпюры напряжений, возникающих от сейсмического воздействия (МПа), в поперечной раме с мостовым краном:

- _____ напряжения на исходном этапе (1986 г.);
- напряжения через 10 лет эксплуатации (1996 г.);
- напряжения на прогнозируемом этапе

Так как наиболее значимыми частотами колебаний для одноэтажных промышленных зданий являются первые, дальнейшие расчеты по определению внутренних усилий выполнялись с учетом первых десяти частот собственных колебаний.

Эпюры напряжений в элементах каркаса строились по суммарному расчетному отклику, который определялся по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} \sigma_i^2}, \quad (1)$$

где σ_i – величина напряжений в конкретном сечении колонны, возникающая при разных частотах по первым 10 формам колебаний.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ результатов расчета для вышеназванных временных интервалов в эксплуатации каркаса.

Анализируя результаты расчета, представленные в таблице 1, можно увидеть, что в процессе эксплуатации жесткие узловые сопряжения верхней и нижней частей колонны ослабевают: часть нагрузки, воспринимаемая верхней частью колонны, передается на ее более жесткую нижнюю часть. В результате в средней колонне напряжения от изгиба в уровне подкрановой балки уменьшаются, а в заделке колонны – возрастают. Такие же изменения произойдут и на прогнозируемом этапе: напряжения в заделке также увеличатся по сравнению с предыдущим этапом, и в уровне подкрановой балки они тоже увеличатся, хотя и станут меньше, чем на исходном этапе. Это можно объяснить тем, что на прогнозируемом этапе жесткость узловых сопряжений уменьшилась не только в уровне подкрановой балки, но и в заделке, т. е. в узле крепления колонны к фундаменту.

Таблица 1

Результаты расчета на сейсмическое воздействие –
суммарный расчетный отклик (МПа)

Нагрузка	Временной интервал	Сечение колонн	Колонна					
			Крайняя левая		Средняя		Крайняя правая	
			Знач.	Изм., %	Знач.	Изм., %	Знач.	Изм., %
Сейсмическое воздействие	Исход. этап (1986 г.)	Верх	116		217		191	
		Низ-уступ	32		37		53	
		Низ-заделка	135		167		138	
	Через 10 лет (1996 г.)	Верх	122	+5	159	-27	139	-27
		Низ-уступ	34	+5	27	-27	39	-26
		Низ-заделка	142	+5	214	+28	185	+34
	Прогноз. этап	Верх	128	+5	178	+12	157	+13
		Низ-уступ	36	+6	31	+15	44	+13
		Низ-заделка	149	+5	245	+15	216	+17

Пояснения к сечениям колонн:

«Верх» – внизу верхней части колонны (в уступе);

«Низ-уступ» – вверху нижней части колонны (в уступе);

«Низ-заделка» – внизу нижней части колонны (в заделке).

Пояснения к «Изм., %»:

в 1996 г. показано увеличение напряжений по сравнению с 1986 г.;

на прогнозируемом этапе показано увеличение напряжений по сравнению с 1996 г.

Для оценки остаточного ресурса воспользуемся разработанным автором программно-расчетным комплексом DINCIB-new [5], который позволяет получить [4]:

- наименьший коэффициент запаса;
- наибольшую скорость износа конструкций;
- индекс надежности;
- наименьший остаточный ресурс каркаса.

В таблице 2 представлены значения нормальных напряжений, возникающих в уровне заделки колонн в фундамент при рекомендуемом автором комбинированном сочетании нагрузок, необходимость учета которого обосновывается в [9].

Таблица 2

Значения нормальных напряжений в колоннах каркаса СКЦ
на уровне заделки колонн в фундамент (МПа)

<i>Колонна</i>	<i>Исходный этап (1986 г.)</i>	<i>Через 10 лет (1996 г.)</i>	<i>Прогнозируемый этап</i>
Крайняя	227	284	321
Средняя	274	330	368

Анализ результатов расчета, представленных в таблице 2, показывает, что через 10 лет эксплуатации, когда горизонтальная жесткость из-за воздействия на каркас значительных по величине, фактических боковых сил, не учтенных при проектировании, снижается, и, тем более, на прогнозируемом этапе, когда частота колебания каркаса становится на 10 % меньше от ее исходного значения в начале эксплуатации здания, нормальные напряжения на 20...25 % (через 10 лет эксплуатации) и 35...40 % (на прогнозируемом этапе) превышают среднее значение сопротивления стали, равное 282 МПа, допускаемое при эксплуатации здания.

До 1997 г. Астрахань относилась к сейсмически не опасным районам. Поэтому на стадии проектирования здания СКЦ (1976 г.) нормы строительства для сейсмических районов не учитывались. Несмотря на это данное здание на начальном этапе эксплуатации обладало достаточной несущей способностью для восприятия сейсмической нагрузки.

В настоящее время в соответствии с комплектом карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97) [13] для объектов повышенной ответственности, к которым относятся производственные объекты со стационарно установленными грузоподъемными механизмами, с учетом слабых водонасыщенных грунтов, которые преобладают на территории Астраханской области, сейсмичность площадки строительства должна быть повышена на 1–2 балла. В связи с этим при проверке прочности и устойчивости несущих конструкций в процессе эксплуатации должна быть учтена сейсмическая нагрузка.

В качестве примера приведем результаты оценки остаточного ресурса здания СКЦ с учетом возможного сейсмического воздействия. В табли-

це 3 приведены результаты оценки остаточного ресурса СКЦ с перечнем показателей безопасности эксплуатации объекта.

Таблица 3

Показатели безопасности эксплуатации объекта

Обобщенный коэффициент запаса		Индекс надежности		Скорость износа (кПа/год)		Остаточный ресурс (годы)	
без сейсм.	с учетом сейсм.	без сейсм.	с учетом сейсм.	без сейсм.	с учетом сейсм.	без сейсм.	с учетом сейсм.
6,2	0,50	3,0	0,27	97	4751	17	0

Анализ результатов расчета, представленных в таблице 3, показал, что при расчете здания СКЦ без учета действия сейсмической нагрузки, наименьшее значение обобщенного коэффициента запаса у исследуемого объекта было равным примерно 6. В практике проектирования промышленных объектов рекомендуется рассчитывать каркасы с обобщенным коэффициентом запаса, лежащим в пределах 6...8. Учет сейсмического воздействия приводит к существенному уменьшению коэффициента до уровня 0,5, что происходит из-за значительного (практически в 50 раз) увеличения скорости износа конструкций. Такая ситуация недопустима для безопасной эксплуатации сооружения, из чего следует, что при сейсмическом воздействии остаточный ресурс здания будет исчерпан задолго до окончания срока службы и эксплуатация объекта в дальнейшем будет невозможна.

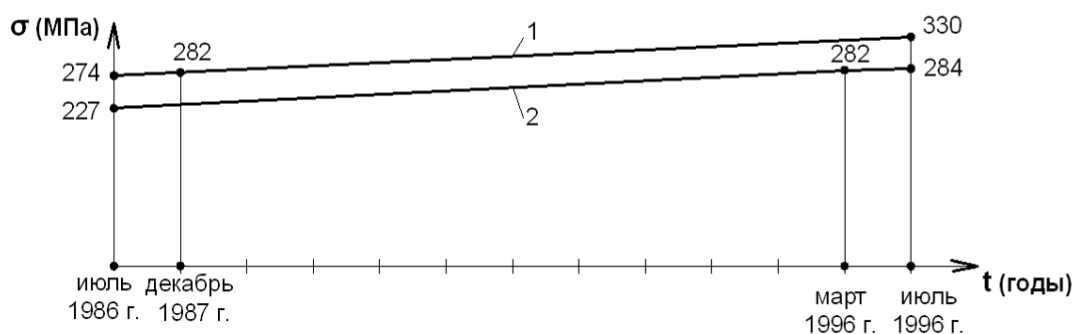


Рис. 2. Нормальные напряжения в средней (1) и крайней (2) колоннах поперечной рамы с мостовым краном, возникающие при проверке ее устойчивости из плоскости действия момента на комбинированное сочетание нагрузок:

июль 1986 г., июль 1996 г. – время проведения первого и второго обследования соответственно; декабрь 1987 г. – время достижения нормальными напряжениями предельного сопротивления стали (282 МПа) в средней колонне; март 1996 г. – время достижения нормальными напряжениями предельного сопротивления стали (282 МПа) в крайней колонне

В процессе эксплуатации из-за накопления повреждений в узловых сопряжениях и физического износа несущих конструкций горизонтальная жесткость здания уменьшилась. Это привело к тому, что уже через 1 год и 5 месяцев в расчетных сечениях средней колонны и через 9 лет и 8 месяцев в расчетных сечениях крайней колонны (после первого обследования здания в 1986 г.) при сейсмическом воздействии возникнут такие напряжения, которые приведут к разрушению каркаса (рис. 2).

Таким образом, на основании выполненных расчетов можно сделать вывод о необходимости обследования технического состояния и проведения расчетов на сейсмическую нагрузку тех промышленных зданий с крановым оборудованием, которые были спроектированы без учета норм строительства в сейсмических районах, и для которых расчетная сейсмичность в связи с введением ОСР-97 была увеличена на 1–2 балла. Это позволит предотвратить возможные аварии, которые могут возникнуть от естественных и техногенных землетрясений.

Предлагаемый автором программно-расчетный комплекс DINCIB-new [5] предоставляет возможность при мониторинге технического состояния зданий оценивать возможные риски возникновения аварийных ситуаций, планировать капитальный ремонт и тем самым обеспечить надежную и безопасную эксплуатацию промышленного объекта.

Список литературы

1. Барштейн М. Ф., Зубков А. Н. Исследование поперечных сил, возникающих при движении мостового крана // Динамика сооружений. – М. : Стройиздат, 1968. – С. 4–31.
2. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.
3. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния : введ. 25.03.2010. – М. : Изд-во стандартов, 2010. – III, 25 с.: ил.; 61 с.
4. Золина Т. В., Садчиков П. Н. Методика оценки остаточного ресурса эксплуатации промышленного здания, оснащенного мостовыми кранами // Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2013. – № 33 (52). – С. 51–56.
5. Программно-расчетный комплекс DINCIB-new : свид. о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2014613866 / Т. В. Золина, П. Н. Садчиков. – Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 09.04.2014.
6. Золина Т. В. Экспериментальное обоснование необходимости уточнения крановых воздействий для объективной оценки остаточного ресурса промышленного здания // Перспективы развития строительного комплекса : сборник материалов VII Международной науч.-практ. конф. – Астрахань : АИСИ, 2013. – С. 6–12.
7. Золина Т. В. Вычисление крановых нагрузок, определяющих несущую способность каркаса промышленного здания, при оценке его работоспособности // Научный потенциал регионов на службу модернизации. – 2013. – № 3 (6). – Т. 1. – С. 14–17.
8. Золина Т. В. Исследование напряженно-деформированного состояния несущих конструкций промышленного здания с крановым оборудованием и методика оценки его остаточного ресурса в процессе эксплуатации // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : науч.-техн. журнал. – 2014. – № 1 (7). – С. 44–52.

9. Золина Т. В. Обоснование выбора расчетного сочетания нагрузок при оценке несущей способности строительных конструкций каркасов промышленных зданий с мостовыми кранами в процессе их эксплуатации // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : науч.-техн. журнал. – 2014. – № 3 (9) (в печати).

10. Колинченко А. Ф., Нестеренко Ю. М. Природная и техногенная сейсмичность Оренбужья // Вестник ОГУ. Т. 2 «Естественные и технические науки». – 2006. – № 1. – С. 98–103.

11. Колинченко А. Ф., Юрченко П. А. Измененная сейсмичность и новые проблемы защиты опасных производственных объектов // ООО Научно-технический центр «Промбезопасность – Оренбург» : конкурс «Обеспечение промышленной и экологической безопасности на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах». – Оренбург, 2008. – 31 с.

12. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В. Н. Гордеев, А. И. Лантух-Лященко, В. А. Пашинский, А. В. Перельмутер, С. Ф. Пичугин ; под общ. ред. А. В. Перельмутера. – 3-е изд., перераб. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2011. – 528 с.

13. Свод правил 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах» : утв. приказом Министерства регионального развития РФ (Минрегион России) от 27.12.2010 № 779 ; введ. в действие 20.05.2011.

14. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федеральный закон РФ № 116-ФЗ от 21.07.1997 (ред. от 02.07.2013).

15. Уломов В. И. Общее сейсмическое районирование территории России и сопредельных стран – ОСР-97 / Объединенный институт физики Земли РАН. – М., 2002.