

УДК 550.384

Опыт применения шкалы ESI-2007 для оценки интенсивности Култуковского землетрясения 27.08.2008 г. (Южный Байкал)

Ю.А. БЕРЖИНСКИЙ, А.П. ОРДЫНСКАЯ, А.С. ГЛАДКОВ, О.В. ЛУНИНА, Л.П. БЕРЖИНСКАЯ,
Н.А. РАДЗИМИНОВИЧ, Я.Б. РАДЗИМИНОВИЧ, В.С. ИМАЕВ, А.В. ЧИПИЗУБОВ, О.П. СМЕКАЛИН

Институт земной коры СО РАН
г. Иркутск, Россия

АННОТАЦИЯ: Рассматриваются вопросы, связанные с тестированием шкалы ESI-2007 на примере реального сейсмического события, произошедшего 27.08.2008 г. на Южном Байкале. Цель исследования заключалась в сравнительной оценке интенсивности, определенной по традиционным макросейсмическим шкалам и с использованием шкалы интенсивности по геологическим проявлениям землетрясений в окружающей среде. Исходными данными послужили результаты макросейсмического обследования. Приведены результаты анализа табличной формы шкалы ESI-2007 с точки зрения требований, предъявляемых к сейсмическим шкалам. Особое внимание уделено вопросу о типе (ранге) шкалы. Подобное исследование – один из первых опытов применения новой шкалы на примере регионального сейсмического события.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: проявление землетрясения в окружающей среде, первичные и вторичные эффекты, сейсмические шкалы.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о возможности использования данных о геологических проявлениях сильных землетрясений в оценках сейсмической интенсивности дискутируется уже довольно продолжительное время. Вместе с тем более или менее детальные описания геологических эффектов присутствуют практически во всех сейсмических шкалах, в том числе наиболее ранних, например, в шкале Росси–Фореля. По мере развития традиционных макросейсмических шкал предпринимались неоднократные попытки разработать специализированную шкалу проявлений землетрясения в рельефе или, по меньшей мере, систематизировать имеющиеся сведения [Солоненко, 1973, 1975; Леонов, 1975; Никонов, 1995]. Естественно, высказывались аргументы как «за», так и «против» подобной шкалы. В последние полтора-два десятилетия наметился заметный перевес в пользу сторонников применения данных о геологических эффектах землетрясений в макросейсмических оценках [Dengler, McPherson, 1993; Serva, 1994; Шебалин, Аптикаев, 2003], хотя и с некоторыми оговорками [Vogt et al., 1994]. В определенной мере прогрессу в решении вопроса способствовали работы по выявлению связей между энергией землетрясения

(его магнитудой), эпицентральной расстоянием и масштабами различных геологических проявлений [Wells, Coppersmith, 1994; Стром, Никонов, 1997; Galli, 2000; Malamud et al., 2004; Papathanassiou et al., 2005], а также совершенствование сейсмогеологического метода исследований, где использование подобной информации предполагается изначально.

В оформленном виде новая шкала, известная сейчас под названием «The INQUA Scale», была опубликована в 2004 г. [Michetti et al., 2004], и с этого момента началось ее тестирование в мировом масштабе [Татевосян и др., 2006]. Одна из несомненных удач шкалы INQUA – введение в научный обиход понятия «эффекты землетрясения в окружающей среде», более емко отражающего сейсмические проявления в природе, нежели термины «эффекты в грунте» или «эффекты в рельефе». Таким образом, был расширен диапазон макропризнаков, которые предлагается использовать в оценках сейсмической интенсивности. Опыт применения шкалы INQUA в изучении последствий некоторых недавних и исторических землетрясений отражен в ряде публикаций [Fokaefs, Papadopoulos, 2007; Рогожин и др., 2007; Papathanassiou, Pav-

lides, 2007; Serva et al., 2007; Tatevossian, 2007; Татевосян и др., 2008]. Полученные в результате этих исследований наработки учтены в новой редакции шкалы, опубликованной в 2007 г. под названием «ESI-2007 (Environmental Seismic Intensity 2007)» [Michetti et al., 2007].

Тем не менее многие вопросы на сегодняшний день остаются нерешенными. Очевидно, что совершенствование шкалы напрямую зависит от разнообразия условий, в которых будет проводиться ее тестирование. В связи с этим необходимость дальнейшей апробации шкалы ESI-2007 была особо подчеркнута на заседании Научного совета РАН по проблемам сейсмологии в октябре 2008 г. В частности, всем заинтересованным организациям было предложено принять участие в ее тестировании.

27 августа 2008 г. в районе Южного Байкала произошло сильное сейсмическое событие с магнитудой $M_w=6.3$, названное Култукским. Оно сопровождалось массовыми разрушениями печных труб и печей в деревянных домах в близлежащих населенных пунктах, а также многочисленными сейсмогравитационными деформациями. Результаты детального изучения последствий землетрясения для отдельных объектов, а также обзор макросейсмических эффектов в ближней к эпицентру зоне были опубликованы в работах [Лунина, Гладков, 2008; Бержинский и др., 2008, 2009; Радзиминович и др., 2009]. Однако в этих публикациях акцент на использовании шкалы ESI-2007 сделан не был. В данной работе предпринята попытка апробации новой шкалы в условиях Прибайкалья на примере недавно происшедшего события. В большинстве случаев можно сопоставить оценки, сделанные по шкале ESI-2007, с оценками по шкале MSK-64, выполненными на основе изучения макросейсмических эффектов в населенных пунктах. Полученные результаты, равно как и некоторые соображения по поводу шкалы ESI-2007, представлены в настоящей работе.

ВТОРИЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ КУЛТУКСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ПРИРОДНОЙ СРЕДЕ

Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. вызвало макросейсмические эффекты интенсивностью $I=7-8$ баллов в ближней к эпицентру зоне. В результате серьезно пострадали некоторые населенные пункты, расположенные в районе юго-западного замыкания впадины оз. Байкал.

Поскольку эпицентр землетрясения располагался в акватории озера, авторы не располагают какими-либо доказательствами выхода очага на дневную поверхность. Землетрясение, наряду с повреждениями зданий, сопровождалось многочисленными вторичными эффектами в природной среде. Согласно шкале ESI-2007 [Michetti et al., 2007; Татевосян и др., 2008], к ним относятся, прежде всего, склоновые движения, трещины в грунте, гидрогеологические аномалии и раскачивание деревьев. Подобные эффекты наблюдались при сильных землетрясениях Прибайкалья и ранее, однако в рассматриваемом случае область их распространения, с одной стороны, достаточно велика, с другой – закономерно локализована в относительно узкой зоне.

В первые дни после события были детально изучены участки вдоль железнодорожного полотна и автомобильных трасс от г. Байкальска до с. Култук и далее по дорогам, ведущим в Тункинскую долину и г. Иркутск (рис. 1)*. Протяженность обследованного пути составляет не менее 180 км. В ходе обследования были обнаружены камнепады, осыпи, обвалы, оползни и сейсмогравитационные разрывы на земной поверхности. Местами в скальных обнажениях в существовавших ранее разломных зонах пришли в движение блоки, увеличилось раскрытие отдельных трещин. Практически во всех случаях сейсмогравитационные явления приурочены к естественным или искусственным выходам скальных пород (придорожные склоны), часто осложненным тектонической трещиноватостью. Зачастую вовлеченный в движение склоновый материал осыпался на федеральные автотрассы М-55 и А-164, что свидетельствует о необходимости более внимательного отношения к проблемам сейсмической безопасности транспортных путей. Гидрогеологические аномалии и раскачивание деревьев были задокументированы по словам очевидцев – местных жителей.

Склоновые движения проявились в виде камнепадов, осыпей, оползней и небольших обвалов объемом от 10 до 135 м³ (рис. 2). Максимальный объем вовлеченного в перемещение отдельного блока достигал 0.7 м³.

* На рис.1 координаты главного толчка и афтершоков приведены по данным Байкальского филиала ГС СО РАН (<http://seis-bykl.ru>), магнитуда и механизм землетрясения – по Гарвардскому каталогу землетрясений (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>)

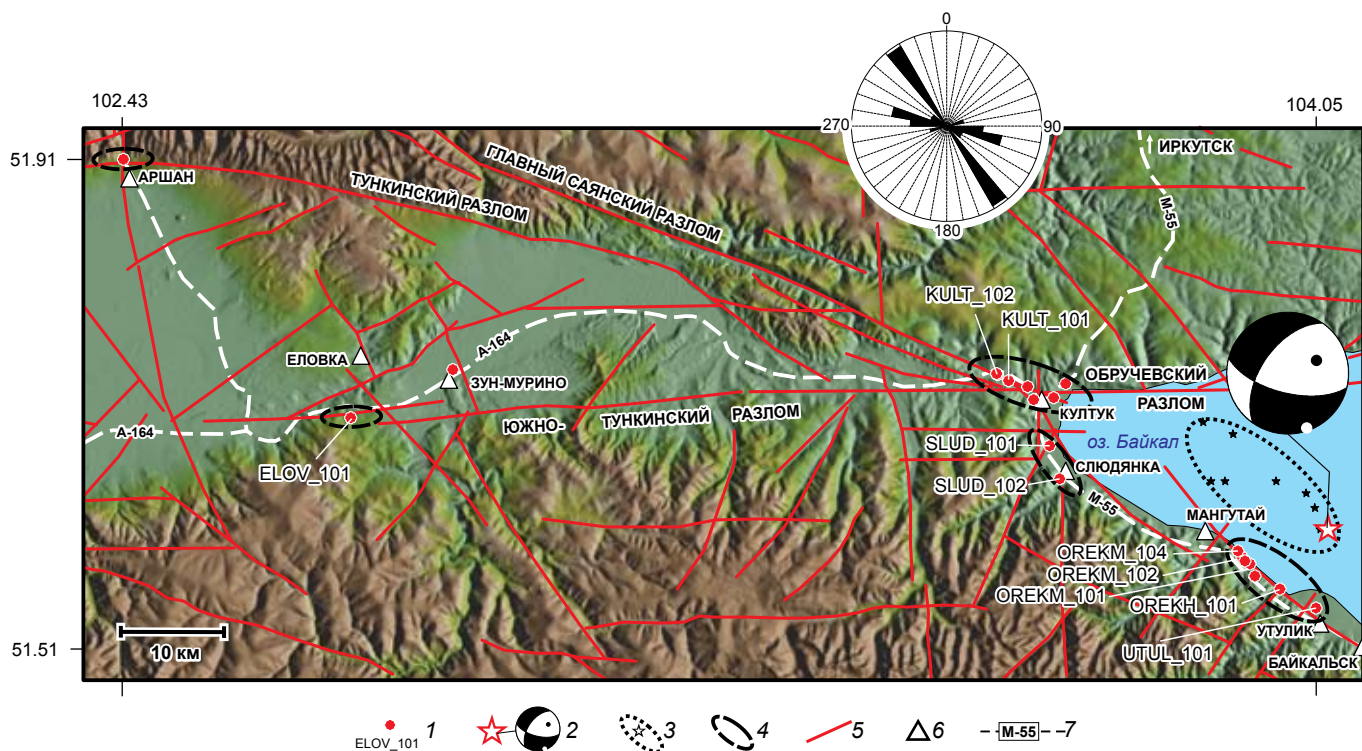


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдения в районе обследования Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. ($M_w=6.3$), Южный Байкал (номера указаны для упомянутых в тексте пунктов). На врезке – роза-диаграмма генерализованных направлений сейсмогравитационных разрывов (количество замеров – 13, шаг – 10, максимальный – 38 %). 1 – точки наблюдения; 2 – главный толчок и механизм очага; 3 – зона наиболее сильных афтершоков с $K \geq 9$ за период с 27.08. по 30.09.2008 г.; 4 – области проявления сейсмогравитационных деформаций; 5 – неоген-четвертичные разломы (по: [Лунина, Гладков, 2004]); 6 – населенные пункты; 7 – автодороги и номера главных шоссе

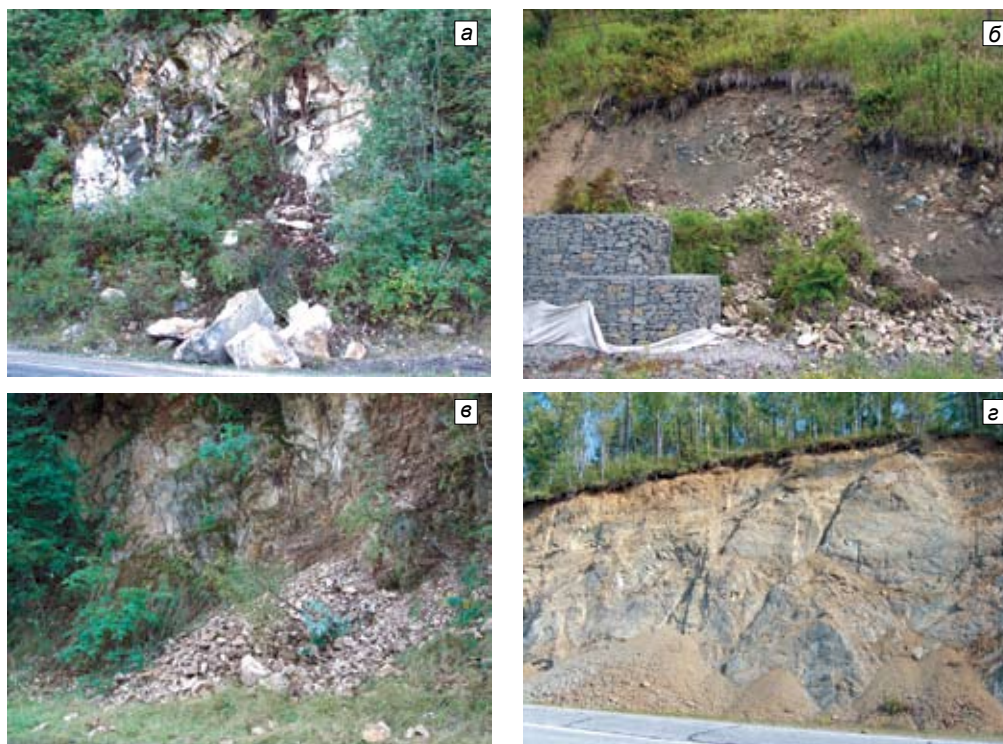


Рис. 2. Примеры проявления склоновых движений вдоль трещиноватых выходов скальных пород в пунктах: а – OREKM_104, б – OREKM_101, в – OREKM_103, г – KULT_101

В большинстве случаев эти сейсмогравитационные эффекты приурочены к естественным или искусственным скальным выходам, расположенным в урзах автомобильных дорог.

Один из крупных и эффектных обвалов возник в районе г. Слюдянка, в пункте SLUD_102. Стенка отрыва обвалившегося материала расположена на вершине скального уступа с относительным превышением около 50 м [Радзиминович и др., 2009]. Крупные глыбы скатились вниз по склону, сбив несколько росших на склоне молодых деревьев. Обвальной массой была перегорожена старая грунтовая дорога, проходящая по левому борту долины р. Слюдянка (рис. 3). Некоторые глыбы, перескочив через дорогу, отлетели вниз в долину. Объем отдельных блоков достигал 0.5–0.7 м³. Более мелкий материал рассредоточился по склону. Общий объем вовлеченного в перемещение материала оценивается примерно в 45–50 м³.

Серия оползней и обвалов (см. рис. 2, а–в) сформировалась на участке между пос. Утулик и с. Мангутай. Общий объем каждого из них составил 25–30 м³, максимальный объем блока – до 0.5 м³. Камнепадами сорваны молодые деревья высотой до 1.5–2.0 м с диаметром ствола 3–5 см, были согнуты ветки. В результате сползания почвы обнажились граниты, в которых по зоне трещиноватости с азимутом падения $235^\circ \angle 60^\circ$ приоткрылись некоторые трещины с зиянием до 1 см.

Большое количество осыпей образовалось у придорожных обнажений первых километров



Рис. 3. Обвал в районе г. Слюдянка, перегородивший старую грунтовую дорогу

автодороги А-164 Култук–Монды (рис. 2, г). Большинство из них приурочено к выходу основного сместителя Главного Саянского разлома, в зоне которого породы интенсивно раздроблены и трещиноваты. Объем отдельных конусов составляет здесь от 0.5 до 8–10 м³. В пункте KULT_101 (см. рис. 1) общий объем вновь образованной осыпи достигает 135 м³. Мелкие камни продолжали скатываться со склона в первые несколько дней после главного толчка. Во многих местах с бровки склона сброшены куски дерна с травяной растительностью.

Особо следует отметить осыпь на автодороге А-164, в пункте ELOV_101, расположенном на удалении 83 км от эпицентра Култукского землетрясения. Она приурочена к придорожному обнажению среднезернистых гранитов длиной более 60 м, высотой около 15–18 м. В точке наблюдения выходит один из сместителей Южно-Тункинского разлома с азимутом падения $(350^\circ - 5^\circ) \angle 75^\circ$ и мощностью зоны трещиноватости ~25–30 м. Кроме того, здесь зафиксированы другие разнонаправленные разрывные зоны меньшего масштаба, которые в совокупности обуславливают сильную раздробленность кристаллических пород. Общий объем осыпанной массы в описываемом месте оценивается примерно в 120 м².

В районе пос. Аршан по долине р. Кынгарга, по словам опрошенных местных жителей, также происходили камнепады и небольшие обвалы. Поселок – максимально удаленная от эпицентра точка, где еще наблюдались следы склоновых движений. Связано это, без сомнения, с интенсивной тектонической раздробленностью пород по долине р. Кынгарга [Агафонов, 1999, 2002], где обвалы – нередкое явление и происходят даже без сейсмических толчков.

Согласно сообщениям очевидцев, находившихся в горах южнее оз. Байкал, на крутых склонах отмечены значительные смещения материала. В движение приходили курумники на склонах хребта Хамар-Дабан. Камнепады сопровождалась подъемом в воздух небольших облаков пыли. Подобные явления наблюдались на расстояниях до 20–25 км в южном направлении от эпицентра.

Трещины в грунте проявились в железнодорожных насыпях, асфальте, на границе асфальта и дерна, а также непосредственно в почве (рис. 4, 5). К особенностям распространения

этих нарушений относится их четкая локализация: при одинаковой детальности обследования они были встречены только на участках между пос. Утулик и с. Мангутай, г. Слюдянка и пос. Култук, а также в нескольких километрах западнее пос. Култук по автодороге А-164 (см. рис. 1). Во всех точках наблюдения разрывы имели линейный характер и были представлены серией зияющих, чаще искривленных субпараллельных или кулисообразных трещин, общая протяженность которых в некоторых местах достигала 150–242 м. Трещины имели раскрытие до 9 см и сбросовые смещения до 8 см. Очевидно, указанные амплитуды обусловлены наличием свободной поверхности. Приведем несколько кратких описаний участков, в пределах которых наблюдались сейсмогравитационные разрывы.

В пункте UTUL_101, расположенном в пос. Утулик, в 8 км от эпицентра, на протяжении 242 м в железнодорожной насыпи отмечены трещины длиной от 1 до 20 м (рис. 4), с максимальным раскрытием 3 см и простиранием 283° , 285° , 300° , 325° . Местами они имеют кулисообразное строение, которое типично для первичных сейсмогенных дислокаций. В некоторых зонах сгущения разрывов наблюдались разорванные в том же направлении гальки диаметром 5–7 см. По одной из трещин в железнодорожной насыпи длиной 20 м и простиранием 285° отмечено сбросовое смещение в 6 см.

В 4 км северо-западнее пос. Утулик, в пункте OREKH_101, в железнодорожной насыпи ближе к склону отмечены две трещины, распо-

ложенные примерно на одной линии одна за другой через 15 м. Азимут простирания первой трещины 320° (рис. 5,а), длина ее не менее 20 м (далее прослеживается в почве вниз по склону). Отмечено вертикальное смещение в 6–7 см и максимальное раскрытие до 7 см. Азимут простирания второй трещины 325° , длина ее не менее 15 м.

В пункте OREKM_102 в асфальте и на границе почвы и асфальта возникли разрывы с простиранием 320° и длиной до 36 м (рис. 5,б). По трещине, которая проходит между почвой и асфальтом, наблюдались сбросовые смещения до 8 см, связанные со сползанием почвы по склону. Максимальное раскрытие составило 6 см.

По автотрассе М-55, между г. Слюдянка и пос. Култук (пункт SLUD_101), в старом асфальтовой покрытии и почве на протяжении 115 м наблюдалась система трещин с простиранием 255° – 270° (рис. 5,в–д). Их раскрытие составило от 3 до 9 см, амплитуда сброса 4–5 см. По смещению бортов трещин устанавливается левый сдвиг размером в первые сантиметры. Рядом в коренном выходе серых гнейсов в зонах трещиноватости с азимутом падения (280° – 290°) $\angle 70^\circ$ и 350° $\angle 45^\circ$ приоткрылись сколы, наблюдалось смещение мелких блоков. Данная точка наблюдения приурочена к узлу пересечения разломов четырех направлений: широтного, меридионального, северо-западного и северо-восточного (см. рис. 1).

К западу от пос. Култук, в пункте KULT_102, в асфальтовой покрытии на протяжении 45.4 м



Рис. 4. Примеры проявления трещин в железнодорожной насыпи в пункте UTUL_101



Рис. 5. Примеры проявления трещин в природных и насыпных грунтах: а – в железнодорожной насыпи в пункте OREKH_101, б – на границе асфальта и почвы в пункте OREKM_102, в, г, д – в старом асфальте и почве в пункте SLUD_101, е – в асфальте в пункте KULT_102

наблюдалась система трещин с азимутом простирания 276° (рис. 5,е), раскрытие трещин достигало 5 см.

Синоптическая роза-диаграмма генерализованных простираний изученных разрывов показывает преобладание субширотного и северо-западного направлений (см. рис. 1). Примечательно, что на сегменте Слюдянка–Култук и далее по автодороге А-164 доминирует первое из них, на сегменте Утулик–Мангутай – второе. Сопоставляя расположение изученных пунктов и разломов на рис. 1, следует сделать вывод о том, что сейсмогравитационные трещины в природных и насыпных грунтах вскрывались над зонами неоген-четвертичных разломов. Последние были откартированы ранее [Лунина, Гладков, 2004].

Гидрогеологические аномалии после землетрясения проявились в виде повышения уровня подпочвенных и поверхностных вод. В пос. Култук в ряде огородах, расположенных на склоне, значительно увлажнилась почва, чего раньше не наблюдалось. Увеличился дебит ручья, текущего вдоль одной из улиц поселка. Из автономной водоканки общественного пользования около трех дней шла мутная вода, а в колодцах отмечалось повышение уровня воды. Аналогичные эффекты отмечены в пос. Зун-Мурино. Сразу после землетрясения вода в колодцах стала мутной и грязной. То же произошло с водой в скважине, подаваемой с помощью глубинного насоса. Очевидно, что эти гидрогеологические аномалии в указанных населенных пунктах следует считать повсеместно распространенными, а не локальными.

Сильное раскачивание высоких вековых деревьев и кустарников, качание высокой травы и тряска отмечались в лесных массивах на эпицентральных расстояниях до 80 км. Колебания почвы отчетливо ощущались под ногами, а в ряде случаев, по словам очевидцев, они были хорошо заметны на глаз.

В целом, следует отметить, что область распространения вторичных эффектов Култукского землетрясения резко асимметрична. Случаи возникновения осыпей и обвалов наиболее многочисленны в пределах полосы, проходящей к западу от эпицентра вдоль южного берега оз. Байкал (автотрасса М-55) и далее вдоль Тункинского тракта (автотрасса А-164). По свидетельству очевидцев, к востоку от эпицентра смещение материала наблюдалось только в го-

рах на неустойчивых склонах. Вдоль автотрассы М-55, а также непосредственно на побережье оз. Байкал (в пос. Танхой и г. Байкальске) склоновые деформации и трещины в грунтах отмечены не были.

Закономерным представляется тот факт, что все пункты наблюдения, в которых задокументированы описанные вторичные природные эффекты, расположены на сместителях крупных разломов или в узлах их пересечений (см. рис. 1), а направления образовавшихся трещин в природных и насыпных грунтах совпадают с простиранием этих дизъюнктивов. Четкая локализация и упорядоченная направленность сейсмогравитационных разрывов, образованных при Култукском землетрясении, позволила предположить, что это сейсмическое событие связано с активизацией одного из разломов субширотного и/или северо-западного простирания [Лунина, Гладков, 2008]. Косвенно это подтверждается особенностями распределения афтершоков и механизмом очага [Арефьев и др., 2008].

Карта изосейст, составленная на основе полевого макросейсмического обследования и посланных в населенные пункты Сибири опросных листов, свидетельствует о том, что излучение из очага распространялось преимущественно в западном и северо-западном направлениях [Радзиминович и др., 2009]. Большинство сейсмодформаций сосредоточено в границах 7-балльной изосейсты. Примечательно также, что в г. Байкальске и около с. Буровщина деформации на земной поверхности, связанные с Култукским землетрясением, обнаружены не были.

СРАВНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ* ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 27.08.2008 г. ПО РАЗНЫМ СЕЙСМИЧЕСКИМ ШКАЛАМ

Оценка интенсивности по шкалам MSK-64 и MMSK-86

Качественная оценка состоит в сравнении наблюдаемых признаков с описательной частью этих шкал. За оценку интенсивности землетрясения в пункте наблюдения принимается та градация (балльность) шкалы, относительно которой отмечено наибольшее число совпадений. Данные наблюдений и информативных признаков в шкалах MSK-64 и MMSK-86 представлены

* Далее в статье для различения интенсивность по шкалам MSK-64 и MMSK-86 дается арабскими цифрами, по шкалам INQUA и ESI-2007 – римскими. (Прим. ред.).

Таблица 1. Оценка интенсивности (*I*) землетрясения 27.08.2008 г. по наблюдаемым информативным признакам в пос. Култук

Данные наблюдений	<i>I</i> , баллы	MSK-64	MMSK-86
1. Изменился уровень воды в колодцах.	6	Наблюдаются изменения дебита источников и уровня воды в колодцах	Возможны небольшие срывы камней, оползни малых и средних объемов, изменения дебита источников
2. Увеличился дебит ручья, уровень поверхностных вод (почва заметно увлажнилась)			
3. Помутнение, загрязнение воды в колодцах на протяжении трех дней после землетрясения.	7	Вода становится мутной. Изменяется уровень воды в колодцах и дебит источников. В отдельных случаях оползни проезжих частей дорог на крутых склонах и трещины на дорогах	Отдельные трещины в твердом покрытии автомобильных дорог. Повреждения грунтовых насыпей. Осыпи и камнепады на горных участках дорог. Помутнение воды в источниках
4. Многочисленные осыпи, камнепад средних размеров, объем осыпанной массы грунта до 135 м ³			
5. Трещины в грунте, система трещин линейного простирания на протяжении 115–242 м с шириной раскрытия 3–9 см	8	Небольшие оползни на крутых откосах выемок и насыпей дорог; трещины в грунтах достигают нескольких сантиметров. Во многих случаях изменяется уровень воды в колодцах и дебит источников	На горных участках дорог падение отдельных каменных глыб и небольшие (10 ² –10 ³ м ³) обвалы. Оползни на крутых склонах. Во многих случаях изменение дебита источников и уровня воды в колодцах
6. Трещины на дорогах с твердым покрытием: максимальная длина 45 м, ширина раскрытия достигает 5 см			
7. Сильное раскачивание деревьев. Ощутимое колебание почвы под ногами и волнообразное колебание, заметное на глаз	9	Часты оползни и осыпания грунта	Во время землетрясения на ровных участках наблюдаются «земляные» волны

в табл. 1. Их сопоставление позволяет констатировать следующее.

Для шкалы MSK-64: макросейсмические признаки 1, 2 соответствуют 6 баллам; признак 3 – 7 баллам; признаки 5 и 6 – 8 баллам; признак 7 – 9 баллам.

Для шкалы MMSK-86: макросейсмические признаки 1, 2 и 4 соответствуют 6 баллам; признаки 3, 5 и 6 – 7 баллам; признаки 4 и 5 – 8 баллам; признак 7 («земляные» волны) – 9 баллам.

Сравнительный анализ наблюдаемых и описательных эффектов в интервале интенсивности $I=6-9$ баллов позволяет предположить, что сейсмический эффект в пос. Култук может быть оценен в 7–8 баллов по шкалам MSK-64 и MMSK-86. Именно относительно этого интервала отмечено наибольшее число совпадений наблюдаемых и описательных явлений. Уточнить оценки сейсмического эффекта (7 или 8 баллов) по этим шкалам не представляется возможным, так как описательная часть в них не содержит меры, позволяющей оценить информативность наблюдаемых данных и сравнить конечные оценки по степени их надежности и обеспеченности макросейсмическими признаками.

Оценка интенсивности по шкале ESI-2007 Для определения интенсивности землетрясения в пос. Култук сравним описательные признаки EEE (Earthquake Environmental Effects) в шкале ESI-2007 с наблюдаемыми данными в интервале интенсивности от VI до VIII баллов (табл. 2).

Так же как и в случае оценки сейсмического эффекта землетрясения в пос. Култук по шкалам MSK-64 и MMSK-86, интенсивность по шкале ESI-2007 можно лишь приблизительно считать равной VII–VIII баллов. Наибольшую неопределенность вносят следующие признаки: помутнение воды в колодцах, изменение уровня воды в колодцах и дебита источников, сильное раскачивание деревьев. Из-за нечетких, расплывчатых описательных характеристик EEE, непонятно какому баллу соответствуют наблюдаемые первые три признака; «сильное раскачивание деревьев...» – неоправданно информативно при оценках $I=VIII-IX$ баллов. Как показал опыт, использование шкалы ESI-2007 для оценки сейсмического эффекта землетрясения в пос. Култук не повысило качество оценок ни по отдельно наблюдаемым эффектам в окружающей среде, ни по комплексу эффектов в сравнении с качественными оценками по другим сейсмическим шкалам.

Таблица 2. Информативные признаки шкалы ESI-2007, наблюдаемые в пос. Култук (эпицентральное расстояние 27–34 км)

Пункт	Объект	Макросейсмический признак	Интервал интенсивности (min–max)	Интенсивность в пункте по шкале ESI-2007
			Баллы	
пос. Утулик	Автотрасса М-55	Придорожное обнажение. Склон разбит трещинами. Возникли осыпи объемом до 3–4 м ³	VI–VII	VII
		Раскачивались деревья	VI–VII	
	Ж/д насыпь	На протяжении 242 м в ж/д насыпи отмечены трещины длиной 1–20 м; наблюдались разорванные гальки диаметром 5–7 см. По одной из трещин сбросовое смещение 6 см; максимальное раскрытие 3 см	VI–VII	
с. Мангута́й	Автотрасса М-53	Осыпь-камнепад длиной 10 м, высотой 5 м, объем осыпания 50 м ³ . Камнепадом сорваны молодые деревья высотой до 2 м с диаметром ствола 3–5 см	VI	VII
	Район ж/д станции	В ж/д насыпи отмечены две трещины длиной 15 и 20 м; сбросовое смещение 6–7 см; максимальное раскрытие 7 см	VII	
	Грунтово-полевая дорога	В насыпи грунтово-полевой дороги трещина длиной 16 м	VI–VII	
		В коренном выходе гранитов трещины приоткрылись до 1 см	VI–VII	
		Оползень-камнепад, сползли трава и почва; объем сползшего материала ~160 м ³	VI–VII	
	Автотрасса	В асфальте и на границе почвы и асфальта трещины длиной 36 м. По «пограничной» трещине сбросовые смещения до 8 см; максимальное раскрытие 6 см	VII	
		В старом асфальтовом покрытии трещина длиной 8 м, максимальное раскрытие 4 см	VI–VII	
		В урзе дороги обвал длиной 10 м, высотой 7 м; объем осыпанной массы 70 м ³ . Камнепадом сорваны молодые деревья высотой до 2 м	VI–VII	
г. Слюдянка	Автотрасса	В старом асфальтовом покрытии и почве трещины с раскрытием 3–9 см; амплитуда сброса 4–5 см	VII	VII
	Скальный уступ, грунтовая дорога	Крупные глыбы откололись от верхушки скалы и скатились вниз по склону, перегородив грунтовую дорогу. Объем отдельных камней 0.5–0.7 м ³ ; общий объем смещенного материала ~45–50 м ³	VII	
пос. Култук	Автотрасса А-165	Осыпь-камнепад длиной 60 м, высотой 15 м; объем осыпанного материала ~450 м ³	VI–VII	Более VII
	Поселок	Повышение уровня почвенной и поверхностной воды, изменение уровня воды в колодцах; из водоканчки около трех дней шла мутная вода	VI–VIII	
		Раскачивались деревья	VI–VII	
	Старая выработка в склоне	Сползание грунта по склону вместе с растущими деревьями, длина стенки отрыва ~20–25 м; объем смещенного грунта ~40–50 м ³ . На этом же склоне свежая осыпь объемом ~2–3 м ³	VI–VIII	
	Автотрасса	В асфальтовом покрытии система трещин с максимальным раскрытием до 5 см	VI–VII	
		Придорожное обнажение высотой ~4.5 м. Осыпи на склоне обнажения объемом до 10 м ³	VI–VII	

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Оценка сейсмического эффекта на территории пос. Култук по наблюдаемым эффектам в окружающей среде выполнена с помощью информационных статистик [Онофраш, Роман, 1979]. Суть методики количественной оценки состоит в преобразовании макросейсмического поля в поле сейсмического эффекта с помощью трех операторов трансформации: теоретико-информационного, проверки гипотез и оценки параметров. Критерием оптимальности для каждого из них служит максимум используемой информации.

Как следует из работы С.А. Айзавяна и В.С. Мхитаряна [2001], «степень нашей разумной уверенности в некотором утверждении, касающемся оценки неизвестного численного значения параметров, возрастает и корректируется по мере пополнения имеющейся информации относительно исследуемого природного явления». Один из возможных способов формализации этого тезиса связан с использованием формулы Байеса.

Специфика байесовского подхода основана на двух положениях:

- степень уверенности в справедливости некоторого утверждения численно выражается в виде вероятности. Это означает, что вероятность в байесовском подходе выходит за рамки ее интерпретации в терминах статистического ансамбля;
- в качестве исходной используется одновременно информация двух типов: априорная и исходные статистические данные. При этом первая представляется в виде некоторого априорного распределения вероятностей анализируемого параметра, которое характеризует степень уверенности в том, что этот параметр примет то или иное значение еще до начала сбора исходных данных. По мере их поступления это распределение уточняется по формуле Байеса, с помощью которой обеспечивается переход от априорного к апостериорному распределению.

Оценка сейсмического эффекта методом проверки гипотез проводится по формуле Байеса и состоит в том, что на основе наблюдаемой случайной выборки требуется оценить апостериорную вероятность по всем гипотезам:

$$P(H_i | E_j) = \frac{P(H_i)P(E_j | H_i)}{\sum_{i=1}^n P(H_i)P(E_j | H_i)}, \quad (1)$$

где H_i — гипотеза, нуждающаяся в подтверждении на основании признака E_j .

За оценку интенсивности принимается та градация шкалы (балльность), относительно которой наблюдаются максимумы количества информации, функции правдоподобия и апостериорной вероятности. Предполагается, что информация о природных явлениях представлена в форме условной вероятности $P(E|H)$, выражающей меру связи между проявлением реакции (степень нарушенности, изменчивости) макросейсмического признака E на сейсмическое воздействие и интенсивностью H на выбранном интервале.

Однако возможность получения достаточно надежной начальной вероятностной информации об остаточных явлениях, проявившихся на грунтах вследствие землетрясений, представляется весьма проблематичной, отождествление понятия вероятности с частотой появления некоторого признака при достаточно большом числе испытаний внутренне противоречиво. Чем многочисленнее выборка и устойчивее частота появления того или иного признака, тем с большим основанием можно эту частоту отождествлять с вероятностью этого признака. В силу перечисленных причин становится мало результативным подбор «точных» статистических закономерностей проявления различных эффектов в природной среде на интервале балльности от порога чувствительности до зоны насыщения.

Анализ имеющихся экспериментальных данных в отношении эффектов на грунтах и в рельефе, в числе которых нужно упомянуть обширные публикации Е.В. Поповой [1974, 1975, 1976, 1978, 1980], шкалу INQUA [Michetti et al., 2004] и другие материалы, показывает, что они с трудом поддаются статистической обработке в силу значительного разброса данных. Впрочем, в некоторых случаях наблюдается довольно близкое совпадение с нормальным распределением. Как известно, при нормальном законе распределения постулируется, что случайная величина формируется под воздействием очень большого числа независимых случайных факторов, причем сила воздействия каждого отдельного фактора мала, а само воздействие носит аддитивный характер [Айзавян, Мхитарян, 2001]. Нормальный закон — один из многих типов распределения, наблюдающихся в природе и обладающий к тому же относи-

тельно большим удельным весом практической приложимости. Вместе с тем известен и афоризм (не без доли иронии), приписываемый Липману: «Каждый уверен в справедливости нормального закона: экспериментаторы – потому, что они думают, что это математическая теорема; математики – потому, что они думают, что это экспериментальный факт». Тем не менее даже в случае отклонения в распределении экспериментальных данных от нормального закона можно указать, по крайней мере, две причины его широкого применения:

1) использование в качестве первого приближения, при этом нередко оказывается, что подобное допущение дает приемлемые с практической точки зрения результаты;

2) использование преобразования исследуемой случайной величины, которая видоизменяет исходный закон распределения, превращая его в нормальный.

Для представления сейсмогенных геологических эффектов на земной поверхности в единой образной форме условной вероятности $P(E|H)$ воспользуемся:

- статистическими данными об эффектах в природной среде шкалы INQUA [Michetti et al., 2004];
- предположением (в качестве первого приближения) о нормальном законе распределения эффекта в природной среде на интервале интенсивности его проявления.

В шкале INQUA представлены гистограммы распределения числа наблюдений 15 эффектов в природной среде на интервале интенсивности III–XI баллов шкалы MCS, построенные по данным обработки 114 землетрясений, из которых 100 сейсмических событий относятся к интервалу интенсивности в эпицентральной зоне VII–XI баллов. По данным гистограмм построены графики кумулятивных частот различных явлений в природной среде на оси балльности (рис. 6). Для каждого признака на графиках отражены основные понятия сейсмических шкал (порог чувствительности и зона насыщения реакции), а также выделен интервал интенсивности, в котором число наблюдений признака составляет около 80 % от общего числа наблюдений на всем интервале 12-балльной шкалы MCS. Статистические данные, представленные гистограммами в шкале INQUA, отражают лишь факт наблюдения природного явления относительно балльности без учета степени его реакции.

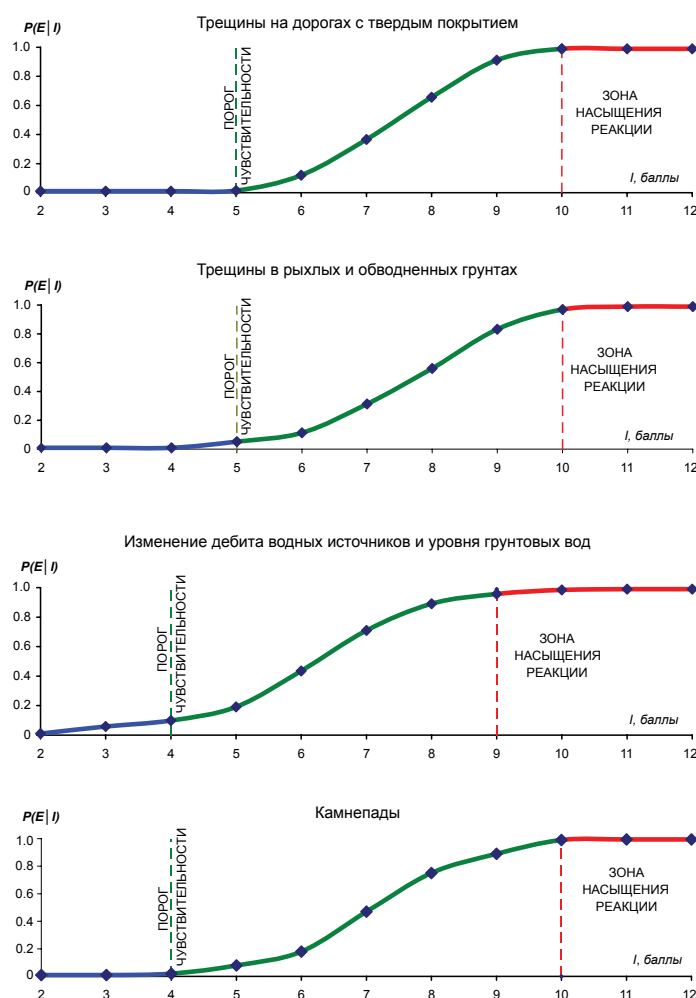


Рис. 6. Графики кумулятивных частот различных эффектов в природной среде

Рассмотрим гистограмму «трещины в рыхлых осадочных грунтах», из которой следует: количество наблюдений данного признака относительно IV–XI баллов составляет 18, 0, 22, 73, 88, 103, 51, 11, всего 366 наблюдений, однако отсутствует информация о диапазоне трещин (ширина раскрытия, длина простира-ния), для которого составлена значительная выборка. Все же для представления возникших вследствие землетрясения природных явлений в форме условной вероятности $P(E|H_i)$ воспользуемся статистическими данными шкалы INQUA, предположив, что параметры реакций наблюдавшихся признаков в пос. Култук не выходят за границы диапазона параметров аналогичных признаков, представленных гисто-

ТАБЛИЦА 3. Количество наблюдений и эмпирическое распределение* по данным гистограмм в шкале INQUA для эффектов в природной среде, наблюдавшихся в пос. Култук

Эффекты в природной среде	Интенсивность, баллы									Σ
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
Изменение дебита источника (изменение уровня грунтовых вод)	17 (0.05)	20 (0.06)	33 (0.09)	85 (0.24)	96 (0.27)	65 (0.18)	26 (0.07)	13 (0.04)	4 (0.01)	359 (1.01)
Химико-физические изменения воды	7 (0.03)	7 (0.03)	11 (0.05)	48 (0.20)	78 (0.32)	50 (0.21)	24 (0.10)	11 (0.05)	4 (0.02)	240 (1.01)
Трещины в грунте с покрытием (асфальт/камень)				73 (0.12)	147 (0.25)	173 (0.29)	151 (0.25)	55 (0.09)		599 (1.00)
Трещины в рыхлых осадочных грунтах		18 (0.05)	0	22 (0.06)	73 (0.20)	88 (0.24)	103 (0.28)	51 (0.14)	11 (0.03)	366 (1.00)
Трещины в уплотненных грунтах				6 (0.06)	15 (0.16)	40 (0.43)	22 (0.23)	11 (0.12)		94 (1.00)
Камнепады, оползни, обвалы		8 (0.02)	24 (0.06)	41 (0.10)	115 (0.29)	110 (0.28)	58 (0.14)	41 (0.10)	2 (0.01)	399 (1.00)

* Эмпирическое распределение дано в скобках.

граммами в шкале. В табл. 3 для природных явлений в пос. Култук приведены эмпирические распределения балльности; ординаты осей графиков при оценке интенсивности землетрясения принимаются за «условные вероятности» $P(E|H_i)$.

Наряду с использованием статистических данных в шкале INQUA для представления наблюдаемых эффектов в природной среде в пос. Култук в единообразной форме условных вероятностей авторами был использован искусственный прием. Так, признак E , соответствующий градации H в шкале ESI-2007, имеет нормальное распределение на оси балльности с максимумом вероятности его наблюдения, равным 0.4, и стандартным отклонением распределения $\sigma = 1$; ординаты распределения при этом будем считать за «условную вероятность» $P(E|H_i)$. Количественная интерпретация сейсмического эффекта землетрясения проведена в интервале VI–IX баллов при различных вариантах априорных оценок: от полной неосведомленности о

параметрах землетрясения (магнитуде, интенсивности землетрясения в эпицентральной зоне, эпицентральной расстоянии до пункта наблюдения) в первом варианте до гипотезы, совпадающей с апостериорной – в третьем варианте. Такой выбор интервала объясняется желанием авторов продемонстрировать идею методики количественной оценки сейсмического эффекта землетрясения по наблюдаемым данным, представленным в единообразной форме «условных вероятностей» с использованием информационных статистик.

Результаты оценок сейсмического эффекта представлены в табличной форме с использованием одной из наиболее значимой в методике оценивания статистики – формулы Байеса: в табл. 4, I – оценки с использованием статистических данных в шкале INQUA, в табл. 4, II – оценки в предположении нормального закона распределения признаков на оси интенсивности их проявления. На рис. 7 дана графическая интерпретация оценок балльности по Байесу.

Таблица 4. Оценка сейсмического эффекта землетрясения в пос. Култук

Вариант	Гипотеза	Интервал оценивания по формуле Байеса, баллы			
		VI	VII	VIII	IX
I. Использование статистических данных в шкале INQUA*					
1-й	Априорная	0.25	0.25	0.25	0.25
	Апостериорная	0.01	0.44	0.55	0.00
2-й	Априорная	0.1	0.6	0.2	0.1
	Апостериорная	0.00	0.83	0.16	0.01
3-й	Априорная	0.1	0.2	0.6	0.1
	Апостериорная	0.00	0.21	0.79	0.00
II. Использование нормального закона распределения эффектов в природной среде на оси интенсивности их проявления					
1-й	Априорная	0.25	0.25	0.25	0.25
	Апостериорная	0.01	0.18	0.82	0.00
2-й	Априорная	0.1	0.6	0.2	0.1
	Апостериорная	0.00	0.39	0.61	0.00
3-й	Априорная	0.1	0.2	0.6	0.1
	Апостериорная	0.00	0.07	0.93	0.00

* Первый и второй варианты выполнены с учетом в выборке наблюдаемых данных признака «трещины в рыхлых осадочных грунтах», третий вариант – с учетом признака «трещины в плотных грунтах».

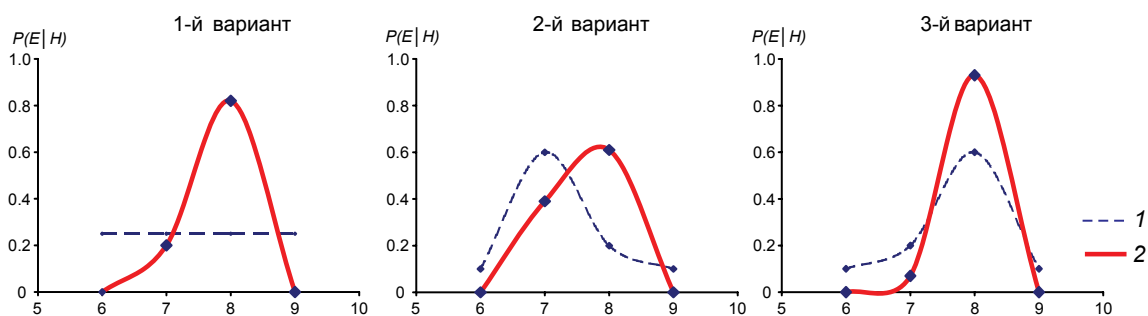


Рис. 7. Графическая интерпретация оценок балльности по формуле Байеса
1 – априорная информация; 2 – апостериорная информация

Результаты наглядно демонстрируют независимость оценок от априорных соображений: сейсмический эффект в пос. Култук по наблюдаемым природным данным может быть оценен в VIII баллов с вероятностью 0.93 и VII баллов с вероятностью 0.07 (табл. 4, II, 3-й вариант).

Таким образом, интерпретация сейсмического эффекта с использованием информационных статистик на примере Култукско-

го землетрясения по наблюдаемым явлениям в природной среде показала, что методика представляет собой формализованный процесс, при котором количественная мера интенсивности землетрясения формируется на основе всей информации, содержащейся в макросейсмических признаках, а сами количественные оценки приобретают более объективный характер.

РАНГ ШКАЛЫ ESI-2007

Не отрицая важности проблемных вопросов, сформулированных в статье Р.Э. Татевосяна с соавторами [2006], считаем необходимым, прежде всего, уделить внимание рангу шкалы ESI-2007. В последнее десятилетие XX в. в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта был достигнут существенный прогресс в области теории создания современных сейсмических шкал. Эти работы позволили сформулировать требования, предъявляемые к современным сейсмическим шкалам, основные из которых [Ершов, Шебалин, 1984] следующие:

- условия единственности и воспроизводимости: одни и те же макросейсмические признаки должны приводить разных наблюдателей к одинаковым оценкам;
- все признаки, используемые в макросейсмической шкале, имеют слева «порог чувствительности», а справа «зону насыщения реакции»;
- разбиение интервала возможных проявлений макросейсмических признаков на ряд последовательных статистически различимых градаций;
- четкое решение вопроса о ранге шкалы (шкала интервалов или шкала порядка);
- определение правил, по которым осредняются значения интенсивности, полученные по разным классам признаков (в зависимости от решения вопроса о ранге шкалы).

В случае сейсмических шкал важным является вопрос: относится ли эта шкала к шкале порядка, или к более сильной шкале интервалов? Обе эти категории используются при построении сейсмических шкал, причем им соответствуют две разные группы объектов. При создании модернизированных шкал MMSK-86 и MMSK-92 все макросейсмические данные были разделены Н.В. Шебалиным на статистические данные (реакция зданий, людей и предметов быта) и описательные данные (элементы ландшафта, инженерные сооружения). Н.В. Шебалин и Ф.Ф. Аптикаев [2003], обсуждая целесообразность учета данных об изменениях элементов грунтов и рельефа для оценки интенсивности землетрясения, посчитали все же преждевременным использование статистических оценок типа шкалы Н.Н. Леонова [1975]. Полагаем, что эта точка зрения сохраняет свое значение и в настоящее время. Следовательно, максимально

сильным типом для шкалы ESI-2007 может быть только шкала порядка. При измерениях с помощью шкал этого типа может быть получена информация лишь о порядке расположения объектов по какому-либо свойству.

Таким образом, узловым вопросом является выбор ранга шкалы ESI-2007. От его решения зависят возможности использования шкалы. Реалистичный подход к проблеме выбора ранга шкалы заключается в принятии на данном этапе шкалы порядка, в которой недопустимы арифметические операции с получаемыми оценками, операции их осреднения, сравнения приращений и т.п., тогда как в шкале интервалов все указанные операции статистически корректны [Шебалин, Аптикаев, 2003]. Вместе с тем разработчиками ESI-2007 [Татевосян и др., 2006] обозначена перспектива построения унифицированной шкалы, для которой планируется совмещение природных и макросейсмических эффектов (т.е. описательных макросейсмических и статистических макросейсмических данных по классификации Н.В. Шебалина). Следовательно, необходим поиск в этом направлении, в том числе приемов, заменяющих процедуру осреднения.

В шкале MMSK-92 интенсивность сотрясений, определенная по разным видам и типам объектов, осредняется по формуле

$$I_i = \frac{\sum I_i f_i}{\sum f_i}, \quad (2)$$

где I_i – интенсивность по i -му типу объекта; f_i – весовая функция для i -го типа объекта.

Значение весовой функции f_i определяется по формуле

$$f_i = \frac{n_i}{(k_i v)}, \quad (3)$$

где n_i – число обследованных объектов i -го типа; v – видовой весовой коэффициент (для зданий $v = 1$, для реакции людей $v = 2$, для предметов быта $v = 3$); k_i – весовой переходный коэффициент, зависящий от близости средней степени реакции объектов данного типа к «порогу чувствительности» или зоне насыщения реакции, принимает значения $k_i = 5, 2$ или 1 .

Описанная процедура, строго говоря, применима к статистическим макросейсмическим признакам (шкала интервалов). Для того чтобы сохранить единый алгоритм осреднения интенсивности, Н.В. Шебалин для описательных

макросейсмических признаков (шкала порядка) применил искусственный прием, который заключается в том, что знаменатель в формуле (3) не расшифровывается по сомножителям k_i и v , а задается блоком в виде произведения $(k_i v)$: для инженерных сооружений $(k_i v) = 2$, явлений на земной поверхности $(k_i v) = 10$, прочих признаков $(k_i v) = 4$.

Сказанное позволяет выстроить все макросейсмические признаки в ряд по степени убывания их статистической достоверности (при $k_i = 1$): здания – 1, инженерные сооружения – 2, реакция людей – 2, предметы быта – 3, прочие признаки – 4, явления на земной поверхности – 10.

В силу этого влияние погрешности такого искусственного приема при учете явлений на поверхности грунта невелики – в 10 раз меньше, чем для зданий.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ШКАЛЕ ESI-2007

Обращает на себя внимание громоздкий перечень описательных характеристик эффектов в природной среде (качественных, пространственно-временных, количественных):

незначительные,
небольшие,
значительные,
обычно значительные,
слабые,
сильные,
существенные,
локально наблюдаемые,
временно локально наблюдаемые,
крайне редко,
нередко,
редко

и т.д., всего около 25 градаций. Нарастание макросейсмического эффекта «трещины в грунте» для дорог с твердым покрытием вначале дано в количественной форме (сантиметровые трещины – VII баллов, дециметровые трещины – VIII баллов), а в дальнейшем числовые характеристики заменяются описательными количественными градациями (значительные трещины – IX баллов, широкие – X баллов, очень широкие – XI баллов). При описании макросейсмического эффекта «склоновые движения» в шкале приведены количественные оценки камнепадов и оползней для интервала IV–VII баллов, причем

в отношении оползней сказано «иногда значительные объемом 10^3 – 10^5 м³». Далее в шкале для VIII и IX баллов упоминания о камнепадах вообще отсутствуют, а объем оползней увеличился до 10^5 – 10^6 м³, но называется уже умеренным. При X, XI и XII баллах камнепады и оползни с количественной оценкой «более 10^5 – 10^6 м³» вновь упомянуты в качестве признака, но называются они теперь «крупные камнепады и оползни».

С этой точки зрения авторами была детально проанализирована табличная форма шкалы, приложенная к протоколу № 1/2008 заседания Совета по проблемам сейсмологии РАН. Из нее нами отобраны четыре колонки признаков ЕЕЕ: «гидрогеологические аномалии», «аномальные волны», «трещины в грунте» и «склоновые движения», которые представлены в виде отдельной таблицы в качестве результатов этого анализа (табл. 5).

Обратимся к описанию параметров одного из признаков ЕЕЕ – «помутнение воды в озерах, источниках, колодцах» в зависимости от интенсивности. Очевидно, приведенные характеристики признака «помутнение воды» и «вода мутнеет» делают неразличимыми либо слабо различимыми оценки в интервале от IV до VIII баллов, а также XI и XII баллов. Аналогично описаны в шкале и некоторые другие природные явления: «трещины в рыхлом аллювии и водонасыщенных грунтах» при V–VI баллах; «камнепады и оползни вдоль неустойчивых склонов», «образование искусственных озер», «подводные оползни», которые также не имеют нарастания макросейсмического эффекта в интервале X–XII баллов (в табл. 5 выделено светло-серым цветом). Обилие нечетких, расплывчатых характеристик эффектов в природной среде, на взгляд авторов, затрудняет проведение оценок интенсивности и не способствует повышению их достоверности по сравнению с другими сейсмическими шкалами.

Среди описательных характеристик различных макросейсмических эффектов в природной среде встречаются «пропуски», т.е. отсутствие проявления признака при изменении интенсивности в один или несколько баллов (в табл. 5 выделено темно-серым цветом). При подобном характере нарастания макросейсмических эффектов с увеличением балльности трудно говорить о соответствии ESI-2007 шкале порядка.

ТАБЛИЦА 5. Характеристика внутренней равномерности шкалы ESI-2007 по отдельным макросейсмическим признакам

Интенсивность по шкале ESI-2007, баллы	Гидрогеологические аномалии – помутнение воды в озерах, источниках, колодцах	Аномальные волны – сейши /цунами в водоемах	Трещины в грунте		Склоновые движения			
			Рыхлый аллювий, водонасыщенные грунты	Дороги с твердым покрытием	Камнепады вдоль неустойчивых склонов	Оползни вдоль неустойчивых склонов	Образование искусственных озер	Подводные оползни
IV	Помутнение	Сейши: высота волны несколько сантиметров	Ширина 1 мм			Отдельные камни	Небольшие	
V	Помутнение	Высота волны несколько дециметров	От нескольких миллиметров до нескольких сантиметров			Небольшие	Небольшие	
VI	Помутнение		От миллиметров до 1-2 см	Тонкие	До 10^3 м^3	До 10^3 м^3	До 10^3 м^3	Возникают
VII	Помутнение		5–10 см	Сантиметровые	До $10^3 - 10^5 \text{ м}^3$	Отдельные иногда значительные $10^3 - 10^5 \text{ м}^3$	Отдельные иногда значительные $10^3 - 10^5 \text{ м}^3$	Возникают
VIII	Мутнеет		До 50 см	Дециметровые		Многочисленные небольшие, умеренные $10^5 - 10^6 \text{ м}^3$	Временно – иногда; постоянно – редко	Часто возникают
IX	Сильное помутнение		До 100 см	Значительные		До 10^5 м^3 – часто, до 10^6 м^3 – иногда	Временные, постоянно – редко	Часто обширные
X	Сильное помутнение, даже в больших водоемах	Высота заплеска $>5 \text{ м}$	Зияющие $>1 \text{ м}$	Широкие	Крупные $>10^5 - 10^6 \text{ м}^3$	Крупные $>10^5 - 10^6 \text{ м}^3$	Постоянно – иногда	
XI	Сильное помутнение, даже в крупных водоемах	Высота заплеска $>15 \text{ м}$	Зияющие несколько метров	Очень широкие	Крупные $>10^5 - 10^6 \text{ м}^3$	Крупные $>10^5 - 10^6 \text{ м}^3$	Постоянно – иногда	Часто обширные
XII	Сильное помутнение, даже в крупных водоемах	Высота заплеска несколько десятков метров	Зияющие $>10 \text{ м}$		Крупные $>10^5 - 10^6 \text{ м}^3$	Крупные $>10^5 - 10^6 \text{ м}^3$	Постоянно – иногда	Часто обширные

Примечание. Отсутствие нарастания макросейсмического признака обозначено светло-серым цветом, «пропуск» макросейсмического признака – темно-серым.

ТАБЛИЦА 6. Проявления признака «изменение дебита источников» в окружающей среде

Интенсивность по шкале ESI-2007, баллы	Степень реакции признака – качественные изменения	Пространственно-временные изменения	Частота проявления
IV	Небольшие	Локальные	Крайне редко
V	Небольшие	Локальные	Редко
VI	Значительные	Локально наблюдаемые	–
VII	Значительные	Временно локально наблюдаемые	–
VIII	Изменчивые	Обычно временно	–
IX	Значительные (дебит источников и их положение)	Обычно временно	–
X	Существенные	–	Во многих источниках
XI	Существенные	–	В большинстве источников
XII	Существенные	–	В большинстве источников

Одна из причин нечеткости количественных формулировок, по мнению авторов, заключается в совмещении в единой классификации различных по физической природе понятий: степени реакции признака, пространственно-временных изменений и частоты их проявлений (табл. 6).

Возможно, что при качественном описании вторичных эффектов в шкале ESI-2007 следует давать пояснение: «проявление эффекта в зоне разлома» или «проявление эффекта в межразломном блоке». При наличии в пункте описания следов склоновых движений и трещин в грунте) можно дополнительно к понятиям «неустойчивые склоны» и «трещиноватые породы» предложить использовать пояснение, количественно учитывающее нарушение субстрата (в частности, проявления оползней, обвалов и оползней, трещин в грунте и т.п. вблизи выходов скальных пород):

а) со слабой нарушенностью, которая характеризуется плотностью трещин (для всех систем) на 1 м^2 (N , трещин/ м^2) < 25 штук или на 1 м^3 (n , трещин/ м^3) < 40 штук;

б) с повышенной, высокой и интенсивной нарушенностью, которая соответственно ха-

рактеризуется плотностью трещин на 1 м^2 (N , трещин / м^2) > 25 штук или на 1 м^3 (n , трещин / м^3) > 40 штук.

Оценки плотности основаны на достаточно большом опыте (более 1000 точек геолого-структурных наблюдений) картирования разломов и изучения их зон [Лунина, Гладков, 2002; и другие работы].

Во многих случаях при описании первичных эффектов протяженность разлома на поверхности не согласуется с амплитудой смещения по нему, если исходить из хорошо известных зависимостей длины сейсмогенного разрыва от смещения. По-видимому, в описании имеется в виду непрерывный сегмент вышедшего на поверхность разлома. В этом случае должно быть дано более четкое пояснение. Критерием для выделения участка сейсмогенного разрыва как пункта может служить его непрерывность или непрерывность проявления связанных с ним сейсмогенных деформаций. Вероятно, не следует также вводить понятие «пороговые расстояния».

Целесообразно расширить перечень учитываемых в шкале ESI-2007 макросейсмических признаков за счет реально наблюдаемых при умеренных и сильных землетрясениях 1995,

1999, 2001 и 2008 гг. на оз. Байкал: гул, торшение льда, «земляные» волны, эффекты в коренных породах. Эти признаки в описательной форме учтены в региональной шкале сейсмической интенсивности для Прибайкалья РШСИ-2002, разработанной в Институте земной коры СО РАН [Шерман и др., 2003].

В числе проблемных вопросов в статье Р.Э. Татевосяна с соавторами [2006] упомянута процедура перехода от интервалов интенсивности «объектов» к интенсивности в «пункте». При этом авторы склоняются к назначению интенсивности в пункте по максимальному ее значению для объектов, входящих в данный пункт, что чревато завышением результирующей интенсивности. При более точном разъяснении проявления эффектов в природной среде и по возможности учете ее неоднородного строения (разломы, уровень залегания грунтовых вод в количественных оценках и др.) проблемы разности значений интенсивности для объектов могут «исчезнуть». На этом этапе, по-видимому, следует принимать некоторые усредненные значения, так как описания эффектов зачастую «весьма размыты». Под таким усредненным значением для пункта можно подразумевать наиболее вероятное значение интенсивности по аналогии с количественными градациями, принятыми в шкале MSK-64, где ему соответствует категория «многие» (50% объектов).

Проблемные вопросы сводятся, в конечном счете, к трем основным позициям:

- место шкалы интенсивности по проявлениям в окружающей среде (ESI-2007) в ряду существующих макросейсмических шкал и порядок взаимодействия с ними;
- значительные расхождения в количественных оценках проявления макросейсмических эффектов в элементах грунта, горных породах и в рельефе в сейсмических шкалах, составленных разными авторами: С.В. Медведевым (1965 г.), В.П. Солоненко (1975 г.), Н.Н. Леоновым (1975 г.), Н.В. Шебалиным (1986 г.), С.И. Шерманом (2003 г.);
- известное противоречие между весьма привлекательной идеей совмещения природных и макросейсмических (статистических) эффектов при построении унифицированной шкалы и достигнутым на сегодня рангом шкалы ESI-2007, который еще нужно «дотягивать» до уровня шкалы порядка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проблема создания шкалы интенсивности землетрясений по проявлениям в окружающей среде (ЕЕЕ) – актуальная задача для регионов с обширными необжитыми территориями, к числу которых принадлежит Восточная Сибирь. Землетрясение 27.08.2008 г. на Южном Байкале с $I = 7-8$ баллов по шкале MSK-64 оказалось информативным с точки зрения проявлений ЕЕЕ, в особенности трещин в грунтах и склоновых движений, и в этом смысле послужило удачным полигоном для тестирования шкалы ESI-2007.
2. Использование предложенного в шкале ESI-2007 формата для стандартизации процедуры сбора данных затруднений не вызвало.
3. Предложенный в шкале трехуровневый принцип пространственной генерализации ЕЕЕ оказался достаточным при проведении обследования, однако границы «общей площади проявления» нуждаются в конкретизации.
4. Узловой вопрос формирования шкалы ESI-2007, особенно с точки зрения совмещения природных и статистических макросейсмических эффектов в единую унифицированную шкалу, – выбор типа (ранга) шкалы. Достигнутый к настоящему времени уровень инженерно-сейсмометрических исследований свидетельствует о преждевременности перехода к статистическим оценкам проявлений в окружающей среде и, следовательно, необходимости ограничиться на данном этапе шкалой порядка.
5. Обилие градаций количественных оценок вероятности (частоты) проявления ЕЕЕ, приведенных в описательной форме, представляется чрезмерным (более двух десятков). Соседние градации, например склоновые движения ($I=5-7$ баллов), раскачивание деревьев и разжижение грунта ($I=6-7$ баллов), трудно различимы. Параллельное использование шкалы ESI-2007 совместно с действующими макросейсмическими шкалами при оценке интенсивности сейсмического события предполагает согласованность количественных характеристик всех типов шкал.

6. Детальный анализ табличной формы шкалы ESI-2007 по проявлениям в окружающей среде «трещины в грунте», «склоновые движения», «гидрогеологические аномалии» и «аномальные волны / цунами» выявил отступления от требований единственности и воспроизводимости результатов наблюдений, а также линейности и внутренней равномерности сейсмической шкалы.
7. При назначении интенсивности сейсмического эффекта в баллах для «пункта» (второй уровень генерализации) по интервалам «минимум–максимум» для интенсивности отдельных объектов впредь до накопления экспериментальных данных предлагается принимать наиболее вероятную балльность по аналогии с количественными градациями, принятыми в шкале MSK-64 (категория «многие» – 50 %).
8. Применение информационных статистик для оценки интенсивности землетрясения с использованием шкалы ESI-2007 позволяет приблизить предложенный алгоритм к методам количественной макросейсмологии. Решающий момент здесь – использование формулы Байеса. Она позволяет организовать пошаговое обследование ситуации, в процессе которого можно уточнить первоначальное предположение об априорной вероятности гипотезы. Формула Байеса отражает кусочно-линейную зависимость степени уверенности в данной гипотезе с учетом накапливаемой макросейсмической информации.

* * *

Задача построения достаточно линейной и достаточно равномерной сейсмической шкалы находится в жестком противоречии с «нелинейной» природой макросейсмических признаков. Нет уверенности в статистической однородности и полноте имеющегося на сегодня экспериментального материала. Авторы статьи отдают себе отчет в том, с какими трудностями пришлось столкнуться разработчикам шкалы ESI-2007. Надеемся, что настоящая статья, наряду с исследованиями других рабочих групп, внесет посильный вклад в решение этой сложной задачи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 09-05-92421-КЭ – EINSTEIN Consortium в рамках интеграционной программы РАН и СО РАН ОНЗ-7, проект № 7.

ЛИТЕРАТУРА

- Агафонов Б.П. Денудация склонов при сейсмических воздействиях умеренной интенсивности (на примере Тункинского землетрясения 1995 г.) // Геоморфология. 1999. № 4. С. 50–55.
- Агафонов Б.П. Тектонически раздробленные склоны в зонах активных разломов – чувствительные индикаторы умеренных сейсмических воздействий // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 61–71.
- Айзавян С.А., Мхитарян В.С. Теория вероятностей и прикладная статистика. М.: Изд-во «ЮНИТИ-ДАНА», 2001. Т. 1. 656 с.
- Арефьев С.С., Быкова В.В., Гилева Н.А., Масальский О.К., Матвеев И.В., Матвеева Н.В., Мельникова В.И., Чечельницкий В.В. Предварительные результаты эпицентральных наблюдений Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. // Вопр. инж. сейсмологии. 2008. Т. 35, № 4. С. 5–15.
- Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Иванькина Л.И., Ордынская А.П., Радзиминович Я.Б., Черных Е.Н. Землетрясение на Южном Байкале 27 августа 2008 г. // Сейсмост. стр-во. Безопасность сооружений. 2008. № 6. С. 53–57.
- Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Иванькина Л.И., Ордынская А.П., Саландаева О.И., Чигринская Л.С., Акулова В.В., Черных Е.Н. Оценка сейсмической надежности жилых и общественных зданий при землетрясении 27.08.2008 г. на Южном Байкале // Вопр. инж. сейсмологии. 2009. Т. 36, № 1. С. 23–39.
- Ершов И.А., Шебалин Н.В. Проблема конструкции шкалы интенсивности землетрясений // Вопр. инж. сейсмологии. М.: Наука, 1984. Вып. 25. С. 78–89.
- Леонов Н.Н. Природные явления в шкале сейсмической интенсивности // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука, 1975. С. 132–138.
- Лунина О.В., Гладков А.С. Детальное картирование и сравнительный анализ внутреннего строения зон разломов (на примере Прибайкалья) // Изв. вузов. Геология и разведка. 2002. № 4. С. 30–39.

- Лунина О.В., Гладков А.С. Разломная структура Тункинского рифта – отражение процесса косого растяжения // Докл. РАН. 2004. Т. 398, № 4. С. 516–518.
- Лунина О.В., Гладков А.С. Сейсмогравитационные разрывы на земной поверхности от землетрясения 27.08.2008 г. на Южном Байкале // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания / Отв. ред. Е.В. Скляров. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. Вып. 6, Т. 2. С. 21–23.
- Медведев С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 151–162.
- Никонов А.А. Терминология и классификация сейсмогенных нарушений рельефа // Геоморфология. 1995. № 1. С. 4–10.
- Онофраш Н.И., Роман А.А. Количественная интерпретация макросейсмического поля. Кисинев: Штиинца, 1979. 63 с.
- Попова Е.В. Остаточные деформации грунтов при землетрясениях. Ч. 1 // Вопр. инж. сейсмологии. Вып. 16. М.: Наука, 1974. С. 200–251.
- Попова Е.В. Остаточные деформации грунтов при землетрясениях. Ч. 2 // Вопр. инж. сейсмологии. Вып. 17. М.: Наука, 1975. С. 150–205.
- Попова Е.В. Остаточные деформации грунтов при землетрясениях. Ч. 3 // Вопр. инж. сейсмологии. Вып. 18. М.: Наука, 1976. С. 155–193.
- Попова Е.В. Остаточные деформации грунтов при землетрясениях. Ч. 4 // Вопр. инж. сейсмологии. Вып. 19. М.: Наука, 1978. С. 171–190.
- Попова Е.В. Остаточные деформации грунтов при землетрясениях. Ч. 5 // Вопр. инж. сейсмологии. Вып. 20. М.: Наука, 1980. С. 190–203.
- Радзиминович Я.Б., Имаев В.С., Радзиминович Н.А., Ружич В.В., Смекалин О.П., Чипизубов А.В. Эффекты Култукского землетрясения 27 августа 2008 года в ближней к эпицентру зоне: результаты макросейсмического обследования // Вопр. инж. сейсмологии. 2009. Т. 36, № 1. С. 56–71.
- Рогожин Е.А., Гордеев Е.И., Чебров В.Н. Сильное землетрясение в Корьякии 20 (21) апреля 2006 г.: результаты предварительного изучения // Физика Земли. 2007. № 2. С. 3–11.
- Солоненко В.П. Землетрясение и рельеф // Геоморфология. 1973. № 4. С. 3–13.
- Солоненко В.П. Шкала балльности по сейсмодислокациям // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука, 1975. С. 121–131.
- Стром А.Л., Никонов А.А. Соотношения между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясений // Физика Земли. 1997. № 12. С. 55–67.
- Татевосян Р., Рогожин Е., Гверрери Л., Микетти А.М., Серва Л., Виттори Э. Эффекты землетрясения в природной среде (ЕЕЕ) и оценка интенсивности: проект шкалы INQUA // Исследования по сеймотектонике и современной геодинамике. М.: ИФЗ РАН, 2006. С. 149–174.
- Татевосян Р.Э., Рогожин Е.А., Арефьев С.С. Оценка интенсивности землетрясений на основании сейсмических эффектов в природной среде: общие принципы и примеры применения // Вопр. инж. сейсмологии. 2008. Т. 35, № 1. С. 7–27.
- Шебалин Н.В., Антикаев Ф.Ф. Развитие шкал типа MSK // Вычислительная сейсмология. М.: ГЕОС, 2003. Вып. 34. С. 210–253.
- Шерман С.И., Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Антикаев Ф.Ф. Региональные шкалы сейсмической интенсивности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 188 с.
- Dengler L., McPherson R. The 17 August 1991 Honeydew earthquake North Coast California: a case for revising the Modified Mercalli Scale in sparsely populated areas // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1993. Vol. 83, N 4. P. 1081–1094.
- Fokaefs A., Papadopoulos G. Testing the new INQUA intensity scale in Greek earthquakes // Quaternary International. 2007. Vol. 173/174. P. 15–22.
- Galli P. New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction // Tectonophysics. 2000. Vol. 324, N 3. P. 169–187.
- Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzetti F., Reichenbach P. Landslides, earthquakes, and erosion // Earth and Planetary Science Letters. 2004. Vol. 229, N 1/2. P. 45–59.
- Michetti A.M., Esposito E., Gürpınar A., Mohammadioun B., Porfeido S., Rogozhin E., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audemard F., Comerci V., Marco S., McCalpin J., Mörner N.A. The INQUA scale. An innovative approach for

assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment. Roma: SystemCart, 2004. 118 p. (Memorie descrittive della carta geologica d'Italia; Vol. 67).

Michetti A.M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audermard F., Azuma T., Clague J., Comerci V., Gürpinar A., McCalpin J., Mohammadioun B., Möner N.A., Ota Y., Rogozhin E. Intensity scale ESI 2007. Roma: SystemCart, 2007. 50 p. (Memorie descrittive della carta geologica d'Italia; Vol. 74).

Papathanassiou G., Pavlides S. Using the INQUA scale for the assessment of intensity: Case study of the 2003 Lefkada (Ionian Islands), Greece earthquake // Quaternary International. 2007. Vol. 173/174. P. 4–14.

Papathanassiou G., Pavlides S., Christaras B., Pitilakis K. Liquefaction case histories and empirical relations of earthquake magnitude versus distance from the broader Aegean region // J.Geodyn. 2005. Vol. 40, N 2/3. P. 257–278.

Serva L. Ground effects in intensity scales // Terra Nova. 1994. Vol. 6, N 4. P. 414–416.

Serva L., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Vittori E., Comerci V. Environmental effects from five historical earthquakes in southern Apennines (Italy) and macroseismic intensity assessment: Contribution to INQUA EEE Scale Project // Quaternary International. 2007. Vol. 173/174. P. 30–44.

Tatevossian R.E. The Verny, 1887, earthquake in Central Asia: Application of the INQUA scale, based on coseismic environmental effects // Quaternary International. 2007. Vol. 173/174. P. 23–29.

Vogt J., Musson R.M.W., Stucchi M. Seismogeological and hydrological criteria for the New European Macroseismic Scale (MSK-92) // Natural Hazards. 1994. Vol. 10, N 1/2. P. 1–6.

Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1994. Vol. 84, N 4. P. 974–1002.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бержинский Юрий Анатольевич

кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт земной коры СО РАН. 664033, г. Иркутск-33, ул. Лермонтова, д. 128. Тел.: (395-2)42-59-97. E-mail: berj@crust.irk.ru

Ордынская Алиса Павловна

научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН. 664033, г. Иркутск-33, ул. Лермонтова, д. 128. E-mail: ordinska@crust.irk.ru

Гладков Андрей Станиславович

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН. 664033, г. Иркутск-33, ул. Лермонтова, д. 128. E-mail: gladkov@crust.irk.ru

Лунина Оксана Викторовна

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН. 664033, г. Иркутск-33, ул. Лермонтова, д. 128. E-mail: lounina@crust.irk.ru

Бержинская Лидия Петровна

кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН. 664033, г. Иркутск-33, ул. Лермонтова, д. 128. E-mail: berjnska@crust.irk.ru

Радзиминович Наталья Анатольевна

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН). 664033, Иркутск-33, ул. Лермонтова, д. 128. E-mail: nradzim@crust.irk.ru

Радзиминович Ян Борисович

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН. 664033, Иркутск-33, ул. Лермонтова, д. 128. E-mail: ian@crust.irk.ru

Имаев Валерий Судейманович

доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт земной коры СО РАН. 664033, Иркутск-33, ул. Лермонтова, д. 128. E-mail: imaev@crust.irk.ru

Чипизубов Анатолий Васильевич

доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН. 664033, Иркутск-33, ул. Лермонтова, д. 128. E-mail: chipizub@crust.irk.ru

Смекалин Олег Петрович

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН. 664033, Иркутск-33, ул. Лермонтова, д. 128. E-mail: smekalin@crust.irk.ru

APPLICATION OF ESI-2007 SCALE FOR ESTIMATING THE INTENSITY OF THE KULTUK EARTHQUAKE, AUGUST 27, 2008 (SOUTH BAIKAL)

YU.A. BERZHINSKY, A.P. ORDYNSKAYA, A.S. GLADKOV, O.V. LUNINA, L.P. BERZHINSKAYA, .A. RADZIMINOVICH, YA.B. RADZIMINOVICH, V.S. IMAYEV, A.V. CHIPIZUBOV, O.P. SMEKALIN

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

ABSTRACT: The paper deals with the ESI-2007 scale testing by the example of real seismic event occurred on August 27, 2008 in South Baikal. The main objective was to obtain a comparative assessment of the earthquake intensity based on traditional macroseismic and environmental seismic intensity (ESI-2007) scales. The results of macroseismic survey served as the initial data. Analysis has been made on the ESI-2007 scale in conformity with the requirements for seismic scales. Particular emphasis has been placed on the type (or rank) of the ESI-2007 scale. Such investigation is one of the first experiences in application of a new scale by the example of regional seismic event.

Keywords: earthquake environmental effects, primary and secondary effects, seismic scales.