

Главные особенности развития сейсмического процесса 2011–2012 гг. в Республике Тыва (прогностический аспект)

А. А. Никонов¹, Н. С. Медведева¹, С. В. Шварев¹ и Л. Д. Флейфель¹

Получено 18 мая 2012 г.; принято 20 мая 2012 г.; опубликовано 14 июня 2012 г.

На фоне особенностей сейсмичности в Юго-Восточной Тыве за XX столетие рассмотрены особенности развития бурной активизации сейсмического процесса с конца 2011 г. в течение 4-х месяцев. Парные события с интервалом в 2 месяца имели необычные для региона магнитуды 6,7 и 6,8 со шлейфами афтершоков каждый. Особенности процесса заключались в линейном сосредоточении афтершоков вдоль разлома северо-запад–юго-восточного простирания и в возникновении периодов сейсмического затишья перед более сильными толчками. Дается хронология процесса и прогностические ожидания после второго главного толчка 26 февраля 2012, а также высказаны представления о возможном будущем сценарии сейсмических событий. Намечаются некоторые выводы сейсмологического характера. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Развитие сейсмического процесса; сильные землетрясения; афтершоки; сейсмогенерирующая структура; парные события; линейная миграция.

Ссылка: Никонов, А. А., Н. С. Медведева, С. В. Шварев и Л. Д. Флейфель (2012), Главные особенности развития сейсмического процесса 2011–2012 гг. в Республике Тыва (прогностический аспект), *Вестник ОНЗ РАН*, 4, NZ5001, doi:10.2205/2012NZ000113.

Введение

Два мощных всплеска сейсмической активности в Республике Тыва с главными событиями 27 декабря 2011 г., $M = 6,7$, и 26 февраля 2012 г., $M = 6,8$, представляют очередной пример особенного и непредвиденного развития событий. Ввиду относительно слабой до сих пор сейсмической активности региона, малого внимания к нему сейсмологов и специфического развития событий как в течение предшествующего столетия, так и в течение трех месяцев сейсмической активности, начиная с конца декабря 2011 г., анализ процесса представляет специальный интерес. В пределах будущих эпицентральных зон 2011–2012 гг. ближе десятков км к ним ни одного сейсмического события с $M \geq 3,3$ с начала 2008 г. не возникало. Авторы начали исследование сейсмичности региона и непрерывное слежение за процессом активизации сразу после второго сильного землетрясения 26 февраля 2012 г. Результаты в текущем режиме доводились до сведения специалистов устно. Теперь, когда активность событий с $M \geq 3,5$ почти закончилась, целесообразно

подвести предварительные итоги, чему и посвящена настоящая статья. До сих пор в печати появились лишь первые данные регистрации декабрьского толчка с $M = 6,7$ [Еманов и др., 2012].

Главные особенности Тывинских землетрясений 2011–2012 гг. заключаются в следующем:

1. Они произошли в местности, столетиями не выделявшейся сейсмической активностью, с событиями на уровне $M \geq 5,7$ [Кондорская, Шебалин, 1977].
2. Всплеск сейсмической активности представлен двумя близкими по магнитуде и времени толчками (каждый со шлейфом афтершоков).
3. Сейсмический процесс в виде главных толчков и их афтершоков (в том числе с $M = 5,0 - 5,3$) имел линейный, в пределах одной полосы (активной структуры) и явно направленный характер.
4. Эта пространственная линейность соотносится с разрывной сейсмогенерирующей структурой (Каахемский разлом), в которой в XX веке и ранее в определенной последовательности возникали землетрясения силой до $M = 5,3 - 5,7$ (Рис. 1).

Специфика сейсмического процесса имеет прямое отношение к двум общим вопросам сейсмологии, а именно, к вопросу о парных событиях (1) и о линейной миграции

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

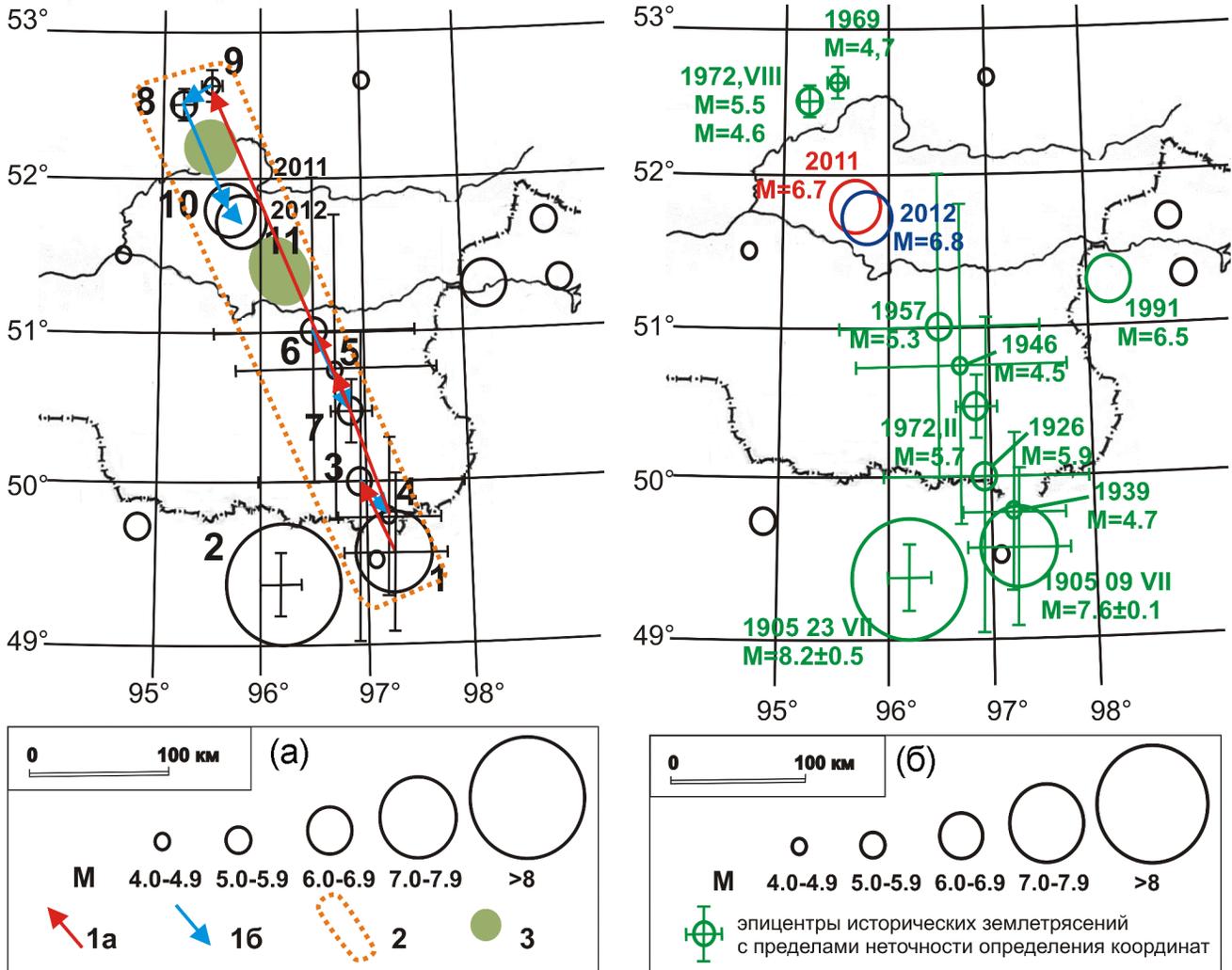


Рис. 1. Пространственное распределение сильных и умеренных землетрясений в Юго-Восточной Тыве. А – с указанием магнитуд и неточности локализации эпицентров; Б – последовательность возникновения землетрясений в полосе СЗ–ЮВ простирания. 1а – миграция очагов к СЗ, 1б – обратная миграция очагов к ЮВ, 2 – рассматриваемая полоса возникновения сильных и умеренных землетрясений в XX–XXI вв., 3 – оставшиеся зоны “сейсмического молчания”.

очагов вдоль разлома (2). Оба вопроса, в свою очередь, содержат важный прогностический аспект, на что обращено особое внимание.

Структурная приуроченность и история событий за столетие

Очаги сильных землетрясений 2011–2012 гг. возникли в зоне Каахемского разлома северо-запад–юго-восточного простирания, на его протяженном северо-западном отрезке, оставшемся “непроработанным” после землетрясения 1957 г. с $M = 5,3 \pm 0,3$ на юго-восточном и землетрясения 1972 г. с $M = 5,5$ (и его афтершока с $M = 4,6$)

на северо-западном концах (Рис. 2). Это означает, что события конца 2011–начала 2012 гг. продолжили вековой тренд перемещения очагов вдоль зоны с юго-востока (от очага сильнейшего землетрясения 9 июля 1905 г. с $M = 7,6$), и частично заполнили крупную сейсмическую брешь на севере зоны примерно в ее середине. Зона ВОЗ вдоль Каахемского разлома выделялась ранее на официальных документах [Комплект..., 1999], но ни указанный тренд, ни сам сейсмолинеament ранее не распознавались.

Анализ сейсмического процесса за 2008–2012 гг. проводился авторами в текущем режиме с 27 февраля 2012 г. по конец апреля 2012 г. включительно на основе бюллетеней ССД ГС РАН (Обнинск). Помимо анализа собственно сейсмических данных за 2011–2012 гг., по мере их поступления, авторы включили в рассмотрение структурно-геологические материалы, сведения об исторических зем-

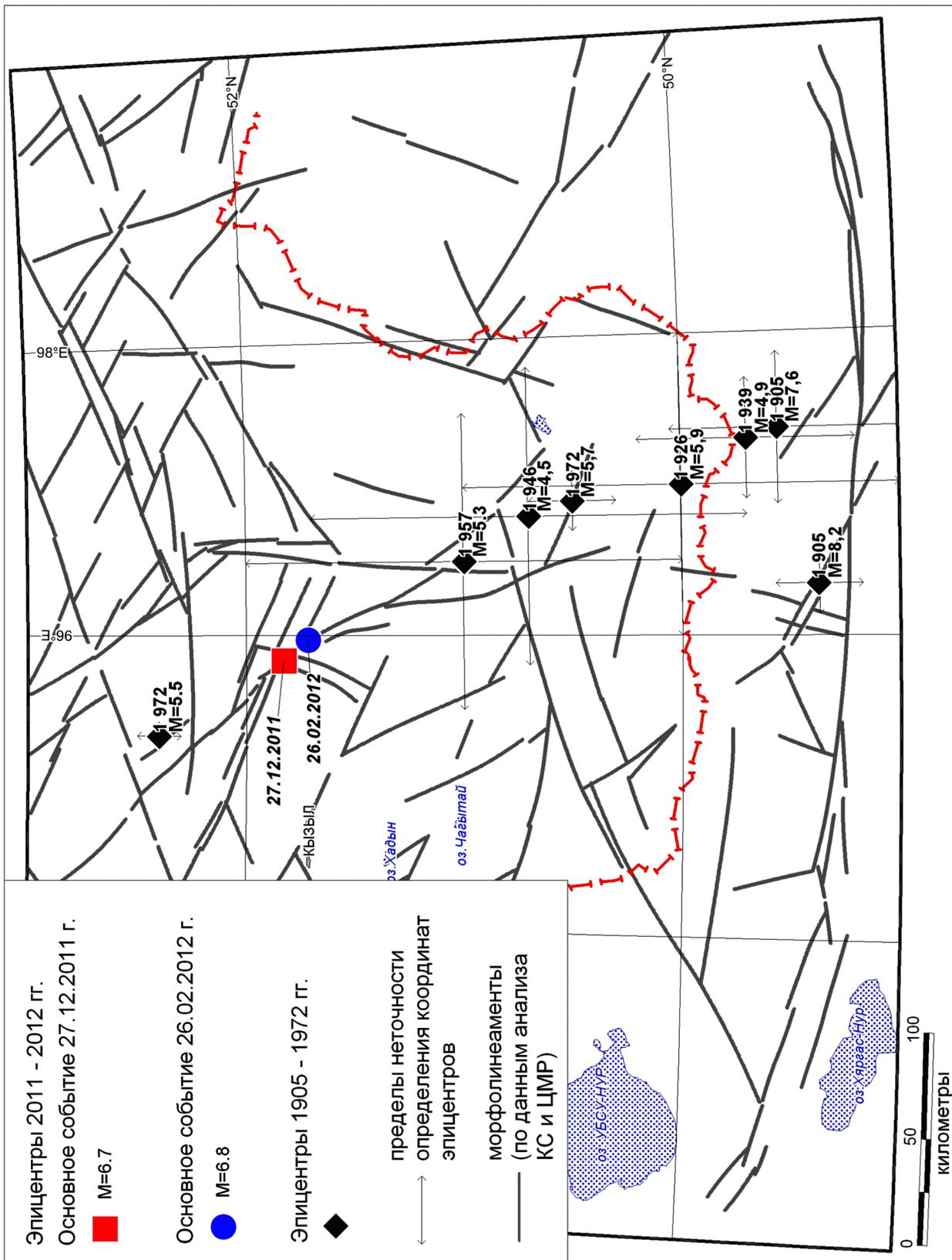


Рис. 2. Расположение эпицентров землетрясений в Юго-Восточной Тыве в сопоставлении с морфолинеаментами.

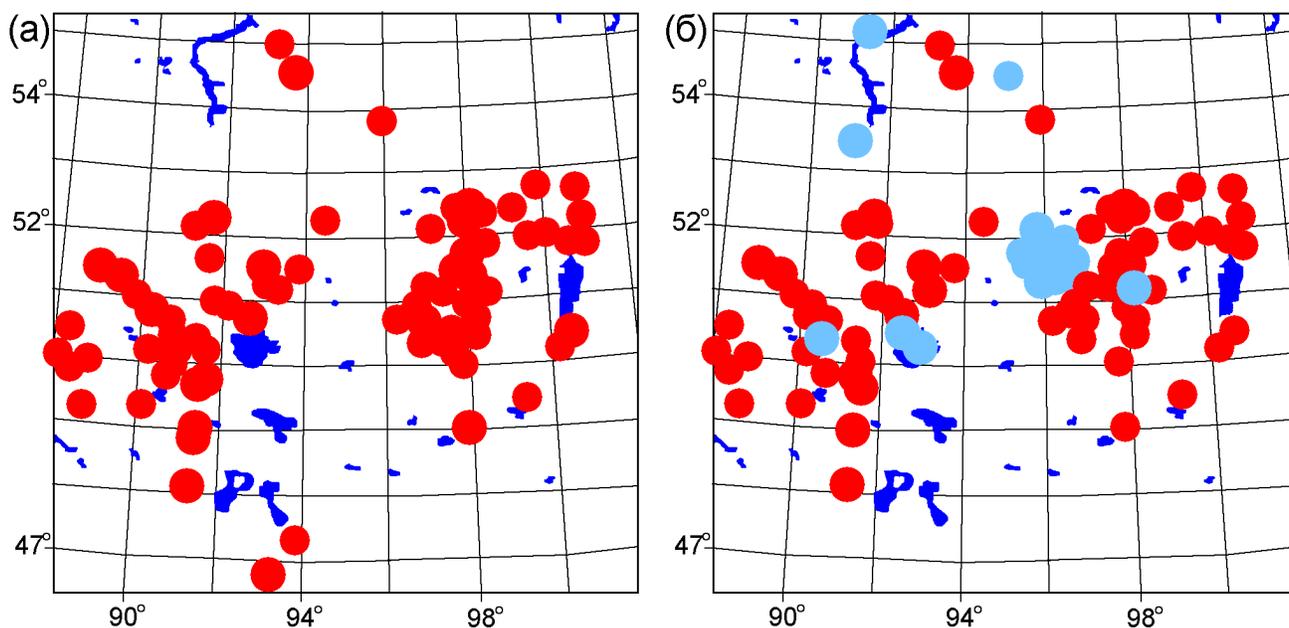


Рис. 3. Сейсмичность территории Юго-Восточной Тывы: (а) – за период 2006–26.12.2011 гг.; (б) – за период 27.12.2011–01.05.2012 гг.

летрясениях, а также частично о палеоземлетрясениях и напряженно-деформированном состоянии в регионе, что позволило рассматривать причины и ход процесса активизации в широком структурно-геодинамическом и пространственно-временном аспектах.

Землетрясение 27 декабря 2011 г. с $M = 6,7$ произошло после явно выраженного сейсмического молчания в этом секторе зоны в течение свыше сотни лет (см. Рис. 3). В течение 2008–2010 гг. и большей части 2011 г. события с $M = 3,3$ – $4,3$ возникали вокруг области будущей активизации, постепенно к ней приближаясь. “Свободным” оставался только южный–юго-западный фронт. Задним числом, с учетом уверенных сведений о господстве в регионе горизонтального, ориентированного с юг–юго-запада на север–северо-восток сжатия, этот последний факт можно расценить как показатель накапливавшихся именно в будущей очаговой области, и к юг–юго-западу от нее, напряжений. Такое суждение вполне согласуется с тем выразительным фактом, что именно на юго-западном крыле вспоровшегося разлома в дальнейшем, за трехмесячный период активизации, сосредоточилось наибольшее число афтершоков с $M \geq 3,3$, а именно 60 против 35, т.е. выделился максимум энергии (помимо высвобожденной при двух главных толчках).

Весь последующий период сейсмической активизации (в течение 3-х месяцев) отчетливо демонстрирует направленное распространение процесса в юго-восточном направлении вдоль вскрывшейся зоны разлома. Линейная миграция в этот период определяется по трем группам данных: 1. Преимущественное распространение афтершоков первого события (27 декабря 2011 г.) к юго-востоку. 2. Смещение эпицентра второго события (26 февраля 2012 г.) к юго-востоку на 17 км. 3. Дальнейшее продви-

жение облака афтершоков второго события (26 февраля) к юго-востоку. Таким образом, проработался участок разлома суммарной длиной около 80 км (Рис. 4). Процесс обратной (относительно трендовой) миграции при всплеске сейсмической активности 2011–2012 гг. не удивителен, т.к., в сущности, повторяет случаи XX-го века в 1939 и 1972 гг.

В феврале, за 25 дней до второго главного толчка, процесс развивался следующим образом (по фазам): 1–5 февраля возникло 4 толчка с $M = 3,8$ – $4,2$ вблизи будущей очаговой области. Затем, после 5–6-суточного молчания, 11 февраля возник одиночный толчок с $M = 3,9$ к северо-западу от будущей эпицентральной области. Дальнейшее молчание длилось 2 недели, и только накануне главного толчка, за 17 часов до него, к юго-западу от будущей очаговой зоны за ее пределами произошел форшок с $M = 4,1$. Отчетливо выраженное сейсмическое затишье перед 2-м событием длилось три недели, и два несильных форшока приблизились к будущей эпицентральной области (Рис. 5).

Сообщение на Прогнозной комиссии 29 февраля 2012 г.

На заседании Прогнозной комиссии под председательством чл.-корр. РАН А. В. Николаева, 29 февраля 2012 г., спустя двое суток после 2-го события, авторы фиксировали следующие позиции:

1. Выделен не привлекавший ранее внимания сейсмолинеament северо-запад–юго-восточного простирания, полоса, в которой в XX столетии возникли

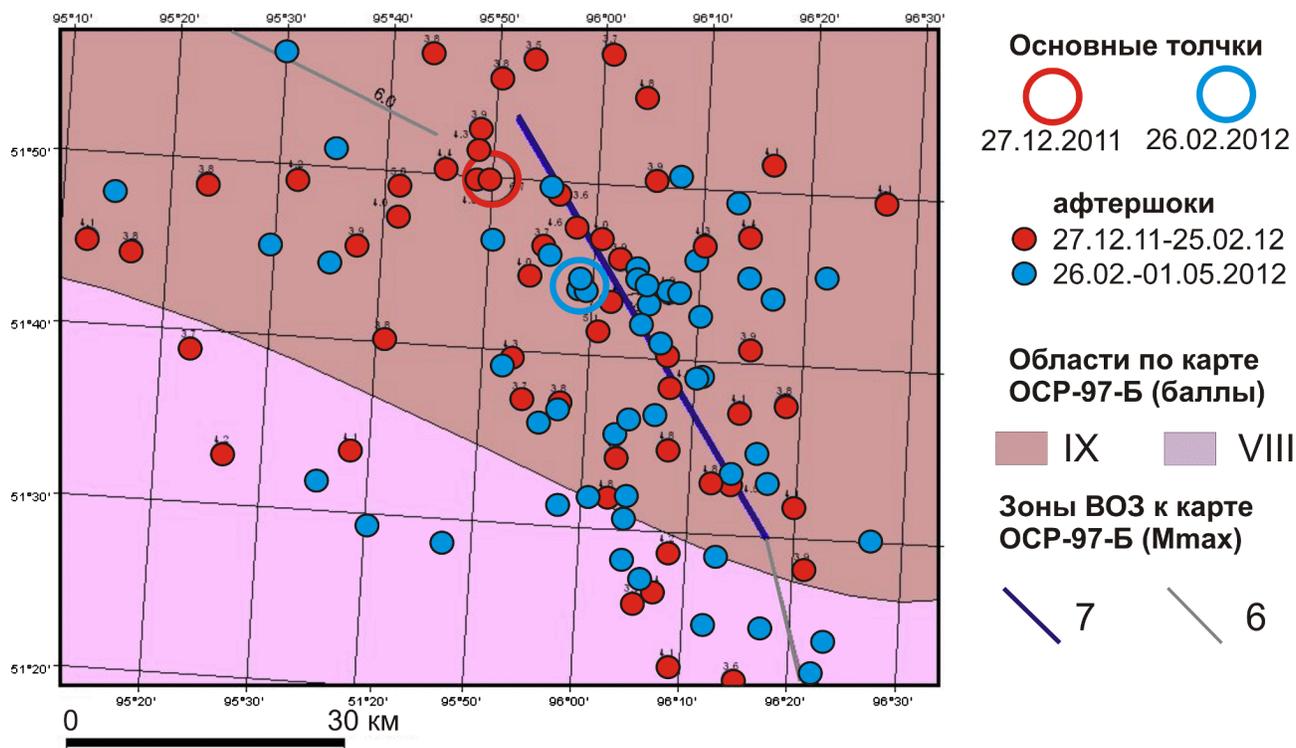


Рис. 4. Пространственное распределение главных толчков 27.12.2011 г. и 26.02.2012 г. и их афтершоков ($M \geq 3,3$) в период до 01.05.2012 г.

среднемагнитудные сейсмические события определенной направленности.

- Второе событие возникло в той же сейсмической зоне северо-запад-юго-восточного простираения, где была выявлена миграция за столетие, и во время афтершокового процесса 1-го события.
- Обращено внимание на отчетливо проявленное сейсмическое молчание за предшествующие 1-му землетрясению (27 декабря 2911 г.) десятилетия и за месяц до 2-го, а также на сужение и в плане, и по глубине области сейсмического молчания перед 2-м главным толчком 26 февраля 2012 г.
- Определенно указано общее смещение эпицентров большинства событий в юго-восточном направлении, т.е. выявлена линейная миграция вдоль зоны.
- Сделано заключение о большой вероятности дальнейшего развития сейсмического процесса именно в юго-восточном направлении на расстояние до 50–60 км от эпицентра толчка 27 февраля 2012 г. и возможности на этом отрезке событий с $M = 5 - 5,5$. В марте 2012 г. процесс развивался именно так.

Развитие процесса в марте 2012 г.

В распределении афтершоков главного толчка 26 февраля 2012 г. выявляется несколько характерных черт. В первые сутки после него возникло 4 события с $5 \leq M \leq 5,4$ и столько же с $M \geq 4$. Общая длина вытянувшегося с северо-запада на юго-восток сгущения облака афтершоков в этот день составила $L = 30$ км. При этом, однако, только один из афтершоков ($M > 5,0$) располагался к северо-западу от главного толчка, а все остальные – в непосредственной близости к нему и к юго-востоку. Единичный, максимально удаленный, возник на юго-востоке на расстоянии 45 км от главного. В последующую неделю сила событий уменьшалась так, что ни одно из них не превысило $M = 4,8$, а вся область афтершоков разрослась в длину до 70 км, причем на 50 км распространилась к юго-востоку. Таким образом, в общем повторилась тенденция проработки линеамента северо-запад-юго-восточного направления к юго-востоку, намечившаяся после главного толчка первой серии (Рис. 6).

Доклад на Научном проблемном совете ИФЗ РАН 29 марта 2012 г.

Спустя месяц после второго сильнейшего толчка и сообщения А. А. Никонова на заседании Прогнозной комис-

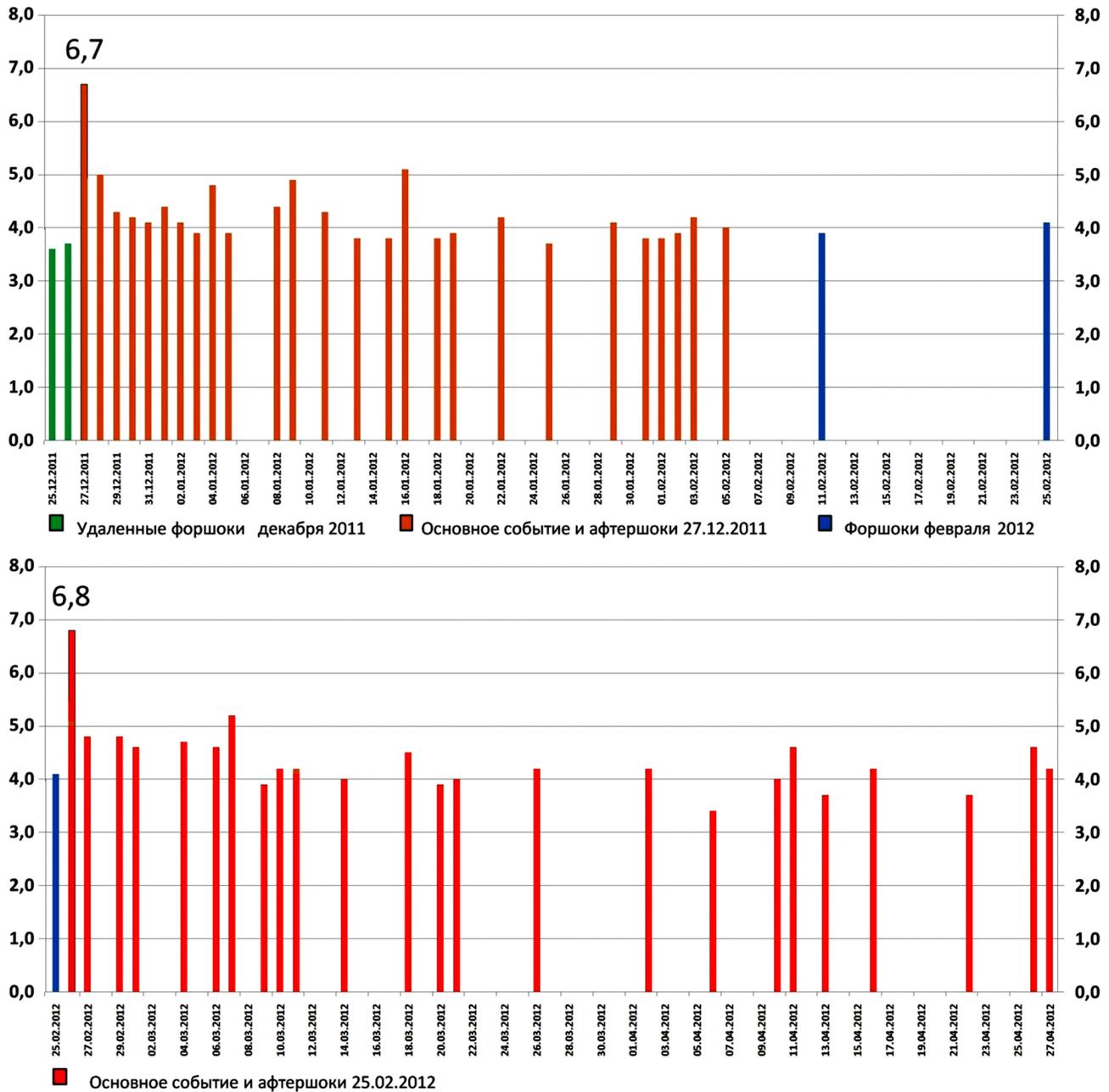


Рис. 5. Временное распределение основных событий 27.12.2011 г. и 26.02.2012 г. и их афтершоков за период до 01.05.2012 г. (шаг отображаемых событий – 1 сутки).

сии, на этот раз на заседании ученого совета ИФЗ РАН, состоялся доклад четырех авторов (Никонов А. А., Медведева Н. С., Шварев С. В., Флейфель Л. Д., “Сильные землетрясения в Республике Тыва: столетний процесс и события 2011–2012 гг. – анализ и мониторинг”). Было сообщено следующее:

1. Зона секущего, северо-запад–юго-восточного простирания молодого Каахемского разлома в юго-восточной Тыве, подтверждена путем обработки модели цифрового рельефа с высокой разрешаю-

щей способностью и все, как исторические, относительно сильные, так и главные толчки 2011 и 2012 гг. с афтершоками, попадают в ее пределы.

2. После первых, следовавших за главным толчком 26 февраля 2012 г., дней в течение месяца афтершоковый процесс (судя по землетрясениям с $M \geq 3,3$) по-прежнему развивался в основном к юго-востоку от основного толчка и распространялся только в этом направлении, захватив полосу протяжением 18 км (с наибольшей плотностью эпицентров) и до

50 км (максимально удаленный в том же направлении афтершок) от эпицентра главного толчка 26 февраля 2012 г).

3. В конце марта, после 21-го числа, зарегистрирован резкий спад афтершоковой активности – за 2 недели возникло лишь 4 афтершока против 13 толчков за аналогичный предшествующий период. Общий спад афтершоковой активности скорее можно рассматривать как затухание процесса, чем принимать за временное затишье перед последующим сильным всплеском.
4. К концу марта 2012 г. отчетливо проявились две бреши (два участка сейсмического молчания) на том же Каахемском разломе – к юго-востоку и к северо-западу от совокупной (двойной) очаговой области событий 2011 и 2012 гг. (определенной по областям плотных афтершоков).

Определение вероятного хода дальнейших событий

В аналитической записке, поданной председателю Прогнозной комиссии чл.-корр. РАН А. В. Николаеву по его просьбе, был описан вероятный ход дальнейших событий (по состоянию на 8 апреля 2012 г.). Сейсмическое затишье (молчание на уровне событий с $M \geq 3,3$) с 26 марта 2012 г. может означать или практически полное затухание сейсмического процесса, или, как это было в декабре 2011 г. и в феврале 2012 г., оказаться затишьем перед очередным всплеском активности, вплоть до сильных событий. Исходя из известных соотношений между размерами очага (проекция его длинной оси на земную поверхность) и значением магнитуды, можно было бы допускать для бреши на юго-востоке длиной 60–70 км возможность события с $M = 7,0 - 7,2$, а для северо-западной бреши – события с $M = 6,7 - 6,8$. Однако за предыдущее столетие ни одно из землетрясений в рассматриваемой полосе не закрывало очередную брешь целиком, и M возникавших в зоне событий не превышала значений $M = 5,3 - 5,7$. Поэтому в оставшихся брешах скорее можно допускать события с M не выше 6,0 – 6,5, если и когда активизация зоны продолжится.

В свете обнаруженных закономерностей, с учетом вековой истории возникновения умеренных и относительно сильных событий в выделенной зоне, можно наметить ожидание возможных дальнейших землетрясений в ней. Длина непроработанного отрезка к юго-востоку (от юго-восточного края главного облака афтершоков события 26 февраля 2012 г. до эпицентра ближайшего исторического землетрясения 1957 г. с $M = 5,3 \pm 0,3$) составляет теперь примерно 40 км. Эта величина соизмерима с расстояниями между эпицентрами землетрясений, возникавших в юго-восточной части того же линеамента в течение XX века. На указанном отрезке, согласно известным соотношениям $L \sim M$ [Уламов и др., 2007], может

возникнуть событие с $M = 5,5 - 6,5$. Такое сильное событие в качестве третьего в данный период активизации представляется здесь маловероятным в течение ближайших 40 лет. Более слабые землетрясения возможны даже в течение месяцев (с конца февраля 2012 г.). После 8 апреля 2012 г., как и было предположено, сейсмическая активность заметно пошла на спад, так что до конца апреля 2012 г. афтершоки возникали редко и стали распространяться за пределы прежнего плотного облака. Поэтому вряд ли можно ожидать неожиданностей в ближайшие недели и месяцы.

Однако в долговременном аспекте нельзя оставить без внимания и северо-западный отрезок линеамента от очаговой зоны события 27 декабря 2011 г. до эпицентрального участка землетрясения 31 августа 1972 г. с $M = 5,5 \pm 0,2$. Это событие, с сильным афтершоком ($M = 4,6 \pm 0,5$) через месяц, произошло на продолжении линеамента к северо-западу, севернее долины р. Енисей. Землетрясение 27 декабря 2011 г. возникло на том же линементе примерно в 20 км к юго-востоку от августовского 1972 г., закрыв середину “пустого” отрезка линеамента (см. Рис. 16). Теперь и здесь можно ожидать закрытия бреши. При этом вряд ли стоит допускать здесь события с $M > 5,0 - 5,5$. Продолжительность молчания на этом отрезке может исчисляться как месяцами, так и десятилетиями.

Выводы

Могут быть предложены следующие выводы общего характера:

1. В сейсмических районах оценивать сейсмический потенциал разломов (зон ВОЗ) по максимальным, известным за 1–2 столетия, данным о землетрясениях – это сильный риск занижить оценки в долговременном аспекте. В распознаваемых как опасные зонах необходимо проведение комплекса целенаправленных палеосейсмологических исследований.
2. В областях со сложным структурным планом (как это имеет место в Тыве) выделение по геологическим данным одной, господствующей, системы сейсмогенерирующих разломов (во многих публикациях и на изданных картах Юго-Восточной Тывы это была субширотная система), без попыток выявления собственно сейсмолинеаментов, может вести к пропуску других, малозаметных (за ограниченное время) систем, опасных в сейсмическом отношении.
3. Выделение сейсмолинеаментов по комплексу сейсмических данных – эпицентрия, макросейсмические поля, слабая и микросейсмичность, механизмы очагов, и с учетом действующего поля напряжений – целесообразно при распознавании и параметризации сейсмогенерирующих зон.
4. Выявление сейсмолинеамента, тем более с признаками линейной миграции очагов, должно рассмат-

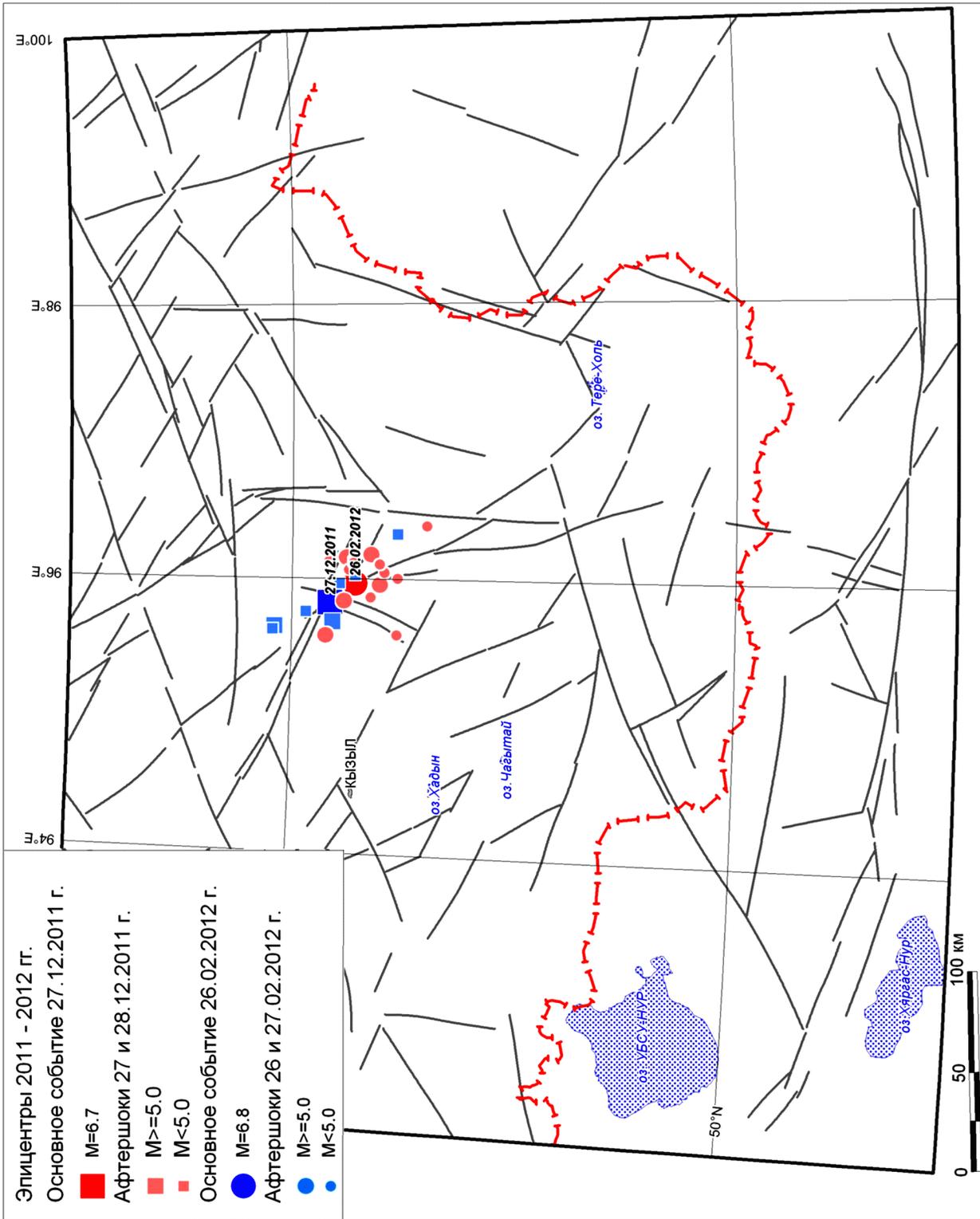


Рис. 6. Распределение главных толчков 27.12.2011 г. и 26.02.2012 г. и их афтершоков в структурном поле (морфо-линеаменты) региона.

риваться и с прогнозной точки зрения, как в долговременном аспекте, так и в афтершоковых сериях сильных землетрясений.

В свете обнаруженных пост-фактум особенностей и закономерностей разного пространственно-временного масштаба видно, что до событий 27 декабря 2011 и 26 февраля 2012 гг. проявлялись следующие главные (притом дистанционно диагностируемые!), прогнозные признаки: а) крупная брешь на направленно прорабатывавшемся умеренными землетрясениями разломе (сейсмолинеamente); б) разрастание облака умеренных по силе землетрясений вокруг и в отдалении от будущих эпицентральных зон в период с 2008 г. по конец 2011 г. при одновременном молчании всей области внутри периферийного облака; в) отсутствие событий с юго-западной и южной сторон от долговременной брехи на разломе (сейсмолинеamente), т.е. со стороны господствующего в регионе сжатия. По ряду количественных показателей этих признаков возможно было ориентировочно оценить и параметры будущего взрыва активности. Но район своевременно не был диагностирован в качестве потенциально опасного в долго- и среднесрочной перспективе и, соответственно, не велся его сейсмический мониторинг. В определенной мере можно было предвидеть и особенности афтершокового процесса, что было выполнено нами частично, во время второй фазы активизации с конца февраля 2012 г.

Послесловие от 8 июня 2012 г.

Как авторы и ожидали и это отмечено в статье, сегодня стало известно, что 06.06.2012 г. после длительного почти полного молчания в очаговой области 2-го главного толчка произошли несколько сильных афтершоков с магнитудой последовательно 5,5, 4,8 и 4,4. На этот раз, как и в конце мая, проработалась полоса северо-восточного простирания длиной 25–35 км. Следовательно, очаговый процесс продолжает развиваться.

Литература

- Еманов, А. Ф., А. А. Еманова, Е. В. Лескова, В. С. Селезнев, А. Г. Филина (2012), Тувинское землетрясение 27.12.2011 г., $M_L = 6,7$ и его афтершоки, *Вестник ОНЗ РАН*, 4, NZ2002, doi:10.2205/2012NZ000112.
- Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. М-6 1:8 000 000 (1999), *Объяснительная записка*, 57 с.
- Кондорская, Н. В., Н. В. Шебалин (ред.) (1977), *Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР*, 536 с.
- Уломов, В. И., Т. И. Данилова, Н. С. Медведева (2007), К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе, *Физика Земли*, 7, 31–45.

Н. С. Медведева, А. А. Никонов, Л. Д. Флейфель, С. В. Шварев, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. (medv@ifz.ru; nikonov@ifz.ru; shvarev@ifz.ru)