

ВАРИАЦИИ ПЛОТНОСТИ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ И СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

С.И. Шерман, О.Г. Злогодухова, В.М. Демьянович

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Приуроченность сильных землетрясений к протяженным глубинным (генеральным) разломам – хорошо известная общая закономерность сейсмических зон континентальной литосферы. Чем сильнее землетрясения, тем ближе к осям областей динамического влияния разломов располагаются их очаги, всегда генерируемые сдвиговыми смещениями крыльев соответствующих разрывов. Названная структурная черта объясняется, скорее всего, тем, что на глубинах, превышающих 5–15 км, разрушение материала происходит исключительно благодаря концентрации касательных напряжений и их реализации сколовыми разрывами. «Можно с большой долей уверенности констатировать, что компонента сдвигового смещения (в физическом понимании) – неотъемлемая черта крупных разломов литосферы» [Шерман, 1977, с. 87]. Амплитуда и специфика проявления разрядки касательных напряжений зависят от накопленной энергии, стадии процесса и охваченной им глубины. Сильное землетрясение осложняет, интенсифицирует деструктивную структуру зоны динамического влияния крупного разлома за счет образования новых мелких разрывов и трещин. Результаты выяснения структурных факторов контроля слабых землетрясений, магнитуда которых менее 4–5, не всегда однозначны. Слабые землетрясения контролируются региональными разломами, смещения по которым незначительны, трудно фиксируются и редко, преимущественно в слаболитифицированных отложениях и грунтах, являются источником возникновения новых небольших разрывов и трещин. Вопросы причинно-следственной связи между событиями и структурами в этих случаях не однозначны. И лишь в эпицентральных зонах сильных землетрясений удается устанавливать и разграничивать вновь возникшие и реактивированные разрывы. Эти небольшие отличия в факторах контроля сильных и слабых сейсмических событий лишь подчеркивают характеристику их общей среды – ее разломно-блоковую структуру, одной из наиболее информативных обобщающих характеристик которой следует считать плотность разломов. Именно она позволяет снизить и/или вообще избежать структурной, дискретной характеристики среды литосферы, трансформировать ее в континуальную с численным параметром – интенсивностью нарушенности, или плотностью разноранговых разломов. Многие исследователи рассматривают этот параметр как величину, характеризующую квазивязкость коры или хрупкой литосферы. Рассмотрим возможности использования плотности разломов как относительного показателя квазивязкости и структурные связи сильных землетрясений с этим параметром.

Разноранговые разрывы литосферы существенно снижают ее квазивязкость. На это обращали внимание Е.В. Артюшков [1979], Д. Тёркот, Дж. Шуберт [1985] и многие другие исследователи [Шерман, 1977; Кучай, 1983; Тычков, 1978; и др.]. Общая связь между плотностью активных разломов и квазивязкостью земной коры была изучена К.Г. Леви [1991] на примерах различных континентов Земли, и им же детализирована в работе по «прикладному» геодинамическому анализу [Levi, Sherman, 1995]. Общая зависимость между плотностью разломов \bar{N} и вязкостью литосферы η аппроксимируется уравнением [Леви, 1991]:

$$\lg \bar{N} = (4.8 - 0.17 \lg \eta) \pm 0.2, \quad (1)$$

при коэффициенте корреляции $r=0.854 \pm 0.2$. Анализ проведенных исследований влияния на вязкость литосферы других различных параметров, их сопоставление с уравнением (1) дали основание К.Г. Леви [1991, с. 55] сделать заключение о том, «что вариации вязкости астеносферы могут быть одной из возможных причин различной раздробленности литосферы». Это подтверждают экспериментальные работы по физическому моделированию разломообразования в литосфере, выполненные С.А. Борняковым [Шерман и др., 1991]. Они показывают, что «уменьшение вязкости и увеличение скорости деформирования способствуют формированию более густой сети разрывов и наоборот» (с. 119).

Из цитируемых и других публикаций [Sherman et al., 2004] следует, что плотность разломов можно рассматривать как один из информативных физических параметров хрупкой литосферы, тесно взаимосвязанный с ее другими количественными характеристиками. Более того, по анализу результатов сейс-

мического мониторинга в областях динамического влияния разломов недавно было показано, что даже в короткие интервалы времени (первые годы) активность разломов может изменяться [Шерман и др., 2006; Шерман, Савитский, 2006]. Именно активные разломы определяют квазивязкость среды, а она в существенной степени определяет потенциальную величину накапливаемых напряжений и интенсивность их разрядки, то есть частоту и силу сейсмических событий. Становится ясным, что изучение вариаций плотности активных разломов в реальном времени может внести дополнительный вклад в наши знания о закономерностях организации эпицентральных полей землетрясений в реальном времени и, что наиболее важно, о локализации в них сильных землетрясений.

Опираясь на эту концепцию, авторы выполнили две серии работ. Первая заключалась в изучении связей между плотностью разломов и силой сейсмических событий. Тестирование было проведено на базе некоторых сильных землетрясений Байкальской рифтовой системы. «Карта разломов юга Восточной Сибири» [1988] была трансформирована в цифровую форму, на основе которой были построены несколько разновидностей карт плотностей, отличающихся друг от друга размерами площадок осреднения и алгоритмами оценок площадей (рис. 1). В рассматриваемой первой серии работ ячейки осреднения были выбраны размерами 10×10 км и 20×20 км. Они фактически перекрывают эпицентральные области землетрясений, характерные для Байкальской рифтовой системы. Расчет плотностей для каждой ячейки проводился четырьмя наиболее распространенными способами:

$$n/S, \quad (2)$$

$$\sum l_i/S, \quad (3)$$

$$\sum w_i/S, \quad (4)$$

$$\sum l_i w_i/S, \quad (5)$$

где n – количество разломов в границах элементарной ячейки; l_i – длина i -ого разлома в границах элементарной ячейки; w – численное значение ранга, устанавливаемое для каждого разлома w_i , в соответствии с его полной длиной и другими характеристиками; S – площадь элементарной ячейки. Расчеты по уравнениям (4) и (5) призваны подчеркнуть значимость в сейсмическом процессе протяженных разломов.

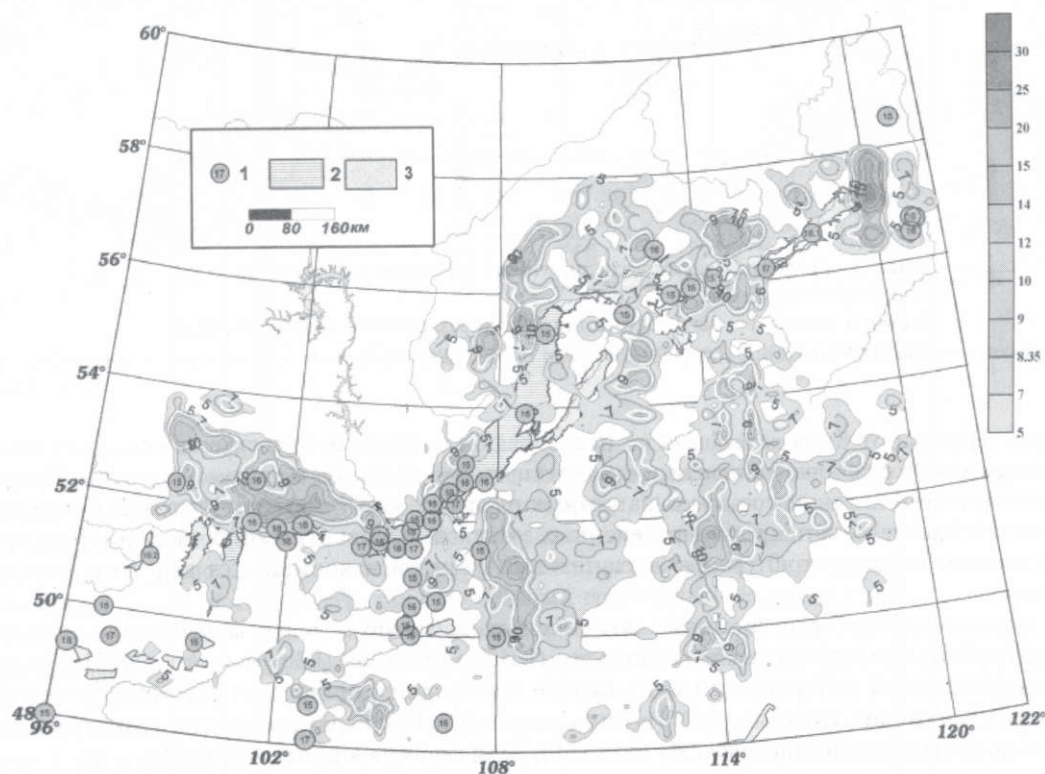


Рис. 1. Карта плотности разломов БРС с эпицентрами крупных землетрясений. 1 – землетрясения с $K \geq 15$; 2 – озера; 3 – впадины; справа шкала изолиний плотности разломов, рассчитанная по количеству разрывов в ячейке. Первая изолиния на карте – среднее значение плотности; белая линия – среднее значение плотности + σ .

Необходимые данные по сейсмичности взяты из каталогов землетрясений, составленных Байкальским филиалом Геофизической службы СО РАН. Результаты расчетов показаны на рис. 2. На графике (рис. 2, А) по двум идентично направленным кривым, построенным по алгоритмам (4) и (5), фиксируется известная закономерность о тенденции связи относительно сильных землетрясений с более крупными, протяженными разломами (по имеющейся выборке данных за последние 40 лет). Их геологическая значимость при расчетах плотностей по элементарным ячейкам подчеркивается ранговой классификацией разрывов по вводимым экспертным коэффициентам. На графике рис. 2, Б показана тенденция связи относительно сильных землетрясений с общей раздробленностью коры, рассчитанной по уравнениям (2) и (3). Отчетливо регистрируется тенденция повышения классов сейсмических событий с уменьшением плотности разрывов, то есть с увеличением квазивязкости среды. Чем выше раздробленность коры, тем меньше она способна накапливать высокие напряжения, следствием чего является значительное количество энергетически слабых событий.

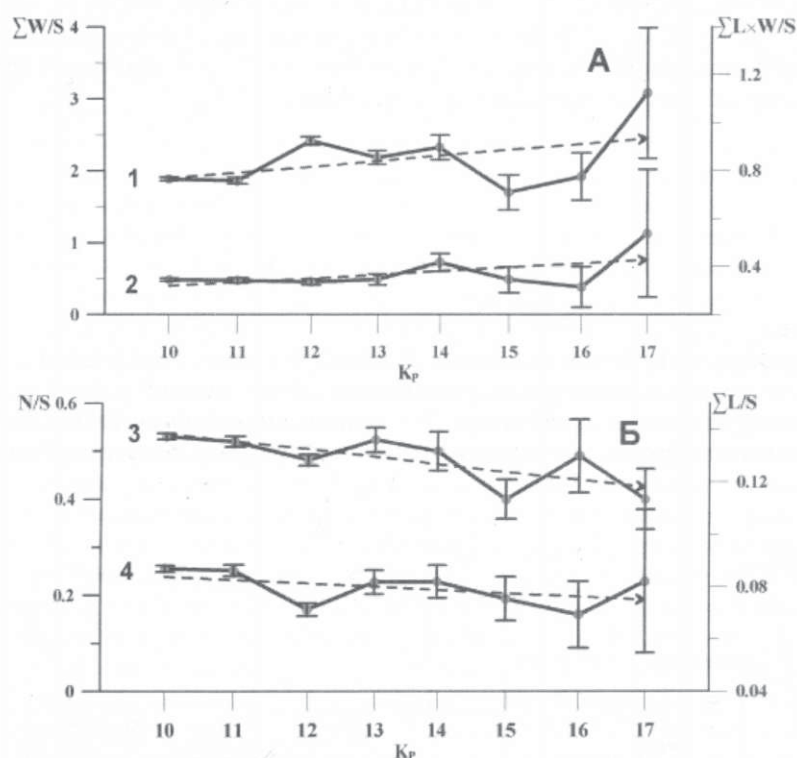


Рис. 2. Графики зависимости плотности разломов от энергетического класса землетрясений.
Номера линий: 1 – вычисление плотности разломов по формуле (4); 2 – по формуле (5); 3 – по формуле (2); 4 – по формуле (3).

Вторая серия работ была направлена на исследование положения относительно сильных землетрясений на площадях с различной интенсивностью активизаций разломов в реальном времени. Временные вариации плотностей активных разломов на разных площадях могут свидетельствовать об относительном изменении квазивязкости среды определенных участков сейсмоактивной области и в большей или меньшей степени служить триггерными механизмами разрядки накопившихся или накапливающихся напряжений.

Для оценки вариаций относительной активности разломов по отдельным площадкам использован количественный индекс сейсмической активности (КИСА) разломов [Шерман и др., 2005]. По предложенному в упомянутой работе алгоритму на основе трансформированного в цифровой вариант «Карты разломов юга Восточной Сибири» [1988] по площадкам $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ были рассчитаны вариации активизаций разломов по пятилетним интервалам. Они охватывали период времени 1961–2000 гг.

Общее количество данных по разломной тектонике составляло 801 разлом, а по сейсмическим событиям – более 122000 наблюдений. На территории региона разместилось более 730 площадок. В первую очередь по площадкам была построена карта плотности всех известных разломов. По значениям плотности активных разломов, отнесенных к центру площадки, для соответствующих пятилетних интервалов (1961–1965; 1966–1970 и т.д. включительно до 1996–2000 гг.) были построены карты плотности актив-

ных разломов (рис. 3). На базе этих карт по площадкам исследованы вариации соотношений плотности активных разломов и общей плотности разломов и некоторых других параметров.

Изучены процентные отношения количества активизированных разломов к их общему числу. Выбраны площадки, в границах которых зафиксированы землетрясения с $K \geq 14$. Установлена тенденция обратной зависимости между плотностями разломов и классами землетрясений, зафиксированных на площадках за последние 40 лет. Определены связи между максимальными классами землетрясений и плотностью разломов, рассчитанной для всех разломов, плотностью только активных разломов, а также между процентным отношением количества активных разломов к их общему числу. Классы землетрясений как функции плотностей характеризуются обратной зависимостью с коэффициентами корреляции соответственно -0.37 ; -0.34 и -0.50 и -0.37 .

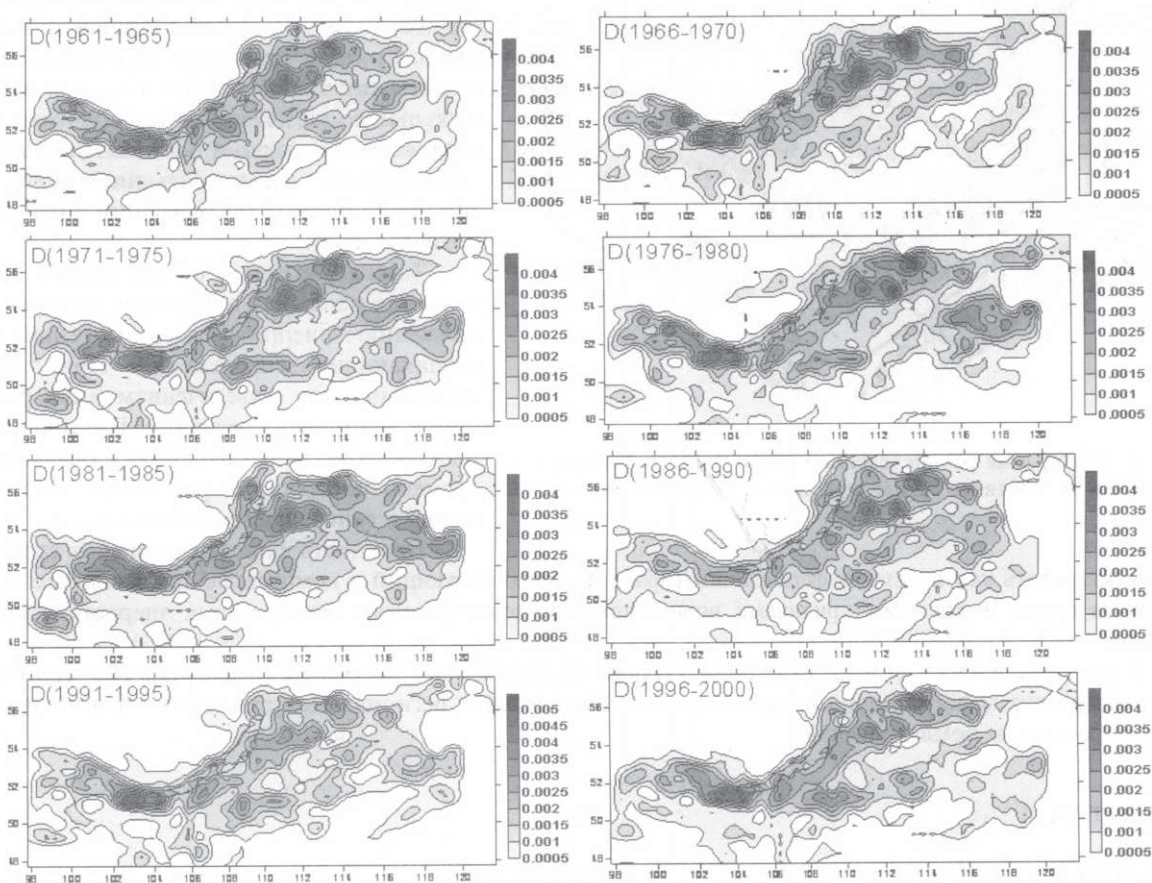


Рис. 3. Вариации плотности активных разломов БРС по пятилетним периодам времени. Справа – шкала плотностей D , км^2 .

Для более точного определения весомости активизаций разломов в контроле зарегистрированных наиболее сильных событий построена гистограмма, показывающая, что 50 % землетрясений с $K \geq 14$ приходятся на площадки со 100-процентной активизацией разломов, остальные 50 % землетрясений с $K \geq 14$ распределяются неравномерно в других интервалах (рис. 4). Относительное снижение квазивязкости среды можно рассматривать как своеобразный триггерный механизм, способствующий возникновению подвижек по разломам с соответствующей сейсмической разрядкой напряжений.

С изложенными фактами хорошо согласуются результаты работ, проведенных в эпицентральных зонах землетрясений последних двадцати лет. Локализация сильных сейсмических событий в полях тектонической раздробленности хрупкой литосферы различных сейсмических зон в последние годы рассмотрена в ряде публикаций [Рогожин и др., 1998; Рогожин, Платонова, 2001; Нечаев, Рогожин, 1991; 2004; Нечаев и др., 1993]. Установлено, что поля тектонической раздробленности коры тяготеют к пограничным тектоническим зонам, разделяющим крупные геологические блоки. Положение очага катастрофического землетрясения в Горном Алтае (27 сентября 2004 г., $M = 7.3$) и двух других сильнейших афтершоков, по результатам исследований Ю.В. Нечаева и Е.А. Рогожина [2004], приурочены к пограничной области Чаган-Узунского блока, то есть к разломной зоне. Такие зоны всегда характеризуются

высоким значением коэффициента w и повышенной плотностью небольших разрывов, которые существенно снижают квазивязкость среды и ускоряют разрядку напряжений.

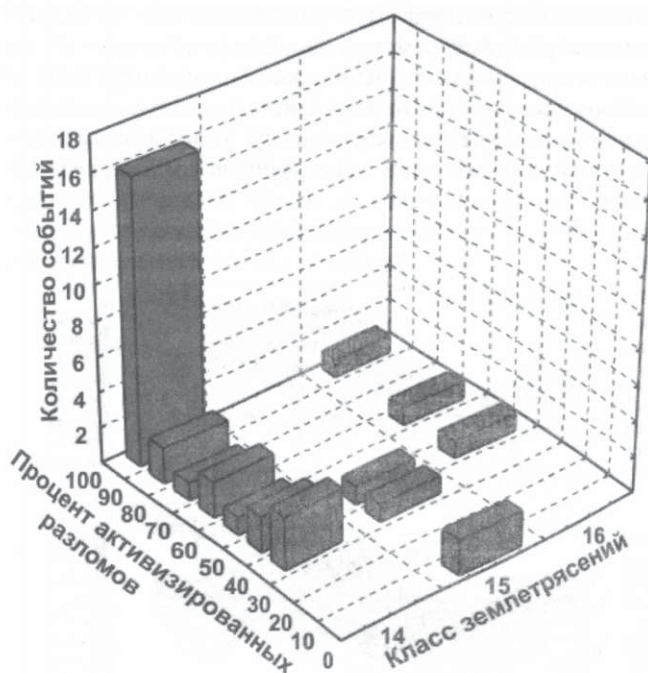


Рис. 4. Гистограмма распределения классов землетрясений в зависимости от процентов активизированных разломов в ячейках.

ет рассматривать как весьма информативный фактор, способствующий в комплексе с напряженным состоянием среды и другими причинами возникновению землетрясений определенных энергетических классов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 07-05-00251) и Программы 16 проекта 3 Президиума РАН «Динамика деформационных процессов в сейсмоактивных регионах Центральной Азии и в очаговых зонах сильных землетрясений».

ЛИТЕРАТУРА

- Артюшков Е.В. Геодинамика. – М.: Наука, 1979. – 212 с.
- Карта разломов юга Восточной Сибири. М-б 1:1500000 / Отв. ред. П.М. Хренов. – М.: Изд-во Мингео СССР, 1988.
- Кучай В.К. Современная динамика Земли и орогенез Памиро-Тянь-Шаня. – М.: Наука, 1983. – 124 с.
- Леви К.Г. Неотектонические движения в сейсмоактивных зонах литосферы. Тектонофизический анализ. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1991. – 166 с.
- Нечаев Ю.В., Рогожин Е.А. Анализ тектонической раздробленности очаговой области Спитакского землетрясения 1988 г. // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 320, № 6. – С. 1441–1445.
- Нечаев Ю.В., Рогожин Е.А. Выделение сейсмоактивных геологических структур по космическим снимкам (на примере Горного Алтая) // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г. – М.: Институт физики Земли РАН, 2004. – С. 68–82.
- Нечаев Ю.В., Рогожин Е.А., Богачкин Б.М. Особенности проявления Рачинского землетрясения (1991) в поле тектонической раздробленности (по космическим данным) // Физика Земли. – 1993. – № 3. – С. 64–69.
- Рогожин Е.А., Богачкин Б.М., Нечаев Ю.В. и др. Новые данные о древних сильных землетрясениях Горного Алтая // Физика Земли. – 1998. – № 3. – С. 1–7.
- Рогожин Е.А., Платонова С.Г. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. – М.: ОИФЗ РАН, 2001. – 120 с.
- Ружич В.В., Шерман С.И. Оценка связи между длиной и амплитудой разрывных нарушений // Динамика земной коры Восточной Сибири. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение,

Снижение квазивязкости (при прочих равных условиях) способствует реализации подвижек по разломам, амплитуда смещений по которым пропорциональна их длине [Ружич, Шерман, 1978], и, тем самым, увеличивается возможность возникновения более сильных сейсмических событий. Отсюда, протяженные разломы являются потенциальными структурными факторами контроля сильных сейсмических событий. С другой стороны, повышенная раздробленность пород, связанная с интенсивностью развития разноранговых разломов, способствует снижению квазивязкости коры и убавляет ее возможности накапливать большие напряжения, необходимые для генерации сильных землетрясений.

Таким образом, в общем случае повышение плотности всех разломов ведет к снижению энергетического потенциала возникающих землетрясений. При этом он повышается с увеличением длин разломов и амплитуд подвижек. Повышение плотности активных разломов в реальном времени способствует реализации напряжений и генерации землетрясений.

Плотность активных разрывов следу-

1978. – С. 52–57.
- Теркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред. – М.: Мир, 1985. – Т. 1. – 376 с. Т. 2. – 360 с.
- Тычков С.А.* Влияние различия вязкости литосферы и астеносферы на процессы изостатического регулирования // Геология и геофизика. – 1978. – № 6. – С. 34–40.
- Шерман С.И., Савитский В.А.* Новые данные о квазипериодических закономерностях активизации разломов в реальном времени на основе мониторинга магнитуд сейсмических событий (на примере Байкальской рифтовой системы) // Докл. РАН. – 2006. – Т. 408, № 3. – С. 398–403.
- Шерман С.И., Сорокин А.П., Савитский В.А.* Новые методы классификации сейсмоактивных разломов литосферы по индексу сейсмичности // Докл. РАН. – 2005. – Т. 401, № 3. – С. 395–398.
- Шерман С.И.* Физические закономерности развития разломов земной коры. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1977. – 102 с.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др.* Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1991. – 262 с.
- Levi K.G., Sherman S.I.* Applied geodynamic analysis // Musee Royal De L'Afrique centrale. – Tervuren, Belgique Annales, Sciences Geologiques. – 1995. – V.100. – 133 p.
- Sherman S.I., Dem'yanovich V.M., Lysak S.V.* Active faults, seismicity and fracturing in the lithosphere of the Baikal rift system // Tectonophysics. – 2004. – V. 380, № 3–4. – P. 261–272.