

Салтыков В.А., Кравченко Н.М., Волович О.Г., Воропаев П.В., Коновалова А.А., Кузнецов Ю.А.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, salt@emsd.ru

Введение

В работе представлена характеристика сейсмичности Камчатки 2011-2012 гг. Комплекс рассматриваемых параметров включает оценку уровня сейсмичности региона по шкале «СОУС'09»; расчет вариаций наклона графика повторяемости, выявление статистически значимых аномалий наклона графика повторяемости с помощью Z -теста, расчет сейсмической активности A_{10} ; мониторинг параметра RTL и вариаций площади сейсмогенных разрывов; обнаружение с помощью Z -теста областей статистически значимого уменьшения скорости потока землетрясений; выявление кластеризации землетрясений. При расчетах использованы каталоги Камчатского филиала Геофизической службы РАН (<http://www.emsd.ru>). Оценки сейсмичности сделаны для района, ограниченного широтой $\varphi=50.5^{\circ}N$ и $56.5^{\circ}N$, долготой $\lambda=156.0^{\circ}E$ и $167.0^{\circ}E$, глубиной от 0 до 300 км, в который попадает наиболее сейсмоактивная часть Камчатки. Нижний энергетический уровень землетрясений определен как $K_S=8.5$ по классификации Федотова, что соответствует уровню надежной регистрации землетрясений для камчатской сейсмоактивной зоны в целом [1]. Из анализа исключены группирующиеся события. Используемая для этого программа Смирнова В. Б. (МГУ им. Ломоносова) реализует алгоритм, описанный в работе [4].

Энергия землетрясений Камчатки

Общая выделившаяся сейсмическая энергия составила $2.1 \cdot 10^{14}$ Дж в 2011 г. и $1.2 \cdot 10^{14}$ Дж в 2012 г. при среднегодовом (за 51 год) значении $5.7 \cdot 10^{14}$ Дж и медианном годовом значении $1.6 \cdot 10^{14}$ Дж. Значение функции распределения годовой сейсмической энергии 2011 г. равно 0.59 ± 0.07 , 2012 г. - 0.42 ± 0.07 . Таким образом, сейсмическая энергия, выделившаяся в 2011-2012 гг., в пределах ошибки определения близка к медианному значению.

Для качественной оценки текущего уровня сейсмичности используется шкала и методика «СОУС'09», согласно которой состояние сейсмичности региона оценивается по эмпирической функции распределения выделившейся за определенный временной интервал сейсмической энергии: $F(K) = P(\lg E \leq K)$, где E – суммарная сейсмическая энергия в Дж [5]. Рис. 1 отражает изменение оценок уровня сейсмичности Камчатки в течение 2011 -2012 гг.

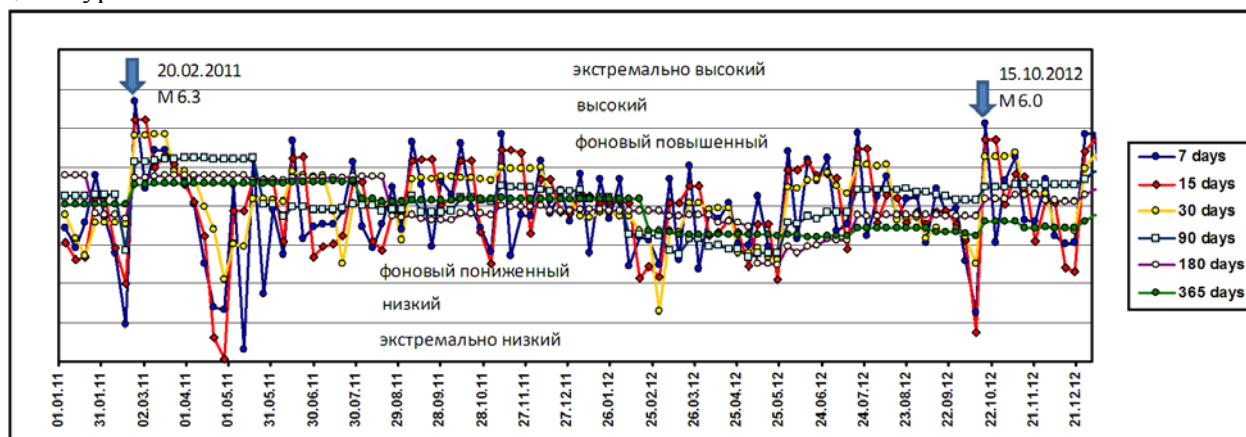


Рис. 1. Временной ход оценки уровня сейсмичности Камчатки в различных временных окнах

Наиболее сильными сейсмическими событиями 2011-2012 гг. были землетрясение с магнитудой $M_L=6.3$, произошедшее 20 февраля 2011 г. в Камчатском заливе и землетрясение с магнитудой $M_L=6.0$, произошедшее на юге Камчатки 15 октября 2012 г. (Рис.2). Перед обоими землетрясениями было отмечено снижение регионального уровня сейсмичности до экстремально низкого в коротких временных окнах (Рис.1). Землетрясению 20 февраля 2011 г. предшествовало появление аномалий сейсмического затишья, определенных по двум независимым методикам (Z и RTL), и группы кластеров [6]. Афтершоковая последовательность последовательность состояла из 33 событий с энергетическими классами $K_S = 8.5 - 11.4$. Перед землетрясением 15 октября 2012 г. была

выделена аномалия сейсмического затишья по Z-методике. Афтершоки составили группу из 13 событий с энергетическими классами $K_S = 8.6 - 12.6$. Наиболее представительные рои землетрясений были зафиксированы в восточной акватории Авачинского залива в марте 2011 г. (45 событий с энергетическими классами $K_S = 8.5 - 12.2$) и в июне 2012 г. (15 событий с $K_S = 8.5 - 11.3$). Данные об этих землетрясениях представлены в Таблице. Для каждого землетрясения или группы приведены дата, энергетический класс K_S , магнитуда M_L и координаты наиболее сильного землетрясения; логарифм суммарной энергии группы землетрясений $\lg(E_{\text{сум}})$ и длительность Δt , определенная как временной интервал, в течение которого произошло 75% сейсмических событий группы, указан тип последовательности: афтершоковая или рой.

Число группированных землетрясений в 2011-2012 гг. составило 12 % от общего количества сейсмических событий с K_S не менее 8.5

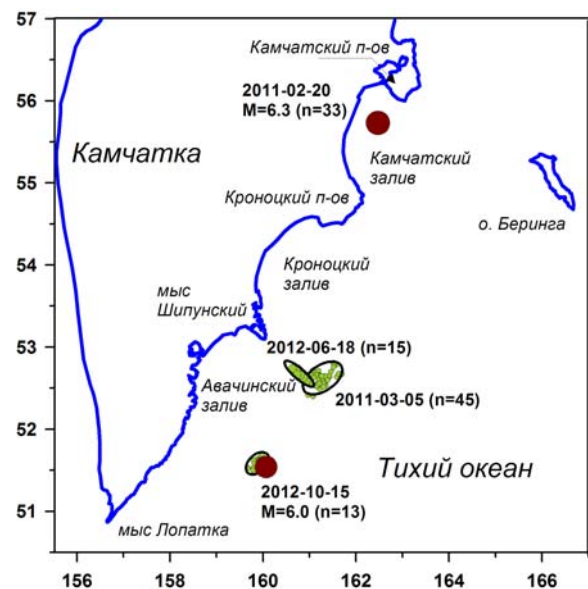


Рис.2. Землетрясения Камчатки с магнитудой $M \geq 6$ и группированные события с $n \geq 10$ 2011-2012 гг.

Таблица. Параметры землетрясений с $M \geq 6$, афтершоковых последовательностей и роев, произошедших в сейсмоактивной зоне Камчатки в 2011 - 2012 гг.

Параметры главного события						$\lg(E, \text{Дж})$	$\Delta t, \text{дни}$	Тип группы
дата	K_S	M_L	$\varphi, ^\circ N$	$\lambda, ^\circ E$	h, км			
2011-02-20	14.1	6.3	55.73	162.47	48	14.1	5	афтершоки
2011-03-05	12.2	5.4	52.58	161.34	16	12.8	13	рой
2012.06.18	11.3	4.9	52.67	160.84	16	11.7	1	рой
2012.10.15	13.5	6	51.54	160.07	45	13.6	9	афтершоки

Наклон графика повторяемости γ

Определение наклона графика повторяемости γ основано на повторяемости землетрясений как фундаментальном свойстве сейсмического процесса. Перед некоторыми сильными землетрясениями наблюдалось уменьшение наклона графика повторяемости [2, 3].

Наклон графика повторяемости γ в 2011 г. и 2012 г. равен 0.47 ± 0.02 , что практически соответствует в пределах ошибки среднееголетнему значению 0.475 ± 0.002 .

Для обнаружения пространственных особенностей γ исследуемая область сканируется цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 150 км. Для выявления статистически значимых изменений γ применяется Z-тест. На Рис. 3 показана карта изменения γ в 2011 - 2012 гг. по сравнению с многолетним фоном. Отмечается статистически достоверное уменьшение γ в районе Камчатского залива и Камчатского полуострова (уровень значимости $\alpha = 0.01$). Статистическая значимость увеличения γ в районе мыса Лопатка – на уровне $\alpha = 0.05$.

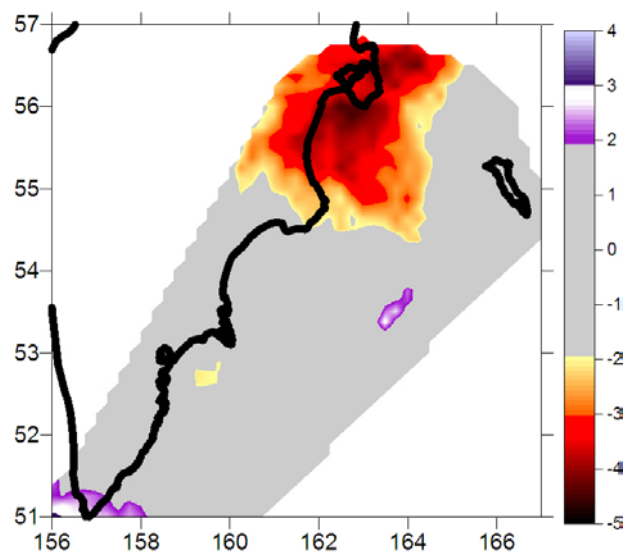


Рис.3. Изменение γ в 2011 - 2012 гг. по сравнению с многолетним фоном, нормированное на его среднеквадратичное отклонение

Сейсмическая активность A_{10}

Средняя по исследуемому району активность A_{10} в 2011 г. составила 0.254 ± 0.006 , в 2012 г. - 0.249 ± 0.006 при среднееголетнем значении 0.279 ± 0.001 . В целом активность региона в 2011 - 2012

гг. была ниже среднего уровня на 8-10%. Карты относительных значений активности A_{10} , построенные при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами с глубиной до 100 км и радиусами 50 км, приведены на Рис. 4. Распределение активности A_{10} в 2011 и 2012 гг. значительно отличается от среднееголетнего. Отмечается снижение активности ниже среднего значения в районе Камчатского, Кроноцкого, Шипунского полуостровов, Авачинского залива и акватории, прилегающей к южной части Камчатки (51° - 52° N), при этом восточнее Камчатского залива активность существенно превысила средние значения.

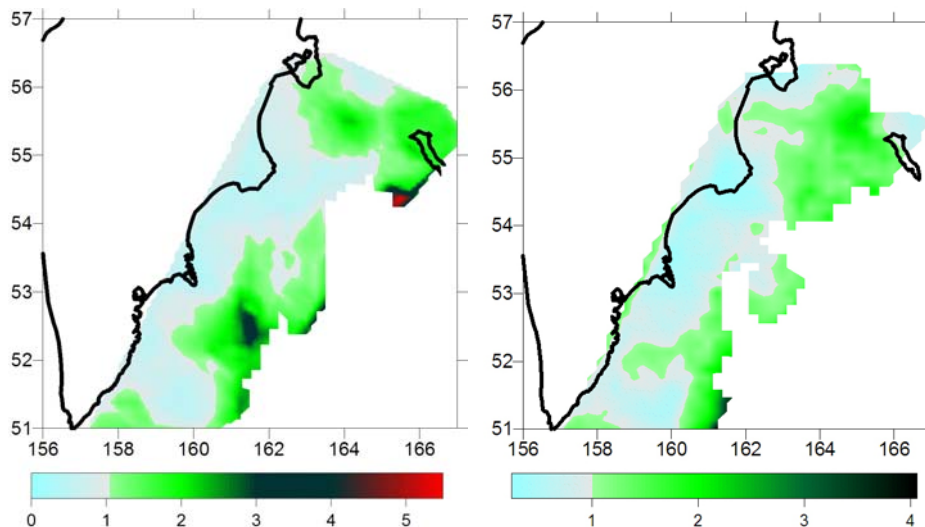


Рис.4. Карты сейсмической активности A_{10} , нормированной на многолетнюю активность, рассчитанные для 2011 г. (слева) и 2012 г. (справа).

Параметр RTL

Применение методики расчета прогностического параметра RTL , предложенной Соболевым Г.А. и Тюпкиным Ю.С. [8], позволяет выявить зоны формирования сейсмических затиший. Аномалии сейсмического затишья соответствует область со значениями параметра $RTL < -3$. Сейсмические затишья по параметру RTL были выделены перед 17 из 37 землетрясениями с $M \geq 6.0$ (8 из 8 землетрясениями с $M \geq 6.8$), произошедшими в камчатской сейсмоактивной зоне за последние 30 лет. Землетрясение происходит, как правило, на краю аномалии в интервале до трех лет после окончания затишья.

На Рис. 5 приведена карты минимальных значений RTL , наблюдавшихся в сейсмоактивной области Камчатки в течение 2011 и 2012 гг. Штриховой линией отмечена область сканирования, за пределами которой аномалия не считается достоверной. Значительных аномалий по параметру RTL в течение 2011- 2012 гг. не наблюдалось.

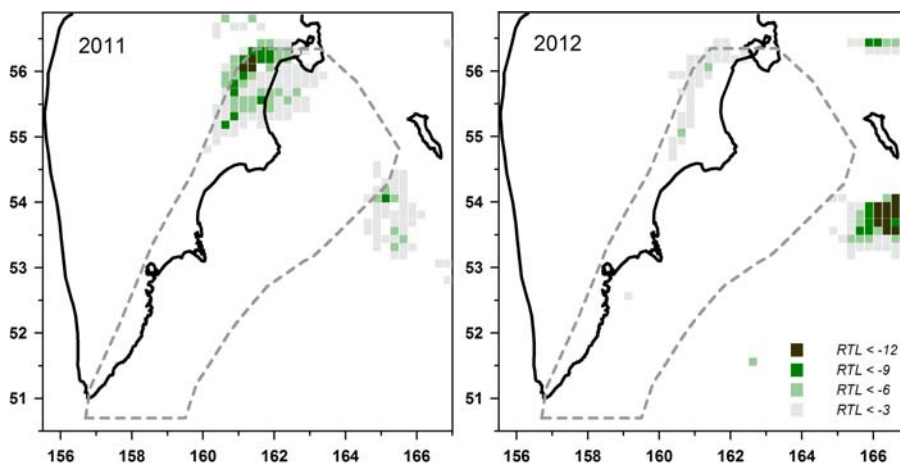


Рис.5. Карта минимальных значений параметра RTL в течение 2011и 2012 гг.

Параметр dS

Параметр dS рассчитывается как разница между накопленной за последний год площадью сейсмогенных разрывов в пределах круговой области радиусом 50 км и среднегодовым значением.

Повышенные значения dS , проявившиеся в окрестности RTL -аномалии после ее окончания, могут быть проинтерпретированы, согласно методике Соболева Г.А., как форшоковая активизация [7].

Карты вариаций площадей сейсмогенных разрывов dS в 2011 и 2012 гг. относительно среднегодовых значений показаны на Рис. 6. Область повышенных значений площади сейсмогенных разрывов dS в Камчатском заливе приходится на область сейсмического затишья по параметру RTL , закончившегося в апреле 2010 г. [6].

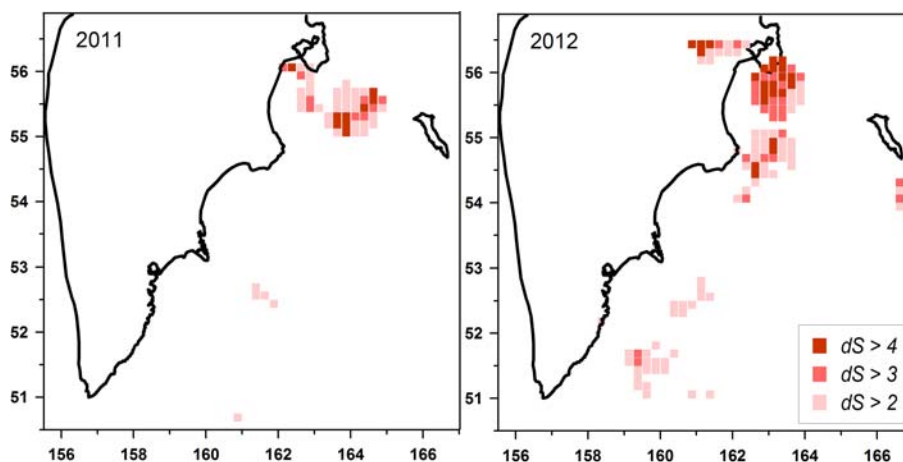


Рис. 6. Карты значений dS -параметра, рассчитанные на декабрь 2011 г. и 2012 г.

Контроль кластеризации землетрясений

Кластером считается группа двух или более землетрясений, если положение их эпицентров, разница во времени их появления и энергия удовлетворяет определенным условиям [7]. Такие кластеры в зонах, отмеченных по методу RTL и dS , могут свидетельствовать о стягивании сейсмической активности к месту будущего макроразрыва. Карты эпицентров главных событий кластеров землетрясений 2011 г. и 2012 г. показаны на Рис.7. Распределение кластеров по сейсмофокальной области неравномерно. Обращают на себя внимание группы кластеров с наибольшими по энергии главными событиями на востоке и юго-востоке от Авачинского залива. Группа кластеров в Камчатском заливе примыкает к зоне повышенных значений dS (рис.6).

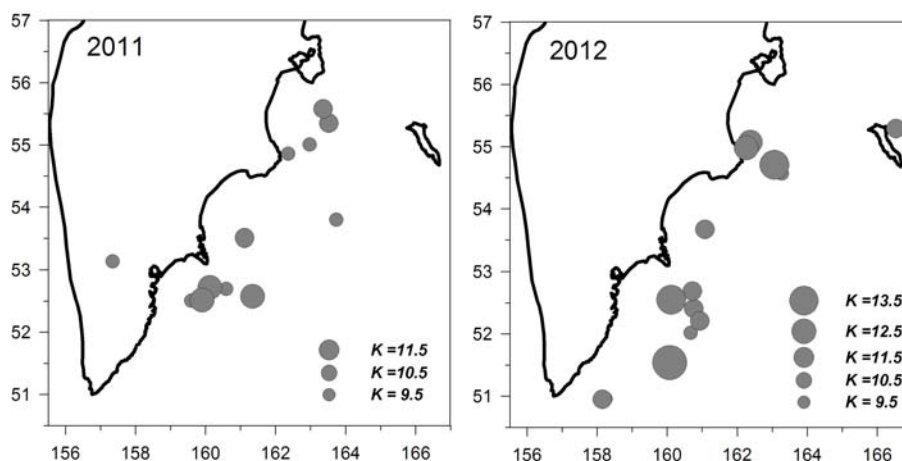


Рис. 7. Карты эпицентров главных событий кластеров землетрясений 2011 г. и 2012 г.

Выявление сейсмических затиший по методу «Z-функция»

Метод «Z-функция» опирается на работу [9] и, также как и метод RTL , ориентирован на выявление сейсмических затиший как временных аномалий в сейсмическом режиме отдельных пространственных областей. Основными характеристиками методики являются параметр Z , определяющий статистическую значимость различий в скоростях сейсмического потока на двух временных участках и параметр SRD , определяющий величину уменьшения скорости сейсмического потока. Абсолютному сейсмическому затишью соответствует $SRD=1$, уменьшению уровня сейсмичности в 8 раз - $SRD=0.875$, уменьшению в 4 раза - $SRD=0.75$. Сейсмические затишья по Z -методике ретроспективно и в реальном времени были выделены перед 20 из 37 камчатскими землетрясениями с $M \geq 6.0$. Землетрясение происходило в пределах аномальной области или в ближайшей ее окрестности в интервале времени до трех лет после окончания затишья.

На рис. 8 показана карта значений параметра $SRD > 0.75$ в 2011-2012 гг. Области, в которых наблюдалось уменьшение скорости сейсмического потока не менее чем в 8 раз в течение не менее года, оконтурены штриховой линией, область абсолютного затишья - сплошной. Время существования сейсмических затиший в этих зонах и их статистическую значимость можно оценить по приведенным рядом графикам $Z(t)$, построенных для временного окна 12 месяцев. Эпицентр землетрясения 15.10.2012 г. с магнитудой $M_L = 6.0$ приходится на границу зоны I. Землетрясение произошло спустя полтора года после окончания затишья. Момент землетрясения отмечен стрелкой на соответствующем графике временного хода $Z(t)$.

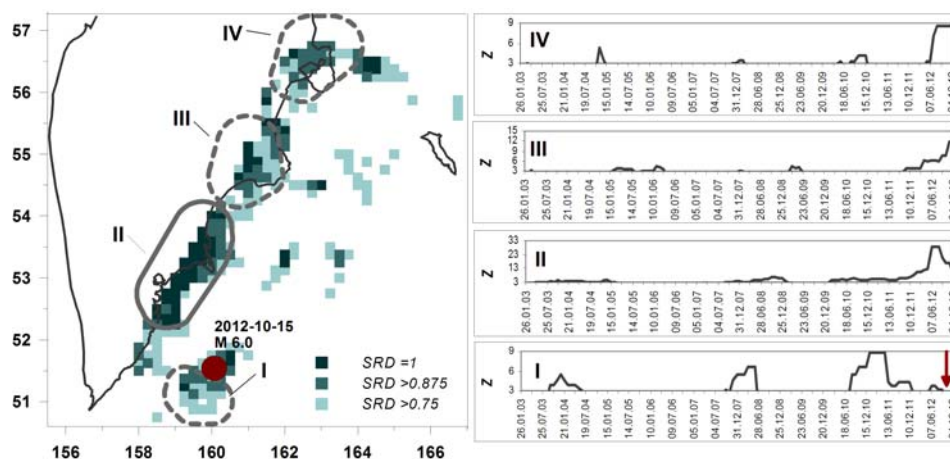


Рис. 8. Карта значений SRD -параметра >0.75 в течение 2011-2012 гг. Оконтурены области уменьшения уровня сейсмичности не менее чем в 8 раз в течение не менее года. Приведены графики временного хода Z -функции. На карте отмечен эпицентр землетрясения 15.10.2012 г., на соответствующем графике $Z(t)$ - момент его возникновения.

Заклучение

На основе региональных каталогов камчатских землетрясений даны оценки параметров сейсмичности Камчатки 2011-2012 гг. и получены следующие результаты:

на севере Камчатки в Камчатском заливе в течение 2 лет наблюдается статистически достоверное уменьшение наклона графика повторяемости, отмечаются повышенные значения A_{10} и повышенные значения площади сейсмогенных разрывов dS , кластеры землетрясений располагаются в непосредственной близости к аномалиям dS , в районе Камчатского и Кроноцкого полуостровов развиваются Z -аномалии;

в южной части Камчатки, в районе мыса Шипунского и Авачинского залива завершилось абсолютное сейсмическое затишье; восточнее Авачинского залива отмечена значительная группа кластеров землетрясений; на юге Авачинского залива наблюдаются повышенные значения A_{10} , в районе мыса Лопатка - повышенные значения наклона графика повторяемости.

Список литературы

1. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С. 6-27.
2. Завьялов А.Д. Наклоны графика повторяемости как предвестник сильных землетрясений на Камчатке // Прогноз землетрясений. №5. Душанбе-Москва: Дониш. 1984. С.173-184.
3. Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
4. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы обработки сейсмологических данных (Вычислительная сейсмология. Вып.24). М.: Наука, 1991. С.19-50
5. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. №2. С.53-59.
6. Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Аномалии в сейсмическом режиме Камчатки, предшествовавшие землетрясению 20 февраля 2011 г.($M=6.2$) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 2011. С.248-251.
7. Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных Камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1999. №4/5. С.63-72.
8. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. №4. С.64-74.
9. Wyss M., Habermann R.E. Precursory quiescence // Pageoph. 1988. Vol.126. P.319-332.