

Богданов В.В., Павлов А.В.

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
с. Паратунка, pavlov@ikir.ru**Введение**

Теоретико-вероятностный подход к каталогу землетрясений позволяет определить на основе каталога случайные события и вычислить их вероятности P [1]. Анализ изменений распределений вероятностей P позволяет исследовать изменения в сейсмическом режиме [2]. В среднесрочном методе прогноза землетрясений КОЗ [4] используется безразмерная величина ξ , которая является мерой статистически значимых отклонений текущих значений исследуемого сейсмологического параметра от его долговременных значений. В представленной работе произведено вычисление параметра ξ_p на основе распределения вероятности для случайного события «попадание эпицентров сейсмических событий, произошедших в выбранном сейсмоактивном объеме V , в заданные интервалы широты $\Delta\varphi_i$ и долготы $\Delta\lambda_j$ ». Проведён анализ динамики параметра ξ_p перед сильными землетрясениями с энергетическим классом $K_S \geq 14$, произошедших за временной интервал 1990 – 2014 гг. вдоль восточного побережья Камчатки на глубинах до 100 км. Всего было проанализировано 25 событий, часть из которых приведены в данной работе.

Методика исследований

При теоретико-вероятностном подходе каталог землетрясений можно представить в виде вероятностного пространства трех математических объектов, а именно: Ω – пространство элементарных событий, \tilde{F} – множество подмножеств случайных событий, P – вероятности этих событий [1]. При этом каждое землетрясение рассматривается как единичный исход ω_i в пространстве Ω , мощность которого за рассматриваемый период задается числом событий каталога. В свою очередь, каждый исход ω_i определяется системой случайных непрерывных величин: широтой φ_i , долготой λ_i , глубиной h_i , энергетическим классом $K_i = \lg E$ и временем t_i . Время единичного события как случайная величина из дальнейшего анализа в предлагаемой модели будет исключено. Так как случайные величины φ_i , λ_i , h_i и K_i заключены в соответствующие интервалы между минимальными и максимальными значениями, то для пространства элементарных событий справедливо

$$\Omega = \{ \omega: \varphi_{min} \leq \varphi \leq \varphi_{max}; \lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max}; h_{min} \leq h \leq h_{max}; K_{min} \leq K \leq K_{max} \} \quad (1).$$

Максимальные и минимальные значения входящих в (1) случайных величин задаются геометрией реального сейсмического региона, а также его внутренними свойствами, определяющими энергетику события. Чтобы перейти от идеализированного вероятностного пространства к реальному эксперименту, необходимо границы пространства элементарных событий Ω и сами вероятности P определять из каталога землетрясений на основе его статистической обработки. Вероятность случайного события рассчитывалась по формуле

$$P(\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j, \Delta h_m, \Delta K_n) = P(\Delta\varphi_i) \times P(\Delta\lambda_j | \Delta\varphi_i) \times P(\Delta h_m | \Delta\lambda_j, \Delta\varphi_i) \times P(\Delta K_n | \Delta h_m, \Delta\lambda_j, \Delta\varphi_i) \quad (2),$$

где i, j, m и n – индексы, соответствующих интервалов случайных величин. В (2) приняты обозначения: $P(\Delta\varphi_i)$ – безусловная плотность распределения сейсмических событий в зависимости от широты $\Delta\varphi_i$; $P(\Delta\lambda_j | \Delta\varphi_i)$ – плотность распределения сейсмических событий по $\Delta\lambda_j$ при условии, что их широта равна $\Delta\varphi_i$; $P(\Delta h_m | \Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j)$ – плотность распределения сейсмических событий по Δh_m при условии, что их широта и долгота соответственно равны $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\lambda_j$; $P(\Delta K_n | \Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j, \Delta h_m)$ – плотность распределения сейсмических событий по ΔK_n при условии, что их долгота, широта и глубина соответственно равны $\Delta\varphi_i$, $\Delta\lambda_j$ и Δh_m . Зная аналитический вид плотности распределения (2), можно вычислить вероятность того, что сейсмическое событие попадет в заданные интервалы: по широте $\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i-1}$, долготы $\Delta\lambda_j = \lambda_j - \lambda_{j-1}$, глубине $\Delta h_m = h_m - h_{m-1}$ и по энергетическому классу $\Delta K_n = K_n - K_{n-1}$, где i, j, m и n – индексы, соответствующих интервалов случайных величин. При таком подходе каталог землетрясений, представленный в виде математического объекта трех элементов, является опорной моделью, на фоне которой можно отслеживать изменения в сейсмической активности, т.е. регистрировать вариации в распределении вероятностей в локальных областях сейсмического региона за различные интервалы времени [2]. В данной работе исследовалось распределение вероятностей для случайного события: «попадание эпицентров сейсмических событий,

произошедших в выбранном сейсмоактивном объёме V , в заданные интервалы широты $\Delta\varphi_i$ и долготы $\Delta\lambda_j$ ».

Для статистической обработки использовался каталог сейсмических событий Камчатского региона, составленный КФ ГС РАН. Рассматривались только землетрясения с энергетическим классом $K_S \geq 9$ и глубиной гипоцентров $h \leq 100$ км. Распределение вероятностей сейсмических событий по широте и долготе $P(\Delta\varphi, \Delta\lambda)$ вычислялись в скользящем временном окне $\Delta T = 1$ год с шагом $\Delta t = 1$ месяц для пространственных ячеек с размерами по широте и долготе $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 1^\circ \times 1^\circ$ (рис.1а). Полная группа событий вероятностного пространства Ω образовывалась всеми землетрясениями, произошедшими за временной период ΔT в указанных областях. При вычислении вероятностей попадания сейсмических событий в пространственные ячейки с размерами $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 2^\circ \times 2^\circ$ и $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 3^\circ \times 3^\circ$, координаты ячейки выбирались так, чтобы координаты эпицентра исследуемого землетрясения с $K_S \geq 14$ совпадали с координатами центра ячейки или не выходили за её границы. При этом полная группа событий вероятностного пространства Ω образовывалась всеми землетрясениями внутри области с координатами $\varphi = 48^\circ - 58^\circ$ с.ш. и $\lambda = 154^\circ - 166^\circ$ в.д. (рис.1б).

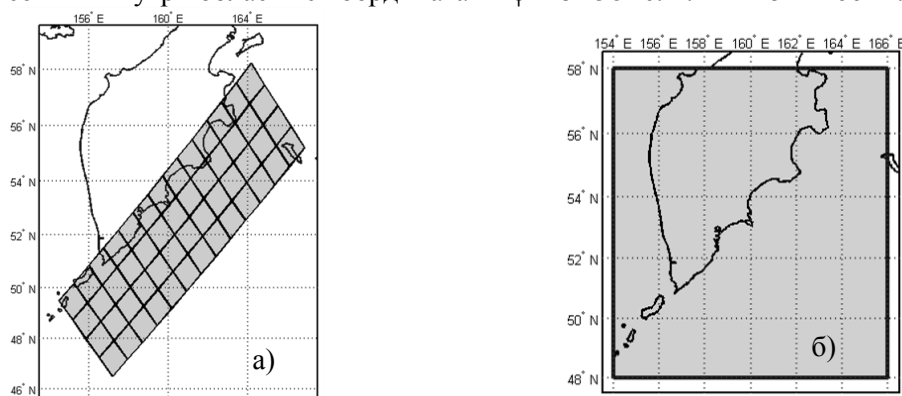


Рис.1. а) Области, для которых вычислялось распределение вероятностей $P(\Delta\varphi, \Delta\lambda)$; б) Область, сейсмические события которой составляют полную группу событий вероятностного пространства Ω для расчёта вероятностей попадания сейсмических событий в ячейки $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 2^\circ \times 2^\circ$ и $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 3^\circ \times 3^\circ$.

На основе полученных вероятностей были вычислены пространственно-временные распределения параметра ξ_P , которые показывают статистически значимые отклонения текущих значений вероятностей $P(\Delta\varphi, \Delta\lambda)$ от их долговременных (фоновых) значений. Параметр ξ_P был определён на основе [4] и представлен в виде:

$$\xi_P = \begin{cases} \frac{\Delta P_i - \text{sign}(\Delta P_i) \cdot |\sigma_{P_{it}}|}{|\sigma_{P_{id}}|}, & \text{если } |\Delta P_i| > |\sigma_{P_{it}}| \\ 0, & \text{если } 0 \leq |\Delta P_i| \leq |\sigma_{P_{it}}| \end{cases} \quad (3),$$

где P_{it} и $\sigma_{P_{it}} = \sqrt{P_{it}(1 - P_{it})/N_T}$ [3] текущие значения параметра $P(\Delta\varphi, \Delta\lambda)$ и его стандартное отклонение в скользящем временном окне ΔT_T ; P_{id} и $\sigma_{P_{id}} = \sqrt{P_{id}(1 - P_{id})/N_d}$ долговременные (фоновые) значения в скользящем окне $\Delta T_d > \Delta T_T$; N_T и N_d – число сейсмических событий, произошедших соответственно за временные периоды ΔT_T и ΔT_d (период инструментальных наблюдений 01.01.1962 до начала периода ΔT_T); $\Delta P_i = P_{it} - P_{id}$ разность между текущим значением вероятности P_{it} и долговременным значением P_{id} .

Полученные результаты

Пространственно-временные изменения параметра ξ_P , рассчитанного по формуле (3) и предшествовавшие ряду сильных сейсмических событий Камчатского региона, представлены на рис.2–12. Из рис.2а видно, что сейсмическому событию 02.03.1992 г. с энергетическим классом $K=14.6$ за период с 01.01.1990г. по 01.01.1991г. предшествовала локализация и усиление сейсмичности. При этом, значения параметр ξ_P в области подготовки землетрясения превысили 18 (рис.3). С сентября 1991 г. последовало ослабление сейсмической активности вплоть до события 02.03.1992 (рис.3). За событием 02.03.1992 г. последовала афтершоковая активизация (рис.2б), которая снизилась перед наступлением сейсмического события 08.06.1993 г. с $K=15$ (рис.3).

На рис.4а и рис.5 представлено распределение параметра ξ_P , рассчитанного до события 08.06.1993 г. Из рисунков видно, что этому событию предшествовало снижение сейсмической активности, как практически во всей расчетной области (за исключением района Командорских

островов (рис.1а)), так и в области эпицентра готовящегося события. После события 08.06.1993 г. последовало повышение афтершоковой активности и наступление события 13.11.1993 г. с $K=14.6$ (рис.4б, рис.5).

Рассмотрим Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г. с $K=15.5$. В области его подготовки наблюдалась пониженная сейсмическая активность (рис.7), хотя непосредственно его наступлению предшествовало увеличение ξ_p до положительных значений (рис.6а).

Отрицательные значения параметр ξ_p принимал перед землетрясениями 08.03.1999 с $K=14.3$ и 08.10.2001 с $K=14.1$, которые затем сменились на положительные перед событием 15.03.2003 с $K=14.2$ (рис.8).

Перед событием 10.03.2007 г. с $K=14.3$ параметр ξ_p принимал значения, близкие нулю, а событию 20.02.2011 г. с $K=14.1$ предшествовало заметное понижение сейсмической активности и параметр ξ_p принимал отрицательные значения (рис.9).

В 2011 – 2013 гг. в Южной части сейсмофокальной зоны Камчатки произошла серия крупных сейсмических событий с энергетическими классами $K \geq 14$, которым предшествовало усиление сейсмической активности, превышавшее многолетние фоновые значения, что и отражает параметр ξ_p , принимающего в этот период значения доходящие до 50 (рис. 10–12).

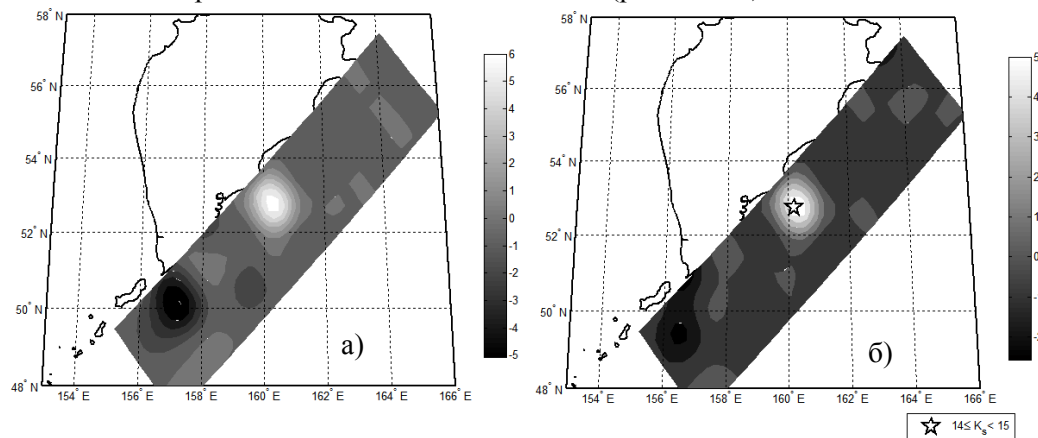


Рис.2. Распределение параметра ξ_p по областям $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 1^\circ \times 1^\circ$ для временных интервалов: а) 01.01.1990 – 01.01.1991 гг. (до события 02.03.1992 г., $K=14.6$, $h=20$ км); б) 01.01.1992 – 01.01.1993 гг.

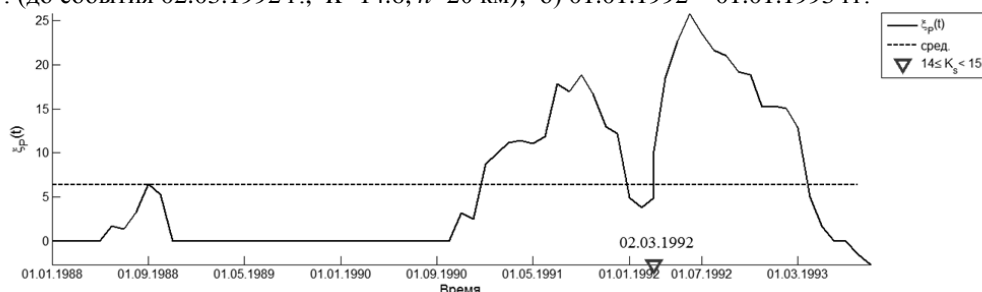


Рис.3. Изменение во времени параметра ξ_p , вычисленного для области $\Delta\varphi=51.7^\circ - 53.7^\circ$, $\Delta\lambda=159.2^\circ - 161.2^\circ$, перед сейсмическим событием 02.03.1992 г., $K=14.6$, $h=20$ км.

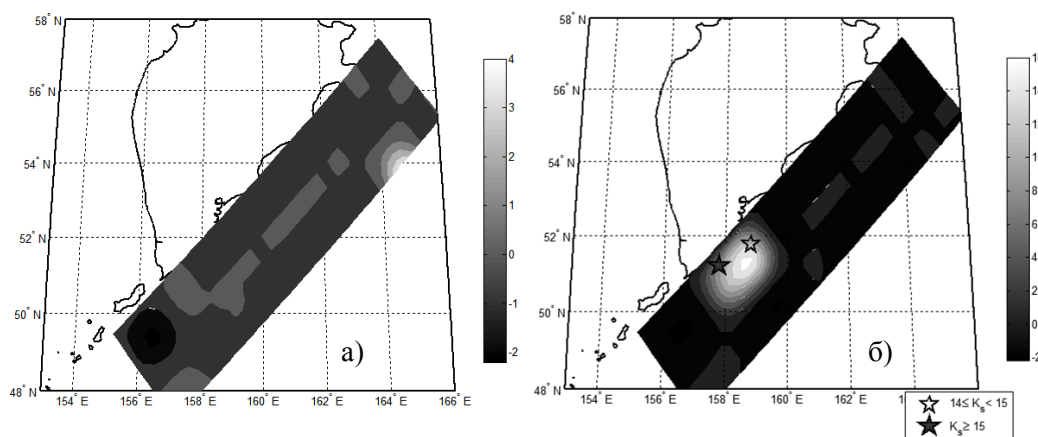


Рис.4. Распределение параметра ξ_p по областям $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 1^\circ \times 1^\circ$ для временных интервалов: а) 06.08.1992 – 07.06.1993 гг. (1 год, предшествующий событию 08.06.1993 г., $K=15$, $h=40$ км); б) 01.01.1993 – 01.01.1994 гг.

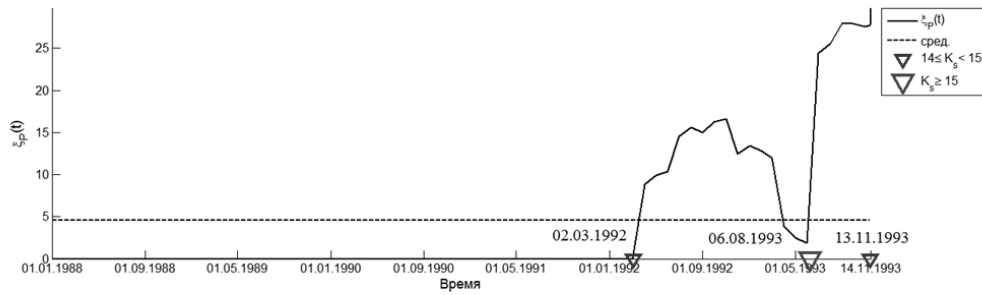


Рис.5. Изменение во времени параметра ξ_p , для области с координатами $\Delta\varphi=50.3^\circ - 53.3^\circ$ и $\Delta\lambda=157.3^\circ - 160.3^\circ$, перед сейсмическими событиями 08.06.1993 г., $K=15$, $h=40$ км и 13.11.1993 г., $K=14.6$, $h=40$ км.

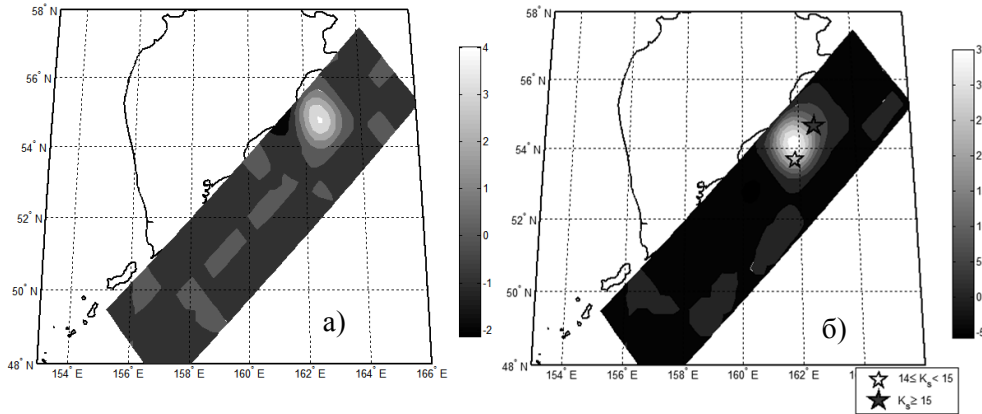


Рис.6. Распределение параметра ξ_p по областям $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 1^\circ \times 1^\circ$ для временных интервалов: а) 01.01.1997 – 04.12.1997 гг. (до события 05.12.1997 г., $K=15.5$, $h=10$ км); б) 01.01.1997 – 01.01.1998 гг.

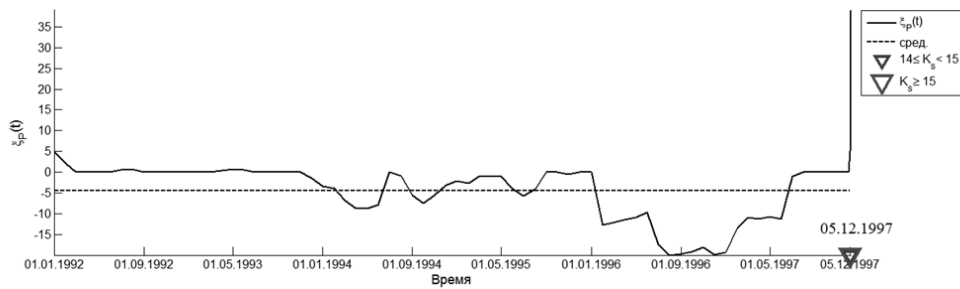


Рис.7. Изменение во времени параметра ξ_p , для области с координатами $\Delta\varphi=53.14^\circ - 56.14^\circ$ и $\Delta\lambda=161.05^\circ - 164.05^\circ$, перед сейсмическим событием 05.12.1997 г., $K=15.5$, $h=10$ км.

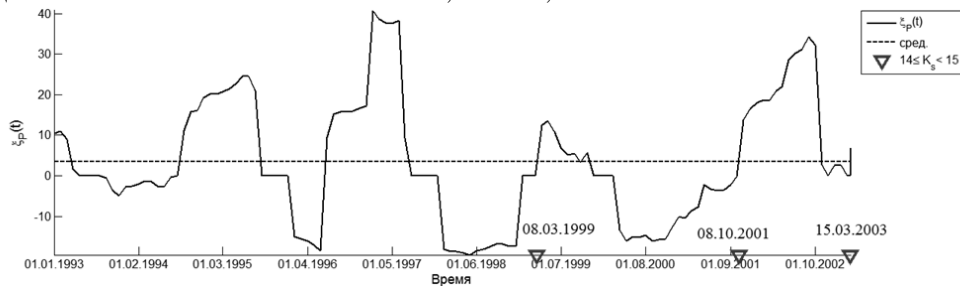


Рис.8. Изменение во времени параметра ξ_p , для области с координатами $\Delta\varphi=50.65^\circ - 53.65^\circ$ и $\Delta\lambda=159.15^\circ - 162.15^\circ$, перед сейсмическими событиями 08.03.1999 г., $K=14.3$, $h=7$ км; 08.10.2001 г., $K=14.1$, $h=24$ км и 15.03.2003 г., $K=14.2$, $h=4.5$ км.

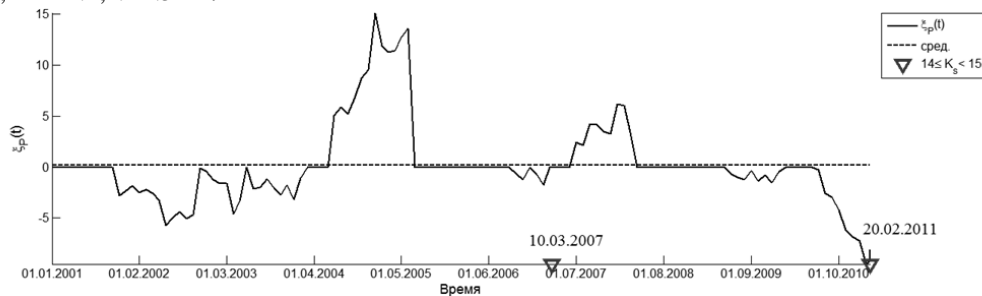


Рис.9. Изменение во времени параметра ξ_p , для области с координатами $\Delta\varphi=54.7^\circ - 56.7^\circ$ и $\Delta\lambda=161.4^\circ - 163.4^\circ$, перед сейсмическими событиями 10.03.2007 г., $K=14.3$, $h=10$ км и 20.02.2011 г., $K=14.1$, $h=48.8$ км.

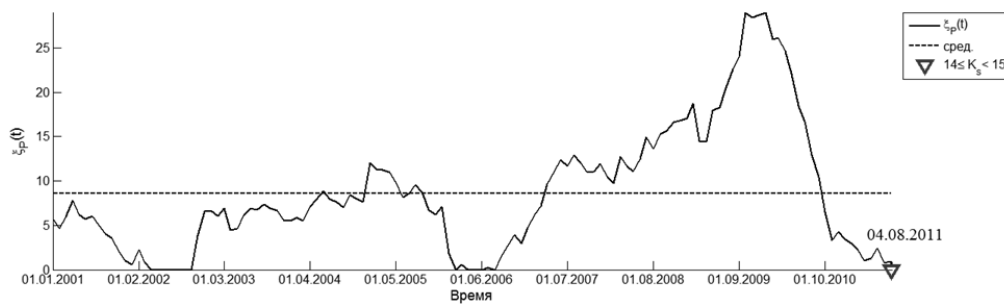


Рис.10. Изменение во времени параметра ξ_p , для области с координатами $\Delta\varphi=48^\circ - 50^\circ$ и $\Delta\lambda=154.47^\circ - 156.47^\circ$, перед сейсмическим событием 04.08.2011 г., $K=14.3$, $h=50.9$ км.

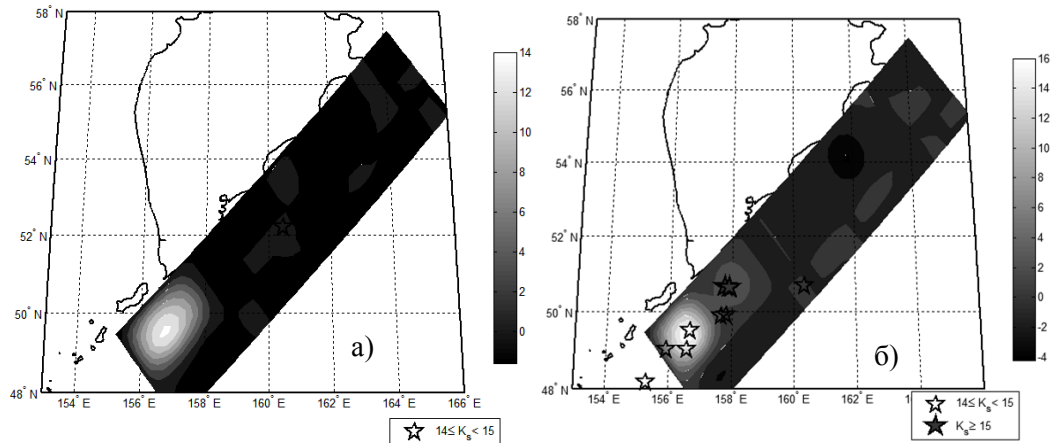


Рис.11. Распределение параметра ξ_p по областям $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 1^\circ \times 1^\circ$ для временных интервалов: а) 2010 – 2011 гг. (до событий); б) 2012 – 2013 гг. (после событий).

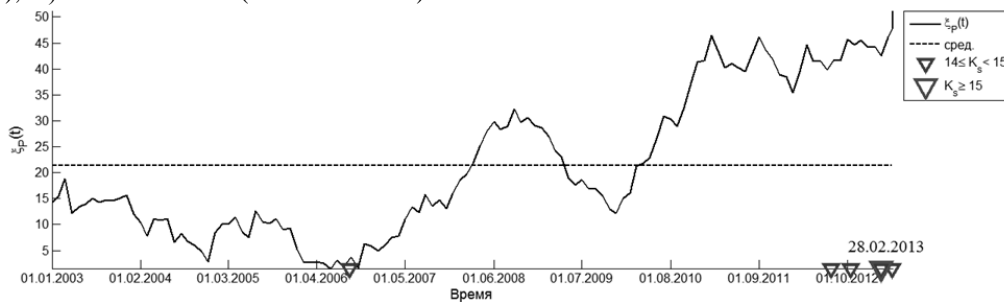


Рис.12. Изменение во времени параметра ξ_p , для области с координатами $\Delta\varphi=48.3^\circ - 51.3^\circ$ и $\Delta\lambda=156.1 - 159.1^\circ$, предшествовавшее группе сейсмических событий с $K \geq 14$, произошедших в 2012 – 2013 гг.

Заключение

На основе вероятностного подхода к каталогу камчатских землетрясений проведено исследование сейсмического режима Камчатского региона за 1990 – 2014 гг. Рассматривая широту и долготу сейсмических событий, произошедших в сейсмоактивных областях Камчатского региона, как случайные величины, были вычислены их временные ряды вероятностей. На основе полученных вероятностей был вычислен параметр ξ_p , который показывает их статистически значимые отклонения от долговременных (фоновых) значений. Анализ значений, принимаемых параметром ξ_p перед наступлением 27 сейсмических событий с $K_s \geq 14$ показал, что $\xi_p < 0$ (сейсмическое затишье) предшествовали восьми событиям, $\xi_p = 0$ (текущий уровень сейсмичности не превышает фоновый) – семи событиям, и $\xi_p > 0$ (сейсмическая активизация) – двенадцати землетрясениям.

Список литературы

1. Богданов В.В. Вероятностная интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона // ДАН, 2006, том 3, с.393–397.
2. Богданов В.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л. Вероятностная модель сейсмичности на примере каталога Камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология, 2010, № 6, с.52–64.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М. Высшая школа, 1999.- 576 с.
4. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. М.: Наука, 2006.- 254 с.