

*Салтыков В.А.**Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, salt@emsd.ru***Введение**

Вопрос о воздействии земных приливов на сейсмичность имеет достаточно долгую историю и многие научные статьи посвящены этой проблеме. Следует отметить, что полученные результаты не всегда однозначны. Существует множество статей с положительными выводами о приливном воздействии [например, 6, 16, 18, 22], но многие исследователи не разделяют эту точку зрения [например, 17, 19, 20]. В настоящее время эта тема продолжает привлекать внимание исследователей [12, 15, 21], причем авторы допускают, что приливные эффекты в сейсмичности не постоянны. Как показано в работе [7] появление землетрясений, коррелируемых с земными приливами, (назовем их «приливыми») может быть связано с подготовкой сильного землетрясения. Эти результаты стали причиной включения мониторинга зон «приливных» землетрясений в группу методов контроля сейсмичности.

Но помимо исследований кратковременных (в течение несколько лет) аномалий заслуживает интереса и изучение фоновых зон «приливных» землетрясений, т.е. таких зон, которые существуют в течение нескольких десятков лет. Для Камчатки этот интервал ограничен 1962 годом, когда были начаты детальные сейсмологические наблюдения.

В данной работе представлены результаты выявления зон «приливных» землетрясений на двух масштабах времени: 40 лет и 3 года. Основное внимание уделялось методическим аспектам, в частности, статистической надежности результатов. Интерпретация до проведения массовых расчетов представляется преждевременной, что не мешает отметить некоторые особенности пространственного распределения зон «приливных» землетрясений.

Исходные данные

Используются каталоги землетрясений 1962-2005 гг., полученные Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (г. Петропавловск-Камчатский), моментные магнитуды сильных землетрясений взяты на сайте National Earthquake Information Center (<http://www.neic.cr.usgs.gov>).

Нижний порог надежной регистрации землетрясений составляет для исследуемого района по магнитуде $M = 2.6$ (пересчитано из энергетического класса $K_S^{\Phi 68} = 8.5$ [2] по формуле:

$$K_S^{\Phi 68} = 1.5M + 4.6$$

[13]). Для расчетов использовались землетрясения, превышающие этот порог, поэтому полученные результаты о воздействии приливов на сейсмичность относятся к землетрясениям $M \geq 2.6$. Глубина землетрясений была ограничена сверху 30 км, что связано с различиями в поведении поверхностной и глубокой сейсмичности [10], которые также могут сказаться и на приливных эффектах.

Предварительно каталоги очищались от афтершоков сильных землетрясений по методу Молчан-Дмитриевой [5] программой, любезно предоставленной В.Б. Смирновым (Физический ф-т, МГУ им. Ломоносова, г. Москва). Но, так как было обнаружено, что данная методика не позволяет обнаружить афтершоковые последовательности, содержащие небольшое количество землетрясений, то (хотя их вклад в общий сейсмический процесс относительно невелик) проводилась дополнительная очистка каталога от таких афтершоков. Эти процедуры необходимы, так как афтершоковые последовательности, происходящие с большой временной плотностью событий, могут создать иллюзию соответствия землетрясений определенной фазе приливной волны. С другой стороны, афтершоки могут рассматриваться как процесс релаксации напряженного состояния среды после сильного землетрясения, то есть являются чужеродным элементом при изучении параметров фоновой сейсмичности.

Кроме афтершоков в сейсмическом процессе существуют и группы связанных событий, которые идут с возрастанием энергетического класса (магнитуды). Это могут быть как рои землетрясений, так и форшоковые активизации. Они также как и афтершоки могут создать искусственную приливную аномалию. Однако их удаление не представляется обоснованным, поэтому из компромиссных соображений проводилось «прореживание» таких групп: временной

интервал между событиями в группе должен превышать $\Delta t = 3$ часа. Группы таких связанных событий определяются с использованием соотношений [9]:

1) расстояние между их гипоцентрами меньше критического, определяемого по формуле

$$R_{cr} \text{ (км)} = 3l + \varepsilon,$$

где $lg l = 0.244K - 2.266$ – размер сейсмогенного разрыва при первом землетрясении, K – энергетический класс первого землетрясения в паре, $\varepsilon = 10$ км – поправка на ошибку определения координат;

2) время между ними меньше критического, определяемого по формуле

$$T_{cr} \text{ (годы)} = 0.01 \cdot 10^{0.4 \cdot (K-8.5)}.$$

Упомянутая выше процедура обнаружения небольших афтершоковых последовательностей проводилась по аналогичным условиям для времени между событиями. Условие для расстояния между событиями было более жестким:

$$R_{cr} \text{ (км)} = l + \varepsilon,$$

что соответствует положению афтершока в пределах очага главного события.

Методика выявления зон «приливных» землетрясений

Разработанная методика обнаружения этих зон детально описана в [7]. Особенностью применяемого подхода стал поиск в сейсмическом режиме уникальных свойств земных приливов, а именно, - характерных периодов приливных волн. Отсутствие базовой модели приливного воздействия на сейсмичность не представляется недостатком на настоящем этапе работ. Более того, можно ожидать, что результаты станут основой для адекватной модели воздействия приливов на землетрясения. Суть метода состоит в следующем: на момент каждого землетрясения t_j рассчитываются значения фаз основных волн приливного гравитационного потенциала $\{\varphi_i(t_j)\}$, где i - тип приливной волны. К основным волнам относятся O_1 (лунная главная, период $T = 25.82$ час.), K_1 (лунно-солнечная деклинационная, $T = 23.93$ час.), P_1 (солнечная главная, $T = 24.07$ час.), Q_1 (лунная большая эллиптическая, $T = 26.87$ час.), M_2 (лунная главная, $T = 12.42$ час.), S_2 (солнечная главная, $T = 12.82$ час.), N_2 (лунная большая эллиптическая, $T = 12.66$ час.). Формулы вычисления их фаз приведены в [4]. При сканировании пространства выявляются зоны, в которых наблюдается статистически значимое отличие распределения приливных фаз для землетрясений, попавших в эти зоны, от равномерного распределения. Для оценки этого эффекта используется распределение Мизеса [3], описываемое функцией:

$$f(\varphi) = \exp[K \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)] / [2\pi \cdot J_0(K)],$$

где K - концентрация, φ - фаза приливной волны, имеющая среднее значение φ_0 , $J_0(K)$ - функция Бесселя. Распределение Мизеса является базовым при рассмотрении угловых величин (к которым относятся фазы волн), подобно распределению Гаусса при распределении случайной величины на прямой. При этом концентрация K характеризует разброс единичных значений выборки относительно среднего направления: чем выше K , тем меньше разброс (При $K = 0$ распределение является равномерным). Для оценки значимости полученных параметров распределения Мизеса применен критерий Рэлея [3]. Далее рассматриваются зоны землетрясений, для которых значения концентрации K превышают критическое значение K_{cr} по уровню значимости $\alpha = 0.01$.

Для оценки значимости выявленных зон использовалось статистическое моделирование (метод Монте-Карло) – выделение аналогичных зон из случайного каталога. Для целей данной работы случайный каталог формировался следующим образом: координаты землетрясений оставались реальными, а время рассчитывалось исходя из экспоненциального распределения временных интервалов между землетрясениями, что соответствует пуассоновскому процессу (хотя, как представляется, способ задания времени землетрясения, включая вид распределения, не является жестким требованием в контексте этого исследования). Из случайного времени землетрясения следует случайная фаза приливной волны на момент этого землетрясения. Обязательным условием является соответствие модельного каталога реальному в пространственно-энергетическом аспекте: количество и энергия землетрясений модельного каталога тождественны реальному. К такому случайному каталогу применяется весь описанный выше комплекс процедур. При выборе параметра, по которому следует проводить сравнение между результатами обработки реального и случайного каталога, предпочтение было отдано количеству землетрясений n , формирующих единичную аномалию. Проведение расчетов по достаточно большому числу случайных каталогов позволяет построить функцию $F_{rand}(n)$, связанную с функцией распределения, и выводы о надежности наших результатов базируются на

совместном анализе функции $F_{\text{rand}}(n)$ и аналогичной функции того же параметра, полученной для реальных каталогов, $-F_{\text{real}}(n)$.

Карта фоновых зон «приливных» землетрясений

Можно предположить существование как относительно непродолжительных во времени (несколько лет) зон, где проявляются приливные свойства землетрясений, так и долгоживущих (назовем их фоновыми). По имеющимся в наличии данным (т.е. результатам детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке с 1962 г.) мы имеем возможность обнаружить аномалии, существующие в течение 40 лет. Если как причину существования первого типа аномалий можно рассматривать временные вариации напряженного состояния среды (в частности, в области подготовки сильного землетрясения [7]), то фоновые зоны, возможно, связаны с его региональными особенностями.

Для обнаружения фоновых зон «приливных» землетрясений использован каталог 1965 - 2004 гг., ограниченный по глубине сверху $h = 30$ км и очищенный от афтершоков.

Согласно вышеописанной методике проводилось сканирование сейсмоактивной области эллипсами. Параметры эллипсов – широта φ и долгота λ центров, длины полуосей a и b и азимут первой полуоси α , представлены в Таблице.

Таблица. Параметры эллипсов при сканировании пространства

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Шаг
φ , °с.ш.	50.5	56.5	0.05
λ , °в.д.	156	166	0.08
a , км	10	22.5	2.5
b , км	10	22.5	2.5
α , рад.	0	$\pi/2$	$\pi/20$

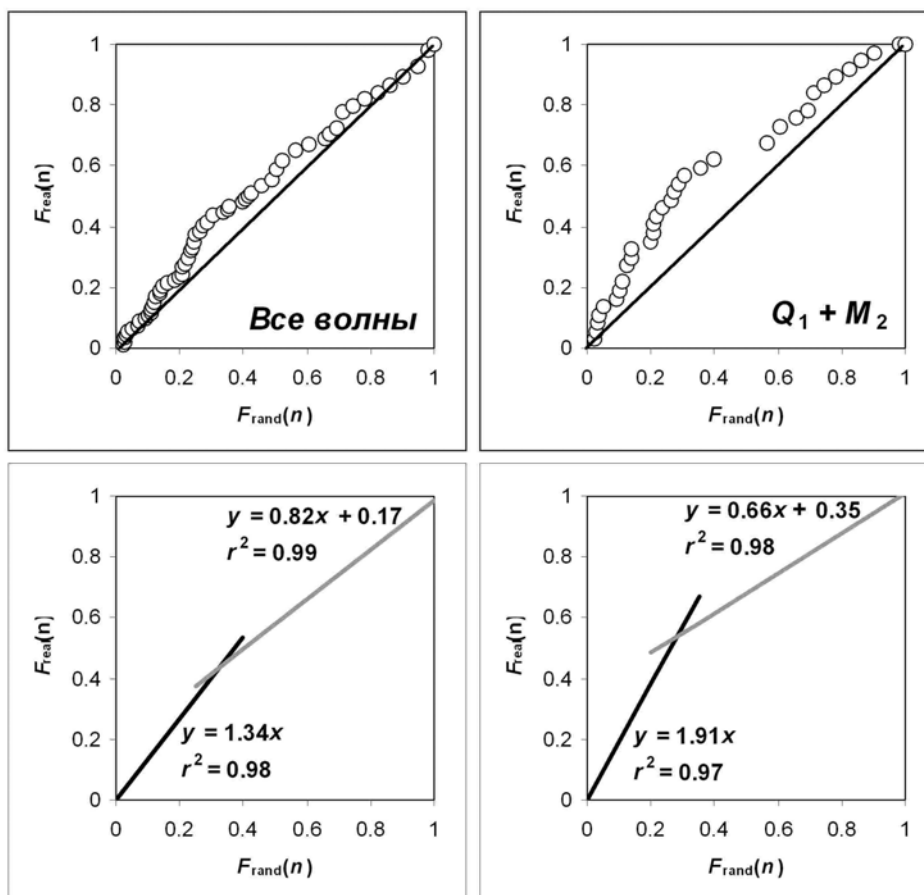


Рис.1. Вверху: Соответствие между значениями функции $F_{\text{real}}(n)$ и функции $F_{\text{rand}}(n)$ для «приливных» зон, включающих n землетрясений. Внизу – аппроксимация этих зависимостей двумя прямыми. Отмечены уравнения прямых и коэффициенты детерминированности r^2 . Слева объединены результаты расчетов по семи основным приливному волнам, справа – по волнам Q_1 и M_2 .

Расчеты проводились как на реальном каталоге, так и на каталогах случайных землетрясений. По результатам обработки реального каталога была построена функция $F_{\text{real}}(n)$, связанная с эмпирической функцией распределения $W_{\text{real}}(n)$ для числа землетрясений n , сформировавших «приливную» зону, а по случайным каталогам – аналогичная функция $F_{\text{rand}}(n)$. Функция $F(n)$ определялась как относительное число зон $N(n_i \geq n)$, содержащих не менее n землетрясений, нормированное на общее число зон N_{all} :

$$F(n) = N(n_i \geq n) / N_{\text{all}} = 1 - W(n)$$

Функция $F_{\text{rand}}(n)$ была построена по N_{all} больше 1000 зон, что потребовало многократного повторения расчетов на различных случайных каталогах.

Рассмотрим соотношение между этими двумя функциями для различных n (Рис.1) с целью выявления возможных особенностей. Графическое представление этого соотношения в виде множества точек с координатами $(F_{\text{rand}}(n), F_{\text{real}}(n))$ в наибольшей степени отвечает нашей задаче. В случае, если эмпирическая функция соответствует случайному процессу, график будет представлять собой последовательность точек, лежащих вблизи диагонали. Если это подтвердится статистическими критериями соответствия, то мы должны признать обнаруженные зоны «приливных» землетрясений *случайными*. Если мы рассматриваем всю совокупность зон, обнаруженных по одной из семи приливных волн, согласно критерию Колмогорова-Смирнова гипотеза соответствия эмпирического распределения случайному отвергается [1]. Визуально на Рис. 1 отмечаются два прямолинейных участка. Предлагается число землетрясений n_{min} , соответствующее точке излома графика (или точке пересечения аппроксимирующих прямых), принять за минимальное значение, ниже которого все аномалии рассматриваются как случайные. В данном случае n_{min} равно 35. На Рис.2 представлены зоны, соответствующие этому условию и рассчитанные для основных семи приливных волн.

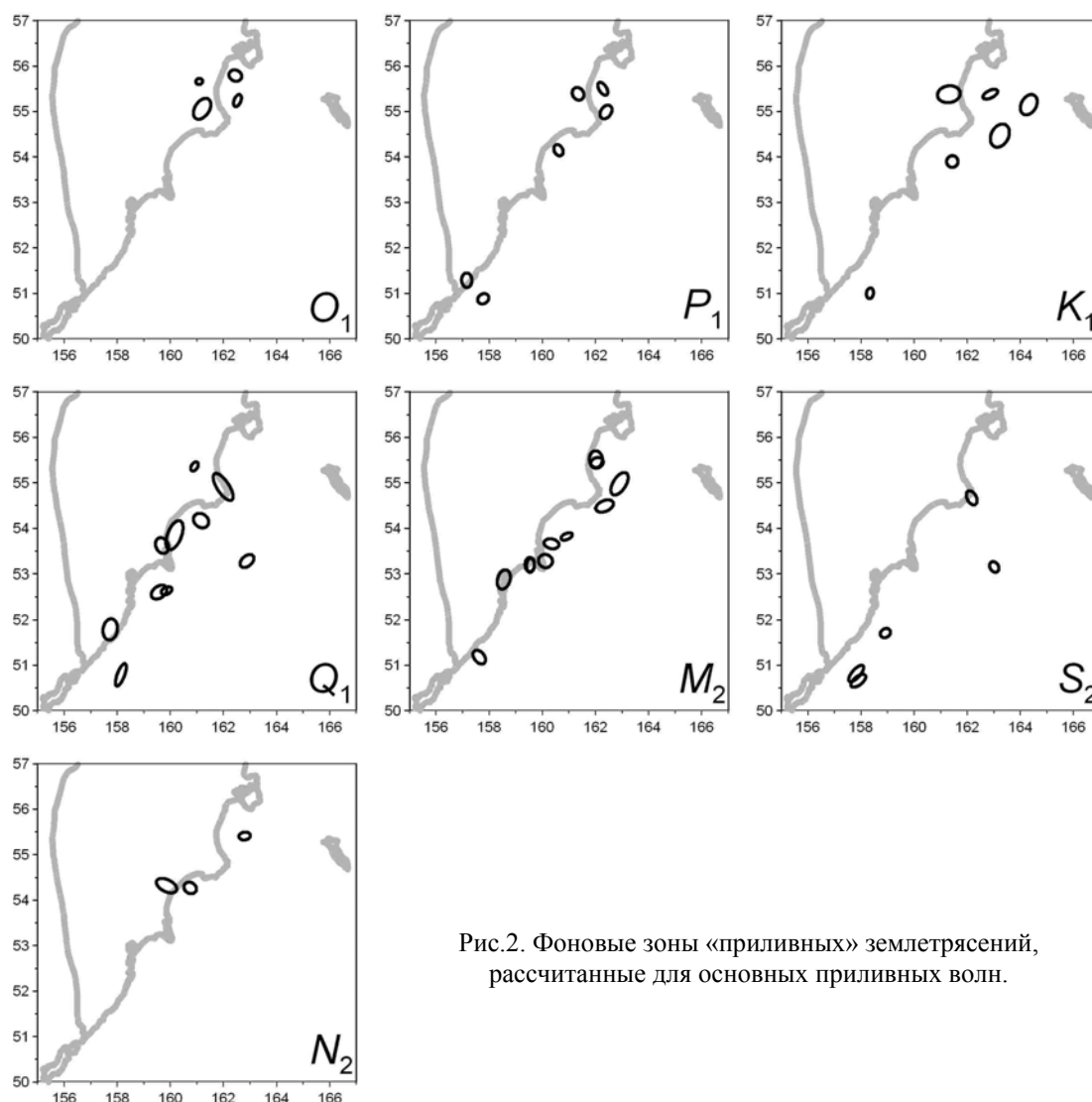


Рис.2. Фоновые зоны «приливных» землетрясений, рассчитанные для основных приливных волн.

Можно отметить следующие особенности построенных зон:

- 1) фоновые зоны неравномерно расположены в пространстве;
- 2) зоны, связываемые с различными приливными волнами, обнаруживают специфические тенденции в своем местоположении;
- 3) зоны, соответствующие волнам O_1 , P_1 , K_1 , N_2 , имеют аномалию пространственного распределения в районе Камчатского залива и Кроноцкого полуострова;
- 4) количество зон, соответствующих волнам Q_1 и M_2 , превышает в два раза количество зон для других волн. Кроме этого, эти зоны более равномерно распределены вдоль восточного побережья Камчатки.

Отмеченная особенность зон для волн Q_1 и M_2 позволяет рассмотреть их вместе (Рис.3). Такое их положение дает хорошее совпадение с областью повышенных значений сейсмического параметра активность A_{10} [8], распределение которого характеризует типичную для Камчатки сейсмичность, приуроченную к зоне субдукции. Зоны «приливных» землетрясений для остальных пяти волн (Рис.4) располагаются компактными группами в районе южной оконечности Камчатки и на севере – в районе Камчатского залива и Кроноцкого полуострова. И здесь следует отметить, что этот район является местом сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, именно здесь сейсмофокальная зона меняет свое простираение, отклоняясь на запад [14]. Кроме этого здесь наблюдается комплекс субширотно ориентированных структур [11]. Можно предположить, что различные приливные волны оказывают иницирующее воздействие на землетрясения, приуроченные к различным структурам, то есть имеющие различные механизмы очагов. Это может стать одним из направлений исследования «приливных» землетрясений в дальнейшем.

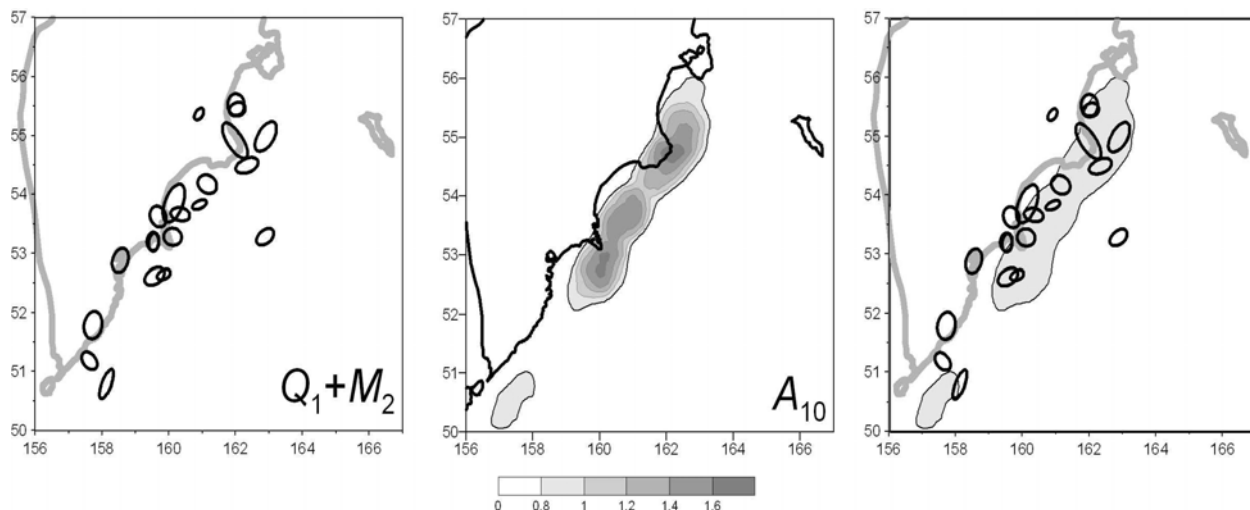


Рис.3. Сравнение положения фоновых зон «приливных» землетрясений, соответствующих приливным волнам Q_1 и M_2 , (слева) и области повышенных значений активности A_{10} (в центре).

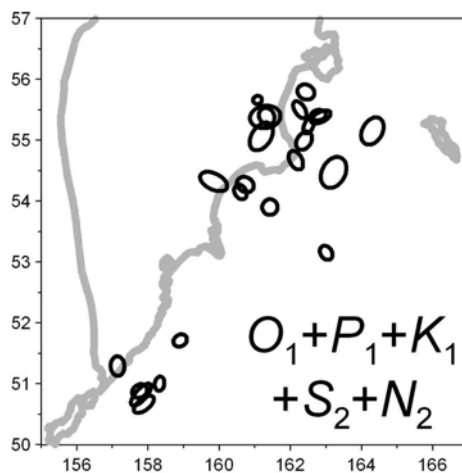


Рис.4. Положение фоновых зон «приливных» землетрясений, соответствующих приливным волнам O_1 , P_1 , K_1 , N_2 и S_2 .

Карта зон «приливных» землетрясений по данным 2003-2005 гг.

Как пример относительно непродолжительных во времени (несколько лет) зон «приливных» землетрясений рассмотрим аномалии «приливных» землетрясений, полученные для каталога землетрясений с 1 января 2003 г. по 1 января 2006 г., т.е. для последних 3 лет.

Методика полностью соответствует вышеописанной, за исключением того, что в данном случае n_{min} равно 11, а на Рис.5 приведены зоны, для которых значения концентрации K превышают критическое значение K_{cr} по уровню значимости $\alpha=0.01$ и 0.05 .

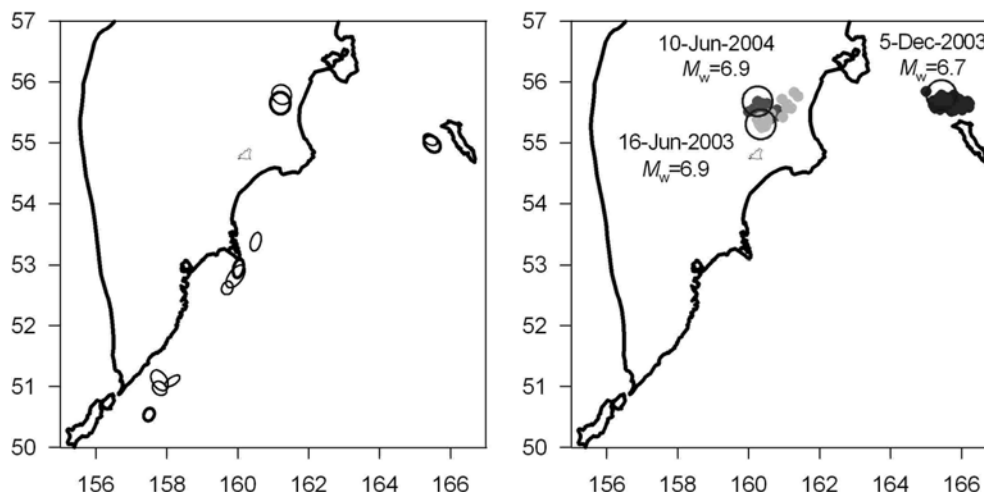


Рис.5. Слева: Положение зон «приливных» землетрясений, включающие не менее 11 землетрясений, рассчитанные по каталогу 2003-2005 гг. Толщина контура эллипса соответствует уровню значимости α : тонкая линия $\alpha = 0.05$, толстая – 0.01 . Справа: Положение землетрясений с магнитудой $M > 6.5$, произошедших на Камчатке в 2003-2005 гг. Большие кружки обозначают инструментальные эпицентры сильных событий, малые кружки, соответствующие их афтершокам, указывают на положение очагов.

В данном случае отметим следующие особенности:

1. На Рис.5 приведены эллипсы для различных волн, при этом наблюдается близкое, вплоть до совпадения, положение зон, соответствующих различным волнам. В таких случаях (а их на графике можно видеть четыре) вероятность того, что очерченная зона соответствует реальной аномалии, существенно увеличивается.

2. Если рассмотреть положение наиболее сильных землетрясений, произошедших на Камчатке в 2003-2005 гг., то дуплет землетрясений 16 июня 2003 г. и 10 июня 2004 г. соответствует положению пары зон, выделенных для приливных волн O_1 и M_2 . Очаг землетрясения 5 декабря 2003 г. не дает такого хорошего совпадения с двумя зонами «приливных» землетрясений около о. Беринга, хотя они расположены достаточно близко друг от друга. Эти зоны связываются с приливными волнами P_1 и N_2 .

3. В районе зон на юге Камчатки (м. Лопатка - приливные волны K_1 , P_1 , S_2 , м. Шипунский – O_1 , K_1 , M_2) сильные сейсмические события в 2003-2005 гг. не наблюдались.

Заключение

Представлены результаты применения на различных временных интервалах (40 лет и 3 года) методики выделения пространственных зон, в которых слабая сейсмичность коррелирует с земными приливами.

Показано, что различные приливные волны проявляют себя неодинаково. Можно предполагать, что волны Q_1 и M_2 оказывают иницирующее воздействие на субдукционные землетрясения. Представляется, что остальные рассматриваемые пять волн проявляют себя в условиях неоднородности зоны субдукции, которые могут быть обусловлены сочленением двух дуг, либо другими тектоническими процессами.

Две из четырех аномалий, выявленных на коротком (3 года) интервале времени, пространственно близки очагам трех сильных ($M = 6.7 - 6.9$) землетрясений того же временного промежутка. Представляется перспективным применить такой подход для временных интервалов, включающие другие сильные землетрясения.

Автор признателен своим коллегам-программистам, без помощи которых эта работа была бы принципиально невозможна: О.Г. Волович, В.В. Иванову, И.В. Сеницыну.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант РФФИ № 05-05-64276).

Список литературы

1. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. // М.: Наука. 1983. 416 с.
2. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И., Сеницын В.И., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система сейсмологических наблюдений // Сб. Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 2004. С.11-42.
3. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 240 с.
4. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
5. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. 1991. Вып.24. С.19-50.
6. Николаев В.А. Пространственно-временные особенности связи сильных землетрясений с приливными фазами // Сб. Наведенная сейсмичность / Под ред. Николаева А.В., Галкина И.Н. М.: Наука. 1994. С.103-114.
7. Салтыков В.А., Иванов В.В., Кугаенко Ю.А. Воздействие земных приливов на сейсмичность перед землетрясением 13 ноября 1993 года $M_w=7.0$ (Камчатка) // Физика Земли. 2004. №7. С.25-34.
8. Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Параметры сейсмичности Камчатки в 2003 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. Петропавловск-Камчатский. 2004. №3. С.36-45.
9. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
10. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. №4. С.64-74.
11. Супруненко О.И., Андиева Т.А., Сафронов П.Н. Кроноцко-Крутогоровская зона субширотных разломов Камчатки // Доклады АН СССР. 1973. Т.209. №6. С.1398-1401.
12. Тюпкин Ю.С. Модулирование слабой сейсмичности приливными деформациями перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2002. №3. С.3-10.
13. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
14. Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. №4. С.91-107.
15. Aoki S., Ohtake M., Sato H. Tidal modulation of seismicity: an indicator of the stress state? // The 29-th General Assembly of the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior. Abstracts. Aug. 18-28, 1997. Thessaloniki, Greece. P.347.
16. Heaton T.H. Tidal triggering of earthquakes // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1975. Vol.43. P.307-326.
17. Knopoff L. Earth tides as triggering mechanism for earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1964. Vol.54. P.1865-1870.
18. Polumbo A. Lunar and solar tidal components in the occurrence of earthquakes in Italy // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1986. Vol.84. Num.1. P.93-99.
19. Shlien S. Earthquake-tide correlation // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1972. Vol.28. P.27-34.
20. Simpson J.F. Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes // Earth and Planet. Sci. Lett. 1967. Vol.2. P.473.
21. Tanaka S., Ohtake M., Sato H. Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data // Journal of Geophysical Research. V. Solid Earth. 2002. V.107. N 10.
22. Weems R.E., Perry W.H. Strong correlation of major earthquakes with solid-earth tides in part of the eastern United States // Geology. 1989. Vol.17. P.661-664.