

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ СЕЙСМИЧНОСТИ РАЙОНА ОСТРОВА ХОККАЙДО

Воропаев П.В.¹, Takahashi H.², Салтыков В.А.¹

¹ Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский

² Hokkaido University Sapporo, Hokkaido JAPAN

Введение

Остров Хоккайдо находится в геодинамической зоне стыка Амурской, Охотской и Тихоокеанской тектонических плит, что обуславливает высокую сейсмическую активность в данном регионе. С 2014 года данный район входит в зону ответственности Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН". По данным Японского Метеорологического Агентства (JMA) на данной территории в период с 1960 по 2011 год было зафиксировано более 180 тысяч землетрясений, включая 13 с магнитудой $M > 7.0$. Землетрясения в районе Хоккайдо распределены в пространстве неоднородно: основная масса событий приурочена к южному участку Курильской островной дуги, помимо этого наблюдается группировка землетрясений в северной части Японского моря. Как следствие, оценка сейсмичности в данном районе представляет собой актуальную научную задачу. В представленной работе для анализа сейсмичности района острова Хоккайдо была использована методика Статистической оценки уровня сейсмичности (СОУС '09).

Методика СОУС'09

Методика Статистической Оценки Уровня Сейсмичности (СОУС'09) [4] создана в Камчатском филиале Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН". Данная методика позволяет в качественных терминах определить уровень сейсмичности в заданной пространственно-временной области, основываясь на количественном параметре – значении функции распределения сейсмического момента M_0 , выделившегося за определенный временной интервал $F(M) = P(\Sigma M_0 \leq M)$. Выбор сейсмического момента в качестве основного параметра обуславливается его низкой чувствительностью к качеству сейсмического каталога, так как практически весь сейсмический момент выделяется вследствие сильных землетрясений.

Интервалы между квантилями функции распределения выделившегося сейсмического момента формируют шкалу, включающую 8 уровней сейсмичности: - экстремально высокий - $F(0.995) < \lg(M_0)$, высокий - $F(0.975) < \lg(M_0) < F(0.995)$, фоновый повышенный - $F(0.85) < \lg(M_0) < F(0.975)$, фоновый средний - $F(0.15) < \lg(M_0) < F(0.85)$, фоновый пониженный - $F(0.025) < \lg(M_0) < F(0.15)$, низкий - $F(0.005) < \lg(M_0) < F(0.025)$, экстремально низкий - $\lg(M_0) < F(0.005)$. Формализованная шкала уровня сейсмичности позволяет сделать заключение о повышенной либо пониженной сейсмической активности рассматриваемого региона. В частности, определяется понятие "сейсмический фон".

С целью автоматизации процесса оценки уровня сейсмичности была разработана компьютерная программа [1], обеспечивающая оперативность применения рассматриваемой методики.

В настоящее время методика СОУС'09 внедрена и используется в ФИЦ ЕГС РАН для ежегодной оценки уровня сейсмичности регионов России и мониторинга сейсмоактивных зон и вулканических объектов Камчатки.

Использованные данные

В данной работе использован каталог землетрясений Японского Метеорологического Агентства (JMA) с 1960 по 2013 гг. Определения гипоцентров получены JMA в кооперации с Министерством Образования, Культуры, Спортa и Технологий (МЕХТ). Учет особенностей тектонического строения рассматриваемого района и пространственного распределения землетрясений Хоккайдо позволяет выделить две сейсмоактивных зоны: северная часть Японского моря (Зона 1) и южный участок Курильской островной дуги (Зона 2) (рис. 1). Сейсмический процесс в исследуемых зонах имеет различие. В Зоне 1 с 1960 по 2013 гг. было зарегистрировано только два события с $M \geq 7.0$, когда за этот же период в Зоне 2 произошло 13 землетрясений с $M \geq 7.0$ и 2 землетрясения с $M \geq 8.0$ (04.10.1994, M 8.2 и 26.09.2003, M 8.0).

Для обеих зон были определены периоды времени с соответствующими уровнями надежной регистрации, на которых выборки землетрясений однородны (соответствуют закону Гутенберга – Рихтера) (Таблица 1).

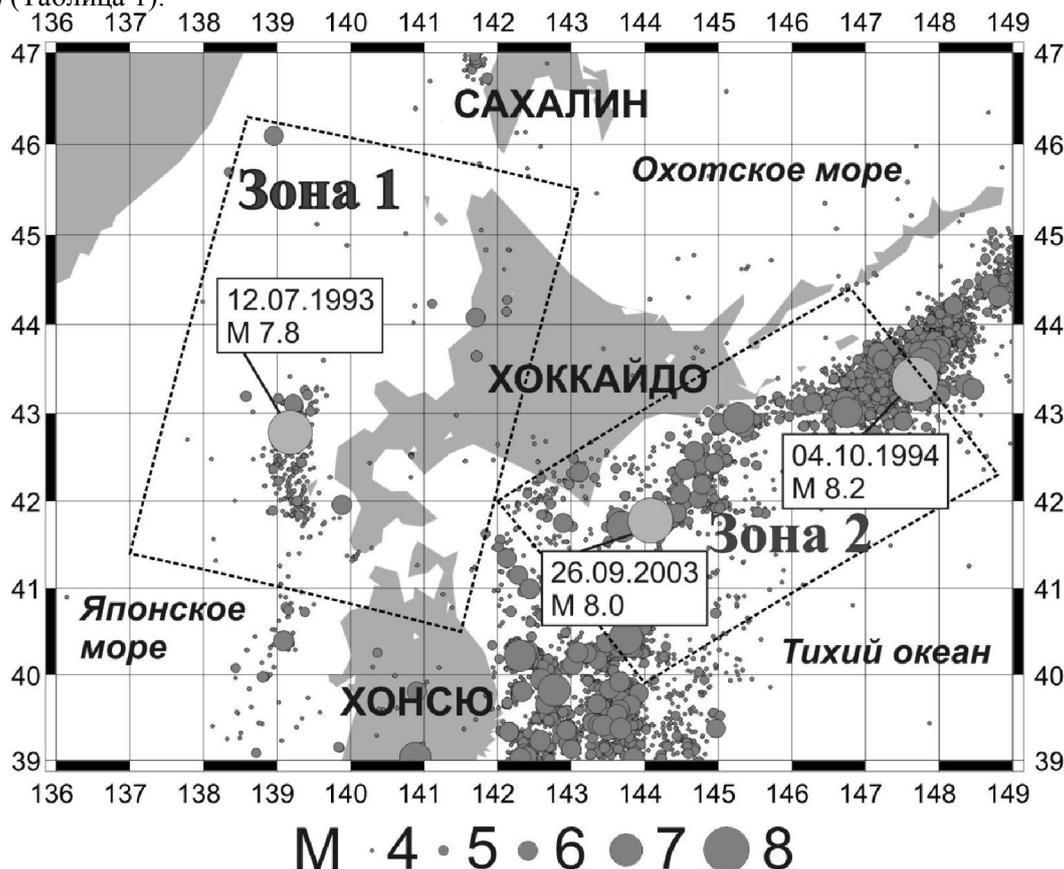


Рис. 1. Сейсмичность Хоккайдо в период с 1990 по 2013 гг. в диапазоне глубин 0–60 км. Пунктирной линией отмечены исследуемые зоны.

Таблица 1. Параметры выборок землетрясений зон 1 и 2.

Зона	Период	Уровень надежной регистрации М	Число землетрясений в выборке
Зона 1	Январь 1960 - Октябрь 2013	4.0	1010
	Январь 1980 - Октябрь 2013	3.5	2452
	Январь 1985 - Октябрь 2013	3	5344
	Январь 1995 - Октябрь 2013	2.5	6809
	Январь 2001 - Октябрь 2013	2	9104
Зона 2	Январь 1960 - Октябрь 2013	4.5	2549
	Январь 1980 - Октябрь 2013	4	3846
	Январь 1985 - Октябрь 2013	3.5	7728
	Январь 1995 - Октябрь 2013	3	11293
	Январь 2001 - Октябрь 2013	2.5	14267

Вычисление сейсмического момента

Сейсмический момент вычислялся по корреляционной зависимости, приведенной в работе Гусева и Мельниковой [2], которая принимает следующий вид:

для $M < 6.8$: $\lg(M_0) = 1.32M + 10.43$

для $M \geq 6.8$: $\lg(M_0) = 0.69 M^2 - 7M + 41.94$

где M - магнитуда JMA

Функции распределения сейсмического момента

Для каждого периода из Таблицы 1 были построены функции распределения логарифма суммарного сейсмического момента во временных окнах 7, 15, 30, 90, 180, 365 суток. На рисунке 2

представлены примеры функций распределения для периодов времени 1960-2013, 1985-2013 и 2001-2013 гг.

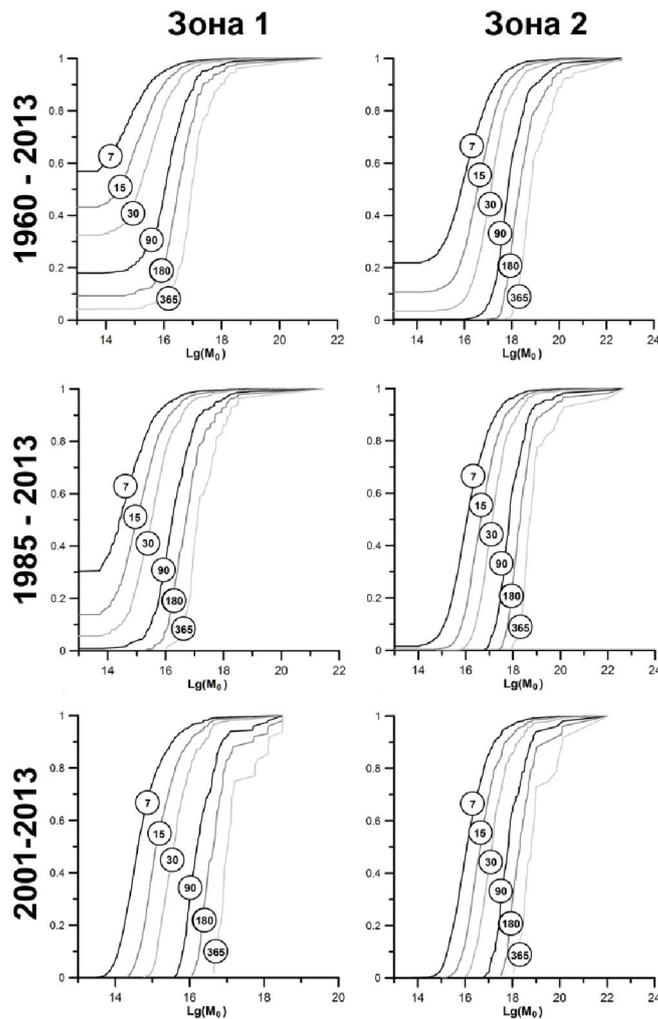


Рис. 2. Функции распределения выделившегося сейсмического момента в зонах 1 и 2 во временных окнах 7, 15, 30, 90, 180, 365 суток, построенные для различных временных периодов.

Анализ функций распределения, построенных для Зоны 1, показал наличие всех уровней сейсмичности шкалы СОУС'09 для периодов начиная с 1995 года. Для периода 1960-2013 отсутствует низкий и экстремально низкий уровень сейсмичности в окнах 180 и 365 суток. Для периодов 1980-2013 и 1985-2013 в окнах 7, 15, 30 суток отсутствует низкий уровень сейсмичности. Такой эффект вызван большим количеством временных окон, в которых отсутствуют землетрясения, с магнитудой превышающей уровень надежной регистрации. В Зоне 2 отсутствует низкий уровень сейсмичности в малых временных окнах (7, 15, 30 суток) начиная с 1995 года.

Функции распределения зон 1 и 2 сравнивались между собой с помощью критерия Колмогорова-Смирнова. Критерий Колмогорова-Смирнова [3] является широко используемым непараметрическим критерием проверки гипотезы о принадлежности двух независимых выборок одному закону распределения. В результате сравнение показало с высоким уровнем значимости (5%) статистическое различие функций распределения зон 1 и 2. Как следствие, сейсмический процесс в зонах 1 и 2 различается.

Номограммы СОУС'09

Сейсмичность рассматриваемых зон описана с помощью номограмм СОУС'09. Номограмма позволяет определить границы уровня сейсмичности для заданного временного окна, основываясь на величине сейсмического момента. На рисунке 3 представлены номограммы СОУС'09 зон 1 и 2, построенные на основании выборок землетрясений, соответствующих периодам времени: 1960-2013, 1985-2013, 1995-2013 гг. Исходя из построенных номограмм, следует отметить отсутствие уровней сейсмичности ниже фонового пониженного для Зоны 1, и отсутствие экстремально низкого уровня

для Зоны 2 в период 1960-2013 гг. Это связано с наличием большого количества временных окон, в которых не было землетрясений выше уровня надежной регистрации.

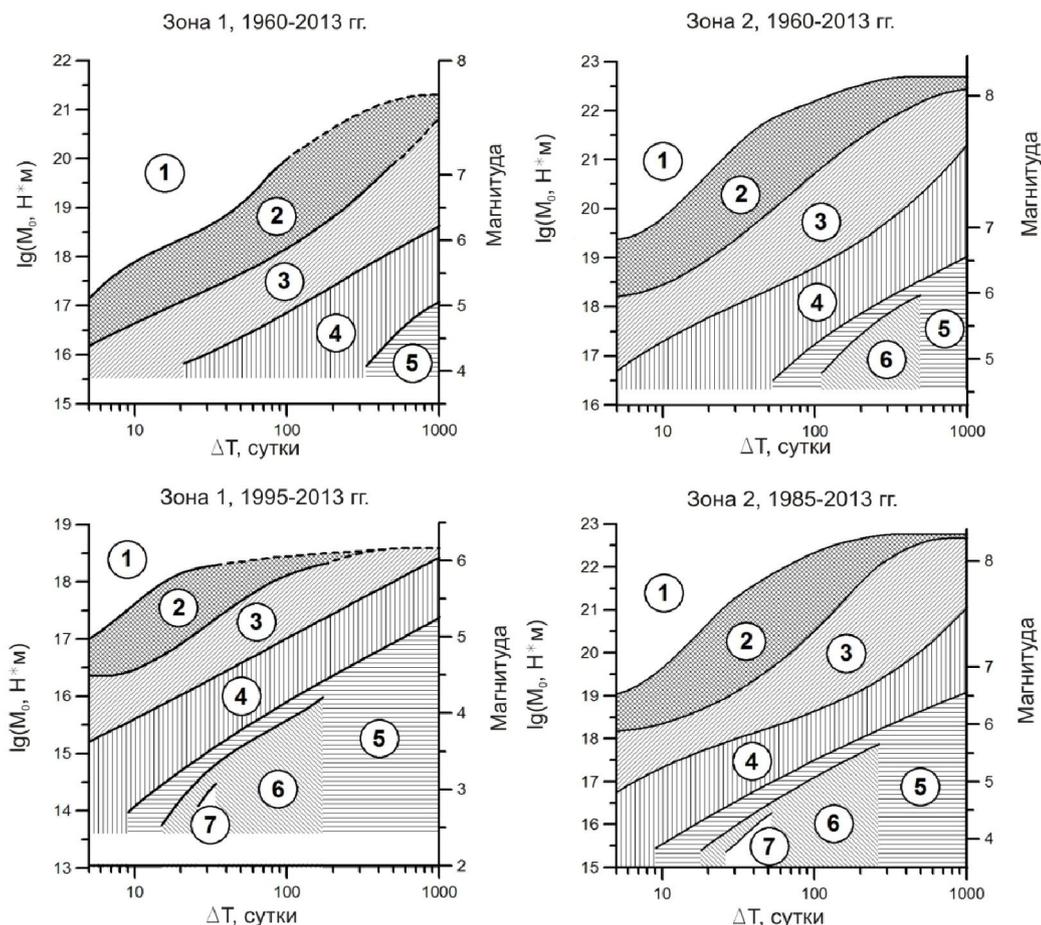


Рис. 3. Номограммы СОУС'09 зон 1 и 2. Цифрами обозначены уровни сейсмичности по шкале СОУС'09: 1 - экстремально высокий, 2 - высокий, 3 - фоновый повышенный, 4 - фоновый средний, 5 - фоновый пониженный, 6 - низкий, 7 - экстремально низкий. Пунктирной линией показаны участки экстраполяции для высокого и экстремально высокого уровня сейсмичности.

С помощью номограмм СОУС'09 выявлены интервалы временных окон, соответствующие максимальному количеству уровней шкалы СОУС'09. Для Зоны 1 в период 1995-2013 гг. все уровни сейсмичности присутствуют в интервале временных окон от 25 до 35 суток. Аналогичный интервал для Зоны 2 в период 1985-2013 гг. составляет 25-55 суток.

Корреляция вариаций уровня сейсмичности зон 1 и 2

Вариации во времени уровня сейсмичности являются индикатором сейсмического процесса в рассматриваемой области. Использование различных математических методов при изучении данных вариаций позволяет получить дополнительную информацию о сейсмическом процессе.

Для зон 1 и 2 построены функции автокорреляции временных вариаций уровня сейсмичности во временных окнах 7, 30, 365 суток.

Анализ данных функций показывает независимость текущего уровня сейсмичности от сейсмичности в предыдущих временных интервалах. Исключением является функция для зоны 1 для вариаций уровня сейсмичности в окне 365 суток. В данном случае наблюдается локальный максимум функции автокорреляции величиной 0.3 при временном сдвиге 135 недель, что говорит о слабой корреляционной зависимости.

Корреляционный анализ временных вариаций уровня сейсмичности во временных окнах 90, 180, 365 суток, показал отсутствие линейной связи между сейсмическими процессами в обеих зонах на длинных временных интервалах (18 лет и более). Однако детальное разбиение на короткие временные участки позволило обнаружить период времени с 1996 по 2000 год с высокой корреляцией вариаций уровня сейсмичности в рассматриваемых зонах. Максимальное значение коэффициента корреляции было обнаружено при анализе временных вариаций уровня сейсмичности, построенных

для окна 365 суток. Оно составило 0.73 при временном сдвиге в 8 недель. Данный результат показывает наличие проявления сейсмичности в Зоне 2, опережающее сейсмическую активность в Зоне 1 на 8 недель в период с 1996 по 2000 год.

Сейсмическое затишье, предвещающее Шикотанское землетрясение

Анализ временных вариаций уровня сейсмичности Зоны 2 выявил шестимесячное сейсмическое затишье, предвещающее сильное Шикотанское землетрясение (Тохо-Оки) 04.10.1994 г., М 8.2. Данное землетрясение произошло в зоне южного участка Курильской островной дуги, и было сильнейшим из зарегистрированных землетрясений в зоне 2. Обнаруженное сейсмическое затишье проявилось в виде выхода уровня сейсмичности на низкий уровень и было наиболее длительным за период 1960 -2013 гг.

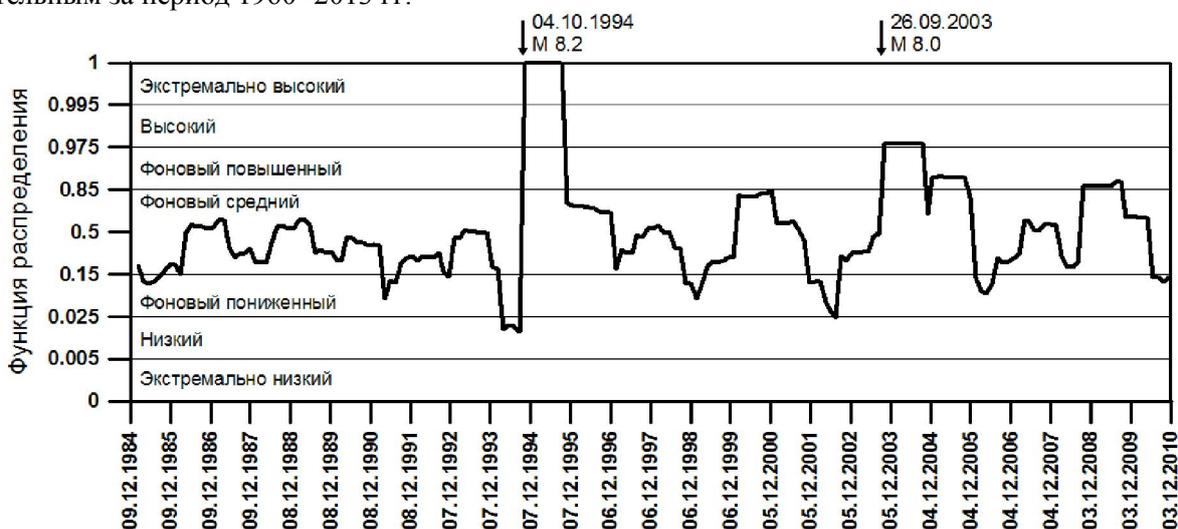


Рис. 4. Вариации уровня сейсмичности Зоны 2 с 1985 по 2010 гг. во временном окне 365 суток. Стрелкой обозначено Шикотанское землетрясение (Тохо-Оки) 04.10.1994, М 8.2. Данное землетрясение предвараюсь шестимесячным пребыванием сейсмичности на низком уровне.

Заключение

Методика СОУС'09 применена для описания сейсмичности территории острова Хоккайдо. Выделено две сейсмоактивные зоны: северная часть Японского моря и южный участок Курильской островной дуги, соответствующие западному и восточному побережью Хоккайдо. Для каждой зоны выделено пять временных периодов, на которых выборки из каталога землетрясений ЖМА однородны.

Анализ функций распределения сейсмического момента зон 1 и 2 с помощью статистического критерия Колмогорова-Смирнова позволил сделать выводы о различии сейсмического процесса в рассматриваемых зонах.

Корреляционный анализ временных вариаций уровня сейсмичности показал отсутствие линейной связи между сейсмическими процессами в обеих зонах на длительных временных интервалах. Однако для периода времени с 1996 по 2000 год наблюдалась высокая корреляция с временным лагом 8 недель.

Обнаружено сейсмическое затишье в зоне 2, предвещающее Шикотанское землетрясение (Тохо-Оки) 04.10.1994, М 8.2, заключающееся в пребывании сейсмичности на низком уровне в течение полугода до наступления данного события.

Список литературы

1. Воронаев П.В., Салтыков В. А. Вычислительная система оценки уровня сейсмичности // Геология и Геофизика Юга России. – 2013, № 2, С. 18-25.
2. Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами - среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55-63.
3. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006, 816 с.
4. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53-59.