

ГЛУБИННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИПОЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛЬСКОГО РЕГИОНА

Е.В. Сасорова¹, М.Ю. Андреева²

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский пр. 36, г. Москва, 117997,
e-mail: sasorova_lena@mail.ru*

²*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1-б, г. Южно-Сахалинск, 693022,
e-mail: andreeva-mu@mail.ru*

Поступила в редакцию 30 апреля 2010 г.

В работе поставлены две параллельные задачи: анализ распределений землетрясений по глубине и магнитуде для четырех субрегионов Курильского региона и автоматическое определение для этих субрегионов значения пороговой границы по глубине ($H_{\text{пор}}$), которая делит всю совокупность событий в каждом субрегионе на две непересекающиеся группы. К первой относятся события, которые характеризуются неравномерной активизацией в течение года и подвержены периодическим дополнительным воздействиям, а ко второй – события, которые распределены в течение года равномерно и не обнаруживают связи с какими-либо периодическими воздействиями.

Сопоставление результатов этих анализов показало, что положение границы между коровыми и более глубокими землетрясениями зависит от особенностей распределений гипоцентров по глубине и от характерных значений магнитуды. Статистически представительные интервалы этой границы для Южных, Средних Курильских островов, о. Хоккайдо от 40 до 80 км, для Северных Курильских островов – от 60 до 100 км.

Ключевые слова: землетрясения, глубина, энергия, Курильские о-ва, о. Хоккайдо.

ВВЕДЕНИЕ

В Тихоокеанской зоне происходит много сильных и катастрофических землетрясений. Для этого региона характерен большой диапазон изменения глубин очагов [3–5, 12, 13]. Однако распределение сейсмических событий по глубинам варьируется в достаточно широких пределах в различных субрегионах этой зоны. Эти распределения могут значительно различаться даже для рядом расположенных субрегионов. Полный интервал глубин в большинстве широтных поясов распадается на три отдельные группы с достаточно четко выраженными границами [8]. Первая группа объединяет события с глубиной от 0 до 80 км (коровые), вторая группа – от 120 до 240 км (промежуточные), а третья выделяется на глубинах от 500 до 700 км.

Часть авторов полагает, что подавляющее число землетрясений всего региона регистрируется в интервале глубин от 31 до 50 км, в наиболее активной части литосферы, расположенной между подо-

швой земной коры и кровлей астеносферы [12]. В работе [2] утверждается, что основное количество Курильских землетрясений происходит на глубинах 35–55 км, а в интервале от 50 до 70 км количество событий резко уменьшается. В исследованиях Охотоморского шельфа Курильских островов [10] отмечено, что существует область концентрации гипоцентров также на глубинах 10–15 км. Авторы работы [11] пришли к выводу, что распределение землетрясений по глубине очага и по магнитуде дискретно.

Но ни в одной из прежних работ не изучены детальные распределения землетрясений по глубине и магнитуде одновременно. Такие зависимости могут показать, как меняются глубинные распределения для событий разных энергетических уровней в пределах одного субрегиона и для различных субрегионов. Изучение глубинных распределений событий по магнитуде важно еще и потому, что энергия события определяет размеры макросейсмического очага.

Данная работа является продолжением работы [1]. Цель данной работы – анализ магнитудных и глубинных распределений землетрясений изучаемых субрегионов, опробование автоматического метода подбора значения оптимальной границы ($H_{\text{пор}}$) для разделения событий по глубине на две непересекающиеся группы для каждого изучаемого субрегиона и сопоставление полученных значений с распределениями сейсмических событий по глубине.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ГРУППИРОВАНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СОБЫТИЙ

На первом этапе наших исследований в работе [1] события в каждом субрегионе делились на две группы. Этим группам приписывались рабочие названия: “условно глубокие” с глубиной залегания гипоцентра $H > H_{\text{пор}}$ ($H_{\text{пор}}$ – пороговое значение глубины) и “условно неглубокие” с $H \leq H_{\text{пор}}$. Эти рабочие названия сохраняются и в данной работе. В работе [1] значение $H_{\text{пор}}$ было выбрано равным 70 км для всех групп исследуемых событий. Но мы предполагаем, что при выборе этого значения необходимо учитывать структуру глубинного распределения событий в изучаемом регионе. Более того, само значение $H_{\text{пор}}$ может изменяться от одного субрегиона к другому (обзорная карта представлена на рис. 1).

В работе использовался сводный каталог землетрясений Курило-Камчатского региона, сформированный на основе единой магнитудной классификации за временной промежуток с 1737 по 2007 гг. Основой его составления послужили сейсмологические сводки: [3–5, 9, 14–18].

Каталог был предварительно обработан путем удаления афтершоков из списка событий. Совокупность событий в каждом субрегионе была разделена на три подмножества в зависимости от магнитуды землетрясений: $4.0 \leq M < 5.0$; $5.0 \leq M < 6.0$; $6.0 \leq M < 9.0$. Для анализа распределения событий по глубине использовалась следующая неравномерная шкала глубин: 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 200, 300, 400, 500 и 700 км. Вычисления выполнялись последовательно и независимо для всех заданных магнитудных диапазонов (МД).

Для статистического анализа исходная выборка землетрясений для выбранного субрегиона, заданного интервального значения МД и заданного значения $H_{\text{пор}}$ делится на два подмножества: события с $H \leq H_{\text{пор}}$ и с $H > H_{\text{пор}}$. Далее для каждого из двух выделенных подмножеств определяется вероятность (P) того, что сейсмические события в исследуемом подмножестве распределены в течение года неравномерно. Таким образом, за один проход программы вычислялись значения: $P_{\text{гн}}$ – для “условно глубоких” землетрясе-

ний и $P_{\text{нг}}$ – для “условно неглубоких” землетрясений. Для каждого МД такая процедура выполняется K раз с различными значениями $H_{\text{пор}}$ (по количеству значений в заданной шкале глубин, в нашем случае $K = 13$). В результате для каждого МД мы получаем две кривые (по K точек в каждой), которые показывают зависимость значений $P_{\text{нг}}$ и $P_{\text{гн}}$ от значения пороговой глубины. Считалось, что оптимальное значение глубины $H_{\text{опт}}$ достигается при максимальной разнице значений вероятностей $P_{\text{нг}}$ и $P_{\text{гн}}$.

Для вычисления значения P параллельно использовался критерий Пирсона (или χ^2) и метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). За нулевую гипотезу принималось предположение о равномерности распределения событий в течение года. Применялись параллельно две дискретные временные шкалы: месячная и десятидневная. Все вычисления, перечисленные выше, выполняются с помощью пакета программ, разработанного в системе MatLab одним из авторов этой работы, и опробованного ранее в работах [6, 7, 19].

Кроме этого для анализа глубинных и магнитудных распределений для каждого субрегиона вычислялись и строились:

- кумулятивные графики повторяемости землетрясений для определения представительности магнитуд по субрегионам;

- гистограммы распределения землетрясений по глубинам без разделения на магнитудные диапазоны по всему основному каталогу (1737–2007 гг.);

- гистограммы распределения землетрясений по глубинным фазам (для каждого землетрясения делалась выборка глубины очага по разности фаз $rP-P$, общее количество таких событий – 5684);

- графики глубинных распределений землетрясений независимо для каждого магнитудного диапазона по каталогу (1980–2007 гг.).

Необходимо было сопоставить результаты, полученные по всем намеченным направлениям исследования, и определить, насколько зависит вычисленное значение $H_{\text{опт}}$ от глубинных распределений событий в каждом субрегионе.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПО СУБРЕГИОНАМ

Северо-Курильский субрегион. Анализ кумулятивного графика повторяемости (рис. 2В) показывает, что для данного субрегиона все землетрясения с $M \geq 4$ можно считать представительными. Составляющая общей дисперсии, зависящая от случайных факторов, равна 0.051 и пренебрежимо мала по сравнению с факторной дисперсией (0.9489).

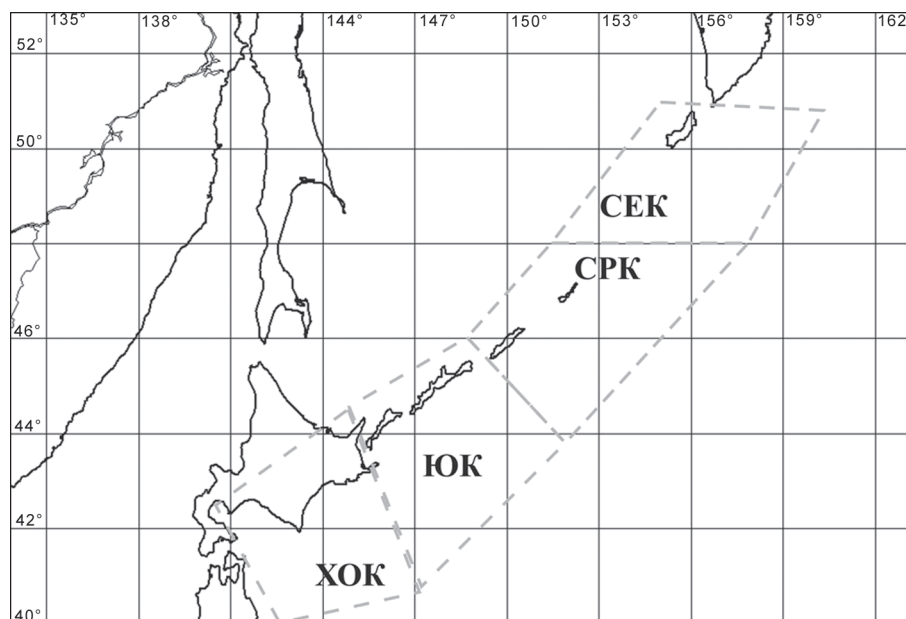


Рис. 1. Карта Курильских островов и острова Хоккайдо с выделенными субрегионами. Границы их обозначены серыми пунктирными четырехугольниками.

Обозначения: ХОК – Хоккайдо; ЮОК – Южные Курильские о-ва; СРК – Средние Курильские о-ва; СЕК – Северные Курильские о-ва.

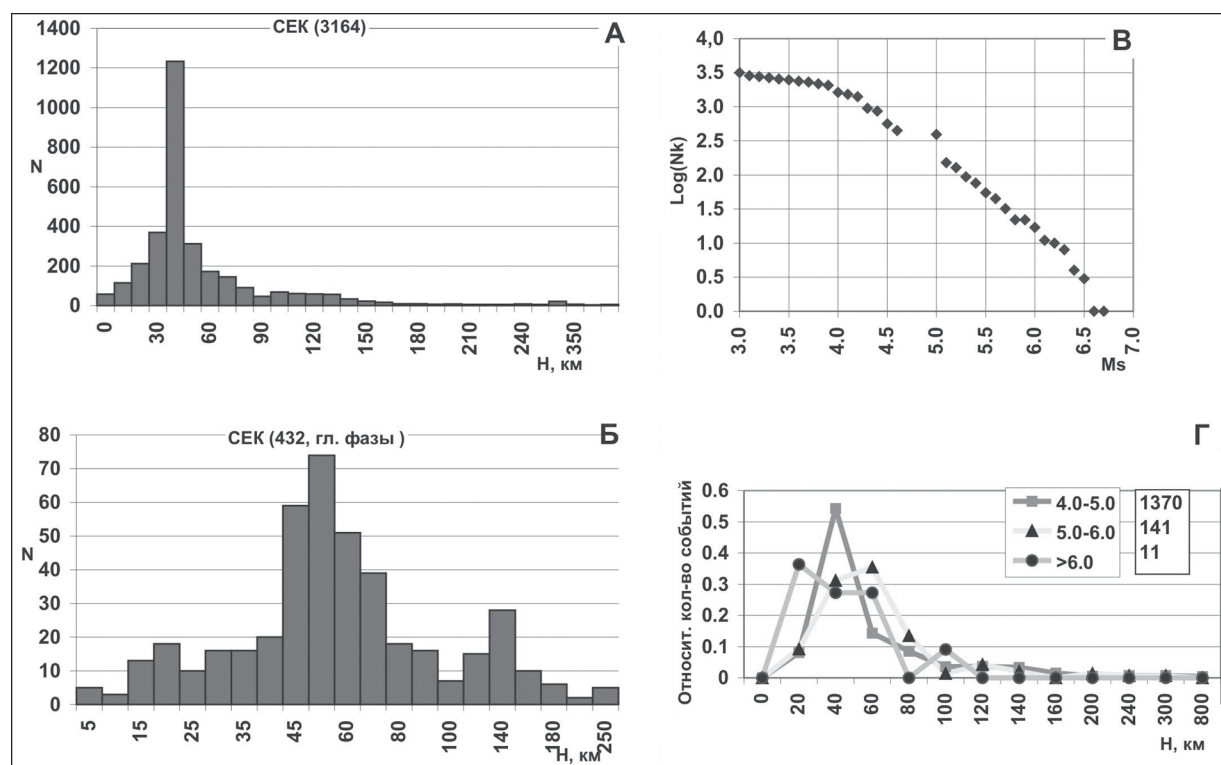


Рис. 2. Распределение событий в субрегионе СЕК.

А – распределение по глубинам соответственно каталогу землетрясений; Б – распределение по глубинам с учетом глубинных фаз; В – кумулятивный график повторяемости; Г – распределение по глубине для каждого магнитудного диапазона в отдельности. На А в скобках, рядом с его названием, указано общее количество событий в субрегионе; на Б там же указано количество событий, для которых выделены глубинные фазы; в правом верхнем углу фрагмента Г, рядом с легендой, указано количество событий в каждом магнитудном диапазоне.

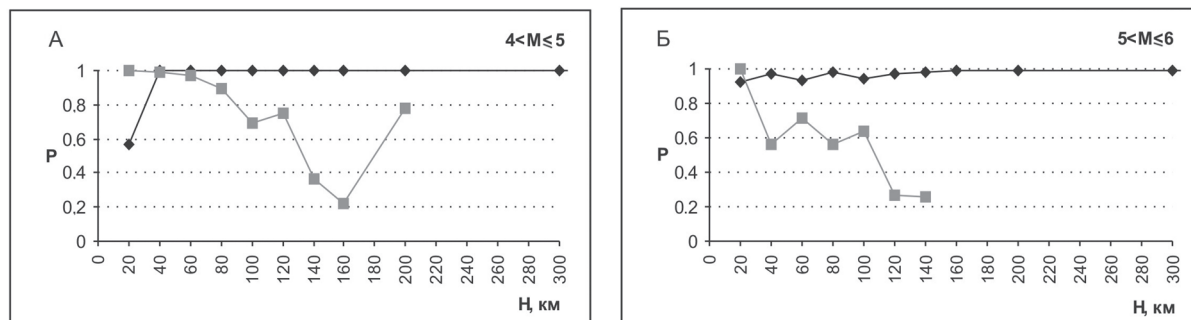


Рис. 3. Зависимость значений вероятностей $P_{нг}$ (черная линия) и $P_{гг}$ (серая линия) от пороговой глубины для двух магнитудных диапазонов СЕК субрегиона.

По оси ординат для обоих фрагментов – значения вероятностей, по оси абсцисс – значение пороговой глубины ($H_{пор}$) в км.

Из рис. 2А видно, что ярко выраженный максимум приходится на глубины от 40 до 50 км. Максимум на рис. 2Б приходится на диапазон 45–50 км. Выделяются еще два локальных максимума на глубинах 15–20 км и 120–140 км.

На рис. 2Г для событий $4 \leq M < 5$ виден ярко выраженный максимум на 40 км (более 50 % событий расположены именно в этом диапазоне) и спад количества событий к 80 км (менее 10 % событий). Для МД $5 \leq M < 6$ максимум перемещается на 60 км (около 35% событий), он не такой резкий, как на двух предыдущих диапазонах (30 % на глубине 40 км и около 14 % на 80 км). Для наиболее сильных землетрясений в этом субрегионе ($M \geq 6$) зафиксировано всего 11 событий, из которых 10 практически равномерно распределены в трех глубинных интервалах (20, 40 и 60 км).

Расхождение двух кривых вероятностей (рис. 3А) начинается на глубине $H_{пор} = 100$ км и достигает максимума на глубине 160 км. Для другого диапазона магнитуд (рис. 3Б) существенное расхождение кривых возникает на глубине 40 км, и далее эта разница с незначительными колебаниями сохраняется до 100 км. Величина $P_{гг}$ не вычисляется, когда событий с $H > H_{пор}$ становится мало для продолжения корректных вычислений (поэтому эти кривые, как правило, короче). Хотелось бы отметить, что значения вероятности для $P_{нг}$ на обоих фрагментах близки к единице, и это значение устанавливается на глубинах 40–60 км и далее не уменьшается. Это подтверждает полученные ранее результаты, что землетрясения с $H \leq H_{пор}$ распределены неравномерно в течение года.

Далее кратко рассматриваются результаты анализа еще трех субрегионов. Схема обозначений на рис. 4, 6 и 8 такая же, как на рис. 2, а на рис. 5, 7 и 10 такая же, как на рис. 3.

Средне-Курильский субрегион. Анализ кумулятивного графика повторяемости (рис. 4В) показывает, что для данного субрегиона все землетрясения с $M \geq 4$ являются представительными. На рис. 4А наблюдается ярко выраженный максимум на глубинах 30–50 км (более 55 % от общего количества событий) и два локальных максимума на глубинах 0–10 км и 120–160 км. На рис. 4Б видно, что максимальное количество событий приходится на интервалы 35–45 км, заметен максимум в интервале 120–160 км. На рис. 4Г распределения землетрясений по глубине для всех МД практически идентичны – ярко выраженный максимум на 40 км. Для наиболее сильных землетрясений в этом субрегионе ($M \geq 6$) зафиксировано всего 17 событий, из которых 13 попадают в интервал 20–60 км и по одному событию приходится на глубины 100, 160, 200 и 300 км.

Расхождение двух вероятностных кривых на рис. 5А начинается на глубине $H_{пор} = 40$ км и достигает максимума на глубине 60 км. Для диапазона $5 \leq M < 6$ (рис. 5Б) существенное расхождение этих кривых возникает на глубине 20 км. Значения вероятности для $P_{нг}$ на обоих фрагментах близки к единице и это значение устанавливается на глубинах 40 км и далее существенно не уменьшается.

Южно-Курильский субрегион. По загибу графика повторяемости на рис. 6В видно, что для данного субрегиона землетрясения с $M \geq 4$ можно считать представительными. На первой гистограмме рис. 6А наблюдается выраженный максимум на глубинах 40–50 км и локальный максимум на глубинах 120–160 км. На рис. 6Б отмечается выраженный локальный максимум на глубине 40–45 км, существенное количество событий – в интервалах 35–40 км и 45–60 км. На интервале от 0 до 25 км события распределены практически равномерно. На рис. 6Г показанные распределения землетрясений по глубине

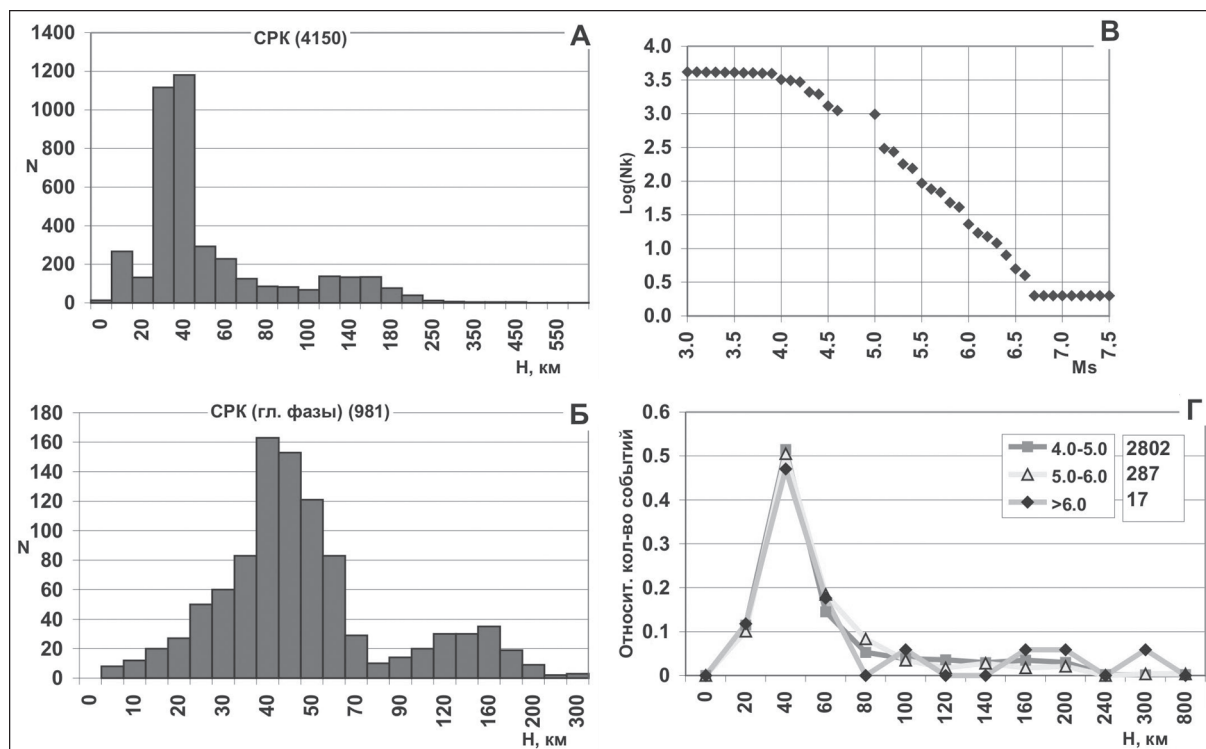


Рис. 4. Распределение событий по глубинам в СРК субрегионе. Обозначения и структура рисунка те же, что и на рис. 2.

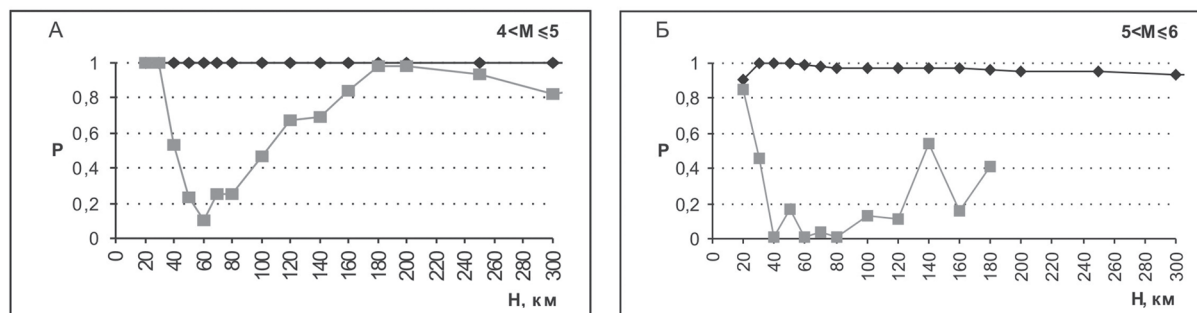


Рис. 5. Зависимость значений вероятностей $P_{нг}$ и $P_{гд}$ от пороговой глубины для СРК субрегиона. Обозначения и структура рисунка те же, что и на рис. 3.

для трех МД практически идентичны: ярко выраженный максимум на 40 км. Для наиболее сильных землетрясений в этом субрегионе ($M \geq 6$) зафиксировано 18 событий, из которых 15 попадают в интервал 40–80 км и еще три события приходятся на интервал глубин 140, 160 км.

На рис. 7А наблюдается расхождение кривых вероятностей на 40 и 140 км, кроме этого существует локальный максимум для $P_{гд}$ при значениях $H_{пор} = 100$ км. Для другого диапазона на рис. 7Б наибольшее расхождение кривых возникает на глубине 80 км. Значения вероятности для $P_{нг}$ на обоих фрагментах

близки к единице, как и для рассматриваемых ранее субрегионов.

Субрегион Хоккайдо. Представительными в этом субрегионе можно считать землетрясения с $M \geq 4$ при анализе графика повторяемости событий (рис. 8В). На первой гистограмме (рис. 8А) наблюдается выраженный максимум на глубинах 40–80 км (80 % от общего числа событий) и локальный максимум на глубинах 120–160 км. Гистограмма на рис. 8Б многомодальна. На ней отмечаются три локальных максимума на глубинах: 30–40 км, 60–80 км и 100–120 км. Заметны два локальных минимума на глуби-

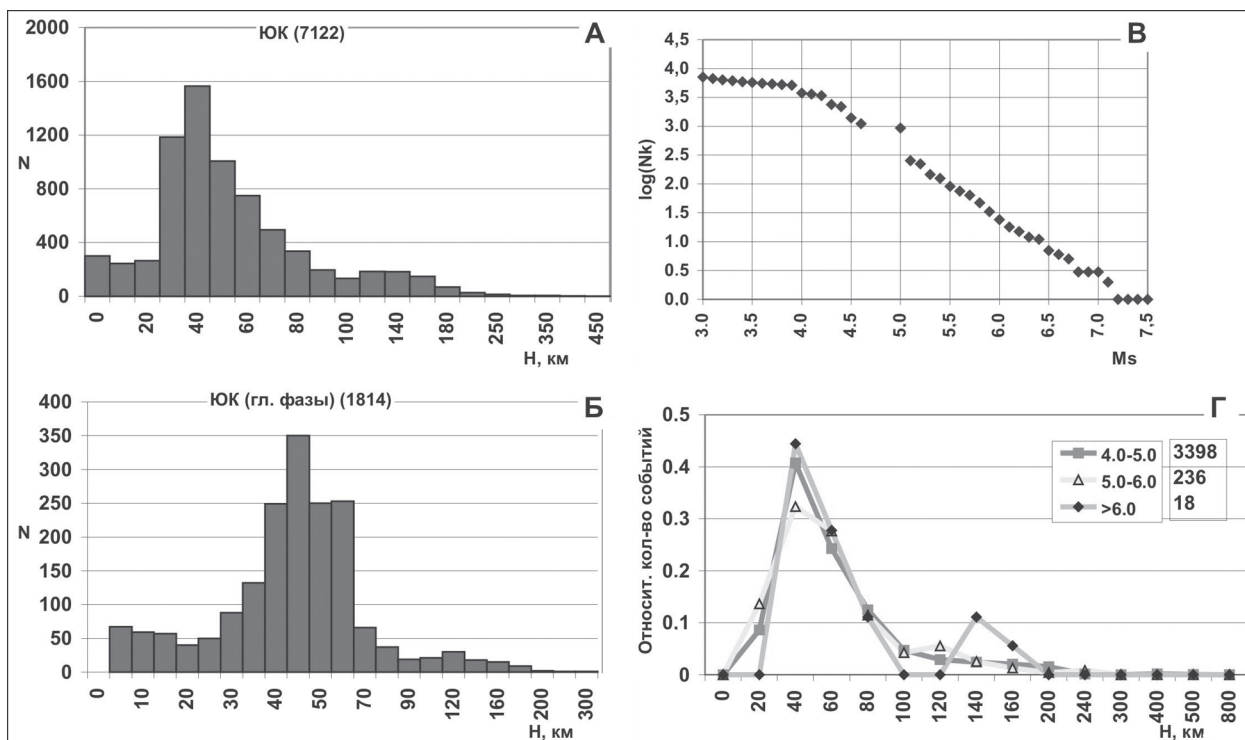


Рис. 6. Распределение событий по глубинам в ЮК субрегионе. Обозначения и структура рисунка те же, что и на рис. 2.

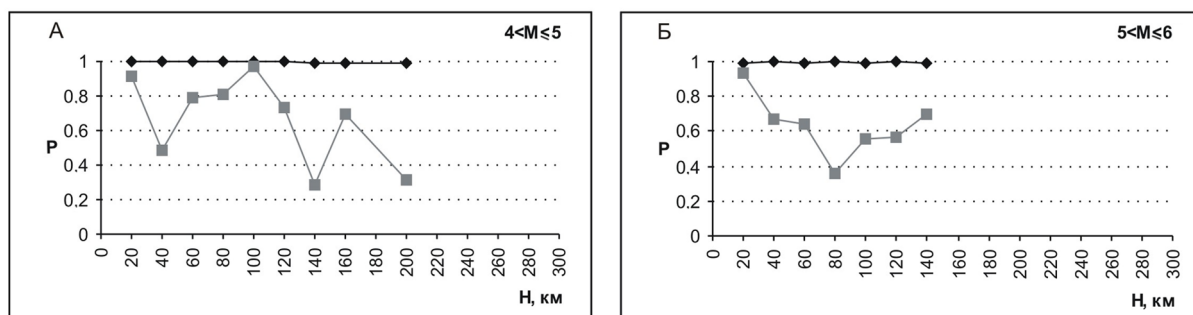


Рис. 7. Зависимость значений вероятностей $P_{нг}$ и $P_{гл}$ от пороговой глубины для ЮК субрегиона. Обозначения и структура рисунка те же, что и на рис. 3.

нах 50 и 90 км. Распределения на рис. 8Г значительно отличаются друг от друга по расположению максимумов и минимумов. Поэтому на рис. 9 представлено трехмерное распределение событий в этом регионе.

Можно отметить следующие характерные особенности этих распределений. Отсутствие ярко выраженного общего максимума в диапазоне глубин 0–80 км. Отмечается постепенный подъем количества событий (от 20 км) и постепенный спад (до 100 км). На всех МД отмечается локальный максимум количества событий на глубинах около 120 км. Для двух магнитудных диапазонов ($4 \leq M < 5$ и $5 \leq M < 6$)

этот максимум выражен достаточно слабо. Выявлено, что нет явной границы между коровыми землетрясениями с глубиной $H < 80$ км и промежуточными с $80 \leq H \leq 140$ км. Явно выраженный максимум на этой глубине отмечается для МД с $M \geq 6$.

На рис.10А незначительная часть событий (10 %) расположена на глубинах до 30 км. Поэтому в группу “условно глубоких” событий при значениях $H_{пор} = 20, 30$ км попадает абсолютное большинство землетрясений данного МД. Начиная с $H_{пор} = 40$ км, все значения $P_{нг} \geq 0.99$ (исключение составляет $P_{нг} = 0.85$ при $H_{пор} = 100$ км). Из анализа рис. 9 следует, что в этом МД нет четкой границы между “коровыми” и

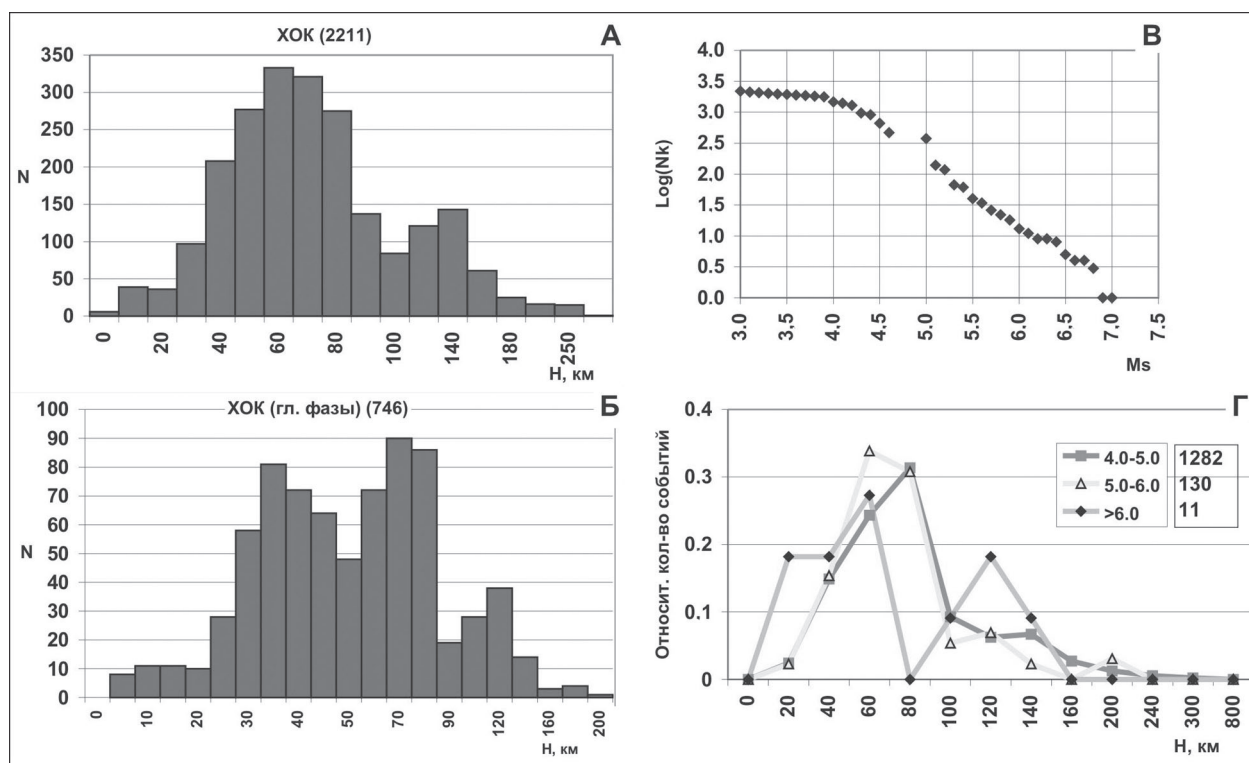


Рис. 8. Распределение событий по глубинам в субрегионе ХОК. Обозначения и структура рисунка те же, что и на рис. 2.

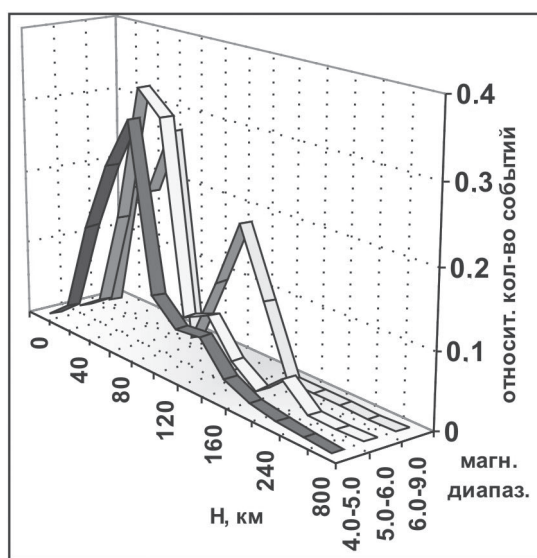


Рис. 9. Трехмерное распределение относительного количества событий по магнитудным диапазонам и глубинам гипоцентров для субрегиона Хоккайдо.

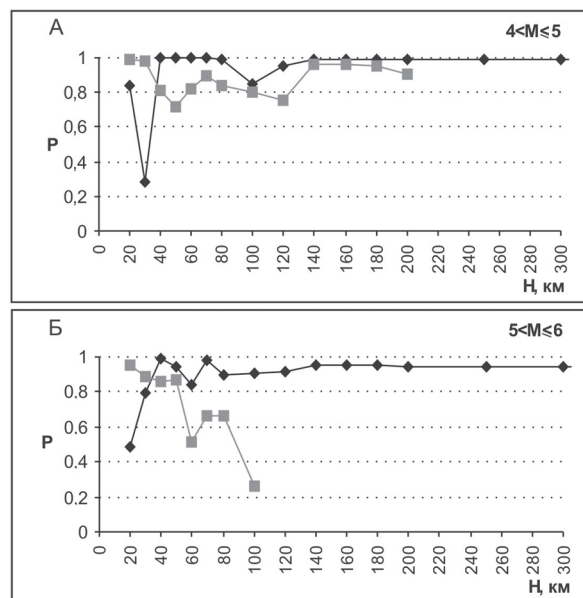


Рис. 10. Зависимость значений вероятностей $P_{HГ}$ и $P_{ГЛ}$ от пороговой глубины для субрегиона ХОК. Обозначения и структура рисунка те же, что и на рис. 3.

“промежуточными” землетрясениями, поэтому не просматривается эта граница и для значений $P_{гг}$. “Условно глубокие” события в этом МД неправомерно считать распределенными равномерно. Для диапазона $5 \leq M < 6$ (рис. 10Б) кривые $P_{гг}$ и $P_{гг}$ расходятся на глубине 60 км, а на рис. 9 для этого диапазона просматривается граница между коровыми и промежуточными событиями.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен совместный анализ распределений гипоцентров землетрясений для четырех субрегионов Курильского региона: Хоккайдо (ХОК), Южные Курилы (ЮК), Средние Курилы (СРК), Северные Курилы (СЕК). Показано, что положение пороговой границы ($H_{пор}$), разделяющей события на две группы: коровые землетрясения, на которые воздействуют дополнительные факторы и вызывающие неравномерную активизацию этих событий в течение года, и более глубокие землетрясения, на которые дополнительные факторы существенного влияния не оказывают, зависит от особенностей распределений гипоцентров по глубине и от характерных значений магнитуды.

2. Коровые события во всех субрегионах и для всех магнитудных диапазонов распределены неравномерно. Распределение “условно глубоких” событий в основном равномерно, за исключением некоторых случаев, когда в исследуемой выборке (для конкретного региона) нет четко выраженной границы между коровыми и промежуточными землетрясениями.

3. Определенные статистическим анализом представительные интервалы пороговой границы различаются для разных субрегионов. Они варьируются для субрегионов СРК, ЮК и ХОК в пределах от 40 до 80 км и для субрегиона СЕК от 60 до 100 км. Для о. Хоккайдо эта граница установлена только для магнитудного диапазона $5.0 \leq M < 6.0$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Левина Б.В. за помощь в подготовке статьи и Тихонова И.Н., Ломтева В.Л. за плодотворные обсуждения. Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ (проект № 07-05-00142 а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева М.Ю., Сасорова Е.В., Левин Б.В. Особенности внутригодового распределения землетрясений Курильского региона // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 3, № 5. С. 86–95.
- Болдырев С.А. Преобладающая глубина очагов фокальной зоны Курило-Камчатских землетрясений по наблюдениям наземных и донных станций // Сейсмологические исследования Миртового океана / Отв. ред. С.М. Зверев, С.А. Болдырев. М.: Междуведомственный геофизический комитет при президиуме АН СССР, 1983. С. 94–103.
- Викулин А.В., Ким Чун Ун. Курило-Камчатские землетрясения: Материалы Миртового центра данных Б. Данные наблюдений с 1911–1952 гг. М., 1983. 84 с.
- Викулин А.В., Ким Чун Ун. Курило-Камчатские землетрясения (материалы Миртового центра данных Б). Данные наблюдений с 1953–1961 гг. М., 1983. 84 с.
- Ким Чун Ун, Андреева М.Ю. Каталог землетрясений Курило-Камчатского региона (1737–2005 гг.): Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. 126 с.
- Левин Б.В., Родкин М.В., Сасорова Е.В. О возможной природе сейсмической границы на глубине 70 км // Докл. РАН. 2007. Т. 414, № 1. С. 101–104.
- Левин Б.В., Родкин М.В., Сасорова Е.В. Особенности сейсмического режима литосферы – проявления воздействия глубинного водного флюида // Физика Земли. 2010. № 5. С. 88–96.
- Левин Б.В., Сасорова Е.В. Глубинные распределения землетрясений по широтным поясам в Тихоокеанском регионе: общие тенденции // Докл. РАН. 2009. Т. 426, № 4. С. 537–542.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. М.: Наука, 1977. 536 с.
- Поплавский А.А., Бобков А.О. О распределении дальневосточных землетрясений по глубине залегания гипоцентра и магнитуде // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока и Восточной Сибири: Докл. междунар. науч. симпозиума, Южно-Сахалинск, 24–28 сентября 2002 г. Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2003. Т. 2. С. 64–87.
- Поплавский А.А., Бобков А.О. Статистическое исследование распределения землетрясений по глубине с учетом случайных ошибок ее оценок // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений Северо-Запада Тихого океана (в 2 т.): сб. статей / Отв. ред. А.И. Ивашенко. Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2001. Т. 1. С. 128–141.
- Тараканов Р.З., Бобков А.О. Зоны возможных очагов землетрясений Курило-Охотского региона // Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 1997. С. 94–107. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 6.)
- Фотиади Э.Э., Березин М.А., Волков А.Н. и др. Геофизическое изучение глубинного строения внутренней зоны Тихоокеанского подвижного пояса на востоке СССР. Строение и развитие земной коры на советском Дальнем Востоке // Труды сессии отделения наук о Земле и Сибирского отделения АН СССР на Дальнем Востоке / Отв. ред. Э.Э. Фотиади. М.: Наука, 1969. С. 43–65.
- Bulletin of the International Seismological Center. International seismological center. Edinburgh. United Kingdom, 1964–1973.
- Bulletin of the International Seismological Center. International seismological center. Berkshire. United Kingdom, 1964–1973.

- Kingdom, 1974–2007.
16. Bureau Central International Seismologie. Bul. Mensuel, Strasbourg, 1962, 1963.
17. Regional catalogue of earthquakes .International seismological center. Edinburg. Scotland, 1964–1973.
18. Regional catalogue of earthquakes .International seismological center. Berkshire. United Kingdom, 1974–1998.
19. Sasorova E.V., Zhuravlev S.A. The peculiar properties of the within-year periodicity for seismic event distributions for some Pacific regions and astronomical factors // Earthquake Prediction / Ed. S. Mukherjee. Brill. Leiden-Boston, 2006. P. 9–20.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

Ye.V. Sasorova, M.Yu. Andreeva

Deep distribution of the hypocenters of earthquakes of the Kuril region

This work is aimed at a comparative analysis of earthquake distribution by depth and magnitude in the four study subregions of the Kuril Islands and numerical determination of the H_{opt} value for these subregions. The H_{opt} value is the depth boundary which divides seismic events in every study subregion into two non-overlapping subsets. The seismic events of the first subset are distributed non-uniformly during the year, while the distribution of seismic events of the second subset is uniform.

The analysis shows that the boundary position between these two subsets depends on the character of hypocenter distribution over the depth and on the magnitude values. The optimal threshold value of the depth calculated by statistical method varies from 40 to 80 km for the Southern, Middle Kuriles and Hokkaido Island and from 60 to 100 km for the Northern Kuriles. A comparison was made of the statistical analysis results with the earthquake distribution over depth according to the basic Kuril catalog.

Key words: earthquakes, depth, energy, magnitude, Kuril Islands, Hokkaido Island.