

НЕВЕЛЬСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 02.08.2007: АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Ч.У. Ким¹, В.И. Михайлов², Р.С. Сен², Е.П. Семенова^{1,2}

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

² Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, г. Южно-Сахалинск

Поступила в редакцию 20 января 2009 г.

По данным локальной сети цифровых сейсмических станций, установленных на юге о. Сахалин, составлен каталог афтершоков Невельского землетрясения 2007 г. с магнитудой $M_w = 6.2$. Определение параметров гипоцентров афтершоков проведено методом инверсии времен пробега сейсмических волн. Выполнен анализ погрешностей в определении координат эпицентров сейсмических событий. Выявлены особенности пространственно-временного распределения афтершоков в очаговой зоне землетрясения. Анализ результатов исследований позволил сделать вывод о том, что сильный афтершок является землетрясением-субочагом, который имеет свою очаговую зону, что, в принципе, позволяет разрешить несогласованность в оценке энергетической характеристики и размера афтершоковой зоны Невельского землетрясения.

Ключевые слова: очаговая зона, локальная сеть, цифровые сейсмические станции, каталог афтершоков, сейсмический режим, Южный Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

2 августа 2007 г. в 2 ч 37 мин по всемирному времени (в 13 ч 37 мин по сахалинскому времени) в акватории Татарского пролива произошло сильное землетрясение с магнитудой $M_w = 6.2$. Землетрясение было названо Невельским по ближайшему населенному пункту. В силу того, что многие здания и сооружения в г. Невельске имели дефицит сейсмоустойчивости до 1.5–2.0 баллов, землетрясение вызвало значительные разрушения. Из 15 тысяч жителей около 6 тысяч остались без крова. Материальный ущерб составил более 6 млрд рублей. Землетрясение ощущалось по всему Южному Сахалину. Интенсивность сотрясений по шкале *MSK-64* составила 7–8 баллов в г. Невельске, 6–7 баллов – в пос. Горнозаводск, 5–6 баллов – в г. Холмске, и 3–4 – в г. Южно-Сахалинске. Данному сейсмическому событию предшествовало землетрясение ($M_w = 5.6$), произошедшее 17 августа 2006 г. в 15 ч 20 мин по Гринвичу вблизи п. Горнозаводск. Невельское землетрясение было предсказано в рамках долгосрочной и среднесрочной перспективы, и теперь можно констатировать, что прогноз полностью реализовался [16].

Невельское землетрясение приурочено к известной зоне ВОЗ, обусловленной системой Западно-Сахалинских глубинных разломов [9] земной коры (рис. 1). В зоне этих разломов, в средней части о. Сахалин, уже наблюдались несколько сильных землетрясений: Александровск-Сахалинское (1907, $M \sim 6.5$), Лесогорско-Углегорское (1924, $M \sim 6.9$) [15], Углегорское (2000, $M_w = 6.8$). Однако в пределах южного фланга этой системы разломов сильных толчков с магнитудой более 5.0 не отмечалось за всю историю инструментальных сейсмологических наблюдений.

Полноценная регистрация многочисленных афтершоков первых суток стала возможной благодаря действующей в этом районе локальной сети сейсмических станций, что позволило оперативно изучить очаговую зону Невельского землетрясения сейсмологами Сахалинского филиала ГС РАН (СФ ГС РАН) и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН).

Анализ инструментальных и макросейсмических наблюдений Невельского землетрясения указывает на некоторые несогласованности в результатах оценки параметров сейсмического события. По данным региональных и мировых центров сейсмологи-

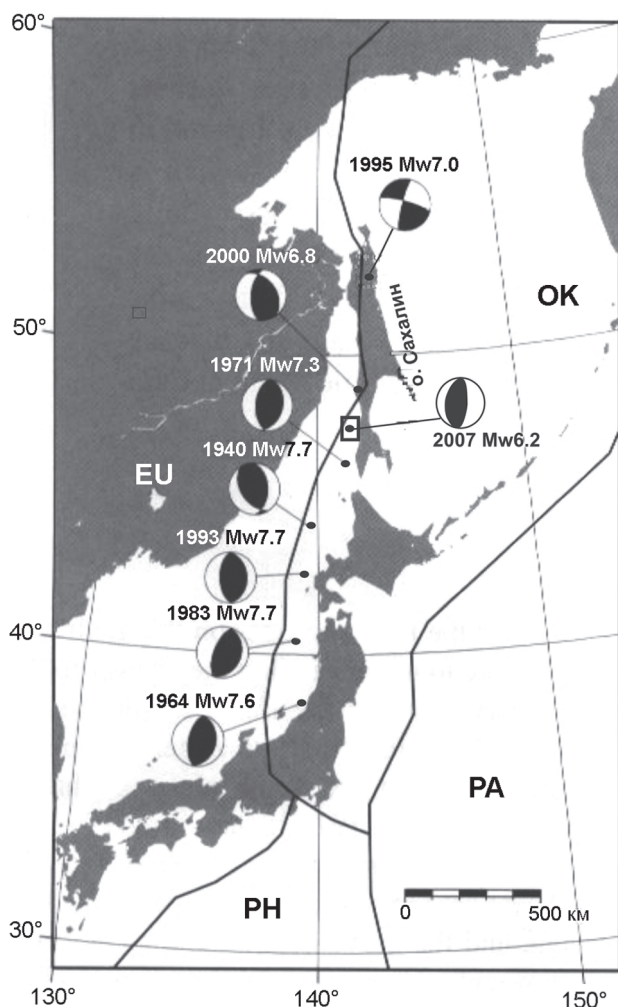


Рис. 1. Схема границы Охотоморской и Евразийской плит с эпицентрами сильнейших землетрясений Япономорско-Сахалинской сейсмоактивной зоны.

ческих наблюдений магнитуда основного толчка составляет $M_w = 6.2$. С другой стороны, возникшая в результате данного землетрясения волна цунами, характер записи страйнметра, подъем значительного участка морского дна и размер афтершоковой зоны указывают на то, что магнитуда данного землетрясения должна быть не менее 6.6.

В настоящей работе сделана попытка прояснить вышеотмеченные несогласованности на основе анализа результатов эпицентральных наблюдений в очаге Невельского землетрясения за первые 8 суток. Детальное изучение афтершоковой зоны позволило выявить закономерности протекания сейсмического процесса в очаговой зоне разрушительного землетрясения, произошедшего на юге о. Сахалин.

СИСТЕМА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЮЖНОГО САХАЛИНА

В настоящее время в пределах о. Сахалин постоянно работают 4 сейсмические станции СФ ГС РАН, которые расположены друг от друга на расстоянии более 250 км (с/ст. “Южно-Сахалинск”, с/ст. “Углегорск”, с/ст. “Тымовское” и с/ст. “Оха”). Представительная магнитуда регистрируемых на Сахалине землетрясений составляет около 3.5.

Результаты экспедиционных работ, проведенных в 2007 г. в районе Невельского землетрясения, показали высокую эффективность локальной сети станций по регистрации слабых афтершоков катастрофического землетрясения и способствовали повышению уровня представительности составляемых каталогов.

В 1995 г. в рамках сотрудничества с Исследовательским центром по прогнозу землетрясений Хоккайдского университета впервые начались работы по развертыванию локальной сети цифровых сейсмических станций “DATAMARK LS-8000H” для регистрации слабых землетрясений на юге о. Сахалин. До 2001 г. эти исследования проводились эпизодически и только в летний период. После Такойского землетрясения 2001 г. с магнитудой $M_w = 5.2$ начались круглогодичные наблюдения.

В настоящее время сейсмологические наблюдения за слабыми землетрясениями проводятся девятью цифровыми автономными станциями “DAT” (производитель – компания “Clover Tech”, Япония) двух модификаций: с накопителями данных на магнитной ленте и на жестком съемном диске (табл. 1). Станции используются в комплекте с датчиками LE-3Dlite (производитель – компания “Lennartz Electronic”, Германия). Комплект аппаратуры работает в режиме непрерывной регистрации. Автономность работы в зависимости от типа накопителя станции составляет 1–2 месяца. Встроенные часы станций корректируются каждые 6 часов по сигналам Глобальной навигационной системы, что обеспечивает точность временной привязки записей около 10 мс.

Наблюдения с помощью комплекса цифровых станций осуществляются на временно обустроенных выносных пунктах. Выбор пунктов регистрации проводился с учетом следующих требований:

- обеспечение сохранности аппаратуры;
- наличие подъездных путей;
- допустимый уровень фоновых помех.

На рис. 2 приводятся графики непрерывности регистрации в каждом пункте наблюдения за 2007 г. и отдельно – за август 2007 г.

Таблица 1. Конфигурация локальной сети цифровых сейсмических станций на юге о. Сахалин.

№	Места расположения станции	Код станции	Координаты станции		
			Широта, град., с.ш.	Долгота, град., в.д.	Высота, м
1	п. Колхозное, Невельский р-н	ККН	46.656	141.907	10
2	фермерское хозяйство «Белые скалы», Анивский р-н	BSK	46.839	142.318	50
3	стационар ИМГиГ ДВО РАН «м. Острый», Долинский р-н	OSM	47.245	143.010	30
4	п. Загорское, Долинский р-н	ZGR	47.303	142.493	120
5	п. Ожидаево, Холмский р-н	OJD	47.029	142.399	230
6	маяк Корсаковский, Корсаковский р-н	KRS	46.610	142.801	100
7	рыборазводный завод «Долинка» вблизи п. Лесное, Корсаковский р-н	LSN	46.958	143.031	30
8	рыборазводный завод «Мальково», Корсаковский р-н	MLK	46.769	143.354	10
9	окраина г. Холмска	KHL	47.076	142.076	10

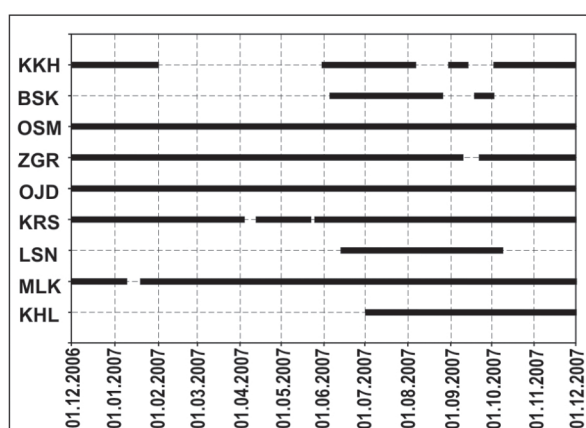
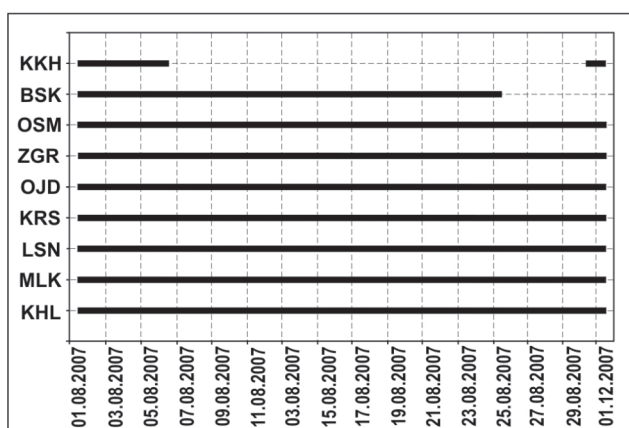


Рис. 2. График непрерывности работы автономных цифровых сейсмических станций «DAT», установленных на юге о. Сахалин в 2007 г. Названия станций приведены в сокращенной форме согласно таблице 1.

Из графиков видно, что во время главного толчка Невельского землетрясения работали все сейсмические станции. Более 1000 сейсмических событий были зарегистрированы всеми станциями, что позволило с высокой точностью определить параметры очагов зарегистрированных афтершоков.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АФТЕРШОКОВ

При составлении каталога афтершоков Невельского землетрясения параметры гипоцентров определялись с помощью программы NYPO71. Программное обеспечение вместе с сейсмическими станциями было предоставлено Исследовательским центром по прогнозу землетрясений Хоккайдского университета.

Алгоритм определения параметров гипоцентра основан на решении системы уравнений, связывающих координаты гипоцентра землетрясения и координаты регистрирующих станций:

$$(X-x_0)^2 + (Y-y_0)^2 + H^2 = v_i^2(t_0 - t_i)^2, \quad (1)$$

где X , Y , H , t_0 — координаты эпицентра, глубина очага и время возникновения землетрясения (время в оча-

ге), соответственно; x_i , y_i , t_i — координаты сейсмических станций, зарегистрировавших землетрясение, и времена прихода сейсмических волн на эти станции, соответственно ($i = 1, 2, \dots, n$); v_i — эффективные скорости распространения сейсмических волн, численно равные отношению расстояния по прямой от i -ой станции до гипоцентра ко времени пробега сейсмической волны по лучу.

Метод локальной гипоцентрии активно развивался и в нашей стране [4–6]. Современные программы гипоцентрии весьма сложны и имеют большое число управляющих параметров, что часто превращается в недостаток, так как априорный выбор не всегда очевиден, а результат сильно зависит от набора этих параметров. Эти программы построены так, что в процессе счета меняются веса фаз в зависимости от невязок и гипоцентрального расстояния в сложном сочетании с весами, заданными как параметр счета. При этом программа часто оказывалась «слишком умной», отбрасывая значительную часть верных данных в угоду несколько ошибочным, что заметно искажало результат.

При хорошем азимутальном окружении очага землетрясения большим количеством станций многие из современных алгоритмов дают близкие результаты и демонстрируют высокую устойчивость решений в задаче определения гипоцентральных параметров, слабо зависящих от начального приближения и скоростной модели земной коры. Однако, когда окружение гипоцентра станциями далеко от идеального и при небольшом количестве пунктов регистрации, как в нашем случае, гипоцентрирование опять, как в эпоху ручных определений, превращается в искусство. Чтобы минимизировать ошибки, связанные с субъективным фактором, в нашем исследовании использована процедура, оптимизирующая скоростную модель. Начальный вариант скоростного разреза для южной части о. Сахалин заимствован из данных глубинного сейсмического зондирования [8]. Далее, по группе уверенно обработанных событий определены станционные поправки к временам пробега сейсмических волн, которые используются в дальнейших вычислениях. Окончательный вариант скоростного разреза скорректирован по данным определения очаговых параметров промышленных взрывов на юге о. Сахалин (рис. 3). Используя метод перебора начальной глубины, выбрано решение, отвечающее минимальным невязкам.

Оценка энергетической величины землетрясения является еще более сложной задачей. Для землетрясений, произошедших на юге о. Сахалин, используется номограмма, построенная по данным записей Такойского 2001 г. и Углегорского 2000 г. землетрясений и их афтершоков, зарегистрированных сетью цифровых сейсмических станций "DAT". Номограмма приведена к шкале магнитуд, значения которых рассчитаны по данным цифровой аппаратуры "IRIS" на сейсмической станции "Южно-Сахалинск" (YSS) СФ ГС РАН (рис. 4). Значения магнитуд, определенные по настоящей номограмме, сравнивались с соответствующими магнитудами, рассчитанными по формуле, используемой в Японии для сейсмических станций данного типа [8].

Как отмечено выше, сеть цифровых сейсмических станций на юге о. Сахалин относительно гипоцентров афтершоков Невельского землетрясения расположена неоптимально. Под оптимальной системой сейсмологических наблюдений будем понимать такую систему, которая регистрирует без пропусков события заданного класса в заданной области с минимальными погрешностями в определении параметров гипоцентров [6]. Решение задачи оптимизации сети сейсмологических наблюдений и оценка распределения погрешностей были предложены

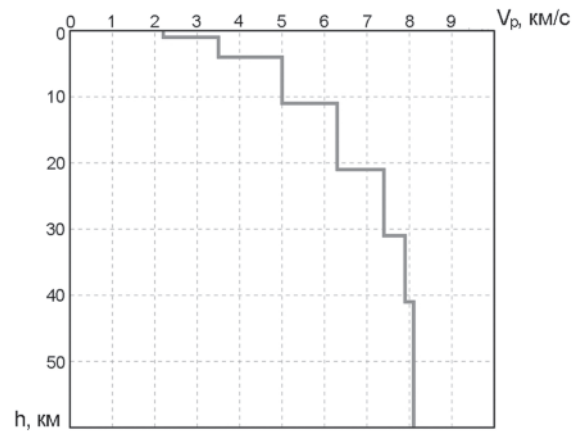


Рис. 3. Скоростная модель строения земной коры.

В.Ю. Бурминым для случая определения координат гипоцентра и времени в очаге. Для оценки эффективности нашей системы сейсмологических наблюдений мы обратились к автору задачи для вычисления погрешностей параметров гипоцентров землетрясений на юге о. Сахалин, который любезно откликнулся на наше предложение. В качестве исходных данных были привлечены координаты сейсмических станций, скоростные разрезы, амплитудно-частотные характеристики цифровых станций, а также номограмма для определения энергетической величины землетрясений по данным цифровых станций. На рис. 5 изображено распределение погрешностей в определении координат эпицентров землетрясений.

ПАРАМЕТРЫ НЕВЕЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2 АВГУСТА 2007 г. ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ

Дежурным инженером сейсмической станции "Южно-Сахалинск" через десять минут после момента регистрации землетрясения были получены предварительные параметры эпицентра этого землетрясения по результатам оперативной обработки записи цифровой станции "IRIS" и аналоговой записи каналов пониженной чувствительности. Оптическая запись землетрясения коротко- и длиннопериодной аппаратурой была нечитаемая, поскольку вышла за пределы регистрируемого диапазона. Срочное сообщение об этом землетрясении через 20 минут после его возникновения было передано оперативному дежурному МЧС России по Сахалинской области. Это сообщение вместе с параметрами эпицентра содержало полученные на это время сведения об ошутимости толчков в населенных пунктах Сахалинской области. Данные первичной обработки были переданы, согласно регламенту работы станции, в службу

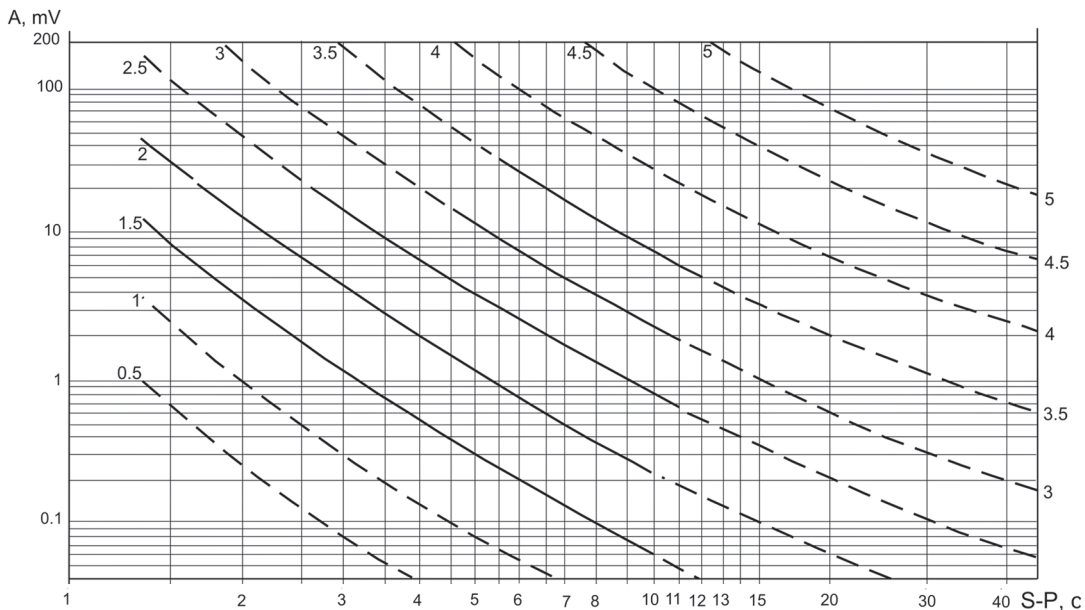


Рис. 4. Номограмма по определению магнитуд землетрясений. Чувствительность сейсмоприемника составляет 400 В/м/с для частот, превышающих 1 Гц.

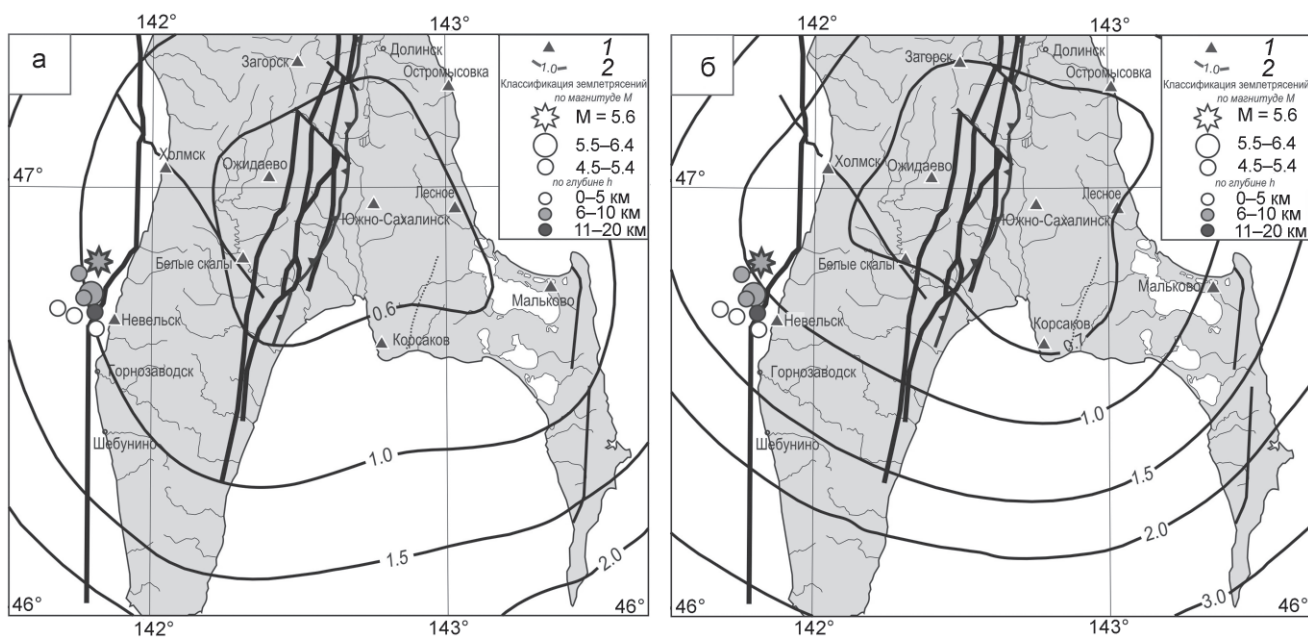


Рис. 5. Карта расположения автономных цифровых сейсмических станций DAT. Распределение погрешностей по широте (а) и по долготе (б) при определении эпицентров землетрясений юга Сахалина.

срочных донесений ГС РАН и в отдел сводной обработки СФ ГС РАН.

Невельское землетрясение было оперативно обработано всеми сейсмологическими агентствами мира, каждое из которых предлагало свой вариант положения гипоцентра. Положение главного

толчка по данным мировых центров (табл. 2), показано на рис. 6.

Сравнение параметров землетрясения по данным сейсмологических центров, работающих с различными сетями сбора и различными методами обработки информации, показало большой раз-

Таблица 2. Параметры очага Невельского землетрясения 2007 г. ($M_w = 6.2$) по данным различных сейсмологических центров.

№	Время в очаге ч-мин-с (GMT)	Широта, град., с.ш.	Долгота, град., в.д.	Глубина, h, км	К-во станций	Ms/ Nsta	Mb/ Nsta	I ₀ расч.	Центр наблюдения
1	02 37 35.9	46.7	141.7	10		6.2		7-8	YSS СФ ГС РАН
2	02 37 39.6	46.68	141.77	10	43	6.2/17	5.4/18	7-8	ИОЦ ГС РАН
3	02 37 36.8	46.81	141.62	8		6.1		7-8	СФ ГС РАН
4	02 37 43.0	47.259	141.750	5			6.2		NEIC
5	02 37 27.9	47.776	141.617	0			5.9		НОККАИДО
6	02 37 38.5	46.829	141.756	10		6.2			ИМГиГ ДВО РАН
7	02 37 44.4	47.256	141.761	10					ЖМА

Примечание. Принятые сокращения в таблице 2: *h* – фиксированное значение глубины, принятое при расчете параметров эпицентра; *Ms* – магнитуда по поверхностной волне Релея; *Mb* – магнитуда по объемной волне *P*; *I*₀ – расчетная интенсивность в эпицентре по шкале *MSK-64*; ИОЦ ГС РАН – Информационно-обработывающий центр ГС РАН, Россия, г. Обнинск; СФ ГС РАН – Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, Россия, г. Южно-Сахалинск; YSS СФ ГС РАН – сейсмическая станция “Южно-Сахалинск”, Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, Россия, г. Южно-Сахалинск; NEIC – Национальный центр информации о землетрясениях Геологической службы США; ИМГиГ ДВО РАН – локальная сеть цифровых сейсмических станций, Россия, г. Южно-Сахалинск; ЖМА – Японское метеорологическое агентство, Япония; НОККАИДО – Университет города Хоккайдо.

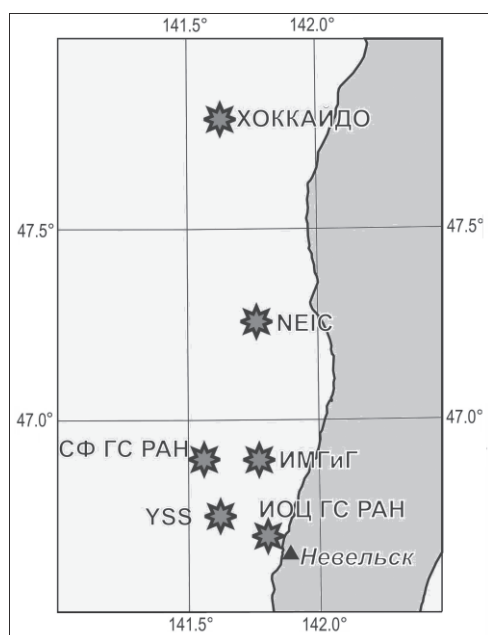


Рис. 6. Эпицентр Невельского землетрясения по данным различных сейсмологических центров.

брос. Наибольший разброс в определении координат эпицентра Невельского землетрясения разными мировыми агентствами составил около 120 км

КАТАЛОГ АФТЕРШОКОВ

В каталог Невельского землетрясения вошли результаты обработки 1350 афтершоков, зарегистрированных в течение 8 суток с помощью 9 авто-

номных цифровых сейсмических станций “ДАТ”, установленных на юге о. Сахалин.

В таблице 3 представлено распределение количества афтершоков Невельского землетрясения с 2 по 9 августа 2007 г. Из графика на рис. 7 видно, что большинство событий произошло за первые двое суток. На пятые-шестые сутки количество зарегистрированных толчков уменьшилось более чем в 20 раз.

Количество зарегистрированных афтершоков Невельского землетрясения сравнивалось с ожидаемым числом событий, рассчитанным по формуле Дракопулоса, которое основано на соотношении общего числа афтершоков с магнитудой, превышающей заданную величину, и магнитудой главного толчка [17, 18]. Формула Дракопулоса имеет следующий вид:

$$N(M) = A \exp(-\beta M), \quad (2)$$

где $N(M)$ – общее количество афтершоков с магнитудой, превышающей M ;

$A = \exp(3.62\beta + 1.1M_0 - 3.46)$, где M_0 – магнитуда главного толчка, $\beta = -b / \lg(\exp)$, b – значение наклона графика повторяемости.

В нашем случае для оценки ожидаемого количества афтершоков, согласно выражению Дракопулоса, значение наклона графика повторяемости заимствовано из [10]. Как видно из таблицы 3, общее число афтершоков с магнитудой $M \geq 2.0$ в два раза превышает ожидаемое количество событий, рассчитанное по формуле Дракопулоса, несмотря на то, что в рассматриваемый каталог вошли афтершоки только за первые 8 суток.

Большое внимание в каталоге уделено оценкам точности определения, в том числе вертикальным и горизонтальным ошибкам (в км). В значительной мере они зависят от конфигурации сети и ее положения относительно очаговой зоны. Для многочисленных афтершоков Невельского землетрясения, гипоцентры которых не совсем “удачно” расположены по отношению к сети близких станций, благодаря качеству регистрирующей аппаратуры удалось добиться высокой точности локализации: порядка несколько сотен метров по широте, 1.8 км по долготе и 1.5–2.0 км по глубине. Однако следует иметь в виду, что речь идет только о внутрисетевых невязках, которые являются основными параметрами в инверсионном методе, характеризующими сходимость итераций. На рис. 8 показаны гистограммы распределения ошибок при определении параметров афтершоков Невельского землетрясения по долготе, широте и глубине. Ошибки в определении параметров землетрясений достаточно хорошо согласуются с результатами численного моделирования

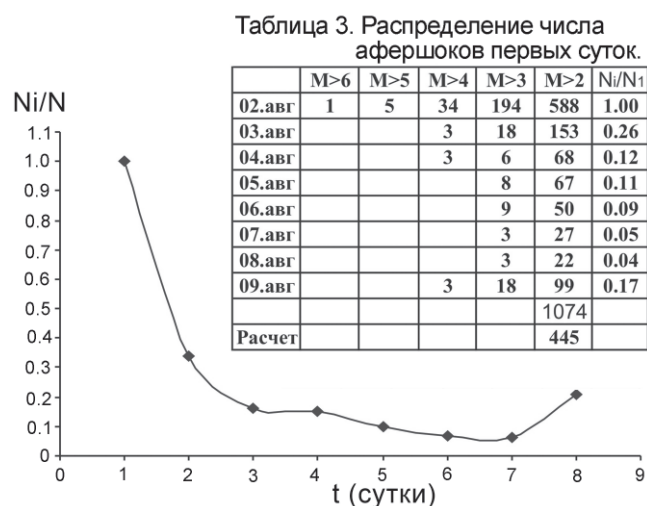


Рис. 7. График посуточного распределения числа афтершоков Невельского землетрясения.

по оценке погрешностей (рис. 5), проведенного по методу В.Ю. Бурмина [6].

В [3] показано, что при небольшой случайной ошибке, например с дисперсией 0.5 км, картина эпицентральной зоны по карте и разрезам более-менее реалистична. Подготовленный нами каталог афтершоков Невельского землетрясения позволяет дать ответы на многие вопросы по конфигурации очаговой зоны и сейсмическому режиму Невельского землетрясения.

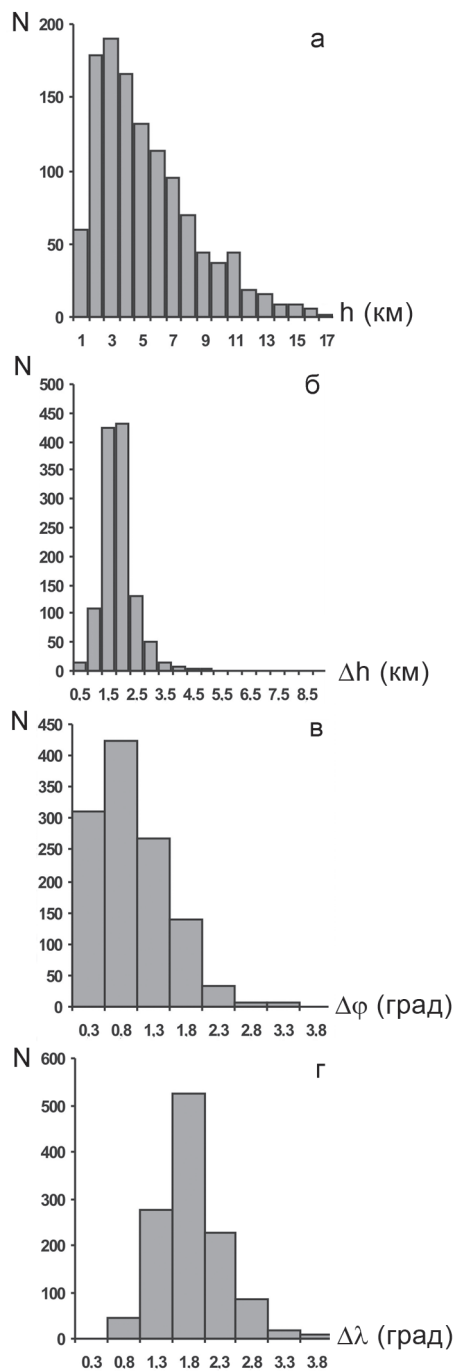


Рис. 8. Гистограммы распределения очагов землетрясений по глубине (а) и погрешностей в определении глубины (б), широты (в) и долготы (г).

На рис. 9 приведена карта эпицентров афтершоков Невельского 2 августа 2007 г. и Горнозаводского 20 августа 2006 г. землетрясений. Основная масса афтершоков Невельского землетрясения образует эпицентрально-область общей площадью $S = 13 \times 40 \text{ км}^2$ в Юго-Западной Сахалинской шельфовой (ЮЗШ) сейсмогенной зоне. По исследованиям

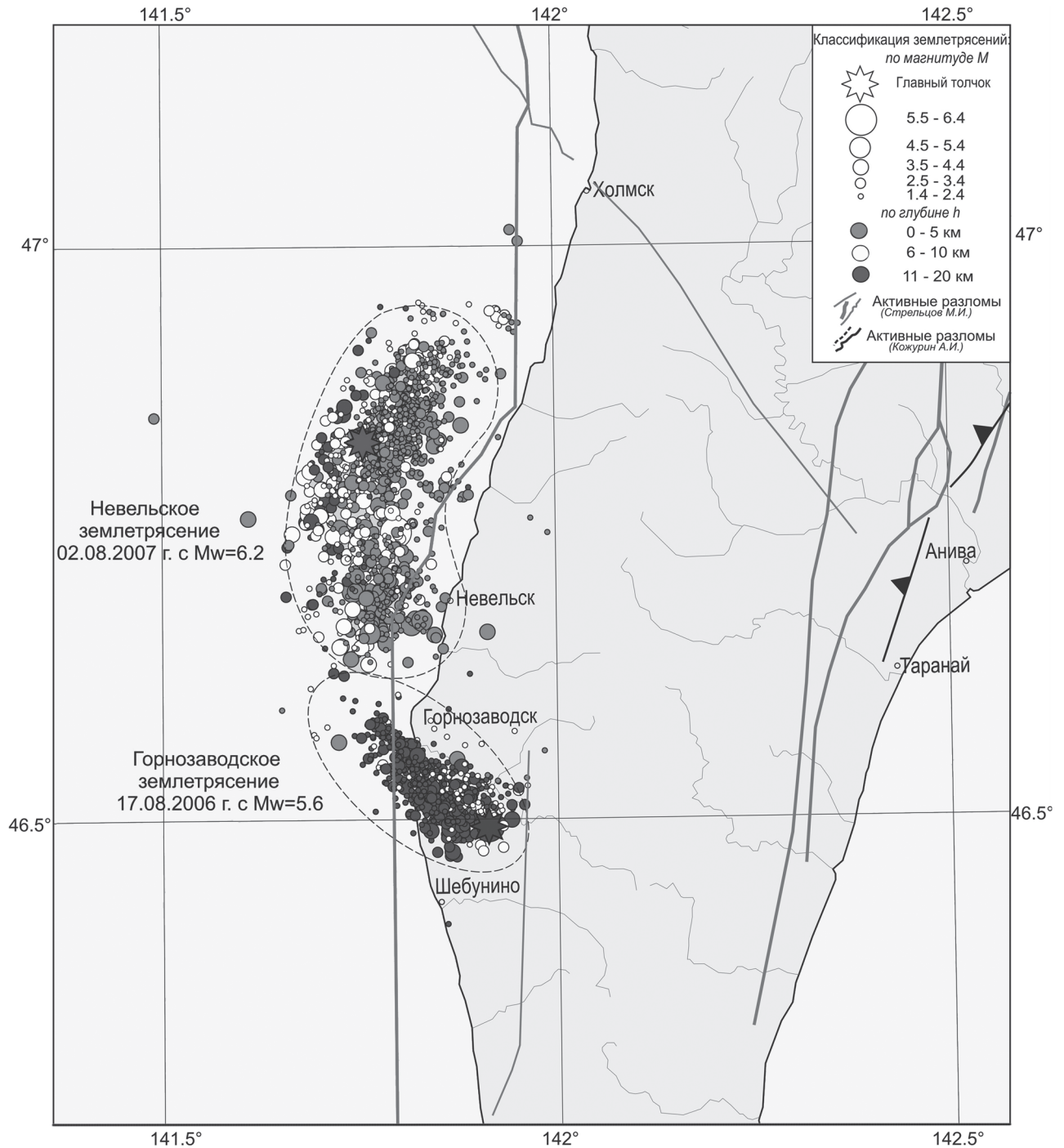


Рис. 9. Эпицентры главных толчков Невельского (02.08.2007 г.) и Горнозаводского (17.08.2006 г.) землетрясений и их афтершоков.

Л.С. Оскорбина [10, 11], эта зона расположена в северной части Исикари-Кузнецовского прогиба Татарского синклинория и граничит на западе – с Моне-ронской (МНР), на севере – с Поясковой (ПСК), на востоке – с Юго-Западной Сахалинской (ЮЗХ) сейсмогенными зонами. Зона ЮЗШ рассекается субмеридиональным Западно-Сахалинским разломом. Мощ-

ность земной коры изменяется от 29 до 31 км, гранитного слоя – от 2 (в южной осевой части прогиба) до 10 км (на севере зоны), базальтового слоя – от 16 до 17 км. Территория зоны ЮЗШ довольно плотно покрыта эпицентрами землетрясений, а наиболее сильными среди них были землетрясения 18 июня 1919 г. ($M = 5$, $h = 20$ км), 23 ноября 1936 г. ($M = 4.9$,

$h = 20$ км), 9 марта 1963 г. ($M = 5.0$, $h = 20$ км), 21 марта 1978 г. ($M = 5.1$, $h = 20$ км) и 25 мая 1981 г. ($M = 5.1$, $h = 15$ км). Таким образом, Невельское землетрясение с $M_w = 6.2$ является первым крупным событием в этой зоне за весь период инструментальных наблюдений.

Из карты эпицентров видно, что очаговая зона располагается на западном крыле Западно-Сахалинского разлома. Эпицентры афтершоков разделяют очаговую зону на две субзоны. Одна из них размером 12×25 км² выделяется в окрестности основного толчка. Распределение землетрясений в данной окрестности ориентировано в направлении с юго-запада на северо-восток. Вторая подзона размером 10×15 км² заполнилась афтершоками после возникновения повторного толчка с $M_w = 6.0$ – она примыкает к южному краю первой субзоны и простирается в направлении строго с севера на юг. Таким образом, конфигурация афтершоковой зоны повторяет излом Западно-Сахалинского разлома в этом районе.

Магнитуда данного землетрясения, согласно корреляционной зависимости [19, 20], связывающей магнитуду землетрясения с размером очаговой зоны, должна быть не менее $M \sim 6.6$. Однако длина и размер очаговой зоны только каждой из отдельно взятых субзон согласуются с магнитудами Невельского основного толчка с $M \sim 6.2$ и сильнейшего афтершока с $M \sim 6.0$. Близкие значения магнитуд двух толчков приводят нас к предположению о возникновении парных землетрясений.

В очаговой зоне Невельского землетрясения наблюдается неравномерная концентрация афтершоков вдоль меридионально ориентированного направления. Кроме того, с восточной стороны по всей длине афтершоковой зоны выделяются рассеянные компоненты сейсмичности, локализованные достаточно далеко от основной зоны. Поперек к основной зоне, на траверзе реки Казачка и п. Ясноморское, распределены слабокластеризованные группы землетрясений. На южном фланге основной афтершоковой зоны выделяется группа рассеянных событий в пределах очаговой зоны Горнозаводского землетрясения 2006 г.

Представление о распределении афтершоков Невельского землетрясения по глубине дают вертикальные разрезы (рис. 10). Для анализа пространственного распределения афтершоковых событий используются разбиения на 8 и на 5 сегментов субзон главного толчка и сильнейшего из повторных сейсмических событий, соответственно. На основе анализа поперечных разрезов афтершоковой зоны можно отметить следующее:

– падение плоскости разрыва очага ориентировано с востока на запад, что согласуется с определением механизма очага по NEIC;

– существенное различие распределения плотности афтершоков по глубине вдоль очаговой зоны.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ НЕВЕЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Динамика сейсмического режима Невельского события отслеживается в нашем исследовании с помощью анализа графиков повторяемости и уменьшения количества афтершоков во времени.

К основным параметрам сейсмического режима традиционно относят сейсмическую активность a и коэффициент b угла наклона графика повторяемости [1, 7, 12, 13]. Принимая гипотезу о равномерности сейсмического процесса, коэффициент b считается постоянным параметром. По данным [10], в сейсмоактивной зоне Невельского землетрясения параметр b кумулятивного графика повторяемости соответствует 0.88. Нами проанализированы кумулятивные графики повторяемости по данным каталога афтершоков и по отдельно взятым суткам. При построении графиков взят равный временной интервал. В основе такого подхода лежит следующее соображение [2, 3]. Если значение наклона графика повторяемости велико, то в исследуемом районе наблюдается относительное преобладание более слабых землетрясений, и среда более раздроблена. В определенном смысле это утверждение может служить критерием для характеристики среды, генерирующей землетрясения.

Диапазон магнитуд представительных землетрясений, которые полностью учитывались в данной системе наблюдений, составляет 2.0–6.2. Наклон графика повторяемости афтершоков Невельского события составил 0.72, что меньше рассчитанного значения для юго-западной шельфовой сейсмогенной зоны о. Сахалин [10]. Значение b по отдельным суткам варьирует в диапазоне от 0.72 до 0.75. Отмечаются колебания значения наклона графика повторяемости на момент времени, предшествующий зарождению сильного афтершока с $M > 4.0$.

Наличие большого количества последовавших после главного толчка афтершоков способствовало детальному статистическому анализу этих последовательностей. Для афтершоковых последовательностей наблюдается хорошее соответствие изменения интенсивности потока событий во времени степенному закону Омори [19], который можно представить в виде:

$$N \sim t^{-p}, \quad (3)$$

где N – интенсивность потока числа событий в данный момент времени; t – время, отсчитываемое от

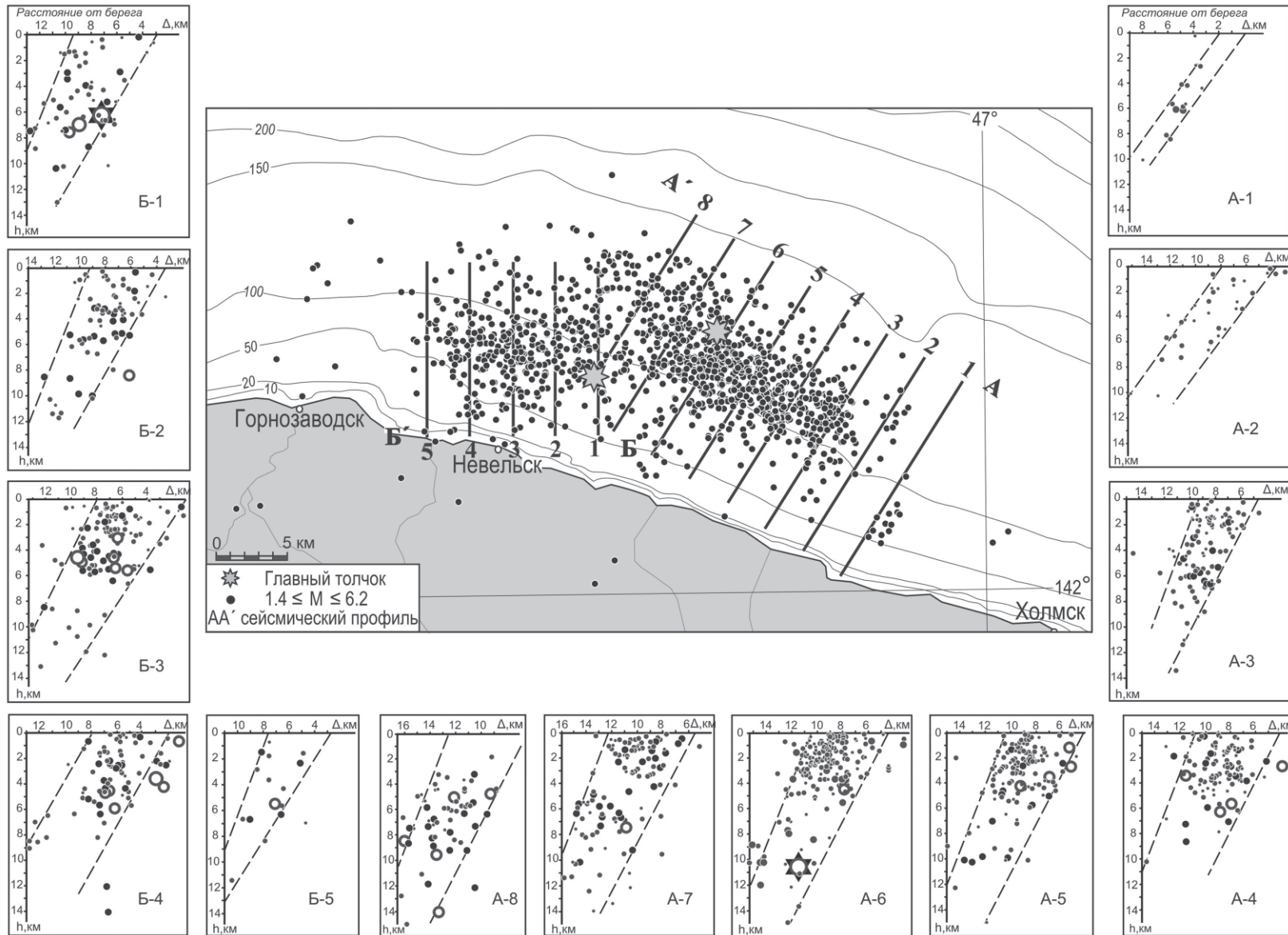


Рис. 10. Пространственное распределение афтершоков Невельского землетрясения по эпицентрам и глубине очага.

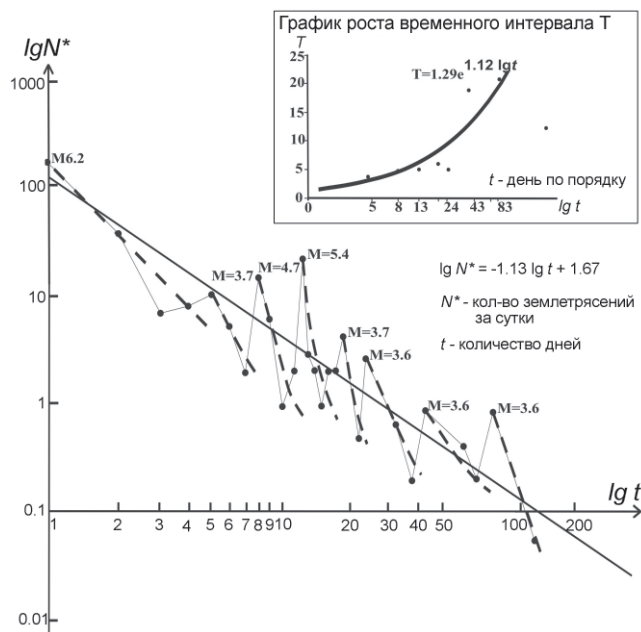


Рис. 11. График Омори (во врезке – график роста временного интервала между сильными афтершоками).

момента главного события; p – параметр закона Омори. При этом степенной закон Омори хорошо выполняется в интервале от 10^{-1} до 10^2 суток или немного более после момента главного события [14].

Для изучения сейсмического процесса в очаговой зоне Невельского события нами был построен график Омори (рис. 11). С этой целью привлекались данные сейсмической станции “Южно-Сахалинск”. Для построения графика Омори использовали сейсмические события с $M \geq 3.0$. Такие события из района Невельского землетрясения уверенно регистрируются короткопериодной аналоговой аппаратурой без пропуска.

Подсчет событий осуществлялся ежесуточно, последние сто суток – еженедельно. Анализ графика Омори, построенного для последовательностей афтершоков Невельского землетрясения свидетельствует о наличии трендов двух типов. Главный тренд достаточно хорошо описывается уравнением:

$$\lg N^* = -1.13 \lg t + 1.67. \quad (4)$$

Второй тренд связан с возникновением сильно-го афтершока, сопровождавшегося своими повторными толчками. Обычно второй тренд после сильно-го афтершока пересекает линию главного тренда, то есть, отмечается резкое уменьшение числа афтершоков. При достижении некоторого порога происходит появление группы афтершоков и сильно-го толчка. На рис. 11 приведен график роста временного интервала T между значимыми афтершоками (относительно сильных событий).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Невельское землетрясение 2007 г. вместе с такими землетрясениями, как Углегорское 2001 г., Горнозаводское 2006 г., образуют единую последовательность землетрясений западного побережья о. Сахалин. Эпицентральная зона Невельского землетрясения располагалась в юго-западной части Татарского пролива.

Полевые наблюдения за эпицентральной зоной позволили получить уникальную информацию о Невельском событии и выявить его характерные особенности.

Магнитуда самого сильного афтершока ($M_w = 6.0$), который произошел в первые часы, была близка к магнитуде главного толчка ($M_w = 6.2$), и можно предположить возникновение парных землетрясений. За почти 100-летний период инструментальных наблюдений сильные землетрясения Сахалина сопровождались афтершоками с магнитудой, отличающейся от магнитуды основного толчка более чем на единицу.

Несоответствие размера очаговой зоны с магнитудой основного толчка позволила выдвинуть предположение о наличии двух очаговых зон, каждая из которых была сгенерирована землетрясением с магнитудой $M \geq 6$. Афтершок с $M_w = 6.0$ произошел на южной оконечности очаговой зоны, продлив облако афтершоков на юг, и явился весьма сильным землетрясением при небольшой глубине, вызвавшим значительные разрушения в населенных пунктах. Детальное исследование пространственного распределения афтершоков по эпицентрам и глубине подтвердило наше предположение.

Конфигурация общего облака афтершоков двух субзон повторяет конфигурацию линии побережья и трассы Западно-Сахалинского разлома. Афтершоки сконцентрированы вдоль западного крыла разломной зоны, падение плоскости разрыва ориентировано с востока на запад.

Распределение афтершоков в пространстве носит неоднородный характер. Главный толчок произошел на глубине 10 км, а основная масса афтершоков концентрируется на глубинах менее 5 км. Подобная картина наблюдалась при Углегорском 2000 г. и Такойском 2001 г. землетрясениях и не противоречит взбросовому механизму сахалинских землетрясений.

Исследование графиков повторяемости показало наличие вариации коэффициента b . Отмечается малое значение наклона графика повторяемости афтершоков Невельского землетрясения по сравнению со средним значением для зоны юго-западного шельфа о. Сахалин. Для Горнозаводского землетрясения

2006 г. коэффициент графика повторяемости имеет большее значение для данной зоны.

Ход сейсмического процесса Невельского события авторами отслеживался с помощью графика спада числа афтершоков во времени. Процесс спада афтершоков Невельского землетрясения хорошо согласуется с законом Омори, а изменение временного интервала между значимыми повторными толчками хорошо описывается формулой экспоненциального распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аки К., Ричардс П.Г. Количественная сейсмология. Т. 1. М.: Мир, 1983. 520 с.
2. Арефьев С.С. О картировании основных параметров сейсмического режима // Оценка эффекта сильных землетрясений. Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука, 1989. Вып. 30. С. 4–14.
3. Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические наблюдения. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. 375 с.
4. Бурмин В.Ю. Новый подход к определению параметров близких землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 73–82.
5. Бурмин В.Ю., Ахметьев В.М. Погрешности в определении параметров гипоцентров близких землетрясений и эффективность системы сейсмологических наблюдений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 109–128.
6. Бурмин В.Ю. Оптимизация сетей сейсмологических наблюдений // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Второй междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2007. С. 54–62.
7. Гайский В.Н. Статистические исследования сейсмического режима. М.: Наука, 1970. 123 с.
8. Ким Ч.У., Сен Р.С. Результаты сейсмических исследований в окрестности Южно-Сахалинска с использованием цифровых сейсмических станций // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 5. С. 163–175.
9. Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области. М.: Наука, 1987. 95 с.
10. Оскорбин Л.С., Бобков А.О. Сейсмический режим сейсмогенных зон юга Дальнего Востока // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 6. С. 179–197.
11. Оскорбин Л.С. Сейсмичность Сахалина // Сейсмическое районирование Сахалина. Владивосток, 1997. С. 3–22.
12. Ризниченко Ю.В. Проблема величины землетрясения // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: МСССС, 1974. Т. 1. С. 43–78.
13. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.
14. Родкин М.В. Аномалии сейсмического режима в окрестности сильного землетрясения // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: Материалы II Сахалинской молодежной науч. школы. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. С. 25–53.
15. Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С., Ферчев М.Д. Землетрясения на Сахалине. М.: Наука, 1967. 180 с.
16. Тихонов И.Н. Долгосрочный прогноз сильного землетрясения на юго-западном шельфе острова Сахалин и его реализация в результате Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. ($M_{\text{лн}} 6.2$) // Проблемы сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири: Междунар. науч. симпозиум, Южно-Сахалинск, Россия, 27–30 сент. 2007 г. Южно-Сахалинск: Ин-т морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2007. С. 100–101.
17. Уломов Н.В., Фаина М.П., Якубов М.С. Оперативное изучение сейсмического режима афтершоков с целью их прогнозирования // Газлийские землетрясения 1976 г.: Инструментальные наблюдения в ближней зоне. М.: Наука, 1983. С. 25–34.
18. Drakopoulos J.C. A statistical model of the occurrence of aftershocks in the area of Greece // Bull. Int. Inst. Seismol. Earthquake Eng. 1971, V. 8. P. 17–39.
19. Omori F. On the aftershocks of earthquakes // J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo, 1894. V. 7. P. 111–200.
20. Wells D., Coppersmith K. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement // BSSA. 1994. V. 84, N 4. P. 974–1002.

*C.U. Kim, V.I. Mikhailov, **R.S. Sen**, Ye.P. Semenova*

The August 2, 2007 Nevelsk earthquake: instrumental data analysis

The catalogue of the 2007 Nevelsk earthquake ($M_w=6.2$) aftershocks is prepared according to the data of the local network of digital seismic stations, installed in the south of Sakhalin Island. Hypocentral parameters are determined by the method of inversion of seismic wave travel times. The analysis of miscalculations of epicenter determination is carried out. The particulars of spatial-temporal distribution of aftershocks in the source zone of the August earthquake are obtained. The analysis of results of investigations made it possible to come to the conclusion that a strong aftershock is an earthquake-subsource, which has its own source zone. Basically, this allows us to resolve doubts on the estimation of magnitude parameters and the aftershock zone size of the Nevelsk earthquake.

Key words: source zone, local network, digital seismic stations, catalogue of aftershocks, seismic regime, South Sakhalin, Far East.