

УДК 550.34 (571.64)

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ОЧАГОВОЙ ЗОНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 16 МАРТА 2010 ГОДА ($M_W = 5.8$) НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ О. САХАЛИН

© 2012 г. А. В. Коновалов¹, Е. П. Семенова^{1, 2}, Д. А. Сафонов^{1, 2}

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

693022 Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1-Б,

e-mail: konovalov@imgg.ru

² Сахалинский филиал Геофизической службы РАН

693010 Южно-Сахалинск, ул. Тихоокеанская, 2-А,

e-mail: semenova@imgg.ru

Поступила в редакцию 14.06.2011 г.

16 марта 2010 г. в 9 ч 44 мин всемирного времени в северо-западной части острова Сахалин в верховьях рек Уанга и Погиби произошло землетрясение с магнитудой $M_W = 5.8$. За инструментальный период сейсмологических наблюдений, проводимых на Сахалине с 1905 г., это землетрясение является сильнейшим в северо-западной части острова. Макросейсмические обследования показали, что землетрясение ощущалось на значительной части территорий Северного Сахалина и Приамурья. В работе представлены результаты детального анализа сейсмического режима в очаговой зоне, особенности пространственно-временного распределения афтершоков и их связи с зонами активных разломов Северного Сахалина. Получены новые данные о взаимосвязи механизма очага с современной геодинамической обстановкой.

ВВЕДЕНИЕ

После катастрофического Нефтегорского землетрясения 1995 г. на Сахалине стали проводиться детальные сейсмологические наблюдения при помощи автономных цифровых сейсмических станций. Проведение таких наблюдений позволило детально изучить развитие сейсмического процесса в сейсмогенных зонах. Научные работы приобрели широту и комплексность, открыв тем самым качественно новый этап в истории эпицентральных сейсмологических наблюдений на о. Сахалин. Детальное исследование очаговых зон сильных землетрясений и построение адекватных геодинамических моделей этих землетрясений внесли существенный вклад в понимание сейсмотектоники региона и физики очага землетрясения в целом.

В 2006 г. на севере о. Сахалин развернута сеть станций сейсмического мониторинга, которая позволяет уверенно регистрировать и локализовывать сейсмические события с $M \geq 2.0$. Сейсмологические наблюдения, проводимые сотрудниками Института морской геологии и геофизики (ИМГиГ ДВО РАН), с помощью высокочувствительного оборудования, обеспечивают непрерывные потоки данных для достоверного анализа сейсмической обстановки на севере острова.

Привлечение современных средств программной обработки данных позволяет добиться высокой точности определения основных параметров зарегистрированных землетрясений; изучать статистические закономерности и т.д.

В данной работе приведены результаты детального анализа сейсмической активности, повторяемости и пространственно-временного распределения афтершоков в эпицентральной зоне Уангского землетрясения, произошедшего 16 марта 2010 г., и связи с активными разломами Северного Сахалина.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ СЕВЕРНОГО САХАЛИНА

Хоккайдо-Сахалинская складчатая область представляет особый интерес для исследования как часть зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. По мнению ученых, в зонах островных дуг происходят наиболее существенные для земной коры процессы. Выявляя эти процессы, можно подойти к механизму динамической модели как целостного района земной коры, так и его части [Мельников, 1987].

Входящий в состав Хоккайдо-Сахалинской складчатой области о. Сахалин занимает террито-

рию между 46 и 54 параллелями северной широты, разделяя бассейны Охотского и Японского морей. Разделение острова на Северный Сахалин, Средний и Южный Сахалин условно и объясняется большой протяженностью острова в меридиональном направлении. Рельеф острова Сахалин определяется системой субмеридиональных тектонических структур и характеризуется особенностями складчато-глыбового горообразования.

Северный Сахалин представляет собой пологов-всхолмленную равнину с общим наклоном к северу с небольшими группами профильных возвышенностей, как Вагис-Джолокорская, Дагинская, Осойско-Вальская, являющимися северным продолжением Западно-Сахалинских гор [Соловьев и др., 1967]. В простирании горно-грядового рельефа превалирует линейно-субмеридиональное направление. Западнее Вагис-Джолокорской гряды отчетливо выражена межгорная депрессия, переходящая в прибрежную низменность, выклинивающуюся в сторону Амурского лимана и слегка раскрывающуюся в сторону пролива Невельского. Почти на всем севере острова геологические структуры простираются в северо-северо-западном направлении. Такие формы рельефа объясняются особенностями развития молодых мезозойско-кайнозойских формаций [Мельников, 1987].

Сейсмотектоническую схему главных разрывных дислокаций острова — Центрально-Сахалинского (Тынь-Поронайского), Хоккайдо-Сахалинского и Западно-Сахалинского глубинных разломов — определяет простирание геологических структур вдоль западного и восточного побережий всего Сахалина [Мельников, 1987; Оскорбин, 1997; Соловьев и др., 1967; Харахинов и др., 1984; Харахинов, 2010].

Система Энгизпальских разломов, которые продолжают Центрально-Сахалинский разлом на север, оконтуривает западное и восточное крылья Вагис-Джолокорской гряды. Западно-Энгизпальский локальный разлом представляет собой взбросо-надвиг западного падения, иногда с отчетливой сдвиговой составляющей [Мельников, 1987; Оскорбин, 1997; Харахинов и др., 1984; Харахинов, 2010]. За историю инструментальных сейсмологических наблюдений в окрестностях этой зоны произошло сильное землетрясение с магнитудой $M = 5.0$ (1962 г.) с последующими повторными толчками с $M \geq 4.0$. Другой подземный толчок с магнитудой $M = 4.8$ был зарегистрирован 14 марта 1980 г. [Региональный каталог ..., 2006].

Вдоль восточного побережья Северного Сахалина проходят региональные разрывы Хоккайдо-Сахалинского глубинного разлома. Сложная система наложенных разрывных дислокаций — молодой отчетливой субмеридиональной диагональной и менее четкой продольной северо-северо-запад-

ной — рассекает ими же предопределяемую систему меридиональных хребтов Восточно-Сахалинских гор [Мельников, 1987]. В пределах этой зоны произошло два крупнейших землетрясения — Ногликское 2 октября 1964 г. с магнитудой $M = 5.8$ и катастрофическое Нефтегорское 28 мая 1995 г. с магнитудой $M_w = 7.0$ [Katsumata et al., 2004].

На рис. 1а показано распределение эпицентров землетрясений с $M \geq 4.0$ по данным регионального каталога землетрясений острова Сахалин с 1905 по 2005 гг. [Региональный каталог ..., 2006]. Области повышенной сейсмичности приурочены к окрестностям вышеупомянутых крупнейших субмеридиональных разломов в виде сгущений и пятен. Распределение сейсмичности на Северном Сахалине неравномерно: северо-восток острова значительно активнее, чем его северо-западная часть. Современная активность большинства разломов острова в целом подтверждается данными сейсмологических и геологических исследований [Булгаков и др., 2002; Ким и др., 2009; Конавалов и др., 2007; Соловьев и др., 1967].

На Сахалине наибольший практический интерес представляет детальное изучение сейсмической активности в зонах крупных активных разломов (Апреловского, Западно-Сахалинского, Горомайского, Пильгунского и др.), установленных в последние годы в результате палеосейсмологических исследований [Булгаков и др., 2002].

ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ

Первые данные о землетрясении ($M_w = 5.8$), произошедшем на севере о. Сахалин 16 марта 2010 г. в 9 ч 44 мин всемирного времени, получены по результатам оперативной обработки на сейсмической станции “Южно-Сахалинск”. Для сбора макросейсмических данных в эпицентральной зоне выехала группа сводной обработки СФ ГС РАН. Примерно в то же время на север о. Сахалин отправились сотрудники сейсмологического экспедиционного отряда ИМГиГ ДВО РАН для технического обслуживания сейсмологического оборудования и сбора инструментальных данных.

Уангское землетрясение было оперативно обработано всеми сейсмологическими агентствами мира, каждое из которых предлагало свой вариант положения очага (табл. 1). Сравнение координат эпицентра землетрясения по данным сейсмологических центров, работающих с различными инструментальными сетями сейсмологических наблюдений и методиками обработки сейсмической информации, показало незначительные расхождения результатов определения (см. рис. 1б).

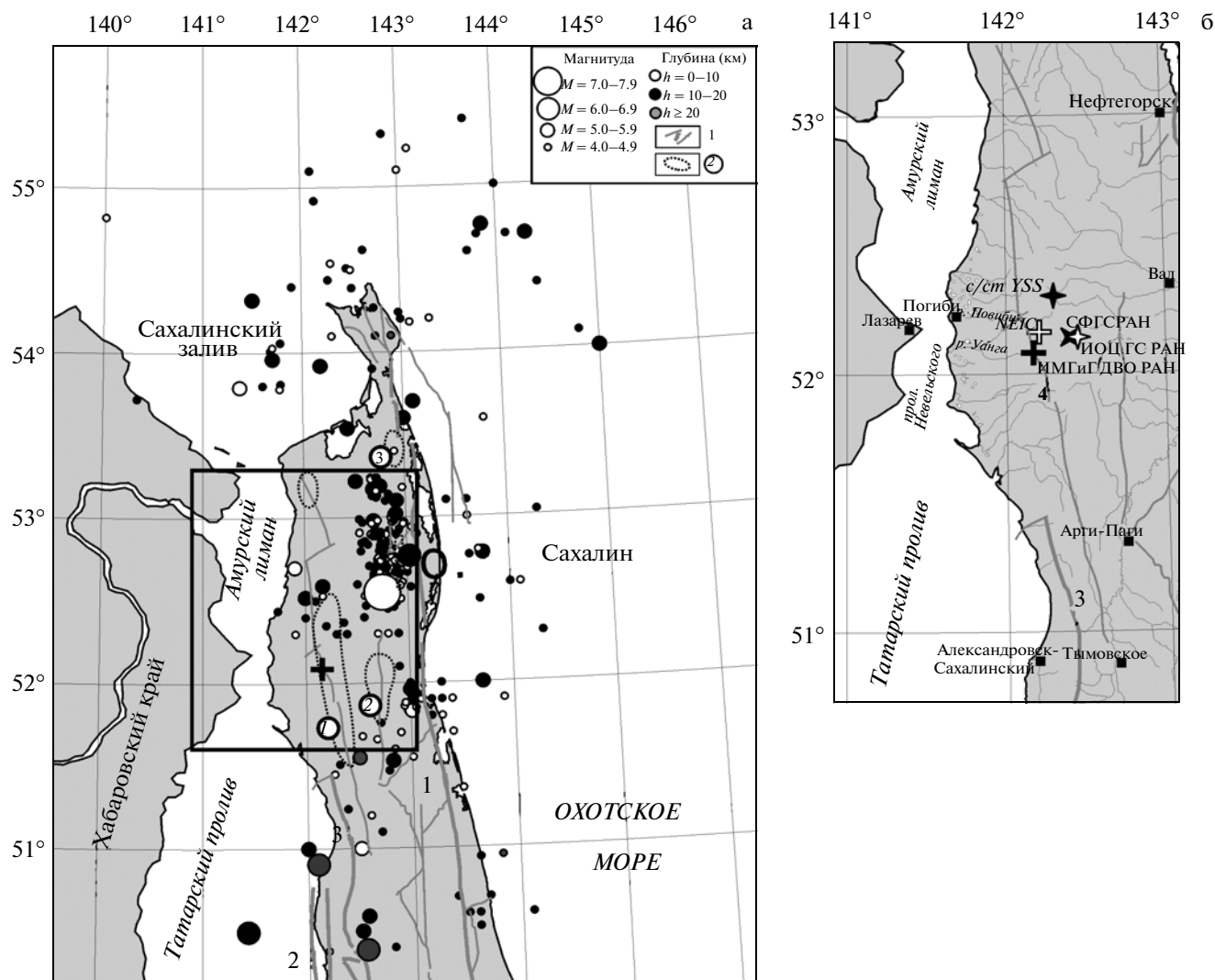


Рис. 1. Карта Северного Сахалина.

а — схема закартированных разломов и пространственное распределение эпицентров землетрясений с магнитудой $M \geq 4.0$: I — активные разломы; II — границы геологических структур. Зоны разломов (цифры на схеме): 1 — Хоккайдо-Сахалинский; 2 — Западно-Сахалинский; 3 — Центрально-Сахалинский; 4 — Западно-Энгизпальский. Геологические структуры (цифры в кружках на схеме): 1 — Вагис-Джолокорское поднятие; 2 — Дагинское поднятие; 3 — Оссойско-Вальское поднятие.

б — положение эпицентра землетрясения 16.03.2010 г. ($M_w = 5.8$) по данным сейсмологических центров.

Макросейсмическое обследование эпицентральной зоны было оперативно (опрос по телефону) проведено дежурными сейсмической станции «Южно-Сахалинск», а впоследствии уточнено группой сейсмологов из отдела сводной обработки. Погодные условия и редкая заселенность территории Северного Сахалина не позволили собрать достоверные данные для составления объективной схемы изосейст Уангского землетрясения (табл. 2). Наибольшие сотрясения 5–6 баллов по шкале MSK-64 отмечены в населенных пунктах западного побережья пролива Невельского. В пределах восточного побережья о. Сахалин макросейсмические проявления изме-

нялись в небольших пределах — от 3 до 4 баллов (см. табл. 2).

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СЕТЬ ДЕТАЛЬНЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СЕВЕРНОМ САХАЛИНЕ

До 1995 г. детальное исследование сейсмичности Сахалина не представлялось возможным в силу крайней разреженности региональной сети сейсмических станций. Неточность в определении координат гипоцентров превышала 10 км.

Качественно новый этап в изучении сейсмичности Сахалина наступил после катастрофического

Таблица 1. Основные параметры и механизм очага землетрясения 16 марта 2010 г. по данным международных агентств и региональных сейсмологических центров

№	Источник	Время в очаге t_0 , ч:мин:с	Эпицентр		Глубина h , км	Магнитуда			Решение механизма очага NP1 (NP2)		
			φ° , N	λ° , E		MS/MLH /ML	mb/MPV (A)	M_W	прости- рание, град	паде- ние, град	подвиж- ка, град.
1	С-ст. YSS	09:44:12.00	52.30	142.30	13	–/5.9/–	–/5.3				
2	СФ ГС РАН	09:44:12.70	52.14	142.40	7	–/5.9/–	–/5.6				
3	ИОЦ ГС РАН	09:44:14.10	52.14	142.44	15	5.7/–/–	6.0/–				
4	ИМГиГ ДВО РАН; наст. работа	09:44:13.50	52.08	142.17	5	–/–/5.7			143 (24)	52 (58)	42 (134)
5	NEIC	09:44:16.04	52.18	142.19	28	5.5/–/–	5.6/–	5.8	148 (1)	31 (63)	61 (106)
6	EMSC	09:44:16.20	52.25	142.18	10			5.8			

Примечание. h – фиксированное значение глубины, принятое при расчете параметров эпицентра; MLH – магнитуда по поверхностной волне Релея, ML – аналог локальной магнитуды по волне S ; mb – магнитуда по объемной волне P , MPV(A) – магнитуда по объемной волне P (тип аппаратуры A), M_W – моментная магнитуда. YSS СФ ГС РАН – сейсмическая станция первого класса СФ ГС РАН, Южно-Сахалинск, Россия; СФ ГС РАН – Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, Южно-Сахалинск, Россия; ИОЦ ГС РАН – Информационно-обрабатывающий центр ГС РАН, Обнинск, Россия; ИМГиГ ДВО РАН – группа обработки сейсмологических данных лаборатории физики землетрясений Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия; NEIC – Национальный информационный центр о землетрясениях Геологической службы США; EMSC – Европейско-средиземноморский сейсмологический центр.

Нефтегорского землетрясения 1995 г. ($M_W = 7.0$), унесшего жизни около 2000 человек. В распоряжении сахалинских сейсмологов появились цифровые сейсмостанции, временные и стационарные локальные сети которых позволили с высокой точностью (1–5 км) определять положение эпицентров землетрясений с магнитудой $M \geq 2.0$. Изучение с помощью этих станций афтершоковых серий Нефтегорского 1995 г. ($M_W = 7.0$), Углегорского 2000 г. ($M_W = 6.9$), Такойского 2001 г. ($M_W = 5.2$), Горнозаводского 2006 г. ($M_W = 5.6$) и Невельского 2007 г. ($M_W = 6.2$) землетрясений позволило сделать важные выводы о сейсмической активности ряда сахалинских структур [Булгаков и др., 2002; Ким и др., 2009; Коновалов и др., 2007].

В настоящее время в пределах Северного Сахалина действует локальная сеть из пяти сейсмических станций со средним расстоянием между пунктами наблюдений около 50 км (рис. 2). Сеть стационарных сейсмических станций была развернута в сентябре 2006 г. Аппаратная часть инструментальной сети представлена наземными цифровыми сейсмическими станциями, каждая из которых укомплектована 3-х компонентным короткопериодным (собственная частота колебаний – 1 Гц) сейсмометром “KS-2000/SP”, регистратором сейсмических сигналов “SMART-24R” и GPS-приемником “Trimble ACUTIME 2000”. Данное оборудование произведено фирмой “Geotech Instruments, LLC”, (США). Станции ра-

ботают в режиме непрерывной регистрации с шагом дискретизации 100 отсчетов в секунду. Встроенные часы регистраторов сейсмических станций корректируются каждые сутки по сигналам GPS, что обеспечивает точность временной привязки около 10 мс.

Для определения основных очаговых параметров (координаты гипоцентра, время в очаге и магнитуда) главного толчка и афтершоков Уангского землетрясения 16 марта 2010 г. использовались инструментальные данные, зарегистрированные цифровыми сейсмическими станциями локальной сети.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Для рутинной обработки цифровых данных и определения параметров зарегистрированных землетрясений применялся пакет вычислительных программ “SEISAN” [Havskov, Ottemoler, 2000], широко используемый в международной сейсмологической практике и сочетающий современные методы детального анализа сейсмической информации с унифицированным форматом базы данных. Применение данного пакета программ предусматривало автоматизацией рабочего места сейсмолога и адаптацией к условиям инструментальной сети сейсмологических наблюдений. В частности, создана единая база данных

непрерывных волновых форм, являющаяся ядром автоматизированного рабочего места сейсмолога на базе операционной системы “LINUX” с использованием технологий виртуализации.

Параметры гипоцентра определялись при помощи метода инверсии времен пробега сейсмических волн, реализованного в виде вычислительной программы “HYPOCENTER” [Lienert, Havskov, 1995]. Алгоритм программы основан на принципе минимизации среднеквадратичной разности измеренных времен пробега и рассчитанных согласно одномерной скоростной модели строения земной коры [Geiger, 1912].

Изучение скорости распространения сейсмических волн и мощности слоев земной коры Северного Сахалина и прилегающих с востока и запада акваторий осуществлялось по материалам методов глубинного сейсмического зондирования, преломленных волн, общей глубинной точки и магнитотеллурического зондирования. По величинам скоростей сейсмических волн и градиентам их изменения по горизонтали и вертикали в разрезах Северного Сахалина традиционно выделяют три крупных геологических комплекса: осадочный чехол, консолидированная кора и верхняя мантия. Материалы данных исследований обобщены и предоставлены в виде обобщенного скоростного разреза ведущим научным сотрудником лаборатории сейсмики и морской акустики ИМГиГ ДВО РАН Патрикеевым В.Н.

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 очага станциями далеко от идеального и при небольшом количестве пунктов наблюдений, как в нашем случае, гипоцентрия, как в эпоху ручных определений, превращается в искусство. Чтобы минимизировать ошибки, связанные с субъективным фактором, в нашем исследовании использована процедура, оптимизирующая скоростную модель. Для этого, варьируя параметры скоростной модели (толщина слоя и скорость), было подготовлено несколько скоростных колонок, которые использовались для расчета времен пробега сейсмических волн. Далее определялась среднеквадратичная невязка по результатам групповой обработки по нескольким станциям и событиям. Та модель, которая давала наименьшее среднеквадратичное значение невязки, принималась за оптимальную. На основе проведенного тестирования выполнена корректировка скоростных колонок и конфигурационных файлов программ обработки. Уточненная скоростная модель

Таблица 2. Результаты макросейсмического обследования эпицентральной зоны при землетрясении 16 марта 2010 года (по данным СФ ГС РАН)

№	Пункт наблюдений	Δ, км
	<u>5–6 баллов</u>	
1	пос. Лазарев Хабаровский кр.	40
	<u>5 баллов</u>	
2	пос. Ноглики	73
	<u>4–5 балла</u>	
3	г. Николаевск-на-Амуре Хабаровский кр.	154
	<u>4 балла</u>	
4	пос. Вал	67
5	пос. Чныррах Хабаровский кр.	136
6	с. Красное Хабаровский кр.	141
	<u>3–4 балла</u>	
7	пос. Горячие Ключи	63
8	г. Александровск-Сахалинский	132
9	пос. Тымовское	140
	<u>3 балла</u>	
10	пос. Мгачи	114
11	пос. Тунгор	156
12	г. Оха	175
13	пос. Маго Хабаровский кр.	184
	<u>2–3 балла</u>	
14	пос. Арги-Паги	90
15	пос. Адо-Тымово	110
16	платформа Моликпак	118
17	пос. Молодежное	125
18	г. Комсомольск-на-Амуре	390
	<u>2 балла</u>	
19	пос. Воскресенское Хабаровский кр.	165
20	пос. Москальво	167

строения земной коры, используемая в данной работе, приведена на рис. 3.

Выполнен сравнительный анализ результатов определений параметров сильных землетрясений, произошедших в 2006–2009 гг. на Северном Сахалине, согласно каталогам NEIC, СФ ГС РАН и данным локальной сети. Несмотря на ожидаемые расхождения с международными агентствами, погрешность определения координат гипоцентра локальной сетью не превосходит 10 км, а зачастую характеризуется гораздо меньшими значениями. Распределение эллипсов ошибок показало, что наиболее уязвимый параметр, помимо глубины очага — долготы, что вызвано, вероятно, меридиональным расположением сейсмических

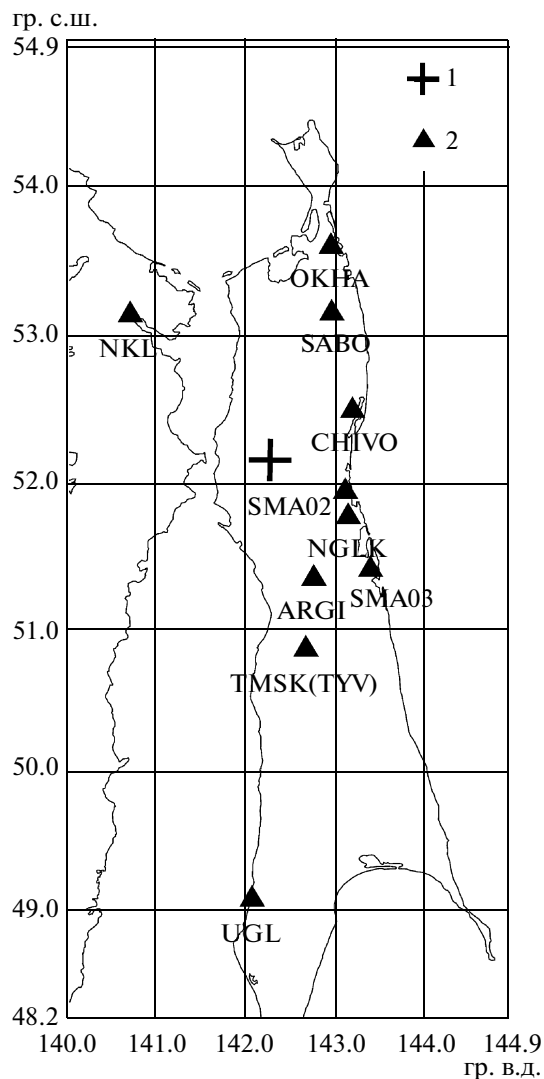


Рис. 2. Инструментальная сеть детальных сейсмологических наблюдений.

1 — эпицентр землетрясения 16.03.2010 г. ($M_W = 5.8$);
2 — цифровые сейсмические станции.

станций. Однако при субширотном удалении от сети разброс ошибок заметно уменьшается.

При определении координат гипоцентров землетрясений использовались данные, полученные одновременно как минимум по трем сейсмическим станциям. Из обработки удалялись времена пробега P - и S -волн, зарегистрированных на эпицентральных расстояниях, превышающих 150 км. Это позволило заметно уменьшить рассеяние гипоцентров, поэтому среднее квадратичное значение невязки (RMS) не превышает 0.2 сек. В качестве примера, демонстрирующего эффективность предлагаемого подхода, на рис. 4а изображено распределение среднее квадратичной величины невязки (RMS) в зависимости от глубины (h) при определении координат гипоцентра главного толчка ($M_W =$

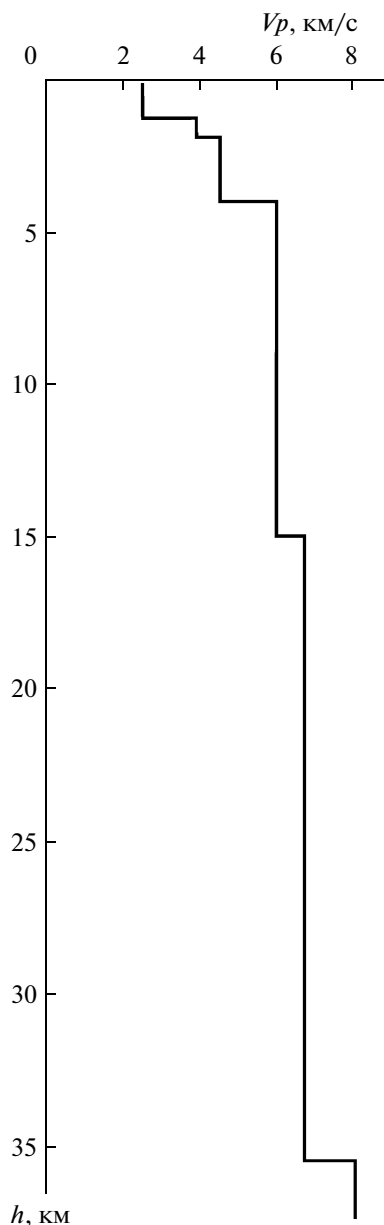


Рис. 3. Одномерная скоростная модель строения земной коры по данным ведущего научного сотрудника лаборатории сейсмики и морской акустики ИМГиГ ДВО РАН В.Н. Патрикеева.

$= 5.8$). Как видно на рисунке, значение глубины очага $h = 5$ км характеризуется четким локальным минимумом функции RMS, принимающей значение чуть более 0.1 сек. При использовании времен пробега сейсмических волн на эпицентральных расстояниях, превышающих 150 км, функция RMS не достигает четкого минимума. Она “размазывается” по широкому диапазону глубин, что вызвано, вероятно, трехмерными вариациями скоростей сейсмических волн на больших удалениях от очага. Кроме того, при обработке каждого землетрясения производилось тестирование из-

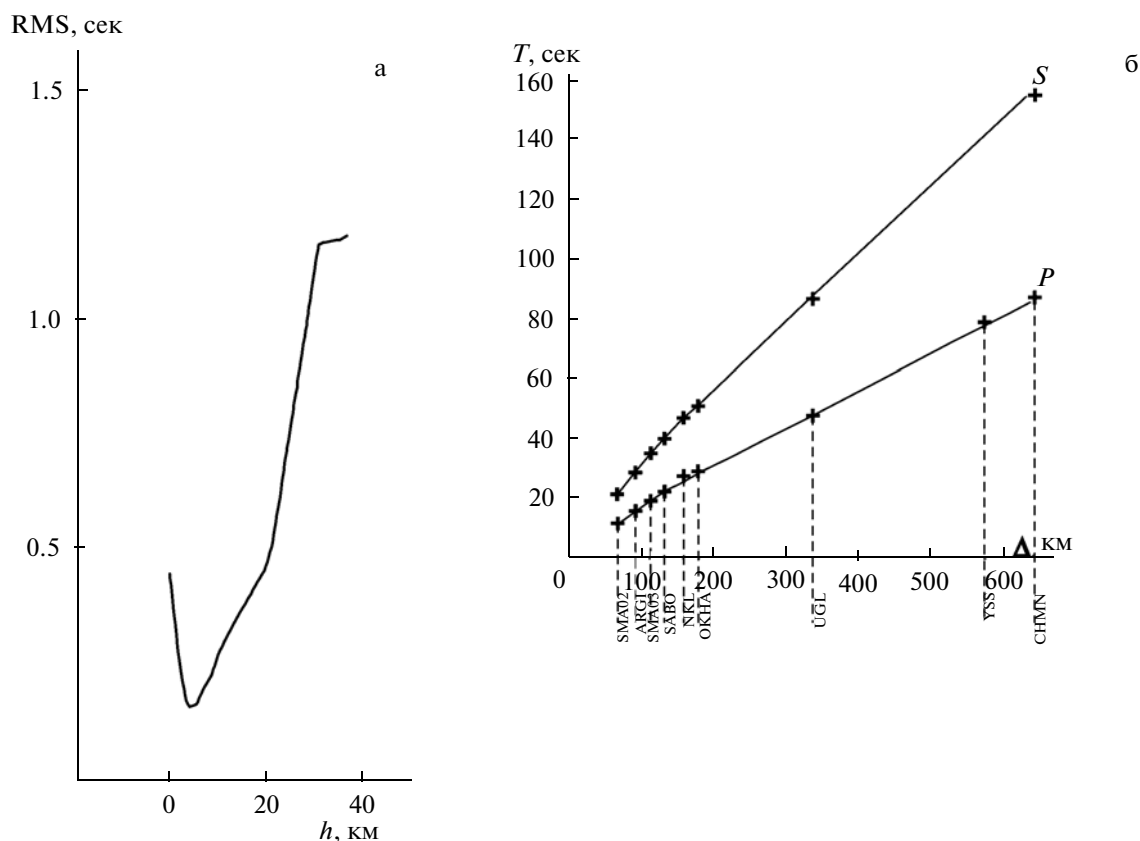


Рис. 4. Результаты тестирования измеренных параметров при определении координат гипоцентра главного толчка ($M_W = 5.8$).

а — распределение среднеквадратичной величины невязки (RMS) в зависимости от глубины очага (h); б — годограф объемных волн.

меренных параметров при помощи графика Вадати, характеризующего среднее соотношение между скоростями P - и S -волн. Скорости S -волн рассчитаны по скорости P -волн из соотношения $V_P/V_S = 1.8$.

На рис. 4б изображен годограф объемных волн для сильного землетрясения, произошедшего 16 марта 2010 г. Измеренные времена пробега P - и S -волн от очага землетрясения до наблюдающих станций обозначены крестиками. Расчетные времена пробега P - и S -волн, построенные согласно базовой скоростной модели и фиксированному значению глубины очага ($h = 5$ км), показаны аппроксимирующими непрерывными линиями: нижняя линия соответствует первым вступлениям P -фазы, верхняя — первым вступлениям S -фазы. Видно, что времена пробега сейсмических волн, измеренные по нескольким сейсмическим станциям, лежат на одних аппроксимирующих линиях годографов, что подтверждает высокую точность вычислений.

Для оценок энергетической величины (локальной магнитуды M_L) местных сейсмических событий использовалась корреляционная зави-

симость, являющаяся эквивалентом эмпирической номограммы, разработанной в лаборатории сейсмологии ИМГиГ ДВО РАН, и рекомендуемой для анализа землетрясений о. Сахалин [Сафонов, 2008]:

$$M_L = \lg A + 2.45 \lg R - 5.39, \quad (1)$$

где A — максимальная амплитуда поперечных волн в нм/с; R — эпицентральное расстояние в км.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОКАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

Определение механизма очага землетрясения по знакам первых вступлений, зарегистрированных глобальной сетью сейсмических станций, в большинстве случаев сопровождается дефицитом исходной информации. Распределение знаков на фокальной сфере контролируется азимутами на станцию и углами выхода сейсмических волн из очага землетрясения. Знаки первых смещений, измеренные на удаленных телесеизмических станциях, распределяются в основном в узком диапазоне стереографической проекции — в центре фокальной полусферы, а получаемые реше-

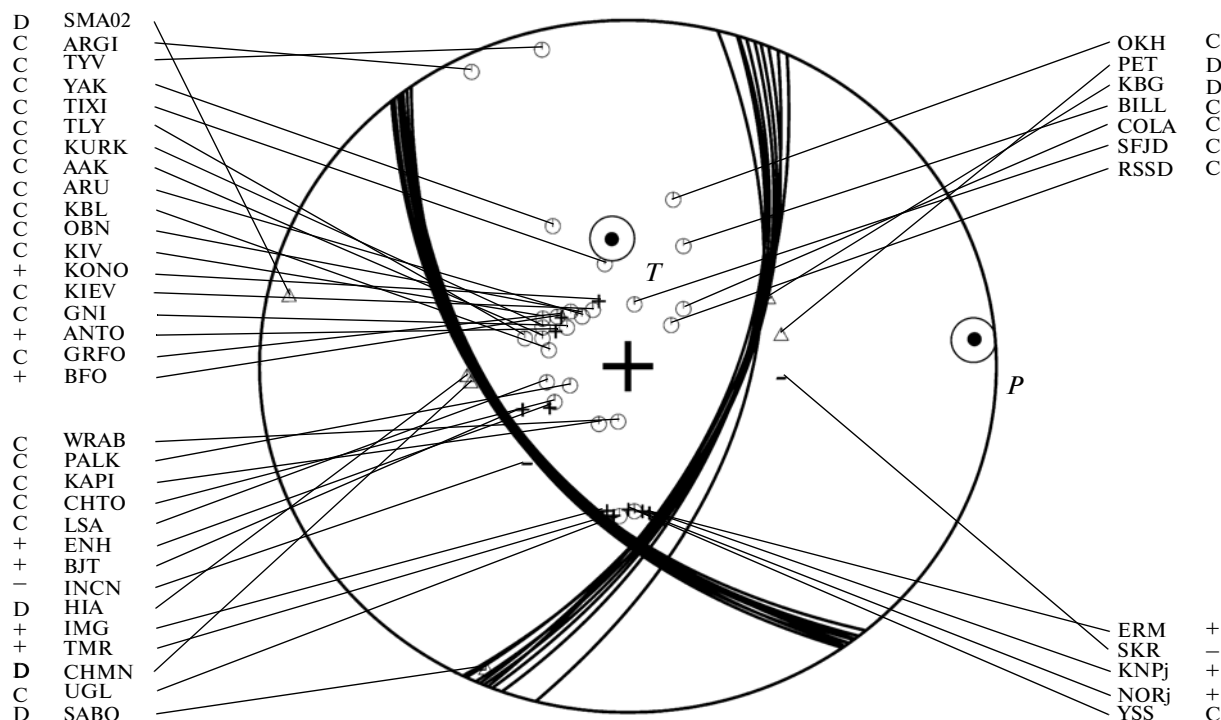


Рис. 5. Решения механизма очага в проекции на нижнюю полусферу.

ния оказываются неустойчивыми. В редких случаях, когда в решении механизма очага преобладают сдвиговые компоненты, можно надеяться на поквadrантное разделение знаков и получение статистически значимого и устойчивого решения.

С целью увеличения статистики знаков нами были использованы знаки первых смещений в прямых P_g -волнах по данным локальной сети и P_n - и P -волнах по данным региональной и глобальной сетей, соответственно. Их использование улучшило не только статистическую обеспеченность решаемой задачи, но и поквadrантное распределение знаков, что особенно важно в условиях односторонне расположенной и разреженной региональной сети наблюдающих станций.

В качестве методической основы в поиске решения механизма был принят базовый алгоритм вычислительной программы “FOCMEC” [Snoke, 2003], интегрированный в программу анализа сейсмической информации “SEISAN”. Для расчетов углов выхода сейсмических волн из очага использовались средняя модель строения Земли IASP91 [Kennett, Engdahl, 1991] и локальный сейсмический разрез (см. рис. 3).

Для определения фокального механизма очага Уангского землетрясения 2010 г. ($M_W = 5.8$) использовались записи локальной сети детальных сейсмологических наблюдений ИМГиГ ДВО РАН, региональной сети широкополосных сейсмических станций СФ ГС РАН, глобальной сей-

смологической сверхширокополосной сети NEIC [http://earthquake.usgs.gov/regional/neic, National Earthquake Information Center], японской сейсмологической широкополосной сети NEID [http://www.bosai.go.jp, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention], а также сети широкополосных сейсмических станций “REFTEK” [Сорокин, Коновалов, 2010], недавно установленных на юге Дальневосточного региона в рамках реализации Комплексной программы фундаментальных научных исследований ДВО РАН “Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России” (см. рис. 2).

В расчете задействовано 44 знака четких вступлений первых смещений, зарегистрированных на вертикальной компоненте записей сейсмических колебаний. Поиск решений осуществлялся на стереографической сетке с шагом равным одному градусу, при этом предполагалось отсутствие несогласованных знаков. Соответствующие этим условиям решения механизма очага в стереографической проекции на нижнюю полусферу показаны на рис. 5. Статистический анализ найденных 33 решений показал, что параметры сейсмодислокаций характеризуются следующими оценками рассеяния в ориентации осей главных действующих напряжений: ось T — ± 10 град.; ось P — ± 5 град. Это позволило однозначно определить механизм очага Уангского землетрясения 2010 г., выбрав одно из представленных на рис. 5 решений.

Для проверки устойчивости найденных решений использовался перебор допустимых нодальных плоскостей при условии двух-трех несогласованных знаков. Несмотря на увеличение области решений механизма очага, разброс в ориентации осей главных напряжений увеличился всего в 2–2.5 раза.

РЕЗУЛЬТАТЫ

За две недели с момента главного толчка сетью цифровых сейсмических станций было зарегистрировано более 130 афтершоков с магнитудами $M_L \geq 1$. Из них удалось локализовать чуть более 60 сейсмических событий. По результатам детальной обработки записей сейсмических колебаний был составлен каталог афтершоков из очаговой зоны Уангского землетрясения.

Результаты детального анализа пространственно-временного распределения афтершоков позволяют уверенно оконтурить очаговую зону Уангского землетрясения, простирающуюся в северо-северо-западном направлении вдоль северного продолжения Центрально-Сахалинского глубинного разлома — линии Западно-Энгизпальского разлома (рис. 6). Эпицентр главного события ($M_L = 5.7$) приурочен к южному краю группы повторных толчков, а очаги афтершоков с магнитудами $M_L \geq 4.0$ сконцентрированы в северо-западной части очаговой зоны. Наибольшей силы афтершок с $M_L = 5.1$ был зарегистрирован спустя трое суток. Все афтершоки локализируются в интервале глубин 5–10 км, где, по-видимому, и происходит накопление упругих деформаций, обусловленных общим региональным сжатием зоны разлома. Следует также отметить, что в пространственном распределении землетрясений наблюдается скученность очагов вдоль простирания обозначенного разлома, а протяженность области афтершоков составила приблизительно 30 км.

Как видно из решения фокального механизма (см. рис. 6), землетрясение с подвижкой взбросо-сдвигового типа произошло в условиях субширотного сжатия, что в целом хорошо согласуется с современными представлениями о характере деформирования Северного Сахалина. Одна нодальная плоскость (NP1) простирается в юго-восточном направлении, другая (NP2) — в северо-восточном (см. табл. 1). Направление простираения первой из плоскостей разрыва (NP1) достаточно уверенно согласуется с конфигурацией разрывов Центрально-Сахалинского глубинного разлома в данном районе и картиной пространственного распределения афтершоков, что в совокупности предопределяет выбор ее в качестве рабочей плоскости механизма очага. Таким образом, по данным детальных эпицентральных наблюдений можно сделать вывод, что при основном толчке 16 марта 2010 г. разрыв в очаге произошел по

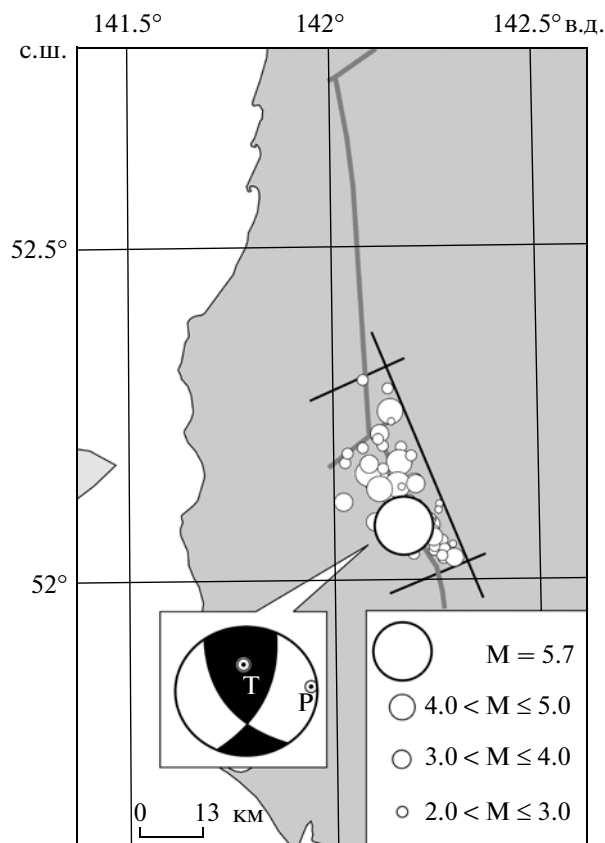


Рис. 6. Положение эпицентра главного толчка 16.03.2010 г. ($M_W = 5.8$), облака афтершоков и сегмента разломной зоны. Во врезке изображен механизм очага Уангского землетрясения в нижней проекции фокальной полусферы.

плоскости, ориентированной субмеридионально. Вероятно, что вспарывание происходило с юга на север. Совмещение сдвиговой компоненты механизма с ориентацией облака афтершоков, вытянутого вдоль простирания разлома и ограничивающего положение эпицентра главного толчка с северо-западной стороны, позволяет предположить, что активным блоком разлома является его западное крыло, надвинутое на “неподвижное” восточное крыло.

Для сравнения максимальной магнитуды и размера очаговой зоны землетрясения использовались как эмпирическое соотношение [Wells, Coppersmith, 1994], связывающие магнитуду землетрясения M с характерным размером сейсмодислокации L для произвольного типа подвижки в очаге $M = 4.38 + 1.49 \lg L$, так и отношение размера приочаговой зоны к размерам очага [Ананьин, 1973]. Оцененное значение максимальной магнитуды в зоне Уангского землетрясения составило $M = 5.9$. Наблюдаемые значения магнитуды Уангского землетрясения, представленные в табл. 1, очень близки к результату этого несложного теоретического расчета.

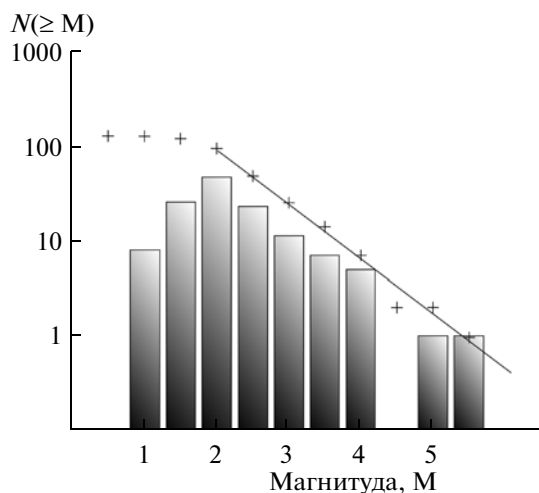


Рис. 7. Кумулятивный график повторяемости Гутенберга-Рихтера и аппроксимирующее лог-линейное соотношение. Гистограмма отображает плотностное распределение повторяемости.

В период афтершоковой активности сейсмический режим нестабилен, характер изменения свойств среды можно оценить лишь в общем виде на основе общепринятых статистических закономерностей распределения афтершоков в эпицентральной зоне [Арефьев, 2003; Семенова, 2010]. С этой целью были исследованы параметры графика повторяемости, среднестатистическая разность магнитуд главного толчка и сильнейшего афтершока, изменение числа афтершоков во времени.

Анализ кумулятивного графика повторяемости позволяет, во-первых, определить уровень представительности каталога афтершоков. Как видно на рис. 7, уровень представительности каталога афтершоков по магнитуде составляет приблизительно $M = 2.0$. Во-вторых, визуальное изучение наполняемости афтершоков показало дефицит сейсмических событий с магнитудами $M = 3.0–4.0$. Доля повторных событий с $M \geq 4.0$ в афтершоковой последовательности составила меньше 10% от общего числа зарегистрированных землетрясений. В качестве магнитуды $M_{\max}$ для определения повторяемости была взята максимальная магнитуда наблюдаемых событий, т.е. магнитуда главного толчка. Значение наклона кумулятивного графика повторяемости составило 0.53. Данное значение является аномально низким для сахалинских землетрясений [Семенова, 2010; Соловьев, Оскорбин, 1977] и соответствует дефициту слабых землетрясений, произошедших в очаговой зоне.

Количество зарегистрированных афтершоков Уангского землетрясения сравнивалось с ожидаемым числом событий, рассчитанным по формуле Дракопулоса, которая основана на соотношении общего числа афтершоков с магнитудой, превы-

шающей заданную величину, и магнитудой главного толчка. Формула Дракопулоса имеет следующий вид [Drakopoulos, 1971]:

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

где $N(M)$ – общее количество афтершоков с магнитудой, превышающей заданное значение M ; $A = \exp(3.62\beta + 1.1M_{\max} - 3.46)$; $M_{\max}$ – магнитуда главного толчка, $\beta = b/\lg(\exp)$, b – значение наклона графика повторяемости. Ожидаемое количество сейсмических событий с магнитудой $M \geq 2.0$, рассчитанное по (2), почти в два раза превышает общее число зарегистрированных афтершоков в заданном интервале магнитуд.

В соответствии с законом Бота среднестатистическая величина, соответствующая разности магнитуд главного толчка и сильнейшего афтершока, составляет $\Delta M_w = 1.2$ [Арефьев, 2003]. Сильнейший афтершок Уангского землетрясения был зарегистрирован через трое суток. Данные о моментной магнитуде афтершока на официальных сайтах международных сейсмологических центров отсутствовали. Поэтому значение $M_w = 4.8$ для афтершока было получено по корреляционной зависимости, связывающей M_w и M_{LH} [Региональный каталог ..., 2006]. Магнитуда M_{LH} , на наш взгляд, является наиболее оптимальной для перерасчета, так как она измеряется по поверхностным волнам. Моментная магнитуда главного толчка, измеренная по корреляционной зависимости, составляет 6.0, а оценка Бота составляет $\Delta M_w = 1.0–1.2$ в зависимости от наблюдаемого и расчетного значения магнитуды главного толчка. Близкое значение мы получили, сравнивая магнитуды по объемной волне $\Delta mb = 6.0 - 4.9 = 1.1$. Однако, сравнение по локальной магнитуде M_L дает $\Delta M_L = 0.6$. Такое аномально низкое значение ΔM_L может быть вызвано насыщением магнитуд для сильных землетрясений. Здесь видится острая необходимость уточнения калибровочной функции локальной магнитуды для оценки энергетической характеристики местных землетрясений, так как обычно локальная и моментная магнитуды принимают близкие значения для слабых и умеренных землетрясений. Таким образом, для объективных выводов по данному критерию требуется дополнительное исследование афтершоковых процессов на примере сахалинских землетрясений.

Общеизвестно, что распределение афтершоков во времени характеризуется затуханием. Закон Омори [Omori, 1894], позднее модифицированная формула Токуда Уцу [Utsu, 1962] описывает это затухание в виде степенной зависимости:

$$N(t) = A/(t + c)^p, \quad (3)$$

где A , p и c – постоянные; t – время, отсчитываемое от момента главного события; параметр p для различных землетрясений изменяется от 0.8 до 1.5.

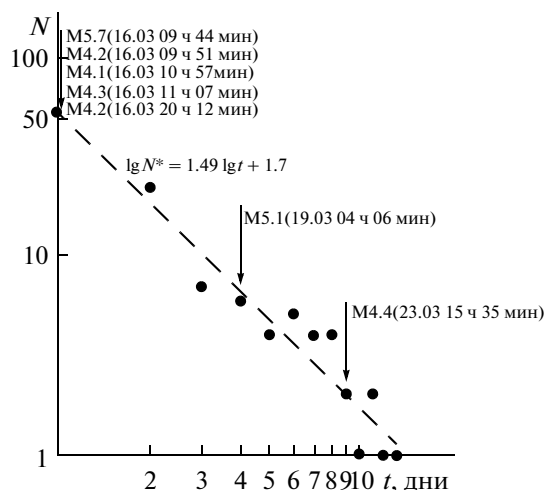


Рис. 8. График затухания афтершокового процесса (график Омори).

В случае афтершокоподобной активности параметры модифицированного закона Омори изменяются при увеличении уровня действующих напряжений — спад активности начинается тем позже, чем выше уровень напряжений; параметры закона Омори увеличиваются [Смирнов и др., 2010].

По результатам оценок количественных параметров сейсмического режима в очагах сильных землетрясений Сахалина, среднее значение величины p (угла наклона графика Омори) приближено к 1.2 [Семенова, 2010]. Угловой коэффициент спада числа афтершоков Уангского землетрясения во времени по графику Омори составил 1.49 (рис. 8). Основные афтершоки с $M \geq 4.0$ произошли в течение первых трех суток, и это наглядно демонстрирует график, изображенный на рис. 8. Таким образом, авторы статьи считают, что имеются предпосылки для возникновения повторных толчков в очаговой зоне Уангского землетрясения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

16 марта 2010 г. в 9 ч 44 мин всемирного времени на северо-западе Сахалина в верховьях рек Уанга и Погиби произошло коровое землетрясение с магнитудой $M_w = 5.8$. За инструментальный период непрерывных сейсмологических наблюдений, проводимых на Сахалине с 1905 г., оно является сильнейшим в этой части острова. По результатам макросейсмического обследования землетрясение ощущалось на значительной части территорий Северного Сахалина и Приамурья.

Инструментальная сеть детальных сейсмологических наблюдений, развернутая на севере Сахалина в 2006 г., позволила провести комплексный анализ сейсмического режима в эпицентральной

зоне Уангского землетрясения: определить конфигурацию и размеры очаговой зоны, выявить особенности пространственно-временного формирования афтершоковой серии землетрясений, исследовать механизм очага, смоделировать поведение сейсмического процесса в очаговой зоне.

Установлено, что исследуемое землетрясение с подвижкой взбросо-сдвигового типа произошло в условиях субширотного сжатия, что в целом хорошо согласуется с современными представлениями о характере деформирования Северного Сахалина [Василенко и др., 2010]. Направление простирания одной из главных плоскостей сейсморазрыва достаточно уверенно согласуется с ориентацией системы Энгизпальских меридиональных разрывов Центрально-Сахалинского глубинного разлома и картиной пространственного распределения афтершоков. Это позволило сделать вывод, что при основном толчке 16 марта 2010 г. разрыв в очаге произошел по плоскости, ориентированной субмеридионально. Протяженность области афтершоков составила приблизительно 30 км.

Анализ основных характеристик сейсмического режима, таких как параметров графика повторяемости, формулы Дракопулоса, закономерностей закона Бота и Омори, говорит, по всей видимости, о незавершенности сейсмического процесса в очаговой зоне Уангского землетрясения. Полученные результаты приводят также к заключению о необходимости более глубокого изучения процессов взаимодействия разломов в сложной разноранговой системе разрывных нарушений региона. Вместе с тем, сейсмотектонические условия возникновения данного землетрясения еще предстоит более подробно рассмотреть в контексте региональной сейсмичности Северного Сахалина, в том числе и вариаций поля упругих напряжений и устойчивой работы объектов нефтегазовой инфраструктуры, особенно нефтегазопроводов.

Авторы благодарны Сахалинскому филиалу Геофизической службы РАН, а также японскому Национальному исследовательскому институту наук о Земле и предотвращения катастрофических явлений (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention) и Национальному информационному центру о землетрясениях Геологической службы США (National Earthquake Information Center of United States Geological Survey) за предоставление сейсмологических данных.

Авторы признательны сотрудникам Института морской геологии и геофизики ДВО РАН д.ф.-м.н. И.Н. Тихонову и к.г.-м.н. В.Л. Ломтеву за полезные обсуждения и ценные рекомендации.

Отдельная благодарность от авторов ведущему научному сотруднику лаборатории сейсмики и морской акустики ИМГиГ ДВО РАН В.Н. Патрикеву за предоставленные материалы, которые

были использованы при построении обобщенно-го скоростного разреза.

Работа выполнена при поддержке Комплексной программы фундаментальных научных исследований ДВО РАН “Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России”, а также в рамках международного соглашения о научном сотрудничестве с Институтом сейсмологии и вулканологии Хоккайдского университета (Япония).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьин И.В. Об оценке величины сейсмической активности и максимально возможной энергии землетрясений в отдельных сейсмогенных зонах Кавказа // Сейсмогенные структуры и сейсмодислокации. М.: ВНИИГеофизика, 1973. С. 91–94.
- Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические наблюдения. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. 375 с.
- Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У. и др. Активные разломы северо-восточного Сахалина // Геотектоника. 2002. № 3. С. 66–86.
- Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Коган М.Г. и др. Современная геодинамика Сахалино-Курильского региона по данным GPS наблюдений // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири (докл. научного симпозиума, 1–4 июня 2010, г. Хабаровск) / Под ред. Быкова В.Г., Диденко А.Н. Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2010. С. 80–83.
- Ким Ч.У., Михайлов В.И., Сен Р.С. и др. Невельское землетрясение 02.08.2007: анализ инструментальных данных // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 5. С. 4–15.
- Коновалов А.В., Иващенко А.И., Ким Ч.У. и др. Структура и особенности сейсмического режима очаговой зоны Такойского землетрясения 1 сентября 2001 года ($M_w 5.2$) // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 26. № 2. С. 93–102.
- Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области // М.: Наука, 1987. 95 с.
- Оскорбин Л.С. Уравнения сейсмического поля сахалинских землетрясений // Сейсмическое районирование Сахалина. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 34–22.
- Оскорбин Л.С. Сейсмогенные зоны Сахалина и сопредельных областей // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. Т. 6. С. 154–178.
- Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг. / Отв. ред. Поплавская Л.Н. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.
- Сафонов Д.А. Динамика сейсмичности Южного Сахалина на основе современных инструментальных и макросейсмических данных // Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. 24 с.
- Семенова Е.П. Особенности проявления афтершоковой деятельности сильных Сахалинских землетрясений // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири (докл. научного симпозиума, 1–4 июня 2010, г. Хабаровск) / Под ред. Быкова В.Г., Диденко А.Н. Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2010. С. 273–275.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П. и др. Закономерности переходных режимов сейсмического процесса по данным лабораторного и натурного моделирования // Физика Земли. 2010. № 2. С. 17–49.
- Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С., Ферчев М.Д. Землетрясения на Сахалине. М.: Наука, 1967. 180 с.
- Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С. Схема сейсмического районирования Сахалина // Сейсмическое районирование Сахалина. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 52–63.
- Сорокин А.А., Коновалов А.В. Создание системы сбора, хранения и обработки сейсмологической информации для сети наблюдений ДВО РАН на территории юга Дальнего Востока России // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири (докл. научного симпозиума, 1–4 июня 2010, г. Хабаровск) / Под ред. Быкова В.Г., Диденко А.Н. Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2010. С. 176–178.
- Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. Разломы Сахалина // Тихоокеанская геология. 1984. № 2. С. 77–86.
- Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.
- Drakopoulos J.C. A statistical model on the occurrence of aftershocks in the area of Greece // Bull. Int. Inst. Seismol. Earthquake Eng. 1971. V. 8. P. 17–39.
- Geiger L. Probability method for determination of earthquake epicenters from the arrival times only // Bull. St. Louis Univ. 1912. V. 8. P. 60–71.
- Havskov J., Ottemoller L. SEISAN earthquake analysis software // Seis. Res. Lett. 2000. V. 70. P. 532–534.
- Katsumata K., Kasahara M., Ichiyangi M. et al. The 27 May 1995 $M_s 7.6$ Northern Sakhalin earthquake: an earthquake on an uncertain plate boundary // Bull. Seis. Soc. Am. 2004. V. 94. № 1. P. 117–130.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Travel times for global earthquake location and phase identification // Geophys. J. Int. 1991. V. 105. P. 429–466.
- Lienert B.R.E., Havskov J. Hypocenter 3.2: A computer program for locating earthquakes locally, regionally, and globally // Seis. Res. Lett. 1995. V. 66. P. 26–36.
- NEIC, <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic>, National Earthquake Information Center.
- NIED, <http://www.bosai.go.jp>, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.
- Omori F. On the aftershocks of earthquakes // J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo. 1894. V. 7. P. 111–200.
- Snoke J.A. FOCMEC: FOCal MECHANism determinations. A manual. 2003. <http://www.geol.vt.edu/outreach/vtso/focmec/>.
- Utsu Tokuji. On the nature of three Alaskan aftershock sequences of 1957 and 1958 // Bull. Seis. Soc. Am. 1962. V. 52. № 2. P. 279–297.
- Wells D., Coppersmith K. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement // Bull. Seis. Soc. Am. 1994. V. 84. № 4. P. 974–1002.

A Detailed Study of the Rupture Zone of the M_w 5.8 March 16, 2010 Earthquake at Northwestern Sakhalin Island

A. V. Konovalov^a, E. P. Semenova^{a,b}, and D. A. Safonov^{a,b}

^a *Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Nauki 1-B, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Russia*

e-mail: konovalov@imgg.ru

^b *Sakhalin Branch of the Geophysical Service, Russian Academy of Sciences,
ul. Tikhookeanskaya 2-A, Yuzhno-Sakhalinsk, 693010 Russia*

e-mail: semenova@imgg.ru

Abstract—An earthquake of magnitude $M_w = 5.8$ occurred in the upper reaches of the Uanga and Pogibi rivers in northwestern Sakhalin at 9 h 44 min WT on March 16, 2010. The event is the largest for the northwestern part of the island during the entire history of instrumental seismological observations that have been conducted on Sakhalin since 1905. A macroseismic study showed that the earthquake was felt in much of northern Sakhalin and the Amur River area. This paper presents the results from a detailed study of the seismicity in the rupture zone, the space–time distribution of aftershocks, and their relationships to the active fault zones that exist in northern Sakhalin. Some new results were obtained that concern the interrelationships between the focal mechanism and the present-day geodynamic setting.