

НЕВЕЛЬСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2 АВГУСТА 2007 Г. И СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА
НА ЮГО-ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЕ О. САХАЛИН

А.В. Коновалов¹, Т.В. Нагорных¹, Д.А. Сафонов^{1,2}, В.Л. Ломтев¹

¹ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;
e-mail: kononov@imgg.ru

²ФГБУН Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, ул. Тихоокеанская 2А, г. Южно-Сахалинск, 693010;
e-mail: safonov@imgg.ru

Поступила в редакцию 27 ноября 2014 г.

Изложены новые сведения по результатам изучения инструментальных и макросейсмических данных об ощутимых Невельских землетрясениях интенсивностью 7–8 (6–7) баллов по шкале MSK-64, с магнитудой $M_LH=6.3$ (6.0), произошедших 02.08.2007 вблизи юго-западного побережья о. Сахалин. Собраны и проанализированы все имеющиеся инструментальные данные, полученные по комплексу локальных, региональных и телесейсмических наблюдений, что позволило более детально изучить сейсмическую обстановку в районе возникновения землетрясений, определить механизмы не только главных событий, но и их афтершоков. Анализ пространственного распределения очагов главных событий и их многочисленных афтершоков по координатам гипоцентров, особенностей решения механизмов сильнейших из них, данных о косейсмических деформациях прибрежной части о. Сахалин позволил отчетливо оконтурить очаговую область землетрясения, построить объективные дислокационные модели сильнейших событий.

Ключевые слова: землетрясение, механизм очага, афтершоки, сейсмодислокационная модель, напряженное состояние, гравитационная сейсмостектоника, цилиндрические разломы, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена углубленному изучению сейсмической обстановки и сейсмостектоники юго-западной окраины Сахалина (северное окончание Японо-Сахалинской островной дуги), где 02.08.2007 г. в верхней части континентальной коры произошли шельфовые Невельские землетрясения с $M_LH = 6.3$ (6.0) с глубиной $h = 11$ (14) км (зона Западно-Сахалинского регионального разлома [2, 9, 13, 16, 18, 25, 29, 31]). В сравнении с землетрясениями на япономорской подводной окраине Японо-Сахалинской дуги [30, 37, 38] оно по ряду позиций оказалось аномальным. Было три волны цунами высотой до 3.2 м [18], рой афтершоков западного падения ($38\text{--}40^\circ$) со взбросовым механизмом основных событий и небольшой сдвиговой компонентой, массовый выход угольного метана в прибрежной зоне протяженностью 40 км, подъем бенчей в районе порта Невельск, массовые разрушения зданий (> 200), мостов, ж/д и автодорог, Горнозаводский триггер и др. При оператив-

ном анализе материалов обследования сейсмической обстановки, геологии и сейсмостектоники очаговой зоны в [2, 9, 13, 16, 18, 25, 28, 30] некоторые проблемы решить не удалось. Так, в отличие от Невельского землетрясения, для ряда сильных коровых событий на япономорской окраине Японо-Сахалинской дуги, в том числе близкого Монеронского 1971 г., установлено восточное падение главных сейсморазрывов [37]. Не освещены также дуговой изгиб роя афтершоков в плане к западу и его линзовидная форма в меридиональном сечении (рис. 1), которые в соответствии с материалами геологосъемки в орогенных структурах [1, 19] указывают на гравитационное сползание кайнозойского чехла и его мезозойско-палеозойского основания на пологом западном склоне Камышового антиклинория, при котором возникают надвижки и взбросы, частью цилиндрические [34], а также блоковые оползни, крип и связанные с ними параллельные берегу постабразионные антиклинали бортового отпора [16].

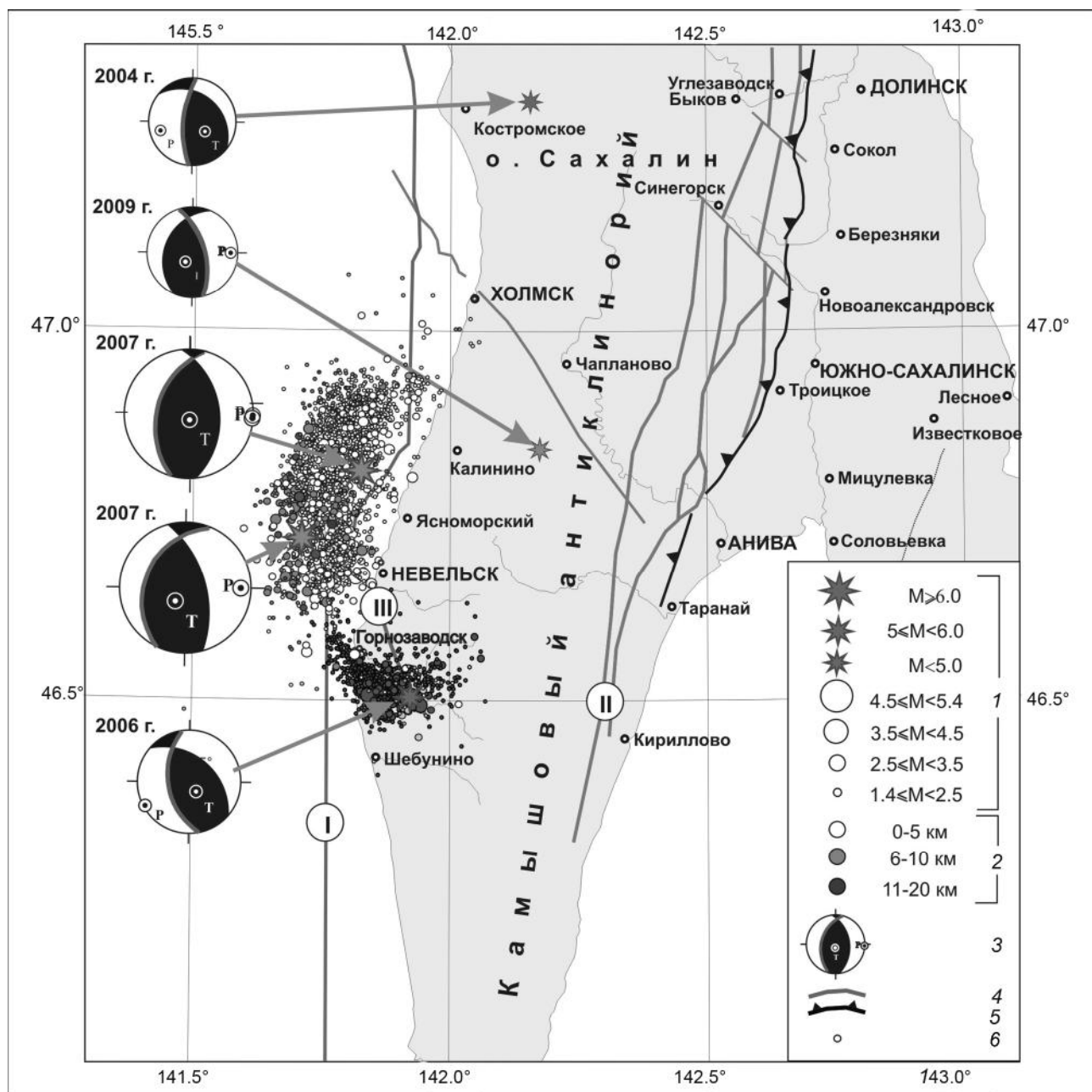


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений юго-западного побережья о. Сахалина за 2004–2010 гг., включая афтершоки Горнозаводского и Невельских землетрясений, по данным [8, 11], и главные разломы Южного Сахалина.

I – классификация по магнитуде; *2* – классификация по глубине; *3* – стереограммы механизмов очагов землетрясений; серым цветом выделены рабочие плоскости; *4* – схема разломов согласно [28]: *I* – Западно-Сахалинский, *II* – Зона Центрально-Сахалинского разлома, *III* – Горнозаводский разлом; *5* – фронт аккреции в основании восточного склона Камышового моноклинория; *6* – населенные пункты.

ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ РЕГИОНА

Наиболее сильными сейсмическими событиями, произошедшими на юге о. Сахалин за инструментальный период наблюдений, являются: Анивское землетрясение 1951 г. (MLH = 5.5), Моне-ронское землетрясение 1971 г. (MLH = 7.5) и Такой-ский рой землетрясений 2001 г. (MLH = 5.6) [11]. Ха-

рактеристика сейсмичности подробно представлена в [18].

По историческим данным, на западном побережье Южного Сахалина в зоне Западно-Сахалинского глубинного разлома за последние 100 лет землетрясения с $MLH \geq 5$ не были зарегистрированы. В 2004–2010 гг. в рассматриваемом районе произошло

несколько сильных и умеренных землетрясений. Так, первое землетрясение зарегистрировано 30 мая 2004 г. недалеко от пос. Костромское с $MLH = 4.8$ и интенсивностью до 6 баллов по шкале MSK-64. Спустя два года 17(18) августа 2006 г. вблизи пос. Горнозаводск произошло сильное землетрясение с $MLH=5.9$, вызвавшее в ближайших населенных пунктах сотрясения интенсивностью до 7 баллов. Его эпицентр находился в 100 км юго-западнее первого события [31]. Установив аномальность хода афтершокового процесса Горнозаводского землетрясения в течение первых 6 суток и проанализировав ряд других геофизических данных, И.Н. Тихонов и Ким Чун Ун пришли к выводу, что оно является предвестником более сильного события [29]. Эпицентр Горнозаводского землетрясения приурочен к центральной части оперяющего разлома, проходящего восточнее пос. Горнозаводск, а далее направление магистрального разрыва обозначилось за счет процесса растрескивания в северо-западном направлении от основного разлома с выходом на акваторию Татарского пролива.

Невельские землетрясения произошли на сахалинском шельфе Татарского пролива, северо-западнее Горнозаводского землетрясения спустя 1 год, вызвав в г. Невельск разрушения и сотрясения до 8 баллов. Спустя 2 года после Невельских землетрясений в данном районе произошло Чаплановское землетрясение 13.09.2009 г. с $MLH = 4.6$ и интенсивностью 5–6 баллов.

В целом все землетрясения, произошедшие на южном фланге Западно-Сахалинского разлома в исследуемый период времени, явились следствием субширотного сжатия. Сдвиговая компонента подвижки, кроме Чаплановского землетрясения, оказалась правосторонней, т.е. верхний, надвинутый блок смещался на север. Отмечено, что рабочие плоскости механизмов очагов землетрясений падают на запад-юго-запад, тогда как рабочая плоскость Чаплановского землетрясения – на северо-восток (левый сдвиг, рис. 1).

ПАРАМЕТРЫ ГИПОЦЕНТРА

Серия сильных Невельских землетрясений произошла вблизи юго-западного побережья о. Сахалин. Время первого и самого сильного события по Гринвичу – 2 ч 37 мин, магнитуда $MLH = 6.3$. В 5 ч 22 мин произошло еще одно сильное землетрясение, сравнимое с первым по магнитуде $MLH = 6.0$. Интенсивность сотрясений, вызванных этими событиями в г. Невельск, составила 7–8 баллов для первого события, 6–7 баллов – для второго, 5–6 баллов – для наиболее сильных последующих событий. Всего в этом районе 2 августа 2007 г. локальной сейсмической сетью СФ ГС РАН было зарегистрировано 776

землетрясений. Были детально изучены оба эпицентра землетрясений с $MLH \geq 6.0$, для них определены основные параметры и механизмы очага, по данным различных источников [11, 18, 25]. Как показано в табл. 1, координаты эпицентров практически совпадают в пределах ($\delta\varphi \leq 0.03$, гр, $\delta\lambda \leq 0.15$, гр.).

Для первого землетрясения ($t_0 = 02:37$) наблюдается большой разброс в координатах эпицентра и отличие их от регионального решения. Сильнее всего – более 45 км к северу – смещен эпицентр по данным агентства JMA, по данным агентства NEIC разница в положении эпицентра с региональным определением составляет 33 км, для MOS и ISC – несколько меньше; хорошее совпадение положения эпицентра отмечается только у агентства GCMT (табл. 1), однако в данном случае агентство публикует положение центра модельного центроида, использованного для определения тензора сейсмического момента события.

Необходимо отметить значительный разброс в положении эпицентра, полученный в СФ ГС РАН и ИМГиГ ДВО РАН при независимых определениях отдельно по оперативным, региональным и локальным данным. Вероятно, это стало следствием сложного характера записи первого события Невельской серии. На записях многих станций в широком азимуте от эпицентра выделяется относительно слабое первое вступление, которое плохо различается на удаленных или зашумленных станциях и может быть пропущено, следом же идет сильный импульс, который может быть принят за первое вступление (рис. 2 а). Такая же ситуация наблюдалась, например, при обработке сейсмограмм Нефтегорского землетрясения 1995 г. В случае второго сильного землетрясения (рис. 2 б) первое вступление более четкое.

Глубина очага изучаемых землетрясений была определена по обменным волнам pP , sP , sS , отраженным вблизи эпицентра, с использованием региональных таблиц Л.Н. Поплавской [22] для близких ($\Delta \leq 10^\circ$) станций и таблиц Н.В. Кондорской и Джеффриса-Буллена [28] – для телесеизмических, и составила для первого события с $t_0 = 02:37$ – $h = 11 \pm 1.5$ км, для второго с $t_0 = 05:22$ – $h = 14 \pm 2$ км.

МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

По совокупности данных локальной, региональной и глобальной сетей были определены механизмы очагов двух сильнейших ($M \geq 6.0$) Невельских землетрясений и шести афтершоков (рис. 3, табл. 2). Для уточнения решения, в соответствии с [20, 21], были привлечены данные о знаках SV , SH волн ряда станций Дальнего Востока и сопредельных территорий (рис. 3). Решения механизмов этих землетрясений хорошо согласуются между собой, отмечается

Таблица 1. Основные параметры Невельских землетрясений 2007 г. по данным различных источников.

№ п/п	Источник	Время в очаге t ₀ , ч:мин:с	Эпицентр		Глубина очага h, км	Магнитуда	Стереогаммы механизмов очагов*
			φ° с.ш.	λ° в.д.			
02.08.2007 г., t ₀ = 02:37:39.5							
1	СФ ГС РАН (оперативное)	02:37:39.5	46.8	141.6	8	MLH = 6.1	
2	СФ ГС РАН (по локальной сети)	02:37:39.13	46.83	141.76	11.7	MLH = 6.3	
3	ИМГиГ ДВО РАН	02:37:39.5	46.81	141.83	11	MLH = 6.3	
	ИМГиГ ДВО РАН (ме- тод двойных разностей)	02:37:38.49	46.81	141.75	9.3	MLH = 6.2	
4	NEIC	02:37:42.4	47.12	141.80	5	Mw = 6.2	
5	JMA	02:37:33.6	47.22	141.72	5	Mw = 6.4	
6	GCMT	02:37:42.4	46.84	141.82	12	Mw = 6.2	
7	ISC	02:37:44.6	46.95	141.79	21	Ms = 6.3	
8	MOS	02:37:40.7	46.91	141.73	9	Ms = 6.5	
02.08.2007 г., t ₀ = 05:22:16.9							
1	СФ ГС РАН (оперативное)	05:22:15.7	46.8	141.7	10	MLH = 6.0	
2	СФ ГС РАН (по локальной сети)	05:22:16.9	46.75	141.80	13.3	MLH = 6.0	
3	ИМГиГ ДВО РАН	05:22:16.0	46.72	141.71	14	MLH = 6.0	
	ИМГиГ ДВО РАН (метод двойных разностей)	05:22:16.97	46.74	141.75	6.54	MLH = 6.0	
4	NEIC	05:22:17.7	46.71	141.72	10	Mw = 5.8/-	
5	JMA	05:22:14.9	46.97	141.69	27	Ms = 5.9/-	
6	GCMT	05:22:17.7	46.81	141.67	13	Ms = 5.8	
7	ISC	05:22:17.6	46.76	141.75	8	Ms = 5.6	
8	MOS	05:22:16.8	46.76	141.70	13	Ms = 5.6	

Примечание. MLH – магнитуда по поверхностной волне Релея, Mw – моментная магнитуда, Ms – магнитуда, определяемая по поверхностным волнам в интервале периодов 17–23 с и расстояний 1500–15 000 км; СФ ГС РАН – Сахалинский филиал Геофизической службы РАН – (Южно-Сахалинск, Россия); ИМГиГ ДВО РАН – Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (Южно-Сахалинск, Россия); NEIC – Национальный сейсмологический информационный центр США; JMA – Японское метеорологическое агентство; GCMT – The Global CMT Project – (Колумбийский университет, США); ISC – Международный сейсмологический центр (Беркшир, Великобритания); MOS – Геофизическая служба РАН (Обнинск, Россия); * – стереогаммы механизмов приведены в нижней полусфере.

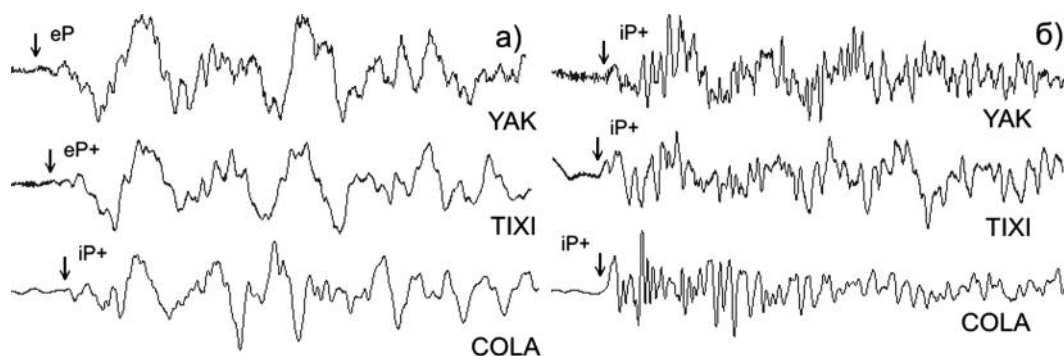


Рис. 2. Пример записи первого вступления землетрясений 2 августа 2007 г. в 02:37 (а) и 05:22 (б) на вертикальной компоненте широкополосных сейсмостанций.

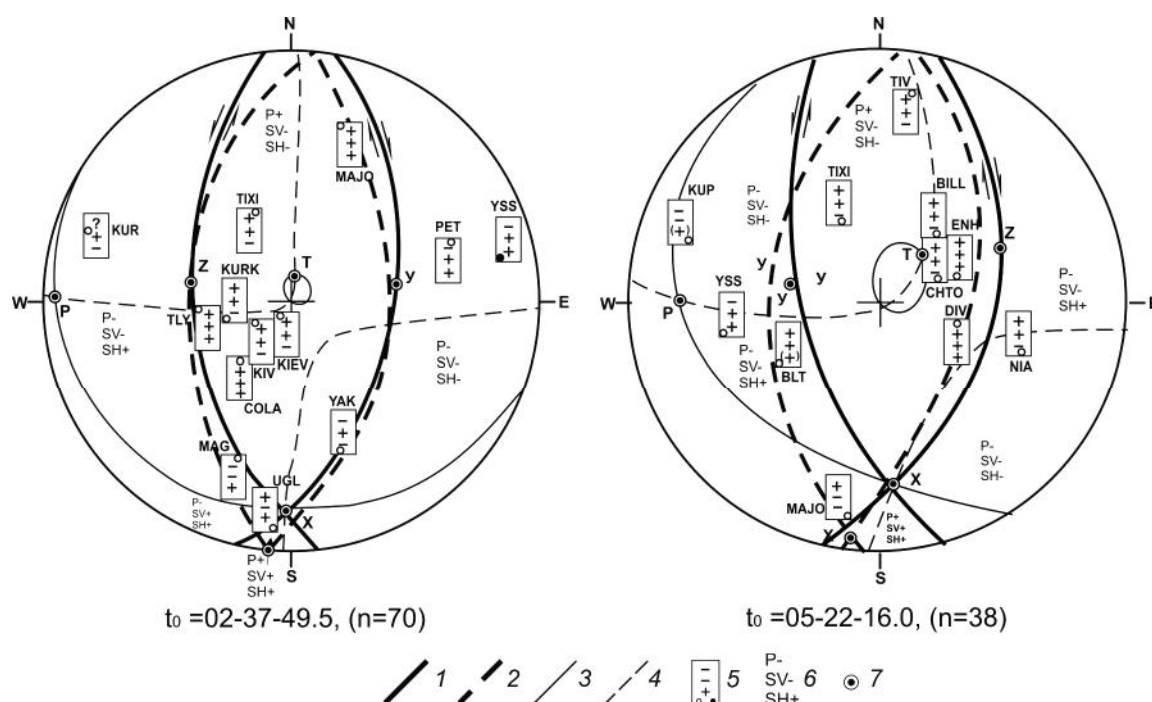


Рис. 3. Стереогаммы механизмов очагов Невельских землетрясений 2 августа 2007 г. с $MLN \geq 6.0$. (верхняя полусфера).

1–2 – положение нодальных плоскостей решений ИМГиГ ДВО РАН (настоящая работа) и GCMT, соответственно; 3–4 – нодальные линии $SV = 0$ и $SH = 0$, соответственно; 5–6 – экспериментальные (5) и теоретические (6) знаки первых смещений в волнах P , SV , SH (пустой кружок соответствует волне, распространявшейся от очага вниз, зачерненный – волне, распространявшейся от очага вверх); 7 – положение осей P , T , X , Y , Z для решений механизма, согласованных со знаками в P , PG , S , SG -волнах.

некоторое увеличение сдвиговой компоненты во втором событии ($t_0 = 05:22$). В соответствии с этими решениями подвижка в очагах Невельских землетрясений произошла под действием близгоризонтальных сжимающих напряжений, ориентированных субшироотно.

Оси промежуточных напряжений близгоризонтальны и ориентированы субмеридионально. Тип сейсмодислокации – взброс с небольшой сдвиговой компонентой. Одна из полученных нодальных плоскостей (NP1 в табл. 2) имеет субмеридиональное

простираие и сравнительно полого падает на запад – северо-запад, при этом западное крыло разрыва поднялось и немного сдвинулось на северо-восток (правосторонняя сдвиговая компонента).

По положению афтершоков первых суток, глубина гипоцентров которых увеличивается в западном направлении, можно предположить, что направление разрыва в очаге соответствует первой нодальной плоскости.

Другая возможная плоскость разрыва (NP2 в табл. 2) имеет северо-западное простираие и более

Таблица 2. Основные сейсмодислокации, реализовавшиеся при Невельских землетрясениях и их наиболее сильных афтершоках.

№ п/п	дата		Время в очаге t_0 ч:мин:с	φ, гр с.ш	λ, гр. в.д.	Глубина очага h , км	MLH	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Тип дислокаций
	м	д						Т		N		P		NP1			NP2			
								PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
Основные землетрясения																				
1	8	2	02:37:39.5	46.81	141.83	11	6.3	79	188	11	3	1	93	194	45	105	353	47	75	Взброс
2	8	2	05:22:16.0	46.72	41.71	14	6.0	67	216	18	355	14	90	203	35	123	344	62	69	Взброс
Афтершоки																				
3	8	2	05:01:45.4	46.70	141.74	5	4.7	63	64	25	222	9	316	205	59	60	73	42	129	Взброс
4	8	2	6:04:40.7	46.7	141.8	6	4.7	68	64	20	218	9	311	204	57	66	63	40	122	Взброс
5	8	2	08:06:27.8	46.74	141.77	7	5.3	86	56	0	146	4	236	326	41	90	146	49	90	Взброс
6	8	2	10:37:30.5	46.67	141.83	4	5.6	69	151	21	339	3	248	177	51	117	318	46	60	Взброс
7	8	4	22:20:52.3	46.66	141.76	4	4.6	54	163	36	338	2	69	191	53	137	310	57	46	Взброс
8	8	14	04:13:33	46.87	141.77	4	5.7	60	221	30	41	0	311	14	52	51	247	52	129	Взброс

крутое падение на восток-северо-восток (левосторонний сдвиг).

МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Обследование территории Южного Сахалина было проведено силами коллективов СФ ГС РАН и ИМГиГ ДВО РАН. Макросейсмический эффект землетрясения достигал $I = 8$ баллов в центральной и южной частях г. Невельск, пос. Селезнево и Лопатино. В северной части Невельска и в пос. Горнозаводск интенсивность сотрясений составила $I=7$ баллов. Подробные результаты макросейсмического обследования представлены в [13, 18, 31] и использованы при построении карты «пункт–балл» (рис. 4).

Невельское землетрясение – сложное сейсмическое событие. В макросейсмической картине выделяется, по крайней мере, четыре сильных события 2 августа: в $t_0 = 02:37$ (MLH = 6.3), в $t_0 = 5:22$ (MLH = 6.0), в $t_0 = 8:06$ (MLH = 5.3) и в $t_0 = 10:37$ (MLH = 5.6), оказавшие отдельное независимое влияние и выделявшиеся наблюдателями как самые сильные. Причем в разных населенных пунктах наиболее сильным назывались разные события. Несмотря на то, что обследование началось на следующий день после землетрясений, крайне сложно оказалось выделить проявления отдельных сейсмических событий, поэтому приходится иметь дело с обобщенной макросейсмической картиной, явившейся результатом проявлений последовательности сильных землетрясений первых суток [25].

Для упрощения анализа макросейсмических проявлений Невельских землетрясений полученные результаты можно условно посчитать следствием одного сильного землетрясения. В этом случае за эпи-

центр «обобщенного» землетрясения принимается центр очаговой области, примерно соответствующий центру области афтершоков первых суток (рис. 4), а за глубину – наиболее характерная глубина этой совокупности землетрясений ($h \approx 10$ км). Очаг Невельского события, соответствующий области эпицентров афтершоков первых суток, имеет размеры примерно 30×12 км и вытянут в субмеридиональном направлении вдоль побережья о. Сахалин. На основе данных об ощутимости Невельских землетрясений в населенных пунктах южной части о. Сахалин были рассчитаны коэффициенты кривой затухания балльности с расстоянием (рис. 5).

Полученная зависимость имеет вид:

$$I = -4.86 \cdot \lg R + 12.65. \quad (1)$$

Сопоставляя параметры затухания с известным уравнением макросейсмического поля Н.В. Шебалина [35], получаем: $b \cdot M + c = 12.65$; $v = 4.86$; где v , b и c – коэффициенты уравнения среднего макросейсмического поля, R – гипоцентрального расстояния, км, M – магнитуда землетрясения, в данном случае ее значение не используется.

Полученное соотношение можно трактовать как осредненное уравнение макросейсмического поля данного землетрясения и использовать для построения круговых изосейст, радиус которых вычисляется следующим образом. Из уравнения среднего макросейсмического поля [35] следует:

$$\bar{\Delta}_i = \sqrt{10^{\frac{2}{v}(bM+c-I_i)}} - h^2, \quad (2)$$

где $\bar{\Delta}_i$ – среднее эпицентрального расстояния до i -го балла, I_i – интенсивность расчетной изосейсты, h – глубина очага.

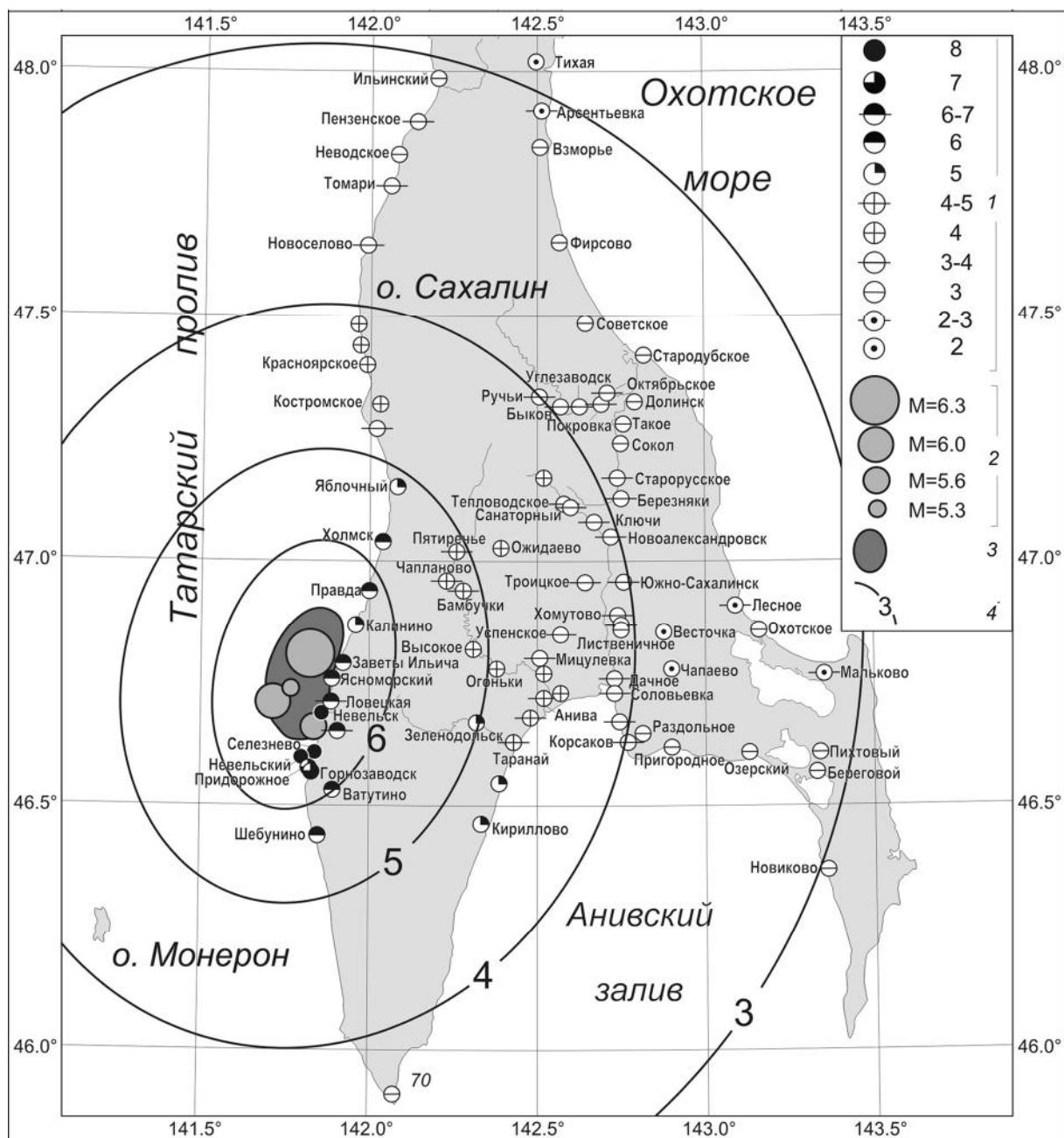


Рис. 4. Макросейсмический эффект Невельских землетрясений 2 августа 2007 г.

1 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK-64; 2 – магнитуда землетрясения; 3 – область афтершоков первых суток; 4 – расчетные изосейсты.

Однако радиус изосейсты и среднее расстояние до пункта с данной балльностью – понятия не тождественные, так как, по определению Н.В. Шебалина [36], «...ныне изосейстой принято называть внешний контур области уверенного определения данной макросейсмической интенсивности (балльности)». В процитированной работе предложена формула, связывающая радиус изосейсты со средним эпицентральной расстоянием:

$$\bar{\Delta}_i = r_i \cdot 10^{\frac{1}{2\nu}}. \quad (3)$$

Объединяя выражения (2) и (3), получаем формулу для вычисления радиуса круговых изосейст:

$$r_i = 10^{\frac{1}{2\nu}} \cdot \sqrt{10^{\frac{2}{\nu}(bM+c-I_i)} - h^2}. \quad (4)$$

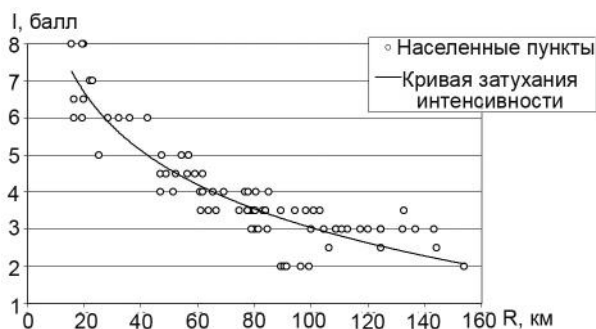


Рис. 5. График зависимости интенсивности проявлений Невельских землетрясений 2 августа 2007 г. от расстояния до центра области афтершоков первых суток.

Построенные по этой методике изосейсты нанесены на стандартную карту «пункт–балл» суммарного макросейсмического эффекта Невельской серии землетрясений 2 августа 2007 г. (рис. 4). При построении изосейст также учтена вытянутость очаговой области Невельских землетрясений, эффект имеет значительное влияние на изосейсты больших баллов и сглаживается с расстоянием. Если принять примерную границу афтершоков первых суток размером $30 \text{ км} \times 12 \text{ км}$ за изосейсту максимального балла, следующая за ней изосейста, повторяя очертания первой, должна быть больше в субмеридиональном направлении на величину $(30-12)/2 = 9 \text{ км}$ и на ту же величину меньше в субширотном направлении. В соответствии с простиранием нодальных плоскостей механизмов двух наиболее сильных землетрясений Невельской серии, полученные эллипсы изосейст повернуты по часовой стрелке на небольшой угол (10°).

По описанной методике были построены расчетные изосейсты интенсивности с 3 по 6 балл. Уже для изосейсты 6 баллов заметно значительное расхождение наблюдаемых и расчетных значений интенсивности, вызванное сложным характером Невельских событий. Строить изосейсту для $I = 7$ по указанной методике уже не имеет смысла.

Довольно интересным макросейсмическим проявлением Невельских землетрясений явилось вздымание прибрежного участка скального дна (бенча) в зоне г. Невельск. Амплитуда поднятия узкой (до 250 м) полосы прибрежных алевролитов достигает 0.5–1.5 м. Дно поднялось в зоне протяженностью 10 км (акватория порта Невельск), что, возможно, и явилось причиной возникновения цунами, которое оказалось самым сильным в данном районе за относительно короткую письменную историю Сахалина. Наибольшие высоты волн были выявлены в приустьевых частях рек севера Невельского района, причем в последнем цунами

началось с сильного отлива практически сразу же после возникновения первых сотрясений, его высота в устьях р. Ясноморка и Асанай (пос. Ясноморский и Заветы Ильича, соответственно) достигала 1.8 и 3.2 м, соответственно [18]. В северной же части г. Холмска жители отмечали подъем уровня воды более полу-метра, в порту пос. Правда вода медленно подняла суда на высоту 0.5–1 м и потом плавно опустила их. Масштаб проявления Невельского цунами оказался значительно выше ожидаемого от землетрясения с магнитудой $MLH = 6.3$. Возможно, причиной такого эффекта является очаг цунами, включающий в себя часть прибрежной полосы и поднятие дна в очаговой зоне Невельских землетрясений [18].

АФТЕРШОКИ НЕВЕЛЬСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Основные параметры афтершоков Невельских землетрясений были определены по данным четырех региональных станций «Южно-Сахалинск», «Тымовское», «Углегорск», «Оха» и девяти автономных цифровых сейсмических станций «DAT» локальной сети, которая работала в рассматриваемый период времени на юге острова и позволила регистрировать без пропусков землетрясения с магнитудой $M \geq 2.5$ в очаговой зоне. В течение 8 суток [8] было зарегистрировано 1350 афтершоков, до конца 2007 года – 1809.

Для некоторых афтершоков Невельской серии удалось определить механизмы очагов землетрясений, которые нанесены на карту (рис. 6); номера механизмов очагов соответствуют номерам землетрясений в табл. 2. Для уточнения положения афтершоков применялся метод двойных разностей [39]. Использовался бюллетень времен вступлений P - и S -волн, подготовленный по записям землетрясений, зарегистрированных локальной сетью станций. При переопределении использовались события, для которых были доступны не менее 8 фаз. Из обработки удалялись времена пробега с невязками, дающими ошибку определения координат эпицентра более 5 км, на каждом шаге итерации. Всего отобрано более 1600 событий. На основе сформулированных критериев отбора сформировано чуть более 2 400 000 двойных разностей. При расчетах использовалась одномерная скоростная модель строения земной коры [9].

Результаты переопределения координат гипоцентров по методу двойных разностей показали уменьшение рассеяния гипоцентров. Среднеквадратичная невязка, усредненная по всем событиям, со значения 0.57 с уменьшалась до 0.32 с.

В целом картина пространственного распределения афтершоков стала более контрастной (рис. 7). Эпицентры афтершоков разделяют очаговую зону на

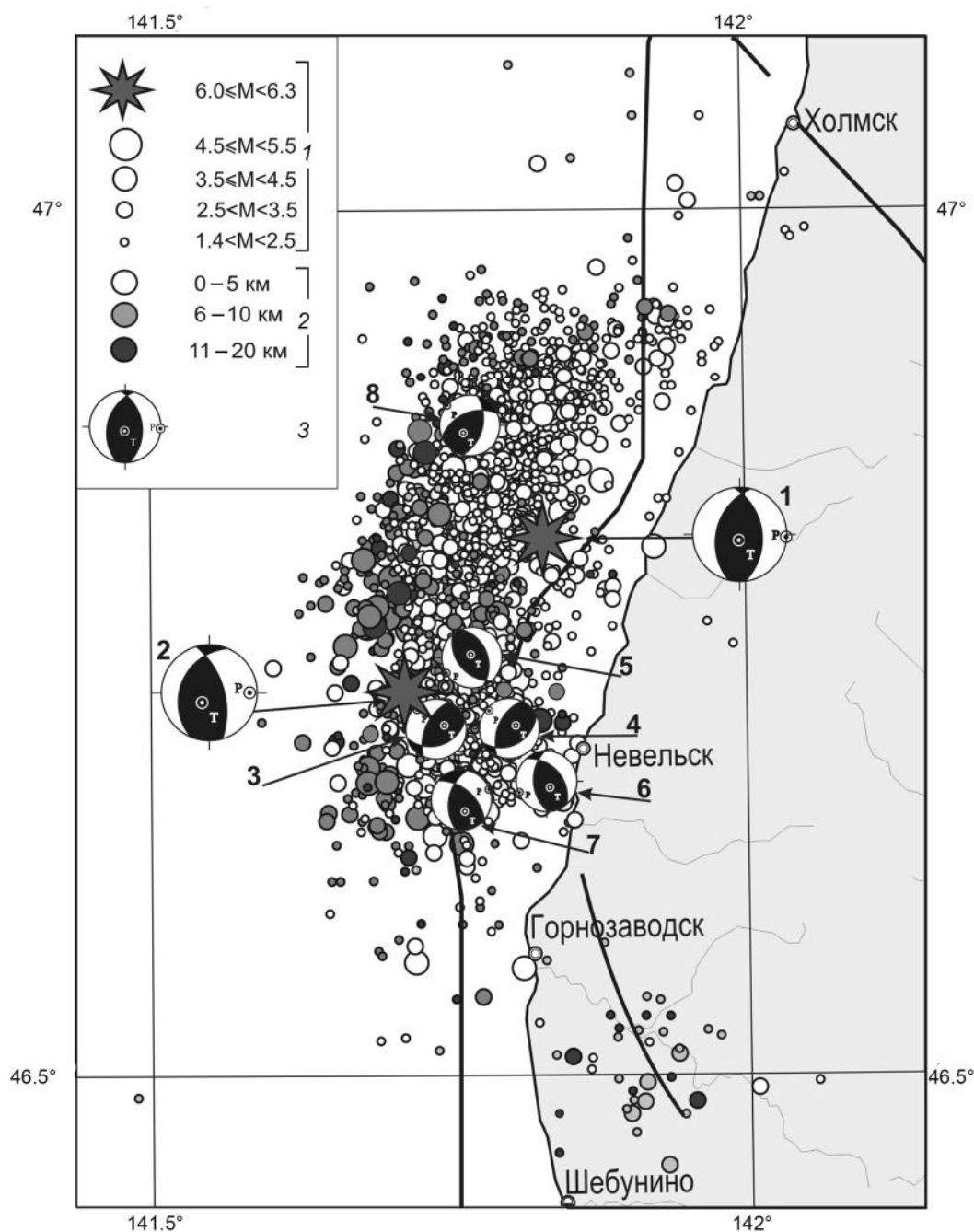


Рис. 6. Карта эпицентров Невельских землетрясений 2 августа 2007 г. и их афтершоков и механизмов очагов, схема разломов согласно [28].

1 – градация по магнитуде; 2 – градация по глубине очага, 3 – стереограммы механизмов очагов (нижняя полусфера).

две субзоны (рис. 6, 7), которые соответственно приурочены к двум сильнейшим землетрясениям Невельской серии.

Одна из них размером 12×25 км выделяется в окрестности первого события $t_0 = 02:37$, распределение землетрясений ориентировано в направлении с юго-юго-запада на северо-северо-восток. Вторая субзона размером 10×15 км выделяется в окрестности

второго эпицентра $t_0 = 05:22$. Она упирается в нижний край первой субзоны и простирается в направлении с севера на юг. Конфигурация всей афтершоковой области повторяет излом Западно-Сахалинского разлома в этом районе. Облако афтершоков в разрезе по глубине с запада на восток имеет явный тренд, который однозначно определяет рабочую плоскость механизма очага с западным падением.

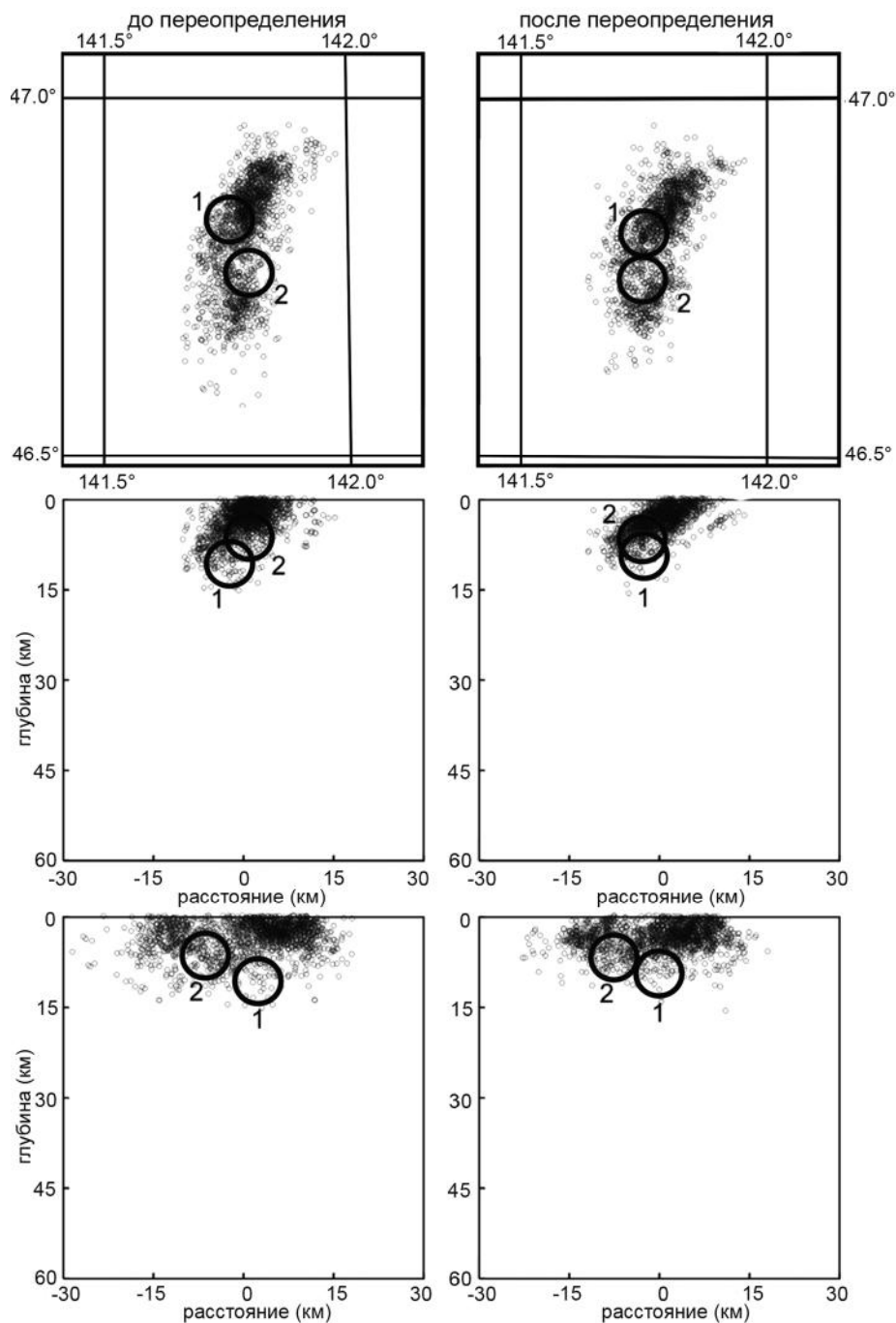


Рис. 7. Уточнение положения главных событий и афтершоков Невельской серии землетрясений методом двойных разностей.

1 – событие в $t_0 = 02:37$ (MLH = 6.3), 2 – событие $t_0 = 05:22$ (MLH = 6.0). Верхний рисунок – эпицентры землетрясений Невельской серии; средний и нижний рисунки – широтный и меридиональный разрезы по глубине, соответственно.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ САХАЛИНА

На тектонических картах Сахалина район Невельского землетрясения относится к абразионно-

складчатому шельфу ЮЗ подводной (япономорской) окраины Сахалина, образованной пологим западным склоном Камышового моноклиния (Западно-Сахалинские горы [4, 6, 15–18]). Это среднечетвертичное (0.5 млн лет [14]) линейное поднятие возникло в депо-

центре неогенового (Западно-Сахалинского) краевого прогиба между горными системами Сихотэ-Алиня и Восточного Сахалина в сахалинскую эпоху складчатости и орогенеза (поздний плиоцен–квартер), поэтому является инверсионным [10]. В широтном сечении поднятие асимметрично, поскольку имеет крутой и короткий восточный склон высотой менее 1 км в сравнении с пологим и протяженным западным (моноклиний). Традиционно его рассматривали как штамповый горст-антиклинорий [27] или присдвиговый ороген в зоне субширотного сжатия [24]. В трактовке [15] он венчает фронт крупной коровой пластины, сорванной к востоку по деколlementу границы М и ограниченной Центрально-Сахалинским взбросо-надвигом западного падения (рис. 1). Это один из главных продольных разломов Сахалина, проникающий в астеносферу и разделяющий Охотскую и Амурскую мезокайнозойские литосферные плиты [7]. Вместе с тем современная коровая, в основном верхнекоровая, сейсмичность Сахалина и асейсмичность подстилающей литосферы [8, 11, 15, 23] показывают, что Центрально-Сахалинский разлом в настоящее время активен только в континентальной коре острова. Горизонтальное смещение по нему не превышает 5–10 км, вертикальное – 3–5 км по кровле меловых пород [17, 33]. Надвиг осадочных толщ мела сопровождается аккрецией кайнозойского чехла в нижней части восточного склона.

Западный, пологий склон Камышового моноклинория и его подводное продолжение в Татарском трогe слагают осадочные толщи неогена и палеогена (угленосы) мощностью более 3–5 км. По данным МОГТ ОАО «Дальморнефтегеофизика», чехол смят в диагональные полускладки северо-западного простирания, обычно сопряженные со взбросами и надвигами восточного падения [4, 5, 10]. Высота полускладок достигает нескольких километров, их своды абрадированы (шельфовый бенч), многие из них разбурены (11 морских и две скважины на острове Монерон в 60 км к юго-западу от Невельска [5]). Формирование подобной эшелонированной системы складок обычно связывали с правосдвиговыми смещениями по Западно-Сахалинскому разлому (взброс), масштабы которых в Невельском районе, заметим, довольно ограничены, если ориентироваться на исследование фокальных механизмов сильных событий в настоящей работе (рис. 1, табл. 2).

Почти идеальная стратификация кайнозойского чехла на крыльях складок на профилях МОГТ [4, 10], их аномально большая высота в сравнении с Камышовым хребтом, а также многочисленные и параллельные берегу постабразионные антиклинали бортового отпора в алевролитах, частью окремнелых, невельской свиты раннего-среднего миоцена указы-

вают на медленное сползание (крип) верхней коры на западном крыле моноклинория [16]. Разломы в кайнозойском чехле и акустическом фундаменте япономорской окраины Сахалина на профилях МОГТ имеют преимущественно восточное падение и относятся к тыловым (ретроразломы). Они формируют дуплекс Западно-Сахалинского разлома, в котором тыловой разлом (взброс) круче фронтального (надвиг).

Итак, по данным МОГТ, геологосъемки и бурения, молодой и сейсмоактивный Камышовый моноклинорий Сахалина имеет разное тектоническое строение склонов (крыльев): покровное на восточном и гравитационное на западном. Независимо это подтверждается отсутствием аналогичной эшелонированной системы полускладок СЗ простирания на восточном склоне моноклинория [4, 6, 17]. Таким образом, Невельское землетрясение и его афтершоки, вероятно, следует связывать с гравитационным сползанием верхней коры в тылу Центрально-Сахалинского взбросо-надвига.

Вместе с тем, если обратиться к рис. 7, нетрудно заметить, что полученному выводу противоречат западное падение роя афтершоков и взбросовый механизм главных Невельских событий с активным западным, опущенным крылом (трог) и пассивным, восточным (моноклинорий – рис. 1, 6, 7; табл. 2; [2, 9, 16, 18, 25]). Легко видеть, что такая трактовка, в соответствии с выводами [38, 39] о восточном падении сейсморазрывов на япономорской окраине Японо-Сахалинской дуги, указывает на шарнирный характер Западно-Сахалинского разлома, не находящего однако отражения в орографии региона (трог и моноклинорий не меняются местами). В [16] выход из создавшегося положения видят в цилиндричности Невельской секции Западно-Сахалинского разлома (складчатый надвиг), изменяющего на глубине 10–12 км свое падение с западного на восточное (под Сахалин). Важно обратить внимание на геометрию роя Невельской серии афтершоков в плане и широтном сечении (рис. 1, 6, 7). Так, в плане он представляет собой дугу, выпуклую к западу и отходящую на юго-востоке от Горнозаводского диагонального сейсморазрыва (триггер). В тектонике и геоморфологии дуговые структуры обычно связывают со взбросами, надвигами и оползнями [1, 19], поэтому на западном склоне Камышового моноклинория здесь можно предполагать сейсмогенное сползание аллохтонных масс верхней коры (гравитационная сеймотектоника). Его дополнительным признаком является линзовидное строение аллохтонных масс в поперечном сечении, которое имеет рой афтершоков в меридиональном сечении на рис. 7. В этой связи обратим внимание на отчетливые дуговые очертания роя афтершоков Горнозаводского землетрясения на рис. 1

и отчасти 7, указывающие на сейсмогенное смещение аллохтонных масс коры к югу–юго-западу.

В контексте упомянутой проблемы выделим три поднятых на 0.5–1.5 м и почти осушенных прибрежных бенча, выработанных в невелиских алевритах, частью окремнелых (рис. 2 в [16]). Два из них (южный и центральный) ограничены с запада тектоническим уступом, тяготеющим к аквальному продолжению Горнозаводского сейсморазрыва (рис. 1, 6, 7). Аэрофотоснимки, любезно предоставленные к.ф.-м.н. Ким Ч.У., сделанные до и после Невельского землетрясения 02.08.2007 г., надежно фиксируют унаследованный характер подвижек по этому разлому и активность его восточного, поднятого крыла с южным и центральным бенчами, еще недавно бывшими мелководными прибрежными банками. Любопытно, но скорость сейсмогенного подъема центрального бенча с надстроенным волноломом порта Невельск (известная лежка сивучей) оказалась столь высокой, что сразу после его осушения кочегары ближайшей котельной собрали здесь два мешка рыбы [16]. Возможно именно скорость воздымания прибрежных участков абразионно-складчатого шельфа в очаговой зоне Невельского землетрясения – ключевой момент в генерации волн цунами на япономорской подводной окраине Сахалина. Однако для решения этой проблемы явно не хватает материалов батиметрической съемки и сейсмики (НСП или МОГТ) в очаговой зоне Невельского землетрясения аналогично [38], а также тектонического моделирования и тектонофизики цилиндрических разломов.

Отдельно выделим блоковый характер сейсмогенных подвижек прибрежного невелиского бенча и их постабразионный возраст (голоцен). Одним из признаков его являются неизменные максимальные глубины (~ 7.3 м) дна в порту Невельск до и после землетрясения, установленные по материалам попутного промера, проведенного по указанию капитана порта [16]. Примечательно, но подъем прибрежных бенчей (рис. 8) лучше согласуется со сползанием и местами выдавливанием (складки бортового отпора) кайнозойского чехла на западном склоне моноклиория в сравнении с кинематикой главного сейсморазрыва с активным западным (внешний шельф) крылом.

Подытоживая, наметим несколько проблем. Прежде это касается взаимодействия Центрально-Сахалинского, фронтального и Западно-Сахалинского, тылового сейсмоактивных разломов (тектонопара) в структуре предполагаемой аллохтонной коровой пластины, сорванной примерно 0.5 млн лет назад к востоку [15]. Дело в том, что очаг Горнозаводского зем-

трясения (диагональный взброс на глубине 15–18 км) явно тяготеет к фронтальному разлому Камышового моноклиория, а его рой афтершоков – к тыловому. Другая проблема связана со стратификацией сползающих в Татарский трог масс верхней коры на западном склоне Камышового моноклиория.

В частности, с учетом данных МОГТ можно говорить о сползании кайнозойского осадочного чехла по меловому акустическому фундаменту [5, 6, 10, 16]. Последний слагает жесткий, консолидированный блок пород мезопалеозоя, фронт которого вероятно маркирует Невельский рой афтершоков западного падения со взбросовыми механизмами очага.

Этот блок сползает по более податливым (компетентным) подстилающим породам и вклинивается в осадочное выполнение смежного осадочного бассейна (прогиба), поскольку рой афтершоков в плане изогнут к западу (рис. 1, 7). Следовательно, главный сейсморазрыв можно определить как вынужденный (35–45°) взброс или надвиг в тектонике [1], фиксирующий выдавливание автохтонных компетентных масс вдоль внешнего шельфа и смежного континентального склона ЮЗ Сахалина благодаря гравитационному сползанию упомянутого выше жесткого блока пород мезопалеозоя (краевое поднятие древнего осадочного бассейна). На близость края последнего может указывать заглубление (15–18 км) Горнозаводского гипоцентра в сравнении с Невельскими (10–14 км). С учетом возможной цилиндричности Невельского сейсморазрыва именно в этой части коры он меняет свое падение с западного на восточное.

Ориентируясь на близкое, но разновременное (~ 3 мин), время прихода сначала «гравитационных», затем собственно сейсмических волн мегаземлетрясения Тохоку 11.03.2011 г. на стоящие рядом гравиметр и сейсмограф в обсерватории ДВФУ [12], сценарий Невельских событий, по-видимому, мог включать в себя асейсмичный (пластичный) крип в средней коре и собственно сейсмическую часть при выходе разрыва в верхнюю, жесткую кору.

Таким образом, аллохтонные массы верхней коры на Невельском участке подводной окраины ЮЗ Сахалина, вероятно, структурированы и включают, по меньшей мере, три уровня автономного гравитационного сползания. Относительным упором в развитии гравитационной сеймотектоники, вероятно, является земная кора под приосевой частью Татарского трога, т.е. за пределами подводной окраины Сахалина.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Все механизмы афтершоков Невельских землетрясений 2007 г. унаследовали от основных



Рис. 8. Аэрофотоснимки южной части Невельска и прилегающей акватории (центральный с волноломом и южный бенчи) до (а) и после землетрясения 02.08.2007 г. (б), любезно предоставленные Ким Ч.У. Песчаная отмель близ устья р. Казачки справа от центрального бенча во время землетрясения видимо была размыва сильным течением стекающей воды.

событий характер сейсмодислокации – взброс с небольшой сдвиговой компонентой, подвижки в очагах сильных событий и их афтершоков произошли под действием близгоризонтальных сжимающих напряжений, ориентированных субширотно, однако направление оси максимальных сжимающих напряжений изменяется весьма значительно (рис. 9).

Ориентация напряжений сжатия главных событий перпендикулярна простиранию основных тектонических структур региона, в то время как ориентация осей сжатия более слабых землетрясений

серии перпендикулярна изгибам более локальных тектонических структур. Простирание нодальной плоскости западного падения афтершоков №№ 3, 4, 7, 8 совпадает с простиранием изгибов Западно-Сахалинского разлома, хотя направление сдвиговой компоненты варьируется. Простирание плоскости афтершоков № 5, 6 хорошо согласуется с продолжением оперяющего (Горнозаводского) разлома, проходящего восточнее пос. Горнозаводск, по данным М.И. Стрельцова [28], (рис. 6, 9) и ставшего причиной Горнозаводского землетрясения 2006 г. [32].

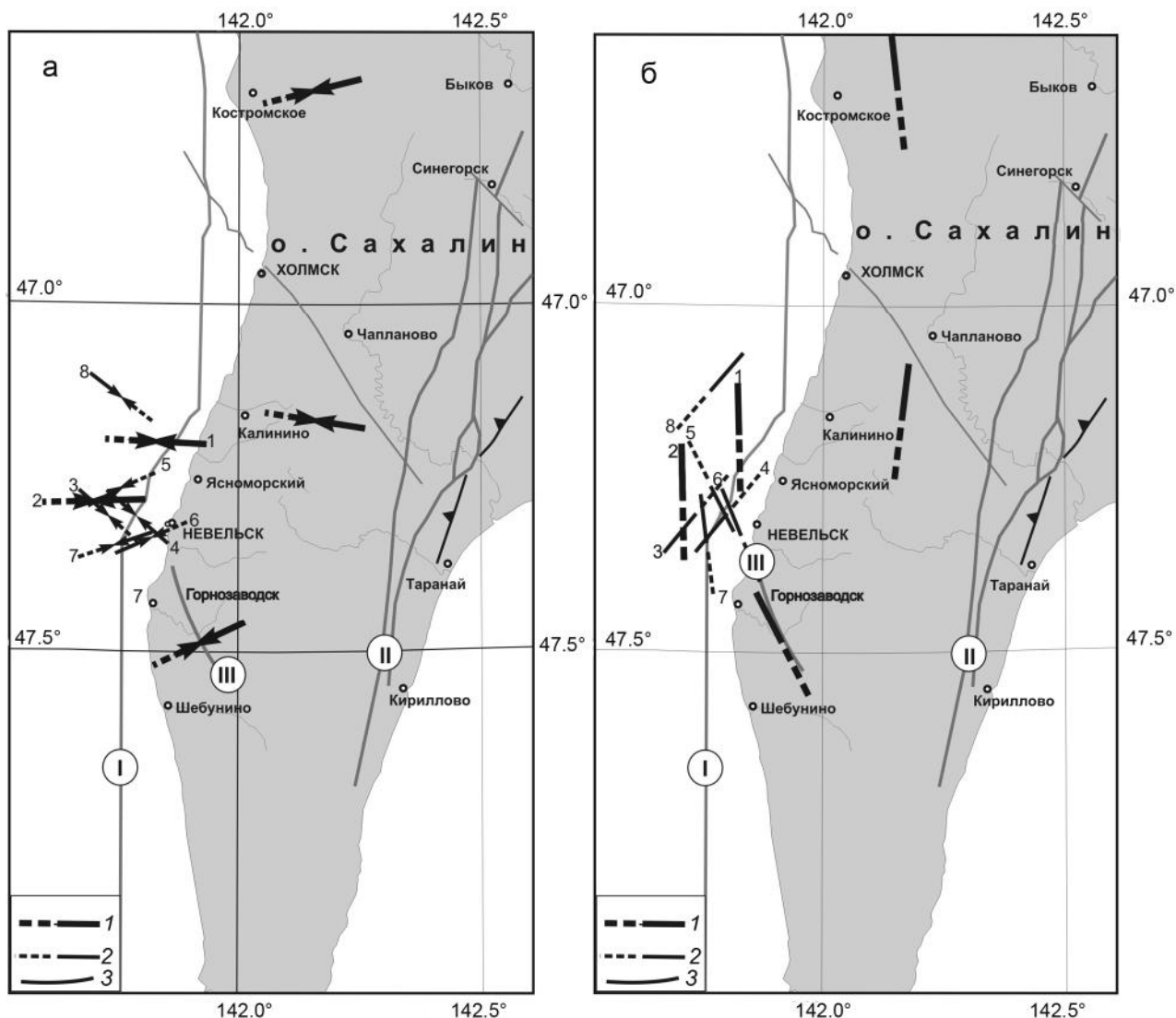


Рис. 9. Ориентация осей сжатия (а) и промежуточного напряжения (б) юго-западного побережья о. Сахалин за 2004–2010 гг., включая афтершоки Невельских землетрясений, по данным каталогов [8, 11], и главные разломы Южного Сахалина.

1 – оси напряжений главных толчков; 2 – оси напряжений афтершоков (пунктиром отмечена полуось, направленная вниз); 3 – глубинные разломы, согласно [28]. Названия разломов и положение сильнейших землетрясений приведены на рис. 1, номера землетрясений см. табл. 2.

В промежуточных напряжениях мы наблюдаем довольно хорошее согласие с простираем структур и, вероятно, эшелонированным строением зоны Западно-Сахалинского разлома, ширина которой с учетом афтершоков вынужденного сейсмозброса включает в себя практически всю подводную окраину Сахалина.

Как было отмечено в [18], согласно соотношению Уэллса и Коппершмита [40], характеризующему зависимость величины магнитуды от размера очаговой зоны, магнитуда главного события должна быть не менее 6.6. Однако по отдельности длина и размер площади каждой из субзон согласуются с магнитудой

двух сильнейших событий $M_LH = 6.3$ и $M_LH = 6.0$, что приводит нас к выводу о возникновении парных землетрясений (дуплет).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное геолого-сейсмологическое обследование эпицентральной зоны Невельских землетрясений 2007 г. позволило собрать многочисленные данные о его основных проявлениях. Выявленные при этом геологические и сейсмологические эффекты создают представление о строении очага и характере подвижки в нем в момент главного землетрясения.

Решения механизмов Невельских землетрясений хорошо согласуются между собой, отмечается незначительное увеличение сдвиговой компоненты во втором событии. В соответствии с этими решениями подвижка в рассматриваемых очагах произошла под действием близгоризонтальных сжимающих напряжений, ориентированных субширотно, что согласуется с современными представлениями о процессе деформирования региона по данным спутниковых геодезических наблюдений [3]. Тип дислокации – взброс с небольшой сдвиговой компонентой. Рабочая плоскость имеет субмеридиональное простирание и сравнительно полого (35° – 45°) падает на запад, при этом западное крыло разрыва поднялось и немного сдвинулось на северо-восток (правосторонний сдвиг). Эпицентры двух сильнейших событий Невельской серии расположены в районе излома Западно-Сахалинского разлома и связаны с подвижками по данному разлому с учетом погружения его на запад под дно Татарского пролива.

Отмечается существование двух субзон афтершоков, сгенерированных сильными землетрясениями с магнитудами $M_LH = 6.3$ и 6.0 . Облако афтершоков размером 13×40 км хорошо совпадает с Западно-Сахалинским разломом, практически все афтершоки расположены в его западном крыле и четко оконтуривают главный наклонный сейсморазрыв [18].

По результатам спутниковой геодезии сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН [3] проведен анализ ко-сейсмических деформаций прилегающего побережья Сахалина. Построены дислокационные модели сильнейших событий. Моделирование показало, что вертикальные деформации земной коры наилучшим образом описываются двумя взбросами по двум сейсморазрывам западного падения под углом 38 – 40° , хорошо согласующимся с решениями механизмов очагов парных Невельских событий, полученными сейсмологическими методами.

И главные события, и их сильные афтершоки способствовали разрядке одной и той же системы напряжений. Однако это не значит, что афтершоки – результат подвижек по той же плоскости разрыва, что и парные землетрясения. Можно предположить, что система напряжений, действующая в эпицентральной области Невельских землетрясений, обусловила в ней некоторую сеть разрывов разной величины (т.н. дерево разлома). С меридиональными отрезками Западно-Сахалинского разлома были связаны сильные землетрясения, а с его изломом (или возможно эшелонированием) – их афтершоки.

В рамках изучения поля упругих напряжений в земной коре на южном сегменте Западно-Сахалинского разлома проведена работа по определению и сопоставлению механизмов очагов наиболее значи-

мых землетрясений, произошедших на юго-западном побережье Сахалина (рис. 1). В целом все землетрясения, произошедшие на южном фланге Западно-Сахалинского разлома в исследуемый период времени, явились следствием субширотного сжатия. Сдвиговая компонента подвижки, кроме Чаплановского землетрясения, оказалась правосторонней, т.е. верхний, надвинутый блок смещался на север. Отмечено, что рабочие плоскости механизмов очагов землетрясений падают на запад-юго-запад, тогда как рабочая плоскость Чаплановского землетрясения – на северо-восток (левый сдвиг, рис. 1).

Наблюдается преемственность в механизмах представленных землетрясений на рис. 1.

По материалам цифровой сейсмологии в настоящей работе с высокой точностью привязки гипоцентров (1 – 2 км) обнаружены признаки гравитационной сейсмотектоники верхней коры Камышового моноклинория и возможной цилиндричности Невельской секции Западно-Сахалинского регионального разлома (точнее дуплекс) с признаками эшелонирования в плане и вынужденным главным сейсмозбросом западного падения (внешний шельф и прилегающий склон). Среди них: дуговые очертания Невельского и Горнозаводского облаков афтершоков с изгибом к западу и югу, соответственно, аномальная высота полуантиклиналей сахалинского абразионного шельфа Татарского трога в сравнении с моноклинорием, малоамплитудные постабразионные (голоцен) складки бортового отпора, параллельные берегу и связанные с выдавливанием невелиских алевролитов, сейсмогенное, блоковое воздымание трех невелиских бенчей и массовое разрушение жилых домов и инфраструктуры прибрежной части Невельска, построенной на обводненной отсыпке [13, 14, 17, 30], структурирование аллохтонных масс верхней коры на западном склоне моноклинория (три уровня автономного гравитационного сползания в верхней коре). Полученные материалы сейсмологических наблюдений и их геолого-тектоническая трактовка позволяют говорить о гравитационной сейсмотектонике ЮЗ окраины Сахалина в сравнении с классическими (рифтинг в Татарском троге, сдвиговая тектоника на Сахалине [24, 28]) и новыми (плиоцен-четвертичная субдукция и/или обдукция плиты Японского моря под Японо-Сахалинскую островную дугу [30]) подходами в региональной тектонике. В методическом плане изучение именно геометрии и фокальных механизмов афтершоков Невельского землетрясения дало много нового в расшифровке современной сейсмотектоники подводной окраины ЮЗ Сахалина, например, в сравнении с [29].

Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке ДВО РАН (Комплексная про-

грамма фундаментальных научных исследований ДВО РАН «Дальний Восток») и РФФИ (проекты №№ 14-05-00765_А и 14-05-31060_МОЛ-А-2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ажгирей Г.Д. Структурная геология. М.: Изд-во МГУ, 1956. 439 с.
- Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Ким Ч.У., Такахаши Х. Ко-сейсмические деформации земной поверхности на о. Сахалин в результате Невельского землетрясения 02.08.2007 г., Mw = 6.2 // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 5. С. 16–21.
- Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 42–48.
- Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 2007. 186 с.
- Геология, геодинамика и перспективы нефтегазоносности осадочных бассейнов Татарского пролива. Владивосток, 2004. 219 с.
- Геология СССР. Т. 33. Остров Сахалин. М.: Недра, 1970. 431 с.
- Злобин Т.К. Динамика сейсмического процесса и строение очаговых зон сильных землетрясений Сахалина и Курил. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2005. 137 с.
- Каталог землетрясений юга острова Сахалин за период с 2000 по 2010 гг. (по данным автономных цифровых сейсмических станций). Владивосток: Дальнаука, 2011. 357 с.
- Ким Ч.У., Михайлов В.И., Сен Р.С., Семенова Е.П. Невельское землетрясение 02.08.2007: анализ инструментальных данных // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 5. С. 4–15.
- Комплексные рекогносцировочные геофизические исследования в Охотском море (объект 11/86). Южно-Сахалинск: Трест «Дальморнефтегеофизика», 1988. 284 с.
- Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2014. 251 с.
- Короченцов В.И., Лисунов Е.В., Абдрашитов А.Г. Использование «гравитационных» волн для увеличения вероятности правильного прогноза цунами // Физика геосфер: Седьмой Всерос. симпозиум. Материалы докл. Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 135–138.
- Кофф Г.Л., Малаховский А.А., Ким Чун Ун. Роль характера застройки городов острова Сахалин в формировании сейсмического риска и анализ последствий Невельских землетрясений 18 августа 2006 г. и 2 августа 2007 г. Владивосток: Дальнаука, 2007. 59 с.
- Кучай В.К. Современная орогенная структура южной части острова Сахалин // Тихоокеан. геология. 1987. № 1. С. 50–57.
- Ломтев В.Л., Никифоров С.П., Ким Чун Ун. Тектонические аспекты коровой сейсмичности Сахалина // Вестн. ДВО РАН, 2007. № 4. С. 64–71.
- Ломтев В.Л., Гуринов М.Г. Тектонические условия Невельского (02.08.2007 г., M~6.1) землетрясения // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 5. С. 44–53.
- Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области. М.: Наука, 1987. 94 с.
- Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин. М.: Янус-К, 2009. 204 с.
- Оползни: исследование и укрепление. М.: Мир, 1981. 368 с.
- Поплавская Л.Н., Бобков А.О., Кузнецова В.Н. и др. Принципы формирования и состав алгоритмического обеспечения регионального центра обработки сейсмологических наблюдений (на примере Дальнего Востока) // Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР (Метод. работы ЕССН). М.: Наука, 1989. С. 32–51.
- Поплавский Л.Н., Нагорных Т.В., Рудик М.И. Методика и первые результаты массовых определений механизмов очагов коровых землетрясений Дальнего Востока // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. М.: ГС РАН, 2001. С. 95–99.
- Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н. Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. М.: Наука, 1988. 128 с.
- Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.
- Рождественский В.С. Тектоническое развитие острова Сахалин // Тихоокеан. геология. 1987. № 3. С. 42–51.
- Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Фокина Т.А. Невельские землетрясения 2 августа 2007 г. в 02h37m с MLN=6.3 и 05h22m с MLN=6.0, I0=8 (о. Сахалин) // Землетрясения Северной Евразии в 2007 году. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 396–407.
- Сейсмологические таблицы. М.: ИФЗ АН СССР, 1962. С. 75–80.
- Сергеев К.Ф. О тектонической природе поднятия Западно-Сахалинских гор // Тихоокеан. геология. 1982, № 1. С. 75–83.
- Стрельцов М.И., Рождественский В.С. Активные разломы Курило-Охотского региона, Приморья и Приамурья // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. 1995. Вып. 2–3. С. 387–407.
- Тихонов И.Н., Ким Ч.У. Успешный прогноз Невельского землетрясения 2 августа 2007 года (MLN = 6.2) на юге о-ва Сахалин // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 4. С. 532–536.
- Тихонов И.Н., Ломтев В.Л. Мелкофокусная сейсмичность и тектонические особенности Японского моря // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 5. С. 66–77.
- Урбан Н.А., Фокина Т.А., Коваленко Н.С. и др. Макросейсмические проявления Невельских землетрясений 2 августа 2007 года. Препр. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. 60 с.
- Фокина Т.А., Сафонов Д.А. Горнозаводское землетрясение 17 августа 2006 г. с MLN=5.9, KC=12.0, I0=7 (юг о. Сахалин) // Землетрясения Северной Евразии, 2006 г. Обнинск: ГС РАН, 2012. С. 367–374.
- Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. Разломы Сахалина // Тихоокеан. геология. 1984. № 2. С. 77–86.
- Хиллс Е. Очерки структурной геологии. М.: ИЛ, 1954. 174 с.
- Шебакин Н.В. Очаги сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1974. 54 с.
- Шебакин Н.В. Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии) // Вычислительная сейсмология. М.: ГЕОС, 2003. Вып. 34. С. 57–200.
- Fukao Y., Furumoto M. Mechanism of large earthquakes along the eastern margin of the Japan Sea // Tectonophysics. 1975.

- V. 26, N. 3/4. P. 247–266.
38. Sato H., Iwasaki T., Kanazawa T. et al. Characterization of the 2007 Noto Hanto earthquake, Central Japan: insights from seismic profiling, aftershock observations, and co-seismic crustal deformation // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, 2007. P. 369–379.
39. Waldhauser F., Ellsworth W.L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward fault, California // Bull. Seis. Soc. Am. 2000. V. 90. P. 1353–1368.
40. 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, N 4. P. 974–1002.
39. Waldhauser F., Ellsworth W.L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

A.V. Konovalov, T.V. Nagornyykh, D.A. Safonov, V.L. Lomtev

The August 2, 2007 Nevelsky earthquakes and seismicity, southwestern Sakhalin Island

New data of instrumental and macroseismic studies of significant Nevelsky earthquakes are presented. The MSK-64 intensity of major events was equal to 7-8 (6-7), magnitude $M_LH = 6.3$ (6.0). Seismic events occurred on 02.08.2007 near the southwestern coast of Sakhalin Island. We collected and analyzed all the available local, regional and global seismic records, which allowed a detailed study of the seismicity in the source zone, the mechanisms of major events as well as their aftershocks. The analysis of the 3D spatial distribution of the major events sources and their numerous aftershocks, features of the source mechanisms, data on co-seismic deformation on the coastal part of Sakhalin Island helped to clearly shape the source zone and get a reliable dislocation model of the earthquake sources.

Key words: earthquake, seismic focus mechanism, aftershock, seismic dislocation model, stress state, gravitation seismotectonics, cylindrical faults, Sakhalin Island.