

ЗМЕИНОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 7 мая 2008 г. с $K_{II}=12.7$, $M_c=5.1$, $M_w=4.8$, $I_0^P=5-6$

(северо-западная часть шельфа Черного моря)

Б.Г. Пустовитенко, А.А. Пустовитенко, А.М. Скляр, В.С. Князева

*Отдел сейсмологии Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
г. Симферополь, bella@seismoexpert.crimea.ua*

5 мая 2008 г. в 08^h00^m в северо-западной части шельфа Черного моря вблизи о. Змеиный произошло землетрясение с расчетной интенсивностью в эпицентре $I_0^P=5-6$ баллов и наблюдаемой интенсивностью $I_{набл.}=4$ балла на побережье, в Одесской области. Очаг землетрясения приурочен к сложной зоне сочленения Придунайского поднятия с Северокрымским задуговым рифтом и поднятием Губкина [1].

В соответствии с картой районирования долговременной сейсмической опасности территории северо-западной части Черного моря [2] в районе произошедшего землетрясения возможны сейсмические воздействия с интенсивностью $I=6$ баллов один раз в 500 лет, $I=7$ баллов – в 1000 лет (рис. 1). Следовательно, расчетное значение $I_0=5-6$ баллов названного землетрясения не превысили прогнозные значения в [2].

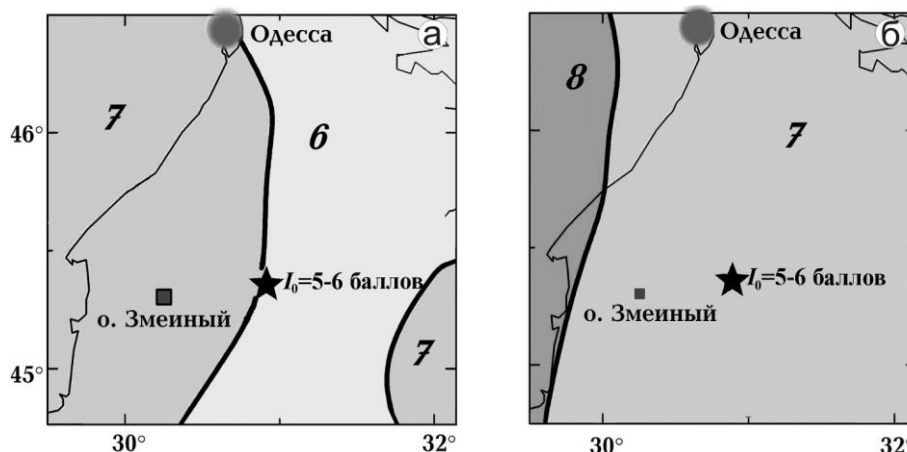


Рис. 1. Фрагменты карт долговременной сейсмической опасности района землетрясения 7 мая 2008 г. с $K_{II}=12.7$, $M_w=4.8$ из [2] для периодов повторяемости 500 (а) и 1000 (б) лет (звездочкой отмечено землетрясение)

Инструментальные данные. Сейсмические колебания от землетрясения 7 мая 2008 г. зарегистрированы всеми сейсмическими станциями Украины и большинством станций мира ($n=1766$) в широком азимутальном окружении на расстояниях от 143 до 16690 км от эпицентра [3, 4]. Основные параметры землетрясения по данным различных сейсмологических центров, включая Крым, представлены в табл. 1, а местоположение эпицентров – на рис. 2. Для сравнения выбрано только 8 из 17 агентств [4], в которых результаты интерпретации землетрясения получены по большому числу исходных данных.

Координаты эпицентра, по данным большинства агентств, близки между собой (рис. 2). Их средние значения составляют: $\bar{\varphi}=45.34\pm 0.02^\circ$, $\bar{\lambda}=30.90\pm 0.03^\circ$. Координаты центра центроида момента несколько отличаются, особенно по широте, от определений по первым вступлениям объемных волн. Наибольшие отличия по долготе отмечены для макросейсмического эпицентра, определенного с большой погрешностью по предполагаемой первой изосейсте, проведенной условно по морской территории (см. рис. 8).

Таблица 1. Основные параметры Змеиног землетрясения 7 мая 2008 г. с $K_{II}=12.7$, $m_b=5.0$, $M_c=5.1$ по данным Крыма в сопоставлении с определениями других агентств

Агентство	t_0 ч мин с	δt_0 с	Гипоцентр					Магнитуда	Источник
			φ°, N	$\Delta \varphi^\circ$	λ°, E	$\delta \lambda^\circ$	$h, км$		
Крым _и	08 00 21.1	1.1	45.34 _и 45.33 _м	0.11	30.95 _и 30.27 _м	0.11	11	$K_{II}=12.7, M_c=5.1, M_w=4.8$	[3]
GCMТ	08 00 21.4	0.4	45.51	0.04	30.96	0.04	17.4	$M_w=4.9$	[4]
PDG	08 00 19.47	0.55	45.32	0.01	30.82	0.01	1.8	$ML=4.8$	[4]
MOS	08 00 20.2	1.15	45.37	0.04	30.89	0.03	15	$m_b=5.0, M_S=4.4, MSPS=5.0$	[5]
CSEM	08 00 21.1	0.05	45.36	0.02	30.92	0.02	10	$m_b=5.0, M_S=4.4, M_w=4.9$	[4]
NEIC	08 00 21.4	0.14	45.36	0.03	30.92	0.02	10	$m_b=4.9$	[4]
ISC	08 00 22.1	0.49	45.32	0.02	30.89	0.01	13.9	$m_b=4.9, M_S=4.5$	[4]
ЕНВ	08 00 22.3		45.35	0.014	30.89	0.01	17.5		[4]

Примечание. Индексами «и» и «м» отмечены инструментальные и макросейсмические определения; расшифровка кодов агентств дана в условных обозначениях к наст. сб.

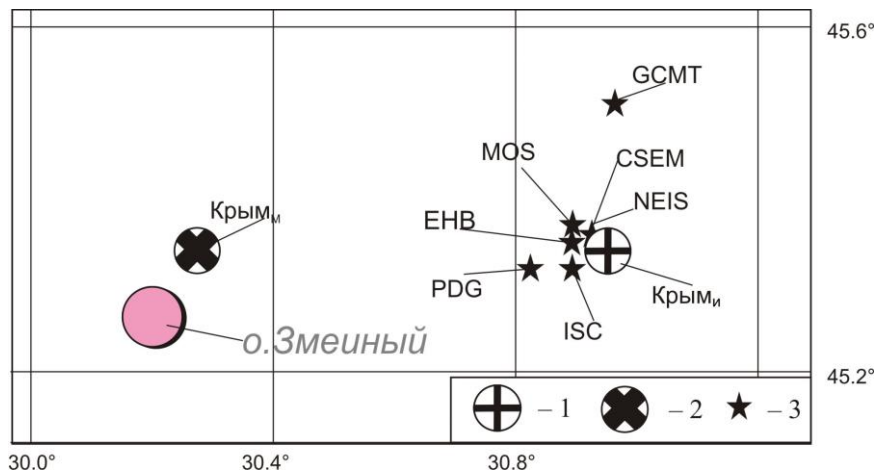


Рис. 2. Разные решения эпицентра Змеиног землетрясения 7 мая 2008 г. с $K_{II}=12.7$, $M_c=5.1$, $M_w=4.8$

1, 2 – инструментальный и макросейсмический эпицентр по региональным данным; 3 – данные различных сейсмологических служб.

Диапазон определенных глубин варьирует от 2 км (PDG) до 17.5 км (ЕНВ) при среднем значении $h=10\pm 4$ км, т.е. очаг землетрясения был приурочен к верхней части земной коры с залеганием в гранитном слое [6].

Хорошее согласие получено в магнитудных оценках как по объемным ($m_b=4.9-5.0$) и поверхностным волнам ($M_S=4.4-4.5$), так и по сейсмическим моментам ($M_w=4.8-4.9$).

Землетрясение сопровождалось двумя повторными толчками, первый из которых с $K_{II}=8.6$ произошел через 4 часа (в $12^h00^m53.1^s$), а другой – через 2 месяца (4 июля в $16^h40^m26.5^s$) с $K_{II}=9.7$. Возможно, что повторных слабых толчков было больше, но современная сеть сейсмических станций Крыма способна контролировать сейсмичность этого района, начиная с уровня $K_{II}>9$ [2]. Отметим, что первый афтершок зарегистрирован только на двух ближайших к очагу станциях – «Одесса» (ODSI) и «Севастополь» (SEV) – и ему присвоены координаты основного толчка (способ 8) [7]. В то же время можно отметить разницу во временах вступления P -волн на этих станциях и для основного толчка, и афтершока [7]. Так, разница между временем вступления S -волн на станции SEV и ODSI для основного толчка составляет 19.1^s , а для афтершока – 12^s , т.е. очаг повторного толчка был смещен в восточном направлении, ближе к станции «Севастополь».

Очаговые параметры землетрясения, к которым относятся механизм очага, параметры разрывообразования и динамические параметры очага, восстановлены по записям волновых форм на близких и удаленных сейсмических станциях.

Решение механизма очага получено в [8] на основе теории дислокации по стандартной методике [9]. Исходными данными служили знаки первых вступлений продольных P -волн, записанных 48 станциями. Все знаки первых движений выверены по первичным данным волновых форм. Углы выхода сейсмических волн определены по годографу ак 135 [10] для удаленных станций и по Крымскому [11] – для близких.

Таблица 2. Параметры механизма очага землетрясения 7 мая 2008 г. в $08^h00^m K_{II}=12.7$, $M_w=4.8$

Агент-ство	Дата, д м	t_0 , ч мин с	h , км	Магнитуды		K_{II}	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Ис-точ-ник
				M_w	M_c		T		N		P		$NP1$			$NP2$			
							PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
Крым	07.05	08 00 21.1	11	4.8	5.1	12.7	89	262	1	82	0	325	81	45	88	263	45	92	[8]
GCMТ	07.05	08 00 21.4	17.4	4.9			68	230	20	69	7	337	45	42	59	264	55	115	[4]

На стереограмме знаки первых вступлений уверенно разделились нодальными плоскостями. В соответствии с этим решением в очаге по обеим нодальным плоскостям произошел чистый взброс (рис. 3 а) под действием горизонтальных ($PL_p=0^\circ$) сжимающих напряжений близмеридиональной ($AZM_p=172^\circ$) ориентации. Обе нодальные плоскости имеют близширотное ($STK_1=81^\circ$, $STK_2=264^\circ$) простираие и одинаковое падение $DP_1=DP_2=45^\circ$ (табл. 2).

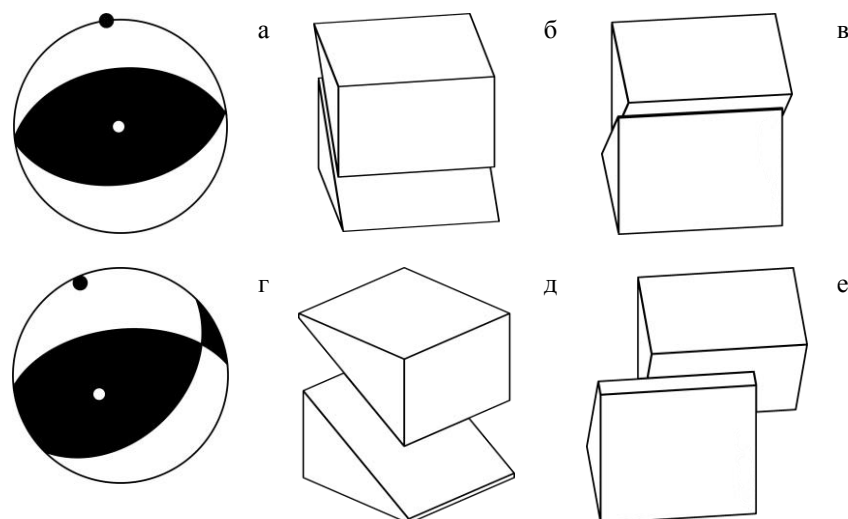


Рис. 3. Механизм очага землетрясения 7 мая 2008 г в проекции нижней полусферы по знакам первых вступлений P -волн по региональным и мировым станциям (а), по методу инверсии волновых форм (г), а также блок-схемы смещения по плоскости $NP1$ (б, д) и $NP2$ (в, е)

Региональное решение близко к решению тензора сейсмического момента центра ГСМТ [4], полученному в международном центре методом инверсии волновых форм 118 записей землетрясения на 60 станциях мировой сети. По данным ГСМТ землетрясение также возникло под действием близгоризонтальных ($PL_p=7^\circ$) сил сжатия запад–северо-западной ($AZM_p=337^\circ$) ориентации (табл. 2). Как видно из стереограммы на рис. 3 г, в очаге также произошел взброс по обеим плоскостям. Отличие состоит в появлении в этом решении небольших сдвиговых компонент, левосторонней – по $NP1$ и правосторонней – по $NP2$, а также в изменении ориентации плоскости $NP1$ с близширотной в региональном решении на северо-восточную ($STK_1=45^\circ$) в решении ГСМТ.

Небольшие различия в приведенных в табл. 2 решениях естественны, т.к. восстановленные параметры механизма очага по первым движениям в продольных волнах характеризуют начальное движение в источнике, а по инверсии волновых форм – максимальную фазу процесса. Кроме того, оба метода имеют свои ошибки в определении параметров. Таким образом, можно предположить, что в очаге землетрясения под действием горизонтальных сжимающих

напряжений произошел взброс активного блока земной коры. При этом первоначальный тип движения не изменился в процессе разрядки напряжений.

Взбросовый тип подвижки в очаге по субширотным ($STK=264^\circ$) плоскостям разрыва в обоих решениях согласуется с сеймотектоническими условиями района: широтного сочленения южного борта Придунайского поднятия и северного борта поднятия Губкина, входящих в состав Придунайско-Крымского мегаподнятия [1].

Параметры разрывов восстановлены по записям волновых форм продольных волн на 18 сейсмических станциях, расположенных на расстояниях менее 1000 км [12], с использованием методики [13, 14], в основу которой положено представление о движущемся источнике разрывообразования от его начального гипоцентра.

Параметры разрывов оценены из экспериментального распределения времен запаздывания (τ) максимальной фазы колебаний в продольных волнах относительно азимутов (Az) расположения станций регистрации по формулам И.В. Горбуновой [13]. Азимутальное распределение $\tau(Az)$ (азимутальный годограф землетрясения 7 мая 2008 г.) показано на рис. 4 (стрелками показана схема направлений разрыва в проекции на земную поверхность).

По экстремальным параметрам (τ_{\max} , τ_{\min}) графика $\tau(Az)$ с учетом средней скорости продольных волн в верхнем (0–10 км) слое земной коры, равной $v_p=6.6$ км/с по профилю № 26 «о. Змеиный–Тарханкут» [6, 15], вычислены значения длины L разрыва, скорость C вспарывания и время T действия источника (табл. 3).

Для данного землетрясения азимутальный годограф имел два максимума в азимутах $Az_1=94^\circ$ и $Az_2=318^\circ$. В соответствии с теоретическими представлениями в очаге процесс разрывообразования был сложным, развивающимся в двух направлениях: близширотном на запад ($Az_{01}=274^\circ$) и диагональном – на юго-восток ($Az_{02}=138^\circ$).

Таблица 3. Параметры разрывообразования в очаге Змеиног землетрясения 5 мая 2008 г. в 08^h00^m с $K_{II}=12.7$, $MS=4.5$, $M_w=4.8$

$Az_{01}, ^\circ$	$Az_{02}, ^\circ$	$L_1, км$	$L_2, км$	$C_1, км/с$	$C_2, км/с$	$T_1, с$	$T_2, с$
274	138	29.6	24.6	5.1	4.9	5.7	5.0

Наибольшая длина разрыва – $L_1=29.6$ км – получена по близширотному направлению ($Az_{01}=274^\circ$). Это направление распространения разрыва с его максимальной длиной близко по ориентации к нодальной плоскости $NP2=264^\circ$ из решения механизма очага (табл. 2) и связано, вероятно, с главной тектонической структурой широтного простирания в этой части земной коры [1, 16].

Отметим, что для предыдущего землетрясения 29.03.1992 г., произошедшего вблизи о. Змеиный, вид азимутального годографа и параметры разрывов получились очень близкими к тем, что приведены в табл. 2: наибольшая длина разрыва соответствовала близширотному направлению ($Az_1=274^\circ$, $L=26$ км), а дополнительный разрыв $L=7$ км – юго-восточному ($Az_2=140^\circ$) [17].

Скорости вспарывания среды в очаговой зоне землетрясения 7 мая 2008 г. по обоим направлениям были близки между собой и составляли 5.1 и 4.9 км/с [12].

Динамические параметры очага восстановлены по спектрам записей цифровых (SDAS) сейсмических станций «Симферополь» (SIM) и «Ялта» (YAL). Записи на этих станциях по трем компонентам (Z, E-W, N-S), отфильтрованные стандартным фильтром, приведены на рис. 5.

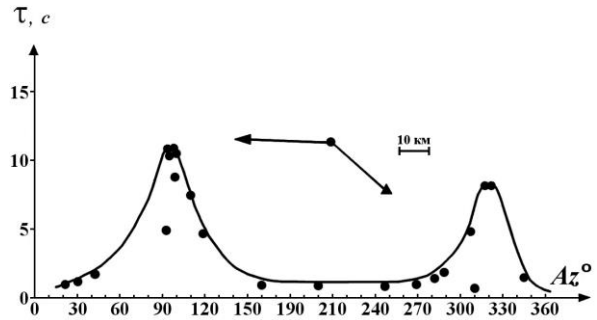


Рис. 4. Азимутальный годограф времен запаздывания максимальных фаз продольных волн от Змеиног землетрясения 7 мая 2008 г. с $M_w=4.8$

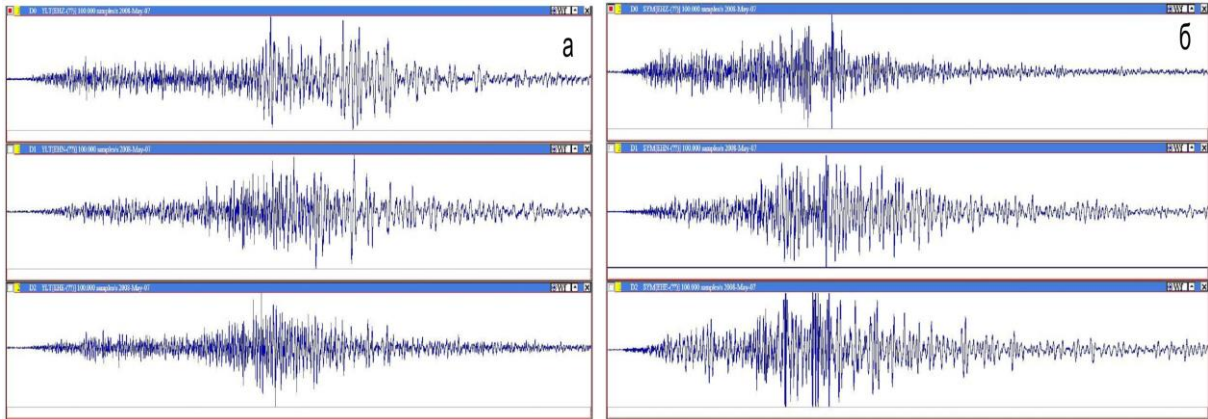


Рис. 5. Записи Змеиногo землетрясения 7 мая 2008 г. на цифровых станциях «Ялта» (а) и «Симферополь» (б) (компоненты записи сверху вниз: Z, N-S, E-W)

Спектры рассчитаны методом быстрого преобразования Фурье. Как видно из примеров на рис. 6, на амплитудных спектрах надежно выделяется угловая частота f_0 и спектральная плотность Ω_0 в длиннопериодной части спектра, по которым в рамках модели Брюна [18] восстановлены динамические параметры очага: M_0 – сейсмический момент, r_0 – радиус круговой дислокации, $\Delta\sigma$ – сброшенное напряжение, $\eta\sigma$ – кажущееся напряжение, $\Delta\sigma_r$ – радиационное трение, ε – деформация сдвига, \bar{u} – средняя подвижка по разрыву, E_u – энергия дислокации в очаге.

Методика интерпретации спектров в соответствии модели Брюна и формулы расчета динамических параметров очага по низкочастотному уровню спектра Ω_0 и угловой частоте f_0 описаны в [18–22]. По значениям скалярного сейсмического момента с использованием формулы Канамори рассчитана магнитуда M_w [23].

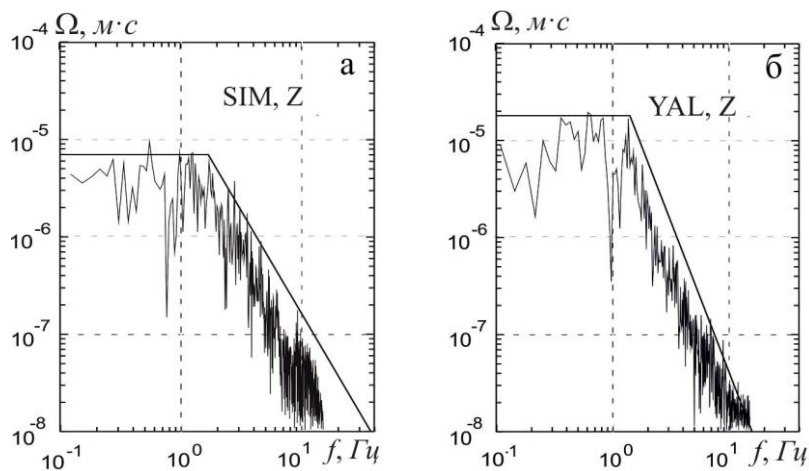


Рис. 6. Амплитудные спектры продольных P -волн по записям вертикальной составляющей (Z) на станциях «Симферополь» (SIM) (а) и «Ялта» (YAL) (б).

В расчет скалярного сейсмического момента вводилась направленность излучения $R_{\theta\phi}$, определенная из решения механизма очага (табл. 4).

Таблица 4. Значения поправок $R_{\theta\phi}$ за направленность излучения для P - и S -волн

Станция	Поправки $R_{\theta\phi}$	
	P	S
SIM	0.37	0.79
YAL	0.26	0.83

Скорости v_p , v_s объемных P - и S -волн приняты по модели среды из [15] для глубин $\Delta h=5-12$ км по данным ГСЗ вдоль профиля № 26, проходящего вблизи о. Змеиный: $v_p=6.6$ км/с, $v_s=3.7$ км/с.

В настоящей статье очаговые параметры, приведенные в [24], дополнены значениями кажущегося напряжения – $\bar{\eta}\sigma$, радиационного трения – $\Delta\sigma_r$ и энергии дислокации E_u в очаге (табл. 5), рассчитанных по формулам из [22, 25]:

$$\bar{\eta}\sigma = \frac{\mu \cdot E_s}{M_0}, \quad (1)$$

где μ – модуль сдвига; η – сейсмический коэффициент полезного действия; E_s – энергия источника, определяемая из соотношения Гутенберга–Рихтера по [26]:

$$\lg E_s = 11.8 + 1.5 MLH. \quad (2)$$

Величина радиационного трения σ_r , связанного с шероховатостью поверхности разрыва в очаге, определяется как

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \Delta\sigma - \bar{\eta}\sigma. \quad (3)$$

Оценка энергии дислокации E_u выполняется по дислокации в очаге и сброшенному напряжению [22]:

$$E_u = \frac{1}{2} \Delta\sigma \bar{U} \cdot \pi r_0^2. \quad (4)$$

Осреднение станционных динамических параметров (кроме радиационного трения $\Delta\sigma_r$) и вычисление их стандартных отклонений δS выполнены, как и прежде [21], с учетом логнормального закона распределения величин. Поскольку индивидуальные станционные значения $\Delta\sigma_r$ имели знакопеременный характер, то их среднее значение по группе станций вычислено по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\bar{\eta}\sigma$.

Таблица 5. Средние значения динамических параметров очага Змеиногo землетрясения 7 мая 2008 г. в 08^h00^m с $K_{II}=12.7$, $M_w=4.8$

Станция	Сост.	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	f_0 , Гц	M_0 , 10^{13} Н·м	M_w	r_0 , км	$\Delta\sigma$, 10^5 Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	\bar{u} , 10^{-2} м	$\eta\sigma$, 10^5 Па	$\Delta\sigma_r$, 10^5 Па	E_u , 10^{15} эрг
Симферополь	Z	252	7.0	1.8	2320	4.85	1.37	39.9	133	13.2	12.9	7.06	15.5
Симферополь	N+E	252	69	1.0	1890	4.79	1.38	31.6	105	10.6	15.9	-0.06	9.96
Ялта	Z	269	3.0	1.7	2530	4.87	1.45	36.6	122	12.8	11.9	6.42	15.4
Ялта	N+E	269	41	1.0	1980	4.8	1.38	33.1	110	11.1	15.2	1.37	10.9
S					2165	4.8*	1.39	35.2	117	11.9	13.9	3.7	12.7
δS					0.03	0.05	0.006	0.023	0.023	0.023	0.03		0.05

Примечание. Знаком * отмечено среднее арифметическое.

Получено хорошее внутреннее согласие динамических параметров очага, как по разным волновым группам записи, так и по разным сейсмическим станциям («Симферополь» и «Ялта») с малой величиной дисперсии (табл. 5). В целом малая величина дисперсии данных позволяет отнести найденные значения динамических параметров к категории надежных и сравнить их с долговременными значениями, определенными по аналоговым станциям.

Для сравнения взяты зависимости:

$$\lg \bar{M}_0 = (0.645 \pm 0.027) K_{II} + (15.14 \pm 0.27) \text{ из [27]}$$

$$\text{и } \lg M_0 = (1.05 \pm 0.023) MLH + (18.572 \pm 0.048) \text{ из [28],}$$

где значение \bar{M}_0 выражено в единицах *дин·см*.

С использованием среднего сейсмического момента $\bar{M}_0 = 2.165 \cdot 10^{23}$ *дин·см* по приведенным выше формулам получены значения энергетического класса $K_{II} = 12.7$ и магнитуды по поверхностным волнам $MLH \sim M_S = 4.5$, которые полностью совпадают с таковыми по определению

ям в центрах обработки данных в Крыму [3] и ISC [4]. Радиус круговой дислокации ($r_0=1.39$ км) для исследуемого землетрясения также не превышает расчетное значение для землетрясения такого же уровня энергетического класса K_{II} .

С использованием скалярного сейсмического момента M_0 механизмы очага пересчитаны в соответствующие компоненты тензора сейсмического момента – девять возможных пар сил, необходимых для получения силового эквивалента произвольного смещения в очаге. В каждой паре первый индекс определяет направление силы, а второй – направление плеча. Из рис. 7 видно, что для обоих вариантов решений (рис. 7 а, б) компоненты M_{xx} и M_{zz} в абсолютных значениях являются приблизительно равными и значительно большими относительно других, что соответствует преобладанию взбросовой составляющей. Скольжение по простиранию для варианта рис. 7 а, б пренебрежительно мало. Для варианта рис. 7 а, б сдвиговая составляющая вносит больший вклад в соответствующее решение.

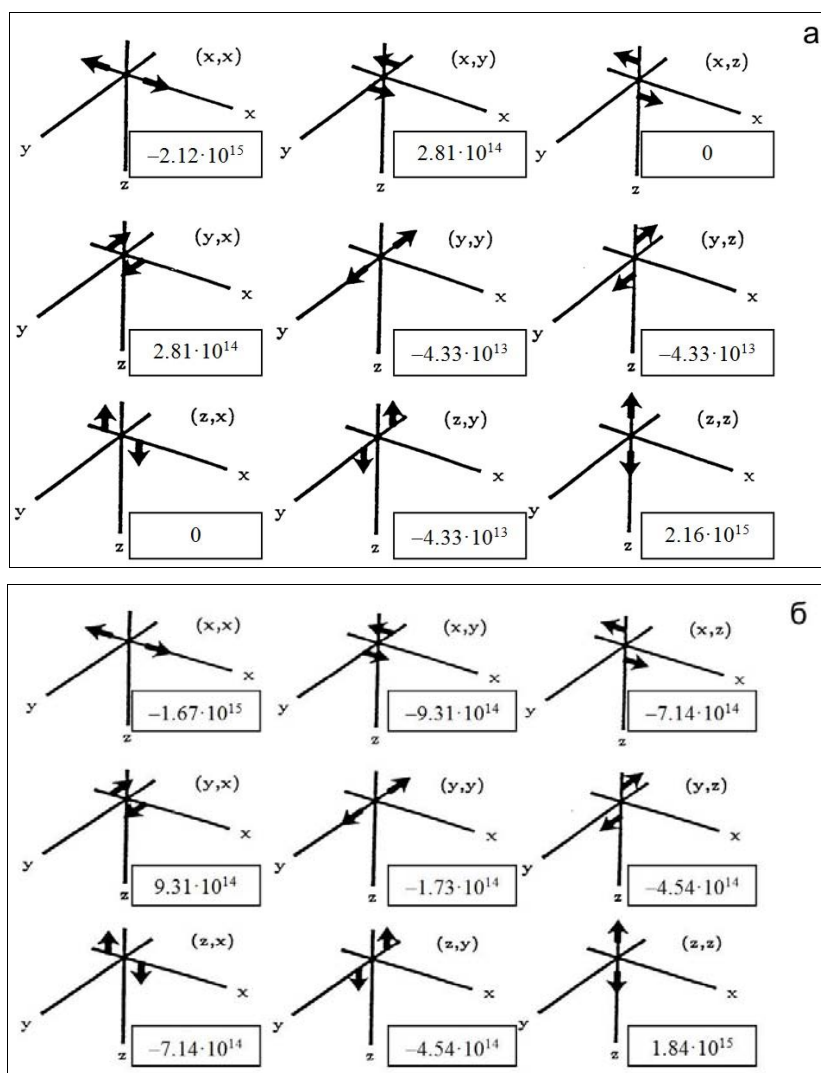


Рис. 7. Компоненты тензора сейсмического момента (в единицах СИ – Н·м) для механизма очага землетрясения 7 мая 2008 г. по данным первых движений в продольных волнах (а) и тензора момента центра GCMT (б)

В целом компоненты тензора сейсмического момента для обоих решений механизма очага (рис. 7) имеют близкие значения.

Таким образом, по результатам исследования очаговых параметров можно заключить, что землетрясение 7 мая 2008 г., произошедшее в северо-западной части шельфа Черного моря вблизи о. Змеиный, возникло в верхней части земной коры под действием горизонтальных сил сжатия близмеридионального направления. В очаге произошла взбросовая подвижка субши-

ротной ориентации. Сброшенное и кажущееся напряжения соответственно составили 35 и 14 бар ($35 \cdot 10^5$ и $13.9 \cdot 10^5$ Па). Скольжение по берегам разрыва было гладким, о чем свидетельствует положительное значение радиационного трения $\Delta\sigma_r \sim 4 \cdot 10^5$ Па. Процесс разрушения среды в очаговой зоне продолжался не более 5.7 с (табл. 3) и развивался в двух направлениях: близширотном (западном) и диагональном (юго-восточном) со скоростями около 5 км/с. Наибольшая длина разрыва получена для близширотного направления ($Az_1 = 274^\circ$), коррелируемого с простираем ($STK = 264^\circ$) плоскости подвижки NP2 по данным о решении механизма очага и крупной тектонической структурой широтной ориентации. В очаге землетрясения с радиусом круговой дислокации $r_0 \sim 1.4$ км произведена работа, эквивалентная сейсмическому моменту $M_0 = 2.165 \cdot 10^{16}$ Н·м или $2.165 \cdot 10^{23}$ дин·см для смещения берегов разрыва u на 12 см. При этом энергия дислокации E_u составила $13 \cdot 10^{15}$ эрг, а моментная магнитуда $M_w = 4.8$, значение которой близко к $M_w = 4.9$ по данным ISC для тензора момента центра. Общая деформация среды в очаговой зоне соответствовала $\varepsilon = 1.2 \cdot 10^{-4}$.

Макросейсмические данные. Сбор сведений о характере распределения макросейсмического эффекта от Змеиног землетрясения выполнен в период с 12 по 20 мая 2008 г. сотрудниками отдела сейсмологии Института геофизики НАН Украины путем прямых опросов населения по специально разработанной анкете. В результате получено 3200 сведений о проявлении землетрясения в 66 пунктах Одесской, Николаевской, Херсонской областей и северо-западной части Автономной Республики Крым.

Обработка макросейсмических данных осуществлялась в соответствии с признаками шкалы MMSK-84 [29]. В качестве основного объекта при определении интенсивности сотрясений выбран «человек чувствительный (в помещении в покое)».

Для каждого населенного пункта оценивалась средняя степень реакции (d_{cp}) и выносилась на схему масштаба 1:2 50 000. Переход от средней степени реакции к интенсивности сотрясений в баллах выполнен по критериям шкалы MMSK-84.

В табл. 6 приведен перечень обследованных населенных пунктов, указаны интенсивность сотрясений, координаты и расстояние до макросейсмического эпицентра. Согласно полученным результатам (табл. 6), интенсивность сотрясений в пределах изученной территории составляла $I = 3-4$ балла.

Таблица 6. Макросейсмические данные о Змеином землетрясении 7 мая 2008 г. в 08^h00^m с $K_{II} = 12.7$, $M_w = 4.8$

№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E	№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E
<u>4 балла</u>					16	Одесса	134	46.5	30.7
1	Вилково	54	45.4	29.6	17	Коблево	166	47	31.2
2	Приморское (Татарбунарский район)	55	45.7	29.8	18	Очаков	174	46.6	31.6
3	Тузлы	62	45.9	30.1	19	Радостное	185	47	30.3
4	Приморское (Белгород Днестровский район)	72	46.0	30.3	20	Бехтеры	188	46.2	32.3
5	Сергеевка	78	46.0	30.0	21	Николаев	226	47	32
6	Килия	80	45.5	29.2	<u>3 балла</u>				
7	Шабо	90	46.1	30.4	22	Александровка	115	46.3	30.6
8	Сарата	90	46.0	29.7	23	Тарутино	129	46.2	29.2
9	Белгород-Днестровский	96	46.2	30.3	24	Нерубайское	137	46.5	30.6
10	Измаил	112	45.3	28.8	25	Егоровка	153	46.7	30.4
11	Ильичевск	113	46.3	30.7	26	Очаковское	176	46.3	32
12	Парутино	199	46.7	31.9	27	Бараново	179	47	30.4
<u>3-4 балла</u>					28	Оленевка	179	45.4	32.5
13	Татарбунары	76	45.8	29.6	29	Ивановка	182	47	36.5
14	Затока	83	46	30.4	30	Станислав	201	47	36.5
15	Арциз	98	46	29.4	31	Лиманы	204	46.7	31.5
					32	Кизомыс	211	46.6	32.3
					33	Красное	213	46.1	32.8
					34	Нечаянное	204	46.9	31.6
					35	Томина Балка	213	46.6	32.3

№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E
36	Михайловка	213	46.3	32.6
37	Березовка	213	47.2	30.9
38	Белозерка	222	46.6	32.4
39	Новоозерное	224	45.4	33.1
40	Цурюпинск	236	46.6	32.7
41	Воскресенское	236	47	32.1
42	Константиновка	285	47.1	31.9
<u>2-3 балла</u>				
43	Серпневое	145	46.3	29
44	Рени	156	45.4	29.3
45	Коминтерновское	174	46.8	30.9
46	Каиры	187	46.9	30.8
47	Черноморское	191	45.5	32.7
48	Лазурное	194	46.1	32.5
49	Скадовск	224	46.1	32.9
50	Камышаны	226	46.6	32.5
51	Степовое	228	47.2	32.6

№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E
52	Херсон	233	46.6	32.6
Не ощущалось				
53	Баловне	229	47	31.9
54	Терновка	231	47.1	31.9
55	Чернобаевка	233	46.7	32.5
56	Калиновка	242	47.1	32.2
57	Евпатория	244	45.2	33.4
58	Каланчак	256	46.2	33.3
59	Новая Маячка	269	46.6	33.2
60	Армянск	280	46.1	33.7
61	Чаплынка	278	46.3	33.5
62	Красноперекопск	284	45.9	33.8
63	Новокаменское	285	46.6	33.5
64	Каменка	295	46.7	33.5
65	Берислав	295	46.8	33.4
66	Воинка	296	45.9	34

По данным табл. 6 построена карта изосейст (рис. 8).

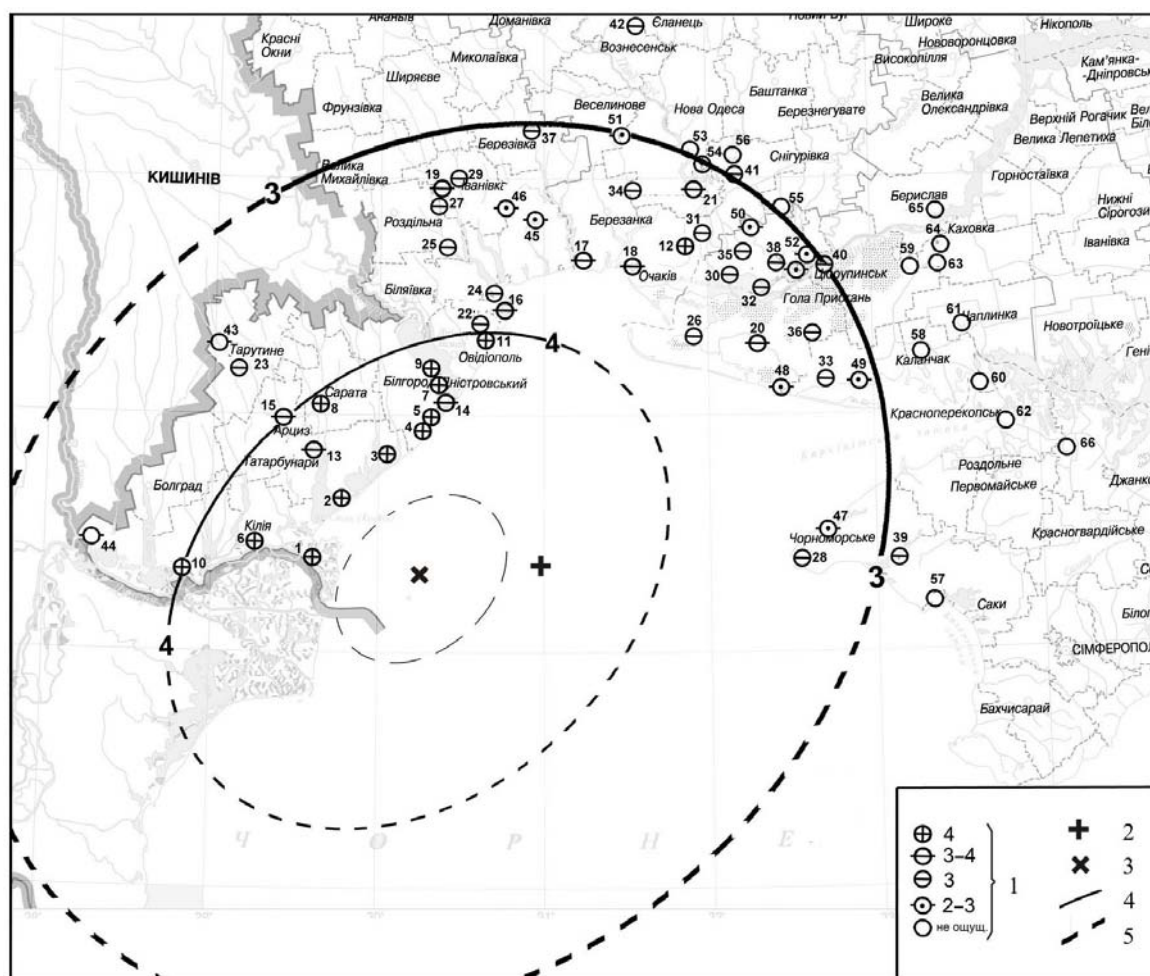


Рис. 8. Карта изосейст землетрясения 7 мая 2008 г. в $08^{h}00^{m}$ с $K_{II}=12.7$, $M_s=4.5$, $M_w=4.8$

1 – интенсивность в баллах шкалы MSK-64; 2, 3 – инструментальный и макросейсмический эпицентры соответственно; 4, 5 – изосейсты уверенные и предполагаемые соответственно; номера пунктов на карте соответствуют порядковому номеру в табл. 6.

Изосейсты землетрясения имеют форму эллипсов, большие оси которых вытянуты в северо-восточном направлении (рис. 8). Осевая линия изосейст имеет $Az=46^\circ$, что практически совпадает с простираем ($STK=45^\circ$) нодальной плоскости NPI в решении GСMT (см. табл. 2 и рис. 3). К сожалению, отсутствуют данные о границах эпицентральной зоны, и имеет место одностороннее по отношению к эпицентру расположение макросейсмической информации, затрудняющие определение координат макросейсмического эпицентра и параметров макросейсмического поля.

Расчетное значение интенсивности в эпицентре найдено по уравнению макросейсмического поля Блейка–Шебалина [30]:

$$I_0 = b \cdot M - v \cdot \lg h + c.$$

Для инструментальных значений глубины очага в пределах $h=10\div 17$ км и магнитуды по поверхностным волнам $MS=4.4\text{--}4.5$ получено $I_0^p=5\text{--}6$ баллов, что отражено в названии настоящей статьи.

Максимальная интенсивность сотрясений, соответствующая $I=4$ баллам (табл. 6, рис. 8), отмечена в населенных пунктах юго-западной части Одесской области: городах Вилково, Киля, Измаил, Татарбунары, Сарата, Белгород-Днестровский, Ильичевск, селах Шабо, Затока, Сергеевка. Здесь землетрясение ощутили большинство опрошенных людей; многие стремились покинуть помещение, некоторые выбежали. В некоторых населенных пунктах детей выводили из школ и детских садов на улицу. Многие респонденты смогли определить продолжительность колебаний (от 10^s до 2^m), направление («вдоль Дуная», «волной от Дуная») и количество толчков (например, «два толчка, второй – сильнее»). Отмечено раскачивание, колебание, дребезжание различных предметов (раскачивались люстры, компьютеры, «все предметы в комнате поехали волной в одну сторону»). Многие заметили сильные дребезжания стекол в окнах.

Граница трехбалльной зоны проходит по населенным пунктам Рени, Раздельная (Одесская область), Николаев, Воскресенск (Николаевская область), Херсон, Скадовск (Херсонская область), Черноморское (АР Крым). Землетрясение ощутили в основном на верхних этажах зданий, толчки респонденты сравнивали с сотрясениями от проезжающей тяжелой автомашины. Большинство ощутили слабые воздействия, в единичных случаях люди пугались или выходили из помещений.

Восточнее и севернее указанных населенных пунктов землетрясение не ощущалось.

Построенная по материалам макросейсмического обследования карта изосейст имеет уверенные границы на материковой части и предполагаемые (расчетные) – на морской территории. Изосейсты в море проведены теоретически в предположении симметрии относительно надежных сегментов эллипсов на материковой части (рис. 8). По расчетной первой изосейсте определены приближенные координаты макросейсмического эпицентра: $\varphi=45.33^\circ N$, $\lambda=30.27^\circ E$.

Несмотря на скудость полноценных макросейсмических данных, оценим геометрические параметры макросейсмического поля, представленного на рис. 8, учитывая, что других данных может не появиться еще много лет из-за низкой сейсмической активности описываемого района на северо-западе акватории Черного моря. В такой ситуации полезны даже приближенные оценки соотношения длин продольных и поперечных осей изосейст и ориентации всей системы изосейст.

Таблица 7. Основные параметры макросейсмического поля Змеиног землетрясения 7 мая 2008 г. в 08^h00^m с $K_{II}=12.7$, $M_w=4.8$

I_i , баллы	Геометрические параметры поля изосейст, км				Площадь S_i зоны, км ²
	ℓ_a	ℓ_b	$\bar{\ell}$	ℓ_a/ℓ_b	
4	140	95	115	1.47	41762
3	257	200	227	1.28	161396

Примечание. Среднее $\bar{\ell}$ является средним геометрическим $\bar{\ell} = \sqrt{\ell_a \cdot \ell_b}$; площадь считалась для эллипса $S=\pi a b$.

Историческая сейсмичность. Местная сейсмичность, связанная с тектоническими нарушениями области шельфа западной части Черного моря, установлена только высокочув-

ствительными сейсмическими наблюдениями региональной сетью станций Крыма. За период с 1955 по 2008 г. из этого района зарегистрировано несколько десятков относительно слабых землетрясений с магнитудами $M_w=2.0-4.9$ (рис. 9), большая часть из которых относится к сложной последовательности сейсмических толчков в 1992 г. с энергетическими классами $K_{II}=7.1-11.5$ ($M_w=2-3.8$) и глубинами очагов до 10 км [31].

Главный толчок, произошедший 29 марта 1992 г. в 23^h46^m с $K_{II}=11.5$, предварялся двумя форшоками с $K_{II}=9.5$ и $K_{II}=10.4$ и сопровождался шлейфом из 18 повторных толчков, последний из которых с $K_{II}=10.6$ был зафиксирован 7 августа 1992 г. При этом наиболее слабые ($K_{II}<8$) толчки были зарегистрированы только ближайшими высокочувствительными станциями «Донузлав» и «Севастополь» [31].

Сведения об исторической сейсмичности данного района отсутствуют из-за удаленности от населенных пунктов. Можно отметить только упоминаемую в документах [32] информацию о землетрясении 27.04.1865 г. с неуверенными координатами очага: $\varphi=44.5^\circ\pm 2^\circ$, $\lambda=29.5^\circ\pm 2^\circ$.

Сейсмический режим северо-западной части шельфа Черного моря изучен по материалам инструментальных наблюдений за период 1955–2010 гг. с выборкой данных по землетрясениям с $M_w>2$ в пределах географических координат: $\varphi=44.0^\circ-46.0^\circ N$, $\lambda=30.0^\circ-33.0^\circ E$. Число землетрясений N нормировано на время T и площадь S , сейсмическая активность A_6 рассчитана для уровня магнитуды $M_w=6$ с учетом единого для данной территории закона повторяемости. Кумулятивный график распределения $N_\Sigma(M)$ построен по всем магнитудам M_w землетрясений, начиная от представительной M_{min} и выше с шагом $M_w\pm 0.25$. Получено, что в целом для всей совокупности землетрясений график повторяемости прямолинеен и описывается логлинейной зависимостью:

$$\lg N_\Sigma = -(0.63 \pm 0.05) M_w + (3.7 \pm 0.24), \quad \rho = 0.98.$$

Аппроксимация экспериментальных точек на графике проводилась с использованием ортогональной регрессии.

Расчет долговременной сейсмической активности и ее картирование выполнены методом установленного качества [33]. Построены две карты: обзорная для всей шельфовой зоны с шагом $\Delta S=0.2^\circ$, $N_\Sigma>3$ за период 1955–2010 гг. (рис. 10 а) и детальная – для района наибольшей плотности эпицентров района о. Змеиный с шагом $\Delta S=0.1^\circ$ за более короткий интервал времени 1990–2010 гг. (рис. 10, б). Отчетливо видна пространственная неоднородность поля активности A_6 с максимальными вершинами в западной части шельфа (район о. Змеиный) и в восточной – вблизи Крыма. Наиболее высокий уровень сейсмической активности $A_6=0.001$ относится к локальному сейсмическому линеamentу северо-восточного простирания на северо-западе шельфа.

В детальном масштабе также выделяются места с максимальным и минимальным уровнем активности. Пиковое значения $A_6=0.007$ относится к очаговой зоне Змеиного землетрясения 7 мая 2008 г. (рис. 10 б) и является временной флуктуацией сейсмичности на фоне средних долговременных параметров.

Таким образом, наиболее сильное землетрясение за весь период инструментальных наблюдений, произошедшее 7 мая 2008 г. вблизи о. Змеиный с $M_w=4.8$ ($I_0^P=5-6$ баллов), подтвердило достаточно высокий уровень активности и сейсмического потенциала геологических структур шельфовой зоны северо-западной части Черного моря. Необходимо отметить, что в настоящее время здесь активно ведется техногенная деятельность по добыче и транспортировке углеводородного сырья. Возрастание антропогенной нагрузки может привести к изменению

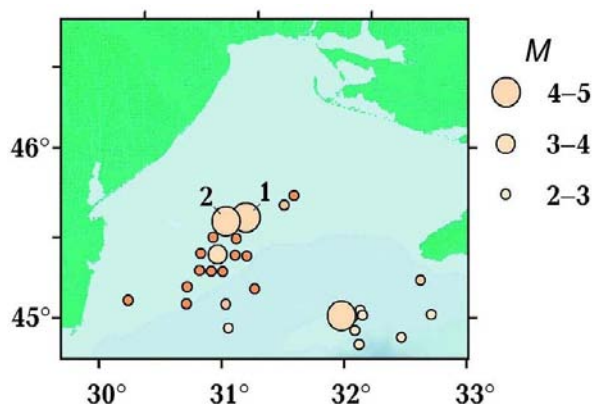


Рис. 9. Карта эпицентров землетрясений северо-западной части шельфа Черного моря за период 1980–2008 гг. Цифрами отмечены эпицентры наиболее сильных землетрясений (29.03.1992 г. (1) и 07.05.2008 г. (2)) с близкими координатами очагов.

естественного хода сеймотектонических процессов и сейсмичности, увеличению сейсмической опасности и сейсмического риска. Для мониторинга сейсмической обстановки этого мало изученного района необходимо усовершенствовать, оптимизировать систему сейсмических наблюдений юга Украины [2].

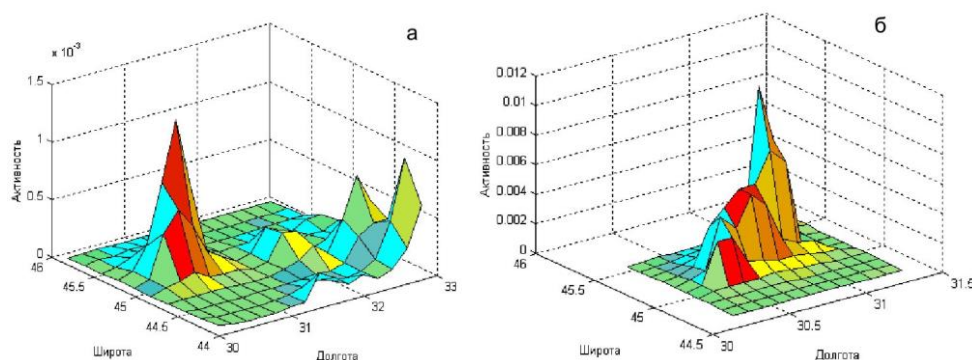


Рис. 10. Поверхности сейсмической активности (A_6) в западной части Черного моря: а – обзорная для всего района шельфа за период 1955–2010 гг.; б – детальная для района о. Змеиный за период 1990–2010 гг.

Л и т е р а т у р а

1. Герасимов М.Е., Бондарчук Г.К., Юдин В.В., Белецкий С.В. Геодинамика и тектоническое районирование Азово-Черноморского региона // Геодинамика, тектоника и флюидодинамика нефтегазовых регионов Украины. Сборник докладов на VII Международной конференции Крым-2007. – Симферополь: «Ассоциация геологов г. Симферополя», 2008. – С. 115–151.
2. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Модель сейсмической опасности северо-западной части Черного моря // Геофизический журнал – 2012. – 28. – № 5. – С. 77–101.
3. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крыма за 2008 г. ($N=61$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
4. Bulletin of the International Seismological Centre for 2008. – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2010. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
5. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2008 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2008.
6. Земная кора и история развития Черноморской впадины. – М.: «Наука», 1975 г. – 358 с.
7. Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Козиненко Н.М. (отв. сост.). Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2008 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2008 г. – Симферополь: ИГ НАНУ, 2010. – С. 51–88.
8. Пустовитенко А.А. (отв. сост.). Каталог механизмов очагов землетрясений Крыма за 2008 г. ($N=1$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
9. Балакина Л.А., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. – М.: Наука, 1972. – 198 с.
10. Kennet V.L.N. Seismological Tables: ak 135 // Research School of earth Sciences Australian national University. Australia, Canberra, ACT0200, 2005. – С. 80.
11. Кульчицкий В.Е., Сафонов Г.П., Свидлова В.А. Годографы сейсмических волн Крымско-Черноморских землетрясений // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕССН СССР (Крым–Карпаты) за 1983г. – Киев: Наукова думка, 1986. – С. 94–103.
12. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А., Калинюк И.В. Очаговые параметры землетрясения 7 мая 2008 г. в районе о. Змеиный (западная часть шельфа Черного моря) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2008 г. – Симферополь: ИГ НАНУ, 2010. – С. 20–27.
13. Горбунова И.В., Бойчук А.Н., Доцев Н.И., Кальметьева З.А., Капитанова С.А., Кучай О.А., Михайлова Н.Н., Пустовитенко Б.Г., Симбирёва И.Г., Товмасян А.К. Интерпретация очаговых волн на записях землетрясений. – М.: Наука, 1992. – 130 с.

14. **Горбунова И.В., Пустовитенко Б.Г.** Новая методология изучения сложного сейсмического разрывообразования // Геофизический журнал– 1997. – 19. – № 3. – С. 42–47.
15. **Вольвовский И.С., Вольвовский Б.С.** Разрезы земной коры территории СССР по данным глубинного сейсмического зондирования. – М.: Наука, 1975. – 268 с.
16. **Геология шельфа УССР.** Тектоника. – Киев: Наукова думка, 1987. – 152 с.
17. **Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А.** Экспериментальные данные о процессах в очагах Черноморских землетрясений// Сейсмологический бюллетень Украины за 2005 год.– Симферополь: ИГ НАНУ, 2007. – С. 152–163.
18. **Brune I.V.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. – 1970. – 75. – N 26. – P. 4997–5009.
19. **Аптекман Ж.Я., Дараган С.К., Долгополов В.В., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С.** Спектры P -волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Унификация исходных данных и процедуры расчета амплитудных спектров // Вулканология и сейсмология. – 1985. – № 2. – С. 60–70.
20. **Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С.** Спектры P -волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. – 1989.– № 2. – С. 66–79.
21. **Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А.** Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
22. **Костров Б.В.** Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
23. **Kanamori H.** Quantification of great earthquakes // Tectonophysics. – 1978. – 49. – N 3/4. – P. 207–210.
24. **Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мерзей Е.А., Поречнова Е.И., Сыкчина З.Н.** Динамические параметры очагов землетрясений Крыма. (См. раздел II (Спектры и динамические параметры очагов землетрясений) в наст сб.).
25. **Кейлис-Борок В.И.** Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений // Труды Геофизического института АН СССР. – 1959. – № 9 (136). – С. 20–42.
26. **Касахара К.** Механика землетрясений. – М.: Мир, 1985. – С. 25.
27. **Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А., Поречнова Е.И.** Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма // Сейсмичность Северной Евразии. Материалы Международной конференции. – Обнинск: ГС РАН, 2008 б. – С. 238–242.
28. **Пустовитенко Б.Г.** Сейсмические процессы в Черноморском регионе и сейсмическая опасность Крыма. – Дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. – Киев: ИГ НАНУ, 2003. – 387 с.
29. **Ершов И.А., Шебалин Н.В.** Проблема конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиций сейсмологов // Прогноз сейсмических воздействий // Вопросы инженерной сейсмологии. – Вып. 25. – М: Наука, 1984. – С. 78–96.
30. **Шебалин Н.В.** Об оценке сейсмической интенсивности // Сейсмическая шкала и методы определения сейсмической интенсивности. – М.: Наука, 1975. – С. 87–109.
31. **Свидлова В.А. (отв. сост.)** Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1992 год // Сейсмологический бюллетень Украины за 1992 год. – Симферополь: ИГ НАНУ, КЭС, 1995. – С. 7–8.
32. **Евсеев С.В., Костюк О.П., Москаленко Т.П., Роман А.А., Сагалова Е.А., Шебалин Н.В.** Карпаты [1091 –1974 гг., $M \geq 4.5$, $I_0 \geq 5$] // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука. – С. 37–54.
33. **Ризниченко Ю.В.** Проблемы сейсмологии. Избранные труды. – М.: Наука, 1985. – 408 с.