

КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКИЙ РЕГИОН**Б.Г. Пустовитенко, В.А. Свидлова, М.Н. Бондарь***Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, seismosilver1@mail.ru, bpustovitenko@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрены результаты сейсмического мониторинга Крымско-Черноморского региона за 2014 год. Инструментальные наблюдения проводились восемью региональными цифровыми сейсмическими станциями. За 2014 г. зарегистрировано 119 местных землетрясений энергетических классов $K_{II}=4.3-11.2$, большая часть из которых меньше представительного для всего региона энергетического уровня $K_{min}=9.0$. Общее число произошедших в 2014 г. землетрясений почти в два раза больше, а выделенная суммарная сейсмическая энергия в 4.4 раза меньше соответствующих средних значений за период 2004–2013 гг. Самое сильное ощутимое землетрясение с $K_{II}=11.2$, $M_{w_{reg}}=4.1$ произошло 2 марта в 03^h34^m в Ялтинском районе на глубине 28 км с интенсивностью $I=2-3$ балла на Южном берегу Крыма. Его очаг приурочен к очаговой зоне разрушительного Крымского землетрясения 11.09.1927 г. Механизм очага обоих землетрясений (11.09.1927 г. и 02.03.2014 г.) подобен – сбросо-сдвиг, с преобладанием сбросовой подвижки. Главный толчок предварялся форшоками и сопровождался шлейфом афтершоков. В очаге 18 октября с $K_{II}=10.1$, $M_{w_{reg}}=3.8$ в районе Черноморской впадины произошла сдвиговая подвижка под действием субширотного сжатия и субмеридионального растяжения. Рассмотрен временной ход высвобождения суммарной энергии землетрясений, пропорциональной снятой упругой деформации (графики Бенъофа) за последние десять лет. Сделан вывод, что сейсмическая обстановка в регионе сохраняется потенциально опасной на ближайшие 2–3 года.

Ключевые слова: сейсмичность, представительность, гипоцентр, энергия, форшоки, афтершоки, миграция, механизм очага, график Бенъофа.

DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.03

Для цитирования: Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А., Бондарь М.Н. Крымско-черноморский регион // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 38–48. doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.03

Регион и районы. В 2014 г. сейсмический мониторинг Крымско-Черноморского региона выполнялся Институтом сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета (ИСиГ КФУ) им. В.И. Вернадского. Вид и размеры региона сохранены в рамках границ, принятых в 1983 г. [1, с. 3–7] (рис. 1), и включают в себя территорию Республики Крым, значительную часть Черного моря и прилегающие территории. Регион условно разделен на девять районов [2], которые существенно отличаются по сеймотектоническим условиям, уровню сейсмической активности и порогом чувствительности сети: 1 – Севастопольский, 2 – Ялтинский, 3 – Алуштинский, 4 – Судакско-Феодосийский, 5 – Керченско-Анапский, 6 – Степной Крым, 7 – Азово-Кубанский, 8 – Северо-Западный, 9 – Черноморская впадина. Границы районов показаны на рис. 2.

Сеть станций и карта K_{min} . Инструментальные наблюдения осуществлялись восемью стационарными сейсмическими станциями, расположенными на Крымском полуострове: «Симферополь» (SIM), «Севастополь» (SEV), «Ялта» (YAL), «Алушта» (ALU), «Феодосия» (FEO), «Судак» (SUDU), «Керчь» (KERU) и «Тарханкут» (TARU) [3]. Все станции оснащены цифровым оборудованием, которое принадлежит двум организациям: ИСиГ КФУ им. В.И. Вернадского и ГАУ РК «Крымский экспертный совет». Сведения о станциях сети и параметрах цифровой регистрирующей аппаратуры представлены в [4]. Аппаратура ЦСС SDAS [5], функционировавшая на станции «Симферополь» с 25.06.2000 г. по 07.07.2014 г., из-за невозможности ее ремонта была заменена на ЦСС MI17 [4].

Уровень представительной регистрации землетрясений в пределах региона не изменился по сравнению с таковым в предыдущем 2012 г. [3]. Расположение сейсмических станций и изолинии энергетической представительности землетрясений K_{min} , рассчитанной по наблюдениям действовавшей в 2014 г. Крымской сети и Северо-Кавказской станции «Анапа» (ANN), показаны на рис. 1. Минимальный энергетический уровень представительных землетрясений соответствует $K_{min}=7.0$. Практически на всей территории региона обеспечена представительная регистрация землетрясений с $K_{min}=9.0$.

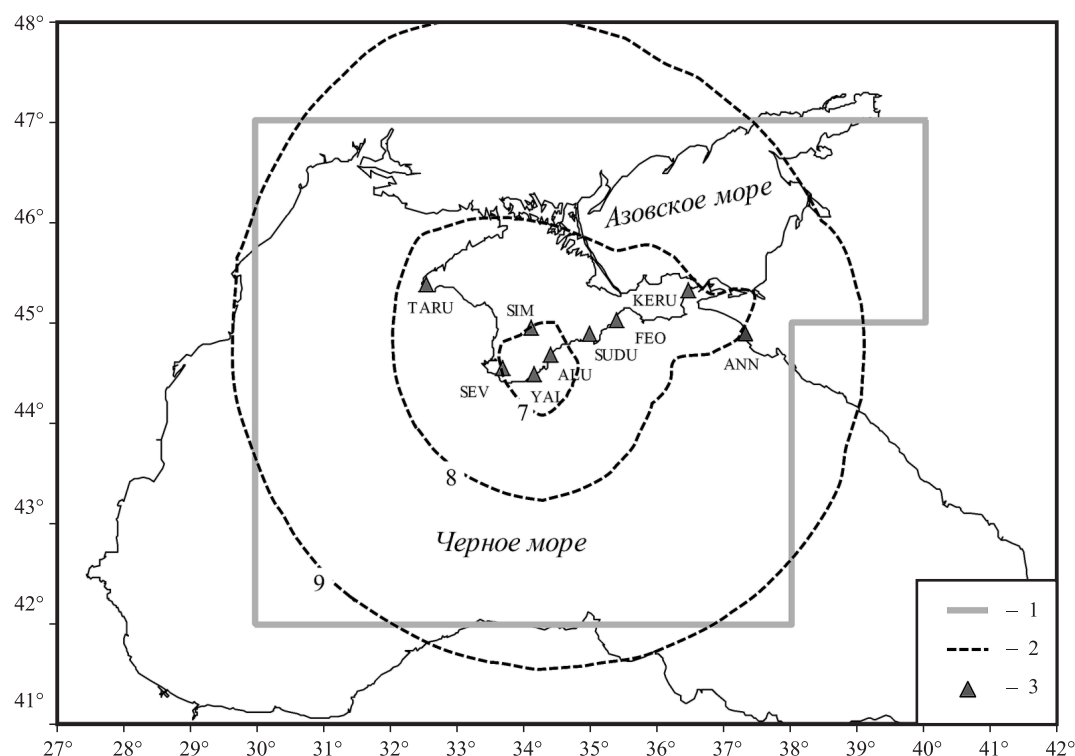


Рис. 1. Карта энергетической представительности $K_{\min}$ землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2014 г.

1 – контур территории региона в рамках принятых границ регионализации [1, с. 3–7]; 2 – изолиния $K_{\min}$; 3 – сейсмическая станция.

Методика сводной обработки землетрясений региона и комплекс программ для их локации подробно описаны в [6, 7]. При обработке землетрясений из районов, приграничных с Северным Кавказом, помимо станций Крымской сети, используются также данные станций ФИЦ ЕГС РАН, входящих в сеть Северного Кавказа [8], и ежедневные сводки станции «Анапа» (ANN). Первичная интерпретация полученных цифровых сейсмических записей и их сохранение выполняются по программному комплексу WSG [9].

Каталог Крымско-Черноморского региона за 2014 г. [10] включает основные параметры 119 землетрясений энергетических классов $K_{\Pi}=4.3\text{--}11.2$.

Для 13 событий региона получены спектральные и динамические параметры их очагов [11], для двух – рассчитан механизм очага [12].

Классификация землетрясений в каталоге выполнена по энергетическим классам K_{Π} [13] для всех землетрясений, а также по магнитудам: для шести – по локальным магнитудам ML_{WSG} [9] и для 13 – по моментным магнитудам $M_{w\text{per}}$, приведенным из работы [11]. Диапазон всех определенных магнитуд составил: $ML_{WSG}=3.0\text{--}3.9$, $M_w=2.6\text{--}4.1$.

Единственное ощутимое землетрясение произошло 2 марта в 03^h34^m в **Ялтинском районе (№ 2)**. Это самое сильное землетрясение года с $K_{\Pi}=11.2$, $M_{w\text{per}}=4.1$, интенсивность сотрясений от которого достигала $I=3$ балла по шкале MSK-64 [14, 15].

Сейсмичность региона. Пространственное расположение эпицентров во многом традиционно: наибольшая плотность их просматривается в **Ялтинском (№ 2)** и **Алуштинском (№ 3)** районах, значительное число – в **Керченско-Анапском районе (№ 5)**. В основном эпицентры землетрясений сосредоточены в пределах морской акватории (рис. 2). Большинство из них слабые с $K_{\Pi}\leq 6$, непреставительные для всего региона.

Несколько иначе, чем в обычный слабоактивный год, расположены эпицентры слабых событий **Севастопольского района (№ 1)** – вблизи берега и на суше. Также привлекает внимание эпицентр с $K_{\Pi}=9$ в центре Азовского моря (**№ 7**).

Глубина гипоцентров большинства землетрясений (92.2 %) не превышает преобладающую глубину для региона $h=20\text{--}25$ км [7].

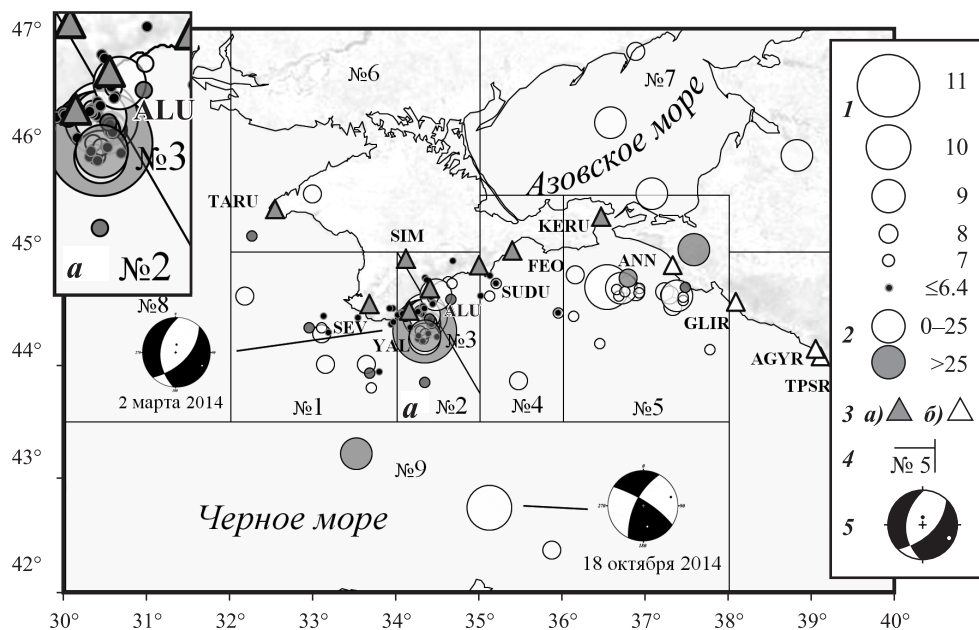


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2014 г.

1 – энергетический класс K_p ; 2 – глубина h гипоцентра, км; 3 – сейсмическая станция: а) Крым; б) Северный Кавказ; 4 – граница района: № 1 – Севастопольский; № 2 – Ялтинский; № 3 – Алуштинский; № 4 – Судакско-Феодосийский; № 5 – Керченско-Анапский; № 6 – Степной Крым; № 7 – Азово-Кубанский; № 8 – Северо-Западный; № 9 – Черноморская впадина; 5 – стереограмма механизма очага в проекции нижней полусферы. На врезке а – увеличенный фрагмент карты эпицентров для центральной зоны региона (районы № 2 и № 3).

В 2014 г. наблюдался подъем сейсмической активности по сравнению с таковой в 2013 г. [16]. В табл. 1 приведено распределение основных параметров сейсмичности Крымско-Черноморского региона в 2014 г. в сравнении с таковыми за предыдущий десятилетний период 2004–2013 гг.

Таблица 1. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_p и суммарная сейсмическая энергия ΣE Крымско-Черноморского региона за 2004–2014 гг.

Год	K_{Π}										N_{Σ}	$\Sigma E,$ 10^9 Дж
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
2004	–	3	16	12	9	7	2	1	–	–	50	57.2
2005	–	1	7	7	7	3	2	–	1	–	28	519.1
2006	1	2	8	15	6	8	1	1	–	–	42	215.3
2007	–	2	7	16	11	7	4	–	1	–	48	682.7
2008	–	2	11	16	15	11	5	–	–	1	61	5067.4
2009	–	17	60	43	26	8	5	2	–	–	161	348.8
2010	–	6	18	32	22	10	3	–	–	–	91	32.7
2011	–	11	24	23	20	7	5	2	–	–	92	144.4
2012	–	3	6	14	16	10	3	–	1	–	53	1288.1
2013	–	9	14	18	12	5	6	–	–	–	64	52.8
Сумма	1	56	171	196	144	76	36	6	3	1	690	8408.5
Среднее	0.1	5.6	17.1	19.6	14.4	7.6	3.6	0.6	0.3	0.1	69	840.8
2014	2	24	27	33	18	11	3	1	–	–	119	191.3

Общее число землетрясений $N_\Sigma=119$ увеличилось по сравнению с $N_\Sigma=64$ в предшествующем 2013 г. и в 1.7 раз больше среднего $N_{\text{ср}}=69$ за десятилетний период наблюдений (2004–2013 гг.) (табл. 1, рис. 3). Суммарная сейсмическая энергия, высвободившаяся в очагах землетрясений региона в 2014 г., равна $\Sigma E=191.3 \cdot 10^9 \text{ Дж}$, т.е. в 4.4 раза меньше среднего значения – $\Sigma E_{\text{ср}}=840.8 \cdot 10^9 \text{ Дж}$, хотя возросла в 3.6 раза по сравнению с годовой энергией в 2013 г. ($\Sigma E=52.8 \cdot 10^9 \text{ Дж}$) [16]. Наглядно динамику изменения сейсмичности за последние десять лет (включая 2014 г.) можно представить графически в виде временной функции ежегодной выделенной сейсмической энергии $\Sigma E=f(t)$ (рис. 3).

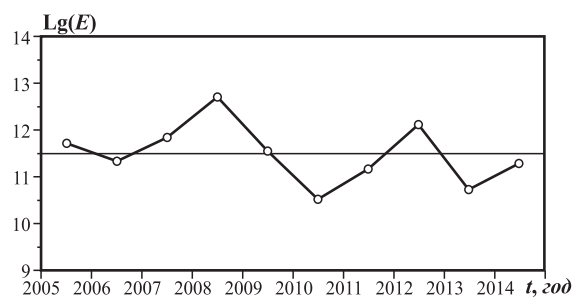


Рис. 3. Изменение со временем суммарной выделенной энергии ΣE в регионе за период 2005–2014 гг.

Прямая линия — среднее долговременное значение $lg(\Sigma E)$ за 10 лет.

Можно отметить квазипериодичность активизации сейсмичности в регионе с двумя всплесками по энергетическому уровню: в 2008 г. и в 2012 г. В эти годы в северо-западном и в Керченско-Анапском районах произошли ощутимые землетрясения с $M_{w\text{per}}=4.8$ и $M_{w\text{per}}=4.3$ соответственно [17, 18]. Минимальный уровень выделенной энергии отмечен в 2010 и 2013 гг. Исходя из выявленной долговременной цикличности сейсмических процессов в [7] и полагая, что показанная на рис. 3 периодичность сохранится в будущем, можно ожидать активизации сейсмичности в регионе в ближайшие два года.

Рассмотрим особенности распределения в 2014 г. числа N зарегистрированных землетрясений и суммарной выделенной энергии ΣE по районам региона (табл. 2, рис. 4).

Таблица 2. Распределение числа N землетрясений по энергетическим классам K_{Π} и суммарная сейсмическая энергия ΣE по районам за 2014 г.

№	Район	K _П								N _Σ	ΣE, 10 ⁹ Дж
		4	5	6	7	8	9	10	11		
1	Севастопольский	1	3	4	4	4	–	–	–	16	0.3428
2	Ялтинский	1	16	16	11	4	3	1	1	53	166.2210
3	Алуштинский	–	4	4	3	–	1	–	–	12	2.0269
4	Судакско-Феодосийский	–	1	3	3	–	–	–	–	7	0.0178
5	Керченско-Анапский	–	–	–	11	7	3	1	–	22	5.8480
6	Степной Крым	–	–	–	1	1	–	–	–	2	0.1685
7	Азово-Кубанский	–	–	–	–	1	3	–	–	4	3.6855
8	Северо-Западный	–	–	–	–	–	–	–	–	0	0
9	Черноморская впадина	–	–	–	–	1	1	1	–	3	13.0314
	Всего	2	24	27	33	18	11	3	1	119	191.342

Широкий энергетический диапазон (восемь порядков) землетрясений 2014 г., как и в предыдущие годы, получен за счет регистрации 53 слабых непредставительных землетрясений с $K_{\Pi} \leq 6$, произошедших вблизи побережья в Севастопольском ($N=8$), Ялтинском (33), Алуштинском (8) и Судакско-Феодосийском (4) районах (табл. 2).

Как следует из рис. 4, экстремальные значения числа N землетрясений и их суммарной энергии ΣE относятся ко второму району (№ 2), в очагах землетрясений которого высвободилось 86.9 % от общей сейсмической энергии (табл. 2).

Всего из **Ялтинского района (№ 2)** в 2014 г. зарегистрировано 53 землетрясения энергетических классов $K_{\Pi}=4.3$ –11.2 на расстояниях $\Delta=8$ –72 км от сейсмической станции «Ялта», при этом удаленно в море (на расстоянии $\Delta=72$ км) был расположен только один эпицентр.

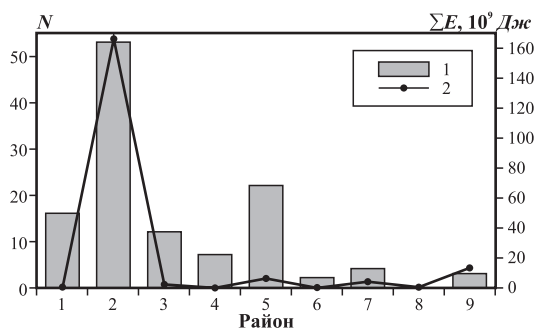


Рис. 4. Распределение по районам числа N (1) землетрясений и суммарной выделенной энергии ΣE (2)

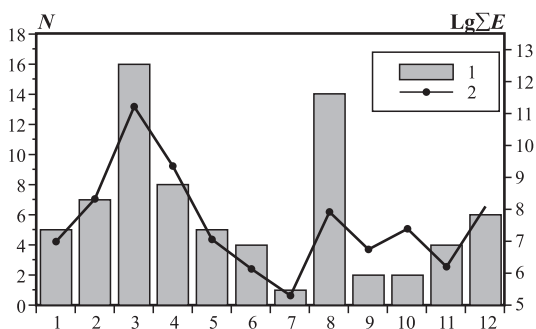


Рис. 5. Распределение по месяцам 2014 г. числа землетрясений N (1) и логарифма суммарной выделенной сейсмической энергии $lg \Sigma E$ (2) в центральной зоне региона (районы № 2–4)

Наибольшее количество зарегистрированных землетрясений в центральной зоне региона (районы № 2–4) приходится на март и август 2014 г. (рис. 5). Большая часть из них относится к группирующимся последовательностям, связанным с самым сильным землетрясением года с $K_{\Pi}=11.2$, $M_{w\text{рег}}=4.1$, которое произошло 2 марта в 03^h34^m с координатами гипоцентра: $\varphi=44.30^{\circ}\text{N}$, $\lambda=34.33^{\circ}\text{E}$, $h=28$ км. Это же землетрясение обосновало пик выделенной сейсмической энергии на графике хода $\lg \Sigma E(t)$, приходящийся на март (рис. 5).

Сейсмические колебания от этого землетрясения были зарегистрированы 122 сейсмическими станциями мировой сети. Самая удаленная из них, станция YKA (Йеллоунайф, административный центр Северо-Западных территорий Канады), расположена на расстоянии 7842 км от эпицентра землетрясения. Магнитудные оценки по разным агентствам и типам волн существенно отличаются друг от друга (табл. 3).

Таблица 3. Разные магнитудные оценки землетрясения 2 марта 2014 г. в 03^h34^m по данным различных сейсмологических центров обработки данных (агентств)

Агентство	Магнитуды					
	m_b	ML_{WSG}	ML	Ms	M_w	Mc
Крым	—	3.9/2	—	3.9*	4.12/7	3.3/1
ISK	—	—	4.1/1	—	—	—
MOS	3.8/1	—	—	—	—	—
IDC	3.4/8	—	3.3/7	2.7/1	—	—
ISC	3.4/8	—	—	—	—	—
CSEM	4.5/14	—	4.1	—	4.64/6	—

Примечание. Знаком * отмечено расчетное значение по формуле для $MLH(K_{\Pi})$ из [2, с. 37].

Наибольшее различие отмечено в оценках магнитуд по объемным волнам ($m_b=3.4–4.5$) и локальным магнитудам ($ML=3.3–4.1$). Максимальные значения магнитуды получены по сейсмическому моменту из спектров записей объемных сейсмических волн на группе станций Крыма ($M_{w\text{рег}}=4.12$) [11] и в CSEM ($M_{w\text{CSEM}}=4.64$), а наименьшее – $Ms=2.7$, определенное по одной станции в IDC. Поскольку для этого землетрясения есть надежное значение $K_{\Pi}=11.2$, но нет прямых определений MLH , необходимых для расчета интенсивности, то MLH получено путем расчета по региональной формуле для $MLH(K_{\Pi})$ из [2, с. 37].

Главный толчок предваралялся с 22 по 28 февраля шестью форшоками энергетических классов $K_{\Pi}=6.5–8.0$ с глубиной очагов $h=18–27$ км [10]. Глубина основного толчка $h=28$ км, первого афтершока с $K_{\Pi}=8.5$, последовавшего через 15 часов, $h=26$ км. Энергетическая ступень между основным толчком и наиболее сильным форшоком составила три порядка ($\Delta K_{\Pi\text{фор}}=3.2$), а между наиболее сильным афтершоком – около полутора порядков ($\Delta K_{\Pi\text{афт}}=1.4$).

Активизация центральной зоны, в том числе за счет афтершоков землетрясения 2 марта в 03^h34^m, прослеживалась до 16 декабря (рис. 6), сейсмическая энергия при этом высвобождалась неравномерно: разрозненно и «пакетами», с некоторой миграцией очагов вдоль зоны и варьирующей глубиной.

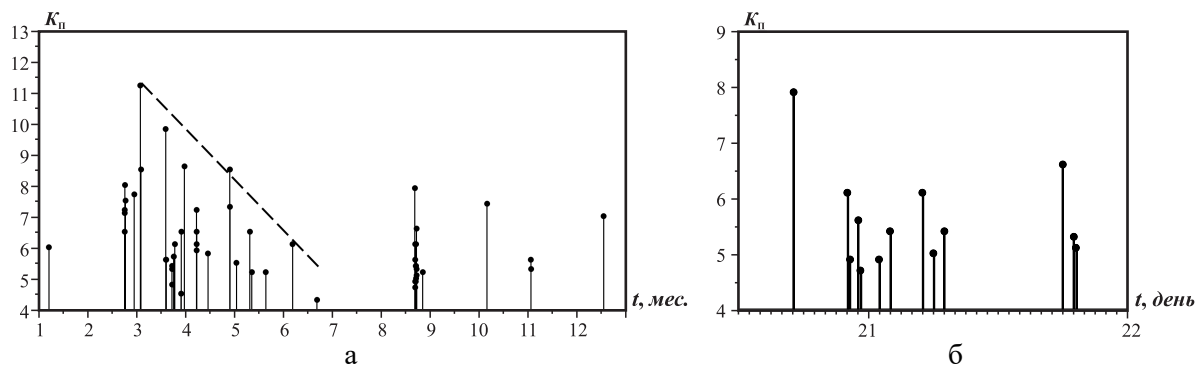


Рис. 6. Изменение энергетического класса K_{Π} землетрясений Ялтинского района по месяцам 2014 г. (а) и по дням в период 21–22 августа (б)

Непосредственно к серии афтершоков можно отнести землетрясения со 2 марта по 20 июня 2014 г., произошедшие вблизи эпицентра главного толчка, с характерным для афтершоковых последовательностей спадом энергетического уровня (рис. 6 а, штрих-линия) и малыми промежутками времени dT между событиями (рис. 7). В форшоковый период dT составляли от 7 минут до 5 дней, а в афтершоковый – от 1 минуты до 17 дней (рис. 7).

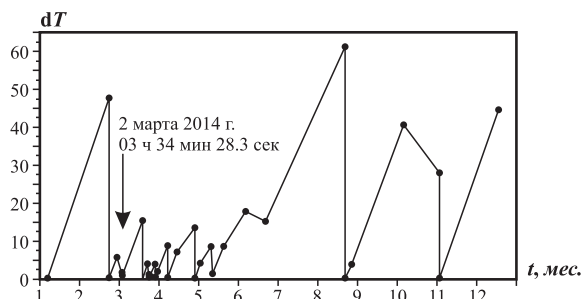


Рис. 7. Изменение со временем промежутков времени dT (в днях) для всех землетрясений Ялтинского района Крыма в 2014 г. Стрелкой показан момент главного толчка.

Из всей совокупности событий часть (61 %) с низкими энергетическими классами $K_{II}=4.3-6.1$ отчетливо записана только двумя станциями. В связи с этим далее при рассмотрении пространственных свойств сейсмичности они не рассматривались.

Общую очаговую зону всей последовательности группирующихся землетрясений ($K_{II}>6$) можно представить в виде эллипса с длиной большей оси около 25 км, ориентированной субмеридионально в $Az\approx 20^\circ$ (рис. 8, контур 2). При этом форшоки, располагаясь в верхней части общей очаговой зоны (рис. 8, контур 1), заняли незначительную площадь в виде эллипса, ориентированного диагонально ($Az\approx 330^\circ$).

Рассмотрим последовательное перемещение в пространстве, миграцию очагов группирующихся событий (рис. 9). Первая группа афтершоков (1) в период до 29 марта энергетических классов $K_{II}=4.5-9.8$ произошла севернее главного толчка на меньшей, чем основной толчок, глубине ($h=7-19$ км), вблизи зоны форшоков (рис. 8, 9). Эпицентральное расстояние от г. Ялты $\Delta=8-24$ км. С 06.04 по 27.04 возникла вторая группа очагов (2), расположенная южнее основного толчка в более глубоких слоях земной коры ($h=22-28$ км).

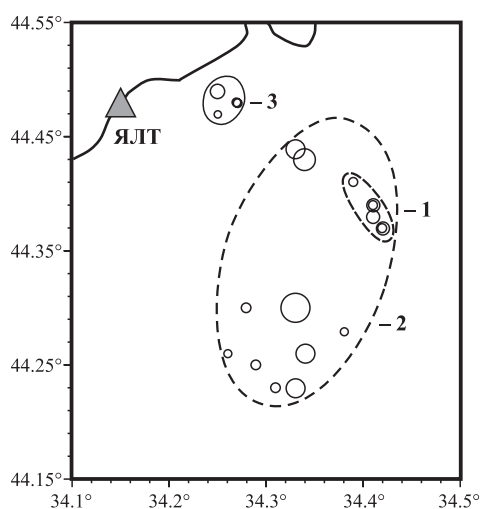


Рис. 8. Пространственное расположение эпицентров группирующихся землетрясений с $K_{II}>6$ Ялтинского района Крыма в 2014 г.

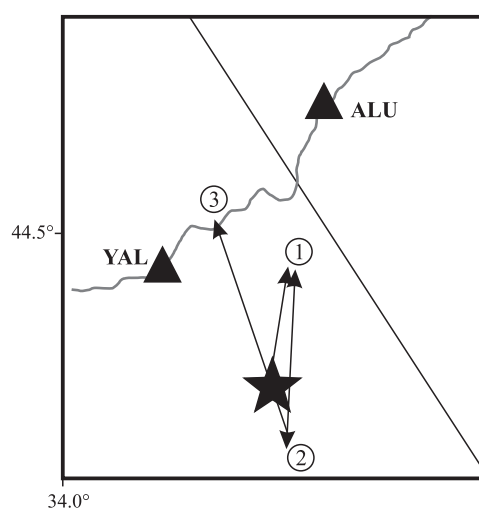


Рис. 9. Миграция очагов последовательности землетрясений после основного толчка 02.03.2014 г.

Контуры: 1 – форшоков ощутимого землетрясения 02.03.2014; 2 – всей зоны последовательности 02.03.2014 г.; 3 – группы толчков 21.08–22.08.2014 г. Цифры – номера групп очагов. Звездочкой показано положение эпицентра главного толчка.

Третья компактная по времени группа событий (3) произошла спустя два месяца после спада афтершоков в период с 20 по 25 августа (рис. 8, контур 3, 9) в непосредственной близости от г. Ялты. Их глубина $h=9-16$ км, энергетические классы $K_{II}=4.7-7.9$. Наиболее сильным (главным) из августовской группы является толчок с $K_{II}=7.9$, далее с малыми интервалами времени от 1 минуты до 11 часов (рис. 6 б) произошло 13 более слабых последующих толчков с $K_{II}=4.7-6.6$. Общее направление миграции центров сейсмической активизации в Ялтинском районе: с юга на север и обратно, далее на северо-запад – показано на рис. 9.

Отметим, что сложные группирующие последовательности с форшоками и афтершоками (второй тип по классификации Моги [19]) являются характерными для центральной части Крымского региона [20].

Главный толчок 2 марта 2014 г. максимального класса $K_{II}=11.2$ ощущался на Южном берегу Крыма. Сейсмические сотрясения примерно одного уровня интенсивности $I=2-3$ балла по шкале MSK-64 [14, 15] отмечены в трех населенных пунктах: Ялта ($\Delta=25$ км), Малый Маяк ($\Delta=36$ км) и Алушта ($\Delta=43$ км) (рис. 10).

Сведения о макросейсмических проявлениях землетрясения собраны по телефону сотрудниками станций «Алушта» (В.А. Антонюк) и «Ялта» (И.В. Курьянова).

Звонки поступили от жителей 4–6 этажей многоквартирных домов. Число сообщений небольшое, так как землетрясение произошло рано утром (в 6 час 34 мин по местному времени). Поскольку собранных макросейсмических данных недостаточно для проведения наблюдаемой изосейсты, то на рис. 10 нанесена теоретическая изосейста с интенсивностью $I=3$ балла для гипоцентрального расстояния 36 км при магнитуде $MLH=3.9^*$ (табл. 3). Наблюдаемая интенсивность сотрясений в каждом из пунктов не превышала $I=2-3$ балла вследствие заглубленности очага ($h=28$ км).

Координаты гипоцентра толчка относятся к очаговой зоне разрушительного Крымского землетрясения 11.09.1927 г. [21].

Механизм очага обоих землетрясений (11.09.1927 г. [21] и 02.03.2014 г. [12]) подобен: сбросовый с преобладанием сбросовой подвижки (см. рис. 10).

Рассмотрим особенности сейсмичности других районов. В **Севастопольском районе (№ 1)** зарегистрировано 16 землетрясений с $K_{II}=4.3-8.1$. Эпицентры всех событий рассеяны в море и на материковой части Крыма на расстояниях 18–121 км от станции «Севастополь» при глубинах $h=7-35$ км.

Интерес представляет активность **Азово-Кубанского района (№ 7)**. Здесь реализовано четыре землетрясения с $K_{II}=7.8-9.4$, что больше обычного. Ранее не было отмечено очагов в центре Азовского моря, далеко от береговой линии. Примечательно, что землетрясение с $K_{II}=9.4$ зарегистрировали все станции сети, несмотря на удаленность и небольшую глубину очага, $h=6$ км.

В **Северо-Западном районе (№ 8)** наблюдалось полное сейсмическое затишье.

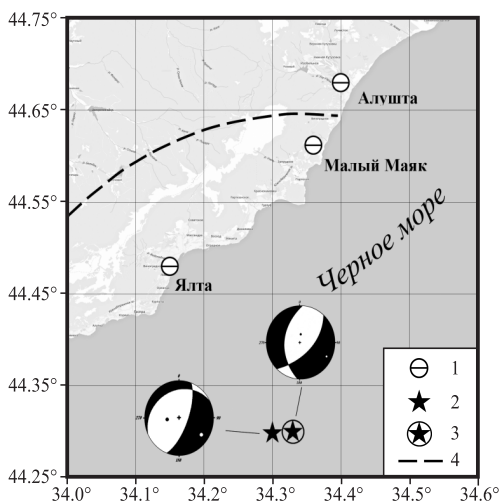


Рис. 10. Карта-схема наблюдаемой интенсивности I от землетрясения 2 марта 2014 г.

1 – пункты с интенсивностью 3 балла; 2, 3 – эпицентры землетрясений 11.09.1927 г. (2) и 02.03.2014 г. (3) и соответствующие диаграммы механизмов очагов; 4 – теоретическая изосейста.

В **Алуштинском районе (№ 3)** произошло 12 землетрясений с $K_{II}=4.5-9.3$. Как всегда, часть их (4) находилась на прибрежной территории вблизи г. Алушты, а остальные восемь – в море, на расстоянии 9–21 км. Глубина всех событий $h=5-35$ км.

В **Судакско-Феодосийском районе (№ 4)** определены параметры семи слабых событий с $K_{II}=4.9-6.8$. Их эпицентры удалены в море на расстоянии $\Delta=15-89$ км от г. Судака при глубинах $h=12-29$ км.

Из **Керченско-Анапского района (№ 5)** Крымская сеть зарегистрировала 22 землетрясения с $K_{II}=6.8-9.6$ и глубинами очагов от $h=4$ до $h=33$ км. Принципиальное отличие сейсмичности района в 2014 г. состоит в том, что большая часть сейсмических событий относится к слабым, по энергетическому уровню ниже представительного для региона.

В слабоактивном районе **Степной Крым (№ 6)** отмечено два события: первое с $K_{II}=8.2$, $h=21$ км и второе с $K_{II}=7.0$, $h=35$ км.

Из **Черноморской впадины (№ 9)** зарегистрировано три землетрясения с $K_{II}=8.1-10.1$, произошедших на глубинах $h=5-34$ км. Черноморская впадина в 2014 г. была на втором месте среди районов региона по количеству высвобожденной энергии, что обеспечено сейсмическим толчком 18 октября энергетического класса $K_{II}=10.1$, $M_{Wper}=3.8$. В соответствии с полученным решением механизма, в очаге

этого землетрясения произошла сдвиговая подвижка под действием субширотного сжатия и суб-меридионального растяжения [12]. Диаграмма механизма очага показана на рис. 2.

Развитие сейсмического процесса во всем регионе можно наглядно представить в виде временного хода высвобождения суммарной энергии землетрясений, пропорциональной снятой упругой деформации – графика Беньоффа [22, 23] (рис. 11). Графики построены с осреднением энергии $\Sigma E^{2/3}$ (Дж) по периодам 1 год.

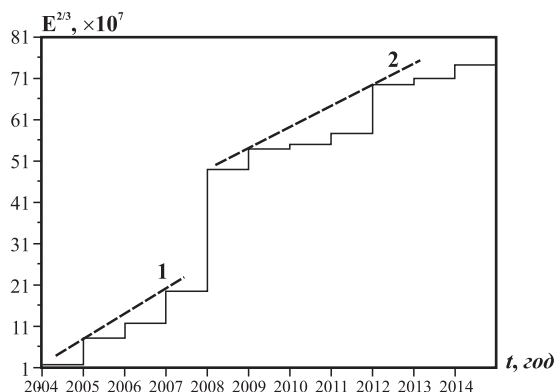


Рис. 11. Временной ход высвобождения упругих деформаций в регионе за последние 11 лет (2004–2014 гг.)

Средняя скорость деформации за весь рассмотренный период составила: $v = 6.6 \cdot 10^7$ Дж/год. Можно отметить (рис. 11) два относительно «спокойных» этапа снятия деформаций: 2004–2007 гг. при скорости $v_1 = 4.45 \cdot 10^7$ Дж/год (рис. 11, прямая линия 1) и 2009–2012 гг. с $v_2 = 5.1 \cdot 10^7$ Дж/год (рис. 11, прямая 2). Каждый из этих этапов заканчивался повышенным сбросом накопленных деформаций, наибольший из которых произошел в 2008 г. в Северо-Западном районе во время Змеиногоского землетрясения 07.05.2008 г. с $K_{\Pi} = 12.7$, $M_{\text{пер}} = 4.8$ [17]. Полагая, что такая тенденция сохранится в будущем (рис. 11, прямая 2), можно предположить, что накопленная во всем регионе Крыма энергия не полностью была высвобождена после наиболее сильного Су-Псехского землетрясения 10.12.2012 г.

с $K_{\Pi} = 12.1$ [18] в Керченско-Анапском районе и сейсмическая обстановка в регионе сохраняется потенциально опасной на ближайшее время. Это следует также из графика временного изменения суммарной выделенной энергии ΣE в регионе за период 2005–2014 г. (см. рис. 3).

Л и т е р а т у р а

1. Землетрясения в СССР в 1983 году (отв. ред. Н.В. Кондорская). – М.: Наука, 1986. – 325 с.
2. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
3. Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А. Крымско-Черноморский регион // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 49–58.
4. Калинин И.В. Сейсмические станции Крыма в 2014 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
5. Цифровая сейсмическая станция SDAS / Описание и инструкция по эксплуатации. – Обнинск: ГС РАН, 1988. – 148 с.
6. Кульчицкий В.Е. Программа расчета координат гипоцентров землетрясений (ГИРО-08) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2008 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2010. – С. 28–33.
7. Пустовитенко Б.Г., Лушик А.В., Боборыкина А.В., Кульчицкий В.Е., Можжерина А.В., Насонкин В.А., Панков Ф.Н., Поречнова Е.Н., Пустовитенко А.А., Тихоненков Э.П., Швырло Н.И. Мониторинг сейсмических процессов в Крымско-Черноморском регионе. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ Гидрофизика», 2014. – 264 с.
8. Мехрюшев Д.Ю., Янков А.Ю., Погода Э.В., Даниялов М.Г., Габсатарова И.П., Пойгина С.Г. Сейсмические станции ГС РАН в хронологии их открытия в аналоговом и/или цифровом варианте, работающие на территории Северного Кавказа в 2009 г. // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – Приложение на CD-ROM.
9. Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 77–83.
10. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыччина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2014 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.

11. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 250–262. doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.25
12. Пустовитенко Б.Г. Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2014 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – Приложение на CD-ROM.
13. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений, т. 2. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – С. 113–125.
14. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
15. Медведев С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. – М.: Наука, 1968. – С. 151–162.
16. Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А., Князева В.С., Бондарь М.Н. Крымско-Черноморский регион // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 44–55.
17. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Складар А.М., Князева В.С. Змеиное землетрясение 7 мая 2008 г. с $K_{II}=12.7$, $M_c=5.1$, $M_{w\text{per}}=4.8$, $I_0^P=5-6$ (Северо-западная часть шельфа Черного моря, Украина) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 313–325.
18. Габсатарова И.П., Малянова Л.С., Селиванова Е.А., Якушева В.Н. Су-Псехское землетрясение 10 декабря 2012 г. с $K_p=11.5$, $M_{w\text{per}}=4.3$, $I_0=5-6$ (Анапский сейсмоактивный район) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 21 (2012 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 420–432.
19. Mogi K. Some discussions on afterschoke, foreschoke and earthquake swarm – the fracture of a some-infinite body caused by on inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena // Bull. of the earthquakes. Res. Inst. Univ of Tokyo. – 41. – Part 3. – 1963. – P. 615–640.
20. Пустовитенко Б.Г. Некоторые свойства сложных последовательностей землетрясений Крыма // Геодинамика. – 2011. – № 2 (11). – С. 257–262.
21. Пустовитенко Б.Г. Динамические параметры очагов разрушительных крымских землетрясений 1927 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2001 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2003, а. – С. 124–130.
22. Беньофф Г. Накопление и высвобождения деформаций по наблюдениям сильных землетрясений // Слабые землетрясения. – М.: ИЛ, 1961. – С. 199–211.
23. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.

CRIMEAN-BLACK SEA REGION

B.G. Pustovitenko, V.A. Svidlova, M.N. Bondar

*Institute of Seismology and Geodynamics, Crimean Federal University V.I. Vernadsky,
Simferopol, seismosilver1@mail.ru; bpustovitenko@mail.ru*

Abstract. In 2014, the seismic monitoring of the Crimean Black Sea region was carried out by eight digital seismic stations located on the Crimean peninsula. For the entire territory of the region, earthquakes with $K_{min}=9$ are representative. In 2014, 119 local earthquakes of K_{II} energy classes in the range of $4.3 \div 11.2$ were recorded, most of them have energy classes less than the representative energy level. The total number of earthquakes that occurred in 2014 is almost twice as large, and the total released seismic energy is 4.4 times less than the average values of ΣE for the period 2004–2013. The strongest earthquake of the year with $K_{II}=11.2$, $M_w=4.12$ occurred on March 2 at 03^h34^m with depth of 28 km in the focal zone of the destructive Crimean earthquake of September 11, 1927, in the Yalta region. It was felt on the southern coast of Crimea with the intensity of $I=2-3$. The focal mechanism of both earthquakes (09/11/1927 and 03/02/2014) is similar: faults-shear with a predominance of the discharge slip. The main shock was preceded by six foreshocks with a $K_{II}=6.5-8.0$ and a depth of $h=18-27$ km. The energy level between the main shock and the strongest foreshock was 3 orders of magnitude ($\Delta K_{II}=3.2$), and between the strongest aftershock – about one and a half orders of magnitude ($\Delta K_{II\text{ aft}}=1.5$). The activation of the central zone, including at the expense of aftershocks of the earthquake on March 2, was traced until the end of the year. At the same time, seismic energy was released unevenly: separately and in groups with some migration of foci and varying depth. In the focus of the earthquake on October 18 with a $K_{II}=10.1$, $M_w=3.8$ (of the Black Sea Basin region), a strike-slip occurred under the action of sublatitudinal compression and submeridional extension. The time course for the last 10 years of release of the total energy of earthquakes proportional to the removed elastic deformation (Benioff graphs) is considered. Two relatively «calm» stages of deformation are

noted: 2004–2007, at the speed of $V_1=4.45 \cdot 10^7$ Joules/year and 2009–2012 – $V_2=5.1 \cdot 10^7$ Joules/year. Each of these stages ended with an increased discharge of accumulated deformations. It is concluded that the seismic situation in the region remains potentially dangerous for the next 2–3 years.

Keywords: seismicity, representativeness, hypocenter, energy, foreshock, aftershock, migration, focal mechanism, Benioff graph.

DOI: 10.35540/1818-6254.2020.23.03

For citation: Pustovitenko, B.G., Svidlova, V.A., & Bondar, M.N. (2020). [Crimean Black sea region]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 38–48. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.03

References

1. Kondorskaya, N.V. (Ed) (1988). *Zemletriaseniia v SSSR v 1985 godu* [Earthquakes in the USSR in 1985]. Moscow, Russia: Nauka Publ, 325 p. (In Russ.).
2. Pustovitenko, B.G., Kul'chickij, V.E., & Goryachun, A.V. (1989). *Zemletriaseniia Krymsko-Chernomorskogo regiona* [Earthquakes of the Crimean Black Sea region]. Kiev, Ukraine: Naukova Dumka Publ., 192 p. (In Russ.).
3. Pustovitenko, B.G., & Svidlova, V.A. (2018). [Crimean Black Sea region]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 21(2012), 49–58. (In Russ.).
4. Kalinyuk, I.V. (2019). [Crimea seismic stations in 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
5. *Cifrovaya seismicheskaya stanciya SDAS. Opisanie i instrukciya po ekspluatacii* [Digital seismic station SDAS. Description and instruction manual] (1988). Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 148 p.
6. Kul'chickij, V.E. (2010). [Program for calculating the coordinates of earthquake hypocenters (GIPO-08)]. In *Seismologicheskii biulleten' Ukrainy za 2008 god* [Ukraine seismological bulletin for 2008] (pp. 28–32). Sevastopol, Ukraine: NPC «ECOSY-Hydrophysica» Publ. (In Russ.).
7. Pustovitenko, B.G., Lushchik, A.V., Boborykina, A.V., Kul'chickij, V.E., Mozhzherina, A.V., Nasonkin, V.A., Pankov, F.N., Porechnova, E.N., Pustovitenko, A.A., Tihonenkov, E.P., & Shvyrolo, V.G. (2014). *Monitoring seismicheskikh protsessov v Krymsko-Chernomorskom regione* [Monitoring of seismic processes in the Crimean Black Sea region]. Sevastopol, Russia: NPC «EKOSI Gidrofizika» Publ., 264 p. (In Russ.).
8. Mekhryushev, D.Yu., Yankov, A.Yu., Pogoda, E.V., Daniyalov, M.G., Gabsatarova, I.P., & Poygina, S.G. (2015). [Seismic stations of the GS RAS in the chronology of their discovery in analog and/or digital versions, operating in the North Caucasus in 2009]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii 2009* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2009]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ., Appendix on CD. (In Russ.).
9. Krasilov, S.A., Kolomic, M.V., & Akimov, A.P. (2006). [Organization of the processing of digital seismic data using the WSG software package. Modern methods for processing and interpreting seismological data]. In *Materialy I Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"*. [Proceedings of the I International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 77–83). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
10. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2020). [Catalog of Crimea earthquakes in 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
11. Pustovitenko, B.G., & Eredzhepov, E.E. (2020). Spectral and focal parameters of earthquakes in the Crimean Black Sea region. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 250–262. doi: 10.35540/1818-6254.2020.23.25. (In Russ.).
12. Pustovitenko, B.G. (2020). [Catalog of Earthquake Focal Mechanisms of the Crimean Black Sea Region for 2014]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), Appendix on CD. (In Russ.).
13. Pustovitenko, B.G., & Kul'chickij, V.E. (1974). [On the energy assessment of the earthquakes of the Crimean Black Sea region] In *Magnituda i energeticheskaya klassifikatsiya zemletriasenii, tom 2* [Magnitude and energy classification of earthquakes, Pt. 2] (pp. 113–125). Moscow, Russia: IEP AS USSR Publ. (In Russ.).
14. Medvedev, S.V. Shponhoyer, V., & Karnik, V. (1965). *Shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 seismic intensity scale]. Moscow: MGK Academy of Sciences USSR Publ., 11 p. (In Russ.).
15. Medvedev, S.V. (1968). International seismic intensity scale. In *Seismicheskoe raionirovanie SSSR* [Seismic zoning of the USSR] (pp. 151–162). Moscow: Nauka Publ. (In Russ.).
16. Pustovitenko, B.G., Svidlova, V.A., Knyazeva, V.S., & Bondar, M.N. (2019). Crimean Black sea region. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 44–55. (In Russ.).

17. Pustovitenko, B.G., Pustovitenko, A.A., Sklyar, A.M., & Knyazeva, V.S. (2014). [Snake earthquake on May 5, 2008 with $K_p = 12.7$, $M_c = 5.1$, $M_w = 4.8$, $I_0^p = 5-6$ (north-western part of the Black Sea shelf, Ukraine)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii, 2008 god*. [Earthquakes in Northern Eurasia, 2008] (pp. 313–325). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
18. Gabsatarova, I.P., Malyanova, L.S., Selivanova, E.A., & Yakusheva, V.N. (2018). [Su-Psekh earthquake on December 10, 2012 with $K_p=11.5$, $M_w=4.3$, $I_0^p=5-6$ (Anap seismoactive area)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 21(2012), 420–432. (In Russ.).
19. Mogi, K. (1963). Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms-the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation the earthquake phenomena. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 41(3), 615-658.
20. Pustovitenko, B.G. (2011). [Some properties of complex sequences of earthquakes in Crimea]. *Geodinamika* [Geodynamics], 2(11), 257–262. (In Russ.).
21. Pustovitenko, B.G. (2003). [Dynamic parameters of foci of destructive Crimean earthquakes in 1927]. In *Seismologicheskii biulleten' Ukrainy za 2001 god* [Ukraine seismological bulletin for 2001] (pp. 124–130). Sevastopol, Ukraine: NPC «ECOSY-Hydrophysica» Publ. (In Russ.).
22. Benioff, G. (1961). *Nakoplenie i vysvobozhdeniia deformatsii po nabliudeniiam sil'nykh zemletriasenii* [Accumulation and release of deformations from observation of the strong earthquakes. Weak earthquakes] (pp. 199–211). Moscow, Russia: Foreign Literature Publ. (In Russ.).
23. Kostrov, B.V. (1975). *Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletriaseniia* [Tectonic earthquake focus mechanics]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 179 p. (In Russ.).