

УДК 550.348.(477.8)

СЕЙСМИЧНОСТЬ КАРПАТ в 2021 году

Р.С. Пронишин¹, В.И. Левина², Н.В. Петрова², Н.А. Тону³

¹Институт геофизики НАН Украины, г. Львов, Украина, pronrom@gmail.com

²ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия, petrova@gsras.ru

³Лаборатория сейсмологии Института геологии и сейсмологии

Молдавского государственного университета, г. Кишинёв, Молдова, mold_ndc@yahoo.com

Аннотация. Описаны сейсмические наблюдения в Карпатском регионе в 2021 г., которые проводились, как и ранее, двумя организациями из двух государств: на Украине – отделом сейсмичности Карпатского региона Института геофизики НАН Украины, в Молдове – лабораторией сейсмологии Института геологии и сейсмологии АН Молдовы. На Украине работали 23 стационарные цифровые сейсмические станции с центром обработки во Львове, в Молдове – одна аналоговая и шесть цифровых станций с центром в Кишинёве. Всего в 2021 г. локализовано 239 землетрясений. Наибольшее число землетрясений зарегистрировано в районах Вранча (177) и в Северо-западном (23). Впервые после 2002 г. в сейсмоактивном районе Буковина 23 сентября 2021 г. произошло Чортковское землетрясение с $K_p=11.7$, $m_{b,ISC}=4.4$, которое ощущалось на территории Украины с интенсивностью до 5 баллов. Эпицентр землетрясения локализован вблизи пересечения Теребовлянского и ортогонального ему Тетеревского глубинных разломов, а изосейсты, построенные на основе данных об ощущимости в 27 населенных пунктах, вытянуты в северо-восточном направлении, как и Тетеревский разлом. Максимальное землетрясение региона в 2021 г. зарегистрировано в горах Вранча 9 апреля с $K_p=12.2$, $m_{b,ISC}=4.4$ и $h=82$ км. Выделившаяся в Карпатском регионе в 2021 г. сейсмическая энергия составила $\Sigma E=3.37 \cdot 10^{12}$ Дж, что ниже уровня предыдущего 2020 г. ($\Sigma E=1.11 \cdot 10^{13}$ Дж).

Ключевые слова: Карпатский регион, землетрясение, эпицентр, очаг, сейсмическая энергия, энергетический класс, магнитуда, интенсивность сотрясений, сейсмическая станция, сейсмоактивный район, глубинный разлом.

Для цитирования: Пронишин Р.С., Левина В.И., Петрова Н.В., Тону Н.А. Сейсмичность Карпат в 2021 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 32–43. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.02> EDN: YWUSFD

Введение. Карпатский регион ограничен координатами: 51°N–21°E, 51°N–25°E, 49.5°N–25°E, 49.5°N–30°E, 44°N–30°E, 44°N–25.5°E, 45°N–25.5°E, 45°N–21°E. Для детального анализа сейсмичности он разделен на восемь районов: № 1 – Северо-западный; № 2 – Вранча; № 3 – Южные Карпаты; № 4 – Банат; № 5 – Буковина; № 6 – Кришана; № 7 – Трансильвания; № 8 – Бакэу (рис. 1).

Сейсмические наблюдения в Карпатском регионе проводились в 2021 г., как и в прошлые годы [1, 2], силами организаций из двух государств: отделом сейсмичности Карпатского региона Института геофизики НАН Украины (ИГФ НАН У) и лабораторией сейсмологии Института геологии и сейсмологии АН Молдовы (ИГиС АН М). Данные подразделения имеют свои сети наблюдений и центры обработки данных во Львове и в Кишинёве соответственно. Обобщение региональных каталогов землетрясений по данным этих центров и формирование сводного каталога землетрясений Карпат впервые осуществлялось в Центральном отделении ФИЦ ЕГС РАН.

Отметим, что на момент написания данной статьи Институт геологии и сейсмологии АН Молдовы перешел в подчинение Молдавского государственного университета со сменой аббревиатуры названия на ИГиС МГУ, однако в данной статье мы сохраняем аббревиатуру, действовавшую в 2021 г.

Сейсмические станции. В Карпатском регионе в 2021 г. сейсмологическая сеть инструментальных наблюдений ИГФ НАН У состояла из 23 сейсмических станций [Приложение 1]. В августе 2021 г. была открыта станция «Бережаны», расположенная в 50 км к юго-западу от г. Тернополя, а в октябре 2021 г. в 30 км восточнее г. Хмельницкого была открыта станция «Меджибиж». На всех сейсмических станциях инструментальные наблюдения проводились с использованием цифровой аппаратуры, созданной в Отделе сейсмичности Карпатского региона Института геофизики Национальной академии наук Украины. Основные параметры регистрирующей аппаратуры приведены в [Приложение 1].

В Молдове в 2021 г. сейсмические наблюдения в лаборатории сейсмологии ИГиС АН М велись на шести станциях с цифровой регистрацией: «Кишинёв» (KIS), «Леово» (LEOM), «Сороки» (SORM), «Джурджулешты» (GIUM), «Малые Милешты» (MILM) и «Пуркары» (PURM), а также комплектом аналоговой аппаратуры на станции «Кишинёв». Список станций, их координаты, перечень и параметры установленной аппаратуры приводятся в [Приложение 2].

Методика обработки и определения параметров землетрясений. Обработка данных сейсмического мониторинга в Карпатском регионе в 2021 г., как и в предыдущие годы, проводилась в двух центрах обработки – в отделе сейсмичности Карпатского региона (ИГФ НАН У) и в лаборатории сейсмологии ИГиС АН М. В каждом из центров получен свой каталог землетрясений Карпатского региона [Приложение 4, 5].

Для определения основных параметров землетрясений Карпатского региона – времени возникновения, координат и глубин очагов, невязок определений и динамических характеристик – привлекались, помимо данных региональных сетей Украины и Молдовы, также данные Крымской сети, сейсмических служб Румынии, Словакии, Польши и Венгрии.

Основные параметры землетрясений каталога ИГФ НАН У [Приложение 4] определялись с помощью программы HYPO [3], где входными данными являются: дата землетрясения, географические координаты сейсмических станций и времена вступлений сейсмических волн P и S на этих станциях. Для расчетов используются соответствующие годографы, заданные в табличном виде. Программа выполняет расчет координат, времени возникновения землетрясения и оценку точности результата в виде среднеквадратического отклонения по координатам эпицентра и времени в очаге. Учитывая особенности распространения сейсмических волн в Карпатском регионе, для определения основных параметров землетрясений Северо-Западного района (№ 1) использовался региональный Карпатский годограф [4, 5], а для очагов зоны Вранча (№ 2) и районов № 5, № 7 – годограф Джейффриса-Буллена [6].

При комплексной обработке землетрясений на станциях определялись следующие величины зарегистрированных сейсмических событий:

– энергетический класс K_p по шкале Т. Г. Раутиан [7];

– локальная магнитуда ML по Рихтеру [8], определяемая по максимальной амплитуде записи на вертикальной составляющей $A_{z \max}$ согласно формуле:

$$ML = \lg(A_{z \max}) - \lg(A_0);$$

– магнитуда MSH по амплитуде поперечной волны A_s на эпицентральном расстоянии Δ согласно формуле из [9]:

$$MSH = \lg(A_s) + 1.32 \cdot \lg(\Delta, \text{ км}),$$

к которой для промежуточных землетрясений с $h \geq 70$ км вносится поправка (+0.8);

– магнитуда M_d по длительности записи d с использованием формулы А. С. Маламуда из [10]:

$$M_d = 2.67 \lg(d, \text{ мин}) + 1.65,$$

с дальнейшим пересчетом в класс K_d (в предположении, что $K_d = K_p$) по уравнению Т. Г. Раутиан [11]:

$$K_d = 1.8 M_d + 4.0.$$

В Молдове для оценки основных параметров землетрясений и составления каталога [Приложение 5] использовалась разработанная в ИГиС АН М программа HYPOS [12], которая вычисляет положение гипоцентра землетрясения по данным о временах вступлений P - и S -волн на сейсмических станциях Молдовы, Румынии, Украины, Крыма. Классификация землетрясений в [Приложение 5] дана только по региональным локальным магнитудам ML_{MLD} (без указания числа станций).

Сводный каталог землетрясений региона «Карпаты» [Приложение 3].

Как уже было упомянуто выше, обработка землетрясений Карпатского региона осуществляется в двух сейсмологических центрах, ИГФ НАН У и ИГиС АН М, по разному набору станций, разным методикам и с разным набором оценок энергии землетрясений в составленных в этих центрах каталогах. С целью объединения двух разнородных каталогов одного региона в Центральном отделении ФИЦ ЕГС РАН была проведена работа по установлению корреляционных связей между разными типами магнитуд и энергетическими классами из обоих каталогов [13, 14], и было предложено в качестве единой энергетической характеристики землетрясений Карпатского региона в сводном каталоге использовать расчетный энергетический класс K , определяемый следующим образом:

$$K = K_{p \text{ UCR}}$$

$$K = K_{MLD} = 1.71 ML_{MLD} + 3.57, \quad (1)$$

где $K_{p \text{ UCR}}$ – энергетический класс по шкале Т. Г. Раутиан землетрясений из каталога ИГФ НАН У [Приложение 4], ML_{MLD} – локальная магнитуда из каталога ИГиС АН М [Приложение 5], K_{MLD} – расчетный класс, полученный по формуле (1) из ML_{MLD} .

Положение гипоцентров землетрясений, определенное по разным сетям и по разным методикам, может иметь значительные отклонения в координатах, а также систематическое смещение.

Для обнаружения этого эффекта в каталогах землетрясений региона «Карпаты» за 2020–2021 гг. по данным ИГФ НАН У и ИГиС АН М были выделены дубли событий, определенные этими центрами, и проанализирована разница в определениях основных параметров землетрясений. На рис. 1 показана карта эпицентров таких событий.

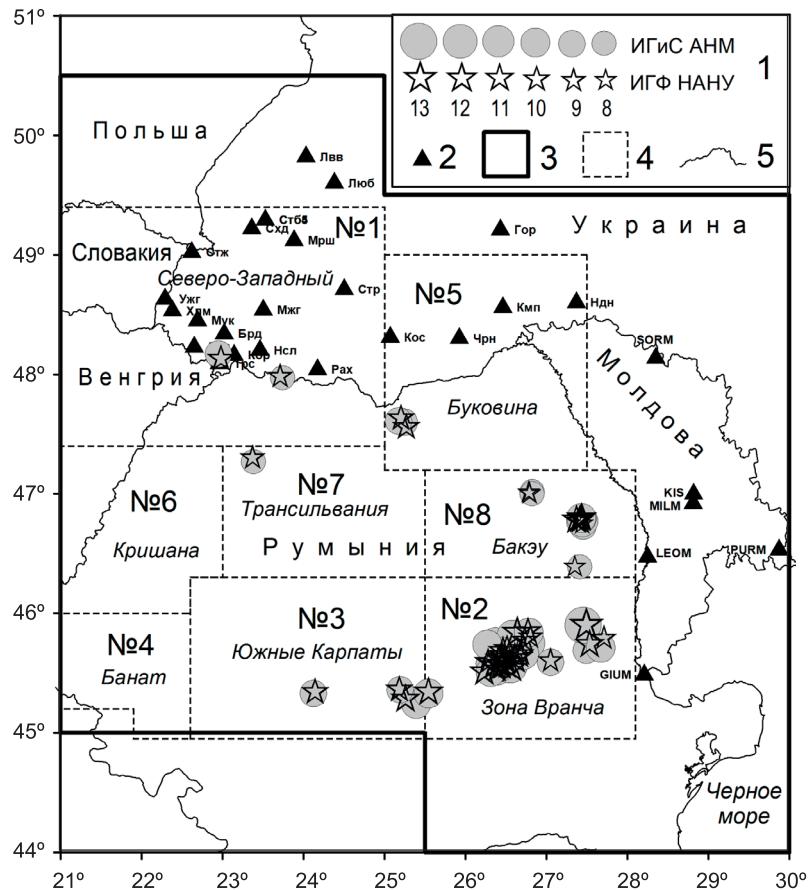


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений 2020–2021 гг. по данным каталогов ИГФ НАН У и ИГиС АН М

1 – эпицентры землетрясений («дубли») с $K_p=8–13$; 2 – сейсмическая станция; 3 – граница региона «Карпаты»; 4 – сейсмоактивные районы: № 1 – Северо-Западный, № 2 – Вранча, № 3 – Южные Карпаты, № 4 – Банат, № 5 – Буковина, № 6 – Кришана, № 7 – Трансильвания, № 8 – Бакэу; 5 – государственная граница.

Как видно из рис. 1, положение эпицентров дублей по данным каталогов ИГФ НАН У и ИГиС АН М имеет незначительные расхождения. Гистограммы расхождений в определении широты и долготы дублей землетрясений показаны на рис. 2 а, б. Диапазон расхождений для дублей составляет $\Delta\phi=–17\div+12$ км, $\Delta\lambda=–14\div+13$ км, систематического смещения не наблюдается. Расхождения по глубине в среднем также невелики и составляют $\Delta h_{cp}=2.4$ км (рис. 2 в) при стандартном отклонении $\delta(\Delta h_{cp})=5.2$ км.

Среднее отклонение $\Delta K_{cp}=K_{pUCR}-K_{MLD}$ расчетных классов K_{MLD} , полученных для землетрясений каталога ИГиС АН М по формуле (1), от энергетических классов K_{pUCR} из каталога ИГФ НАН У, составляет $\Delta K_{cp}=0.19$ (рис. 2 г). Этот незначительный сдвиг относительно нуля может быть связан со значительным разбросом данных, получаемых при измерении динамических параметров землетрясений. Гистограммы на рис. 2 а–в построены с шагом 2 км, а на рис. 2 г – 0.3 ед. K_p .

В сводный каталог землетрясений Карпат за 2021 г. [Приложение 3] вошло 239 землетрясений с $K_{pasc}=4.4–12.2$, из них 60 событий из каталога ИГФ НАН У [Приложение 4] и 179 – из каталога ИГиС АН М [Приложение 5]. В случае определений координат одних и тех же землетрясений двумя центрами предпочтение отдавалось определениям центра ИГФ НАН У, как более обеспеченного сейсмическими станциями.

Кроме основных параметров землетрясений, определяемых в регионе, в сводный каталог в ред. добавлены оценки их величины, полученные в международных сейсмологических центрах, такие как m_{BUC} [15], $MPSP_{MOS}$ [16] и Ms_{ISC} [15], m_{bISC} [15] (далее просто m_b), Mw_{MED} [15].

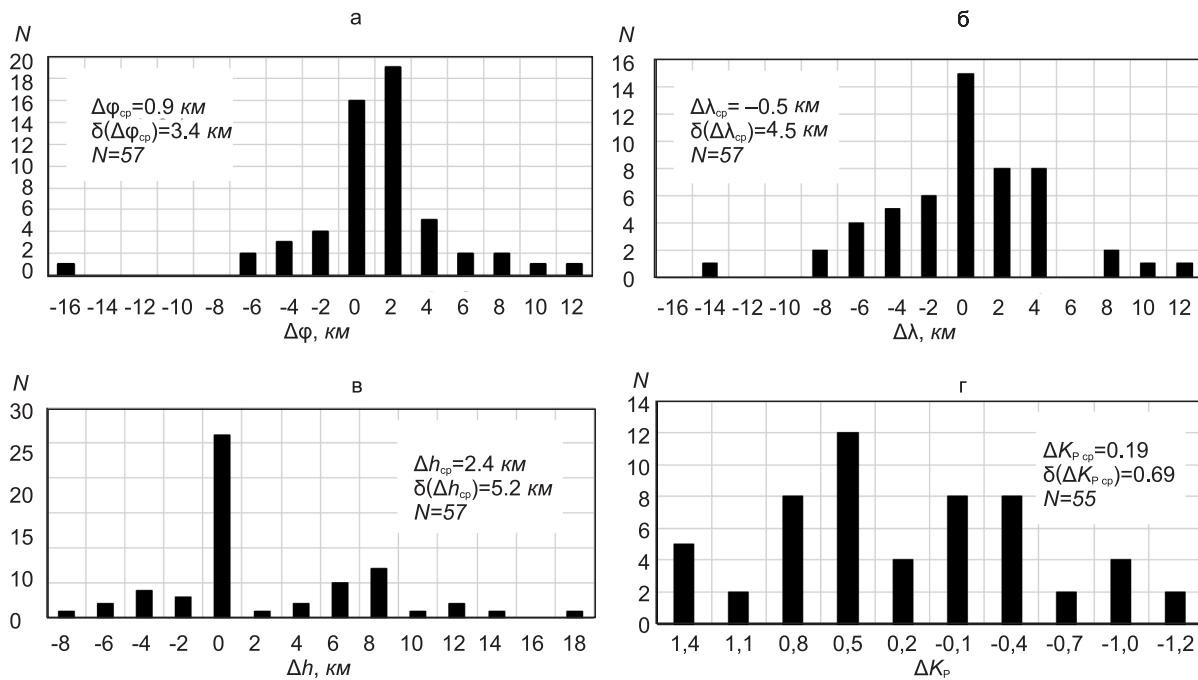


Рис. 2. Гистограммы расхождений в определении широты (а), долготы (б), глубины (в) и энергетического класса (г) для землетрясений за 2020–2021 гг. в каталогах ИГФ НАН У и ИГиС АН М

В [Приложение 6] приведены сведения об интенсивности проявления землетрясений Карпат в 2021 г. с отсылкой к трем источникам данных: ИГФ НАН У [17], EMSC-CSEM – сайт Европейского Средиземноморского сейсмологического центра [18] и USGS – сайт Геологической службы США [19], где сотрясения представлены в баллах шкала MSK-64 [20], EMS-98 [21] и MMI [22] соответственно. Поскольку оценки проявления землетрясений в баллах по этим шкалам примерно равны, в настоящей статье данные из этих источников анализируются совместно.

Анализ сейсмичности. Обзор сейсмичности региона проводился по данным сводного каталога с классификацией по расчетным классам K . Включение в сводный каталог значительного числа событий из каталога Молдовы [Приложение 5] не повлияло существенно на количество выделенной сейсмической энергии ($\Sigma E_{\text{свод}}=3.37 \cdot 10^{12}$ Дж, $\Sigma E_{\text{ИГФ НАН У}}=3.13 \cdot 10^{12}$ Дж), т. к. все сильные землетрясения Карпат обычно представлены в каталоге ИГФ НАН У. Поэтому можно делать сравнение выделенной в регионе в текущем году сейсмической энергии с таковой в предыдущие годы, когда энергия рассчитывалась по каталогу ИГФ НАН У.

В табл. 1 приведено распределение землетрясений по энергетическим классам и суммарная сейсмическая энергия по районам и в регионе в целом за 2021 г. Первенство по числу землетрясений сохранили районы № 1 (Северо-Западный) и № 2 (Вранча), энергии больше всего выделено, как обычно, в районе № 2. Выделившаяся сейсмическая энергия в Карпатском регионе в 2021 г. составила $\Sigma E=3.37 \cdot 10^{12}$ Дж, что ниже уровня энергии в предыдущем 2020 г. ($\Sigma E=1.11 \cdot 10^{13}$ Дж). Наибольшая сейсмическая энергия ($\Sigma E=2.52 \cdot 10^{12}$ Дж), в четыре раза ниже уровня энергии прошлого года ($\Sigma E=1.08 \cdot 10^{13}$ Дж), была выделена в районе Вранча (№ 2).

На рис. 3 показана карта эпицентров землетрясений по данным сводного каталога [Приложение 3].

Как видно из рис. 3, основные черты поля эпицентров, характерные для региона в предыдущие годы [1, 2], сохранились и в 2021 г. Самое сильное землетрясение региона (1 на рис. 3) с $K_p=12.2$, $MPSP=4.7$, $m_b=4.4$ произошло 9 апреля в 18^h36^m в зоне Вранча на глубине $h=82$ км.

За рассматриваемый период в регионе ощущались 18 сейсмических событий. Интенсивность сотрясений в населенных пунктах составляла $I_i=2$ –6 баллов [Приложение 6, 7] по шкалам MSK-64 [20], EMS-98 [21] и MMI [22]. Наибольшие сотрясения в регионе ($I_i=6$ баллов в г. Сынту-Георге, Румыния, $I_i=5$ баллов в г. Фокшаны, Румыния) вызвало землетрясение в зоне Вранча (6 на рис. 3), произошедшее 1 сентября в 10^h32^m с $K_p=11.5$, $Mw=4.4$ на глубине $h=153$ км. Еще два землетрясения региона ощущались в 2021 г. с максимальной интенсивностью 5 баллов: 27 февраля в 21^h13^m с $K_p=9.9$, $ML_{MLD}=4.2$, $h=143$ км в зоне Вранча и Чортковское землетрясение (7 на рис. 3) 23 сентября в 03^h17^m с $K_p=11.7$, $MPSP=4.5$, $h=5$ км на территории Украины.

Таблица 1. Распределение землетрясений региона «Карпаты» по энергетическим классам K и суммарной сейсмической энергии по районам за 2021 г. по данным сводного каталога

№ р-на	Название района	Энергетический класс K									N_{Σ}	$\Sigma E, Дж$
		4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	Северо-Западный	1	5	6	55	4	1	1			23 (23)	$5.03 \cdot 10^9 (5.03 \cdot 10^9)$
2	Вранча				3	75	66	28	4	1	177 (22)	$2.52 \cdot 10^{12} (2.32 \cdot 10^{12})$
3	Южные Карпаты				2	9		2			13 (2)	$4.57 \cdot 10^{10} (4.42 \cdot 10^{10})$
4	Банат				2	3					5 (0)	$4.07 \cdot 10^8$
5	Буковина			2	2	1				1	7 (7)	$5.01 \cdot 10^{11} (5.01 \cdot 10^{11})$
6	Кришана (Румыния)					1		1			2 (0)	$4.30 \cdot 10^9$
7	Трансильвания					1					1 (1)	$26 \cdot 10^8 (1.26 \cdot 10^8)$
8	Бакэу				1	2	2		1		6 (4)	$2.54 \cdot 10^{11} (2.54 \cdot 10^{11})$
9	Вне границ							2			2	$3.01 \cdot 10^{10}$
10	Всего	1	5	8	15	99	69	34	5	2	239 (60)	$3.37 \cdot 10^{12} (3.13 \cdot 10^{12})$

Примечание. В скобках указаны, для сравнения, значения параметров N_{Σ} и ΣE , полученные с использованием только каталога ИГФ НАН У [Приложение 4].

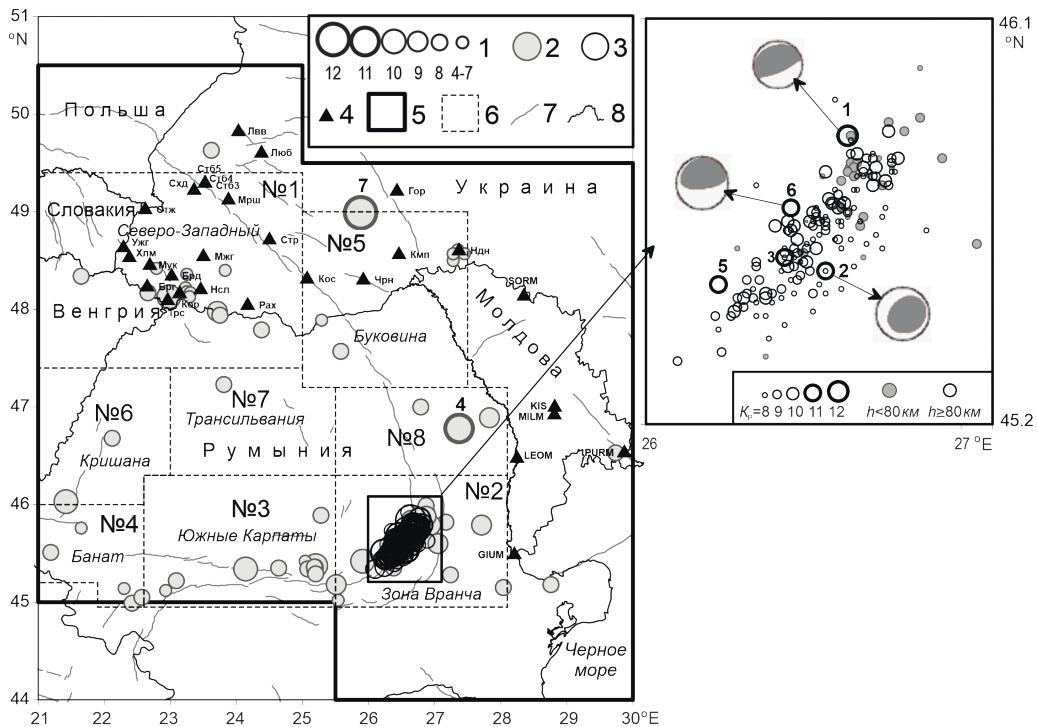


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений Карпат за 2021 г. по данным сводного каталога [Приложение 3]

1 – энергетический класс K ; 2 – эпицентры землетрясений с $h<80$ км; 3 – то же с $h>80$ км; 4 – сейсмические станции Украины (ИГФ НАН У) и Молдовы (ИГиС АН М); 5 – граница региона «Карпаты»; 6 – границы сейсмоактивных районов региона; 7 – активные разломы [23, 24]; 8 – государственные границы. Цифрами около эпицентров обозначены номера сильных землетрясений с $K \geq 10.6$ по каталогу [Приложение 3]. На врезке показаны механизмы очагов по данным агентства MED_RCMT из табл. 2.

Ниже приведен анализ сейсмической обстановки в 2021 г. в каждом из восьми районов, где произошли землетрясения.

Северо-Западный район № 1. Сейсмичность Северо-Западного района, включающего Закарпатье, Предкарпатье, Восточную Словакию, Венгрию и Мармарошский массив Северной Румынии, представлена в 2021 г. 23 событиями с $K=4.4-9.6$ с суммарной сейсмической энергией $\Sigma E=5.03 \cdot 10^9$ Дж (табл. 1), что на порядок меньше, чем в 2020 г. ($\Sigma E=4.89 \cdot 10^{10}$ Дж). Самое сильное землетрясение района произошло около г. Виноградово 27 октября в 01^h44^m с $K_{\text{расч}}=9.6$ на глубине $h=13.4$ км. Оно ощущалось всем населением города и близлежащих населенных пунктов (с какой интенсивностью – не сообщается). Некоторые люди даже испугались [17].

Район Вранча № 2 расположен в Румынии, но землетрясения этого района ощущаются на всей территории Украины и Молдовы. Здесь в 2021 г. сетью сейсмических станций Карпатского региона зарегистрировано 177 землетрясений с $K_p=8.4 \div 12.2$, из них 15 событий – поверхностные с $h=5 \div 29$ км, остальные – с промежуточными глубинами от 60 км до 158 км [Приложение 3]. Суммарная сейсмическая энергия событий зоны Вранча составляет $\Sigma E=2.52 \cdot 10^{12}$ Дж, что на порядок меньше, чем таковое значение в 2020 г. ($\Sigma E=1.07 \cdot 10^{13}$ Дж) Сейсмическими станциями зафиксировано пять сильных землетрясений с $K \geq 10.6$ (1, 2, 3, 5, 6 на рис. 3, врезка), которые произошли: (1) – 9 апреля в 18^h36^m с $K_p=12.2$, $m_b=4.4$, $h=82$ км, (2) – 25 мая в 21^h30^m с $K_p=11.3$, $h=138$ км, $m_b=4.3$, (3) – 6 июля в 11^h20^m с $K_{\text{расч}}=10.7$, $m_b=4.1$, $h=133$ км, (5) – 11 августа в 09^h31^m с $K_p=10.8$, $m_b=4.0$, $h=134$ км, (6) – 1 сентября в 10^h32^m с $K_p=11.5$, $m_b=4.3$, $h=153$ км. Все пять землетрясений ощущались населением на территории Румынии, Молдовы и Украины с разной степенью интенсивности, от 2 до 6 баллов по данным EMSC [18] и USGS [19] [Приложение 6]. Максимальные макросейсмические проявления имело землетрясение (6): $I_i=6$ баллов в г. Сынту-Георге (Румыния) на расстоянии $\Delta=56$ км, $I_i=5$ баллов в г. Фокшаны ($\Delta=57$ км) по шкале MMI [22]. Следующими по интенсивности проявлений оказались землетрясения (1) и (2), которые вызвали сотрясения с $I_i=3 \div 4$ балла в гг. Вултуру и Попешти-Леордени ($\Delta=66$ км и 133 км соответственно) [Приложение 6].

Для трех землетрясений (1, 2, 6) в агентствах MED_RCMT и GFZ получены решения механизмов очага землетрясения (табл. 2, [Приложение 8], рис. 3).

Таблица 2. Параметры механизмов очагов землетрясений зоны Вранча в 2021 г.

№	Дата день мес	Время час:мин	h , км	K_p	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Агент- ство	
					T		N		P		$NP1$			$NP2$				
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$		
1	09 04	18:36	82	12.2	70	338	1	244	20	154	65	65	91	242	26	87	MED	
2	25 05	21:30	138	11.3	77	126	0	36	13	306	36	32	90	216	58	90	MED	
6	01 09	10:32	153	11.5	58	10	14	257	28	159	81	74	104	217	21	49	GFZ	

Примечание. MED – MedNet Regional Centroid – Moment Tensors, Italy (MED_RCMT); GFZ – Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany (GeoForschungsZentrum).

Решения агентства MED_RCMT для всех трех землетрясений свидетельствуют о взбросовой/надвиговой подвижке в очаге с нодальными плоскостями северо-восточного–юго-западного простириания. Согласно решению GFZ, тип подвижки тот же, что и по данным MED_RCMT, но ориентация нодальных плоскостей противоположная – юго-восток–северо-запад.

В районе **Южные Карпаты № 3**, западнее Вранча, согласно [Приложение 3], зарегистрировано 13 поверхностных землетрясений в диапазоне глубин $h=5 \div 14$ км. Максимальное из них с $K_p=10.5$ зафиксировано 9 сентября в 08^h57^m.

В районе **Банат № 4** обработано и включено в каталог пять поверхностных землетрясений с $K_{\text{расч}}=7.0 \div 8.4$.

Район **Буковина № 5** находится в зоне повышенного сейсмического риска. Зону с северо-запада на юго-восток трассирует динамически активный диагональный Теребовлянский глубинный разлом, осложненный узлами пересечения с другими активными глубинными разломами (Тетеревским, Сущано-Пержанско-Кременецким). В зоне Теребовлянского разлома по историческим данным происходили сильные землетрясения. [25, 26]. Так, в районе г. Каменец-Подольского Хмельницкой области в июне 1721 г. было отмечено землетрясение с магнитудой $M=3.2$ на глубине $h=6$ км, с интенсивностью в эпицентре $I_0=5$ баллов. Довольно сильное для района № 5 землетрясение с $M=4.2$ и интенсивностью в эпицентре $I_0=6$ баллов произошло 20 января 1903 г. в 02^h04^m на глубине $h=6$ км в районе г. Залещики Тернопольской области [25]. Здесь же 3 января 2002 г. зафиксировано Микулинецкое землетрясение с $K_p=10.8$, $MLH=3.7$ и интенсивностью в эпицентре $I_0=6$ баллов [26]. Помимо этих трех довольно сильных для зоны Теребовлянского разлома землетрясений, в [26] упомянуто еще одно, более слабое, но хорошо ощущимое событие, которое произошло 21 декабря 1963 г. с $M=2.3$.

Очередное сильное землетрясение (7 на рис. 3) в Тернопольской области произошло 23 сентября 2021 г. в 03^h17^m с $K_p=11.7$, $m_b=4.4$, $h=5$ км вблизи узла пересечения Теребовлянского и Тетеревского разломов в районе г. Чорткова. Землетрясение, получившее название «Чортковское», ощущалось на расстояниях до 397 км, на обширной территории восьми областей (табл. 3, рис. 4). Интенсивность сотрясений в эпицентальной зоне и в г. Чорткове составила более 5 баллов. Спящие просыпались от сильного толчка, подземного гула, движений кровати и всего дома, некото-

рые люди выходили во двор. Из многих населенных пунктов поступали сведения об ощущимости землетрясения, оценить балльность которых сложно.

Сведения об интенсивности сотрясений от землетрясения в десяти пунктах Украины собраны сотрудниками ИГФ НАН У [17] и представлены в табл. 3. В этой же таблице добавлена информация о сотрясениях в 17 пунктах по данным агентств EMSC–CSEM [18] и USGS [19].

Таблица 3. Сводка оценок макросейсмической интенсивности Чортковского землетрясения 23 сентября 2021 г. с $K_p=11.7$, $h=5$ км [Приложение 6]

№	Пункт	Государство	$\phi^{\circ}\text{N}$	$\lambda^{\circ}\text{E}$	$\Delta, \text{км}$	Источник
5 баллов						
1	Чортков	Украина	49.010	25.790	7	[17]
4 балла						
2	Борщев	Украина	48.800	26.042	24	[18]
3	Залещики	Украина	48.650	25.740	39	[18]
4	Городенка	Украина	48.670	25.500	45	[18]
3–4 балла						
5	Бучач	Украина	49.064	25.381	37	
6	Теребовля	Украина	49.307	25.699	38	[18]
7	Оринин	Украина	48.761	26.393	45	[18]
8	Мельница-Подольская	Украина	48.601	26.159	48	[18]
9	Дунаевцы	Украина	48.889	26.857	72	[18]
3 балла						
10	Дружба	Украина	49.257	25.651	44	[18]
11	Тернополь	Украина	49.550	25.560	67	[19]
2–3 балла						
12	Каменец-Подольский	Украина	48.690	26.580	61	[18]
13	Черновцы	Украина	48.292	25.935	78	[17]
14	Ивано-Франковск	Украина	48.923	24.710	86	[18]
15	Хмельницкий	Украина	49.420	26.990	94	[18]
16	Калуш	Украина	49.020	24.370	110	[17]
17	Золочев	Украина	49.808	24.903	115	[17]
18	Новоднестровск	Украина	48.580	27.440	123	[17]
19	Кременец	Украина	50.096	25.726	124	[17]
2 балла						
20	Бар	Украина	49.078	27.681	132	[17]
21	Сучава	Румыния	47.652	26.255	151	[18]
22	Полонное	Украина	50.117	27.511	172	[17]
23	Ровно	Украина	50.620	26.250	183	[17]
24	Винница	Украина	49.261	28.470	191	[18]
25	Яссы	Румыния	47.170	27.590	239	[18]
26	Житомир	Украина	50.267	28.678	247	[17]
27	Требухов	Украина	50.480	30.900	397	[19]

На рис. 4 показана карта «пунктов-баллов», построенная для Чортковского землетрясения по данным табл. 3, и результат их аппроксимации изосейстами 5, 4, 3–4, 3 и 2–3 баллов. Данных недостаточно для детального исследования макросейсмического поля Чортковского землетрясения, и они не всегда надежны, особенно с сайтов, где результаты анкетных опросов осредняются

и приписываются ближайшим населенным пунктам. Поэтому и изосейсты, и макросейсмический эпицентр, определенный как центр 4-балльной изосейсты, недостаточно надежны. Однако данные позволяют определить вытянутость изосейст Чортковского землетрясения 2021 г. в северо-восточном направлении, совпадающим с простиранием Тетеревского разлома (Б на рис. 4), вкрест Теребовлянскому разлому (А на рис. 4) и вытянутости изосейст Микулинецкого землетрясения 01.03.2002 г. [26]. Отметим малую площадь сотрясений при более слабом Микулинецком землетрясении ($K_p=10.8$) по сравнению с Чортковским землетрясением с $K_p=11.7$ (рис. 4). К сожалению, механизм очага Чортковского землетрясения определить не удалось, поэтому сопоставить ориентацию нодальных плоскостей с ориентацией изосейст и выбрать действующую плоскость разрыва не представляется возможным.

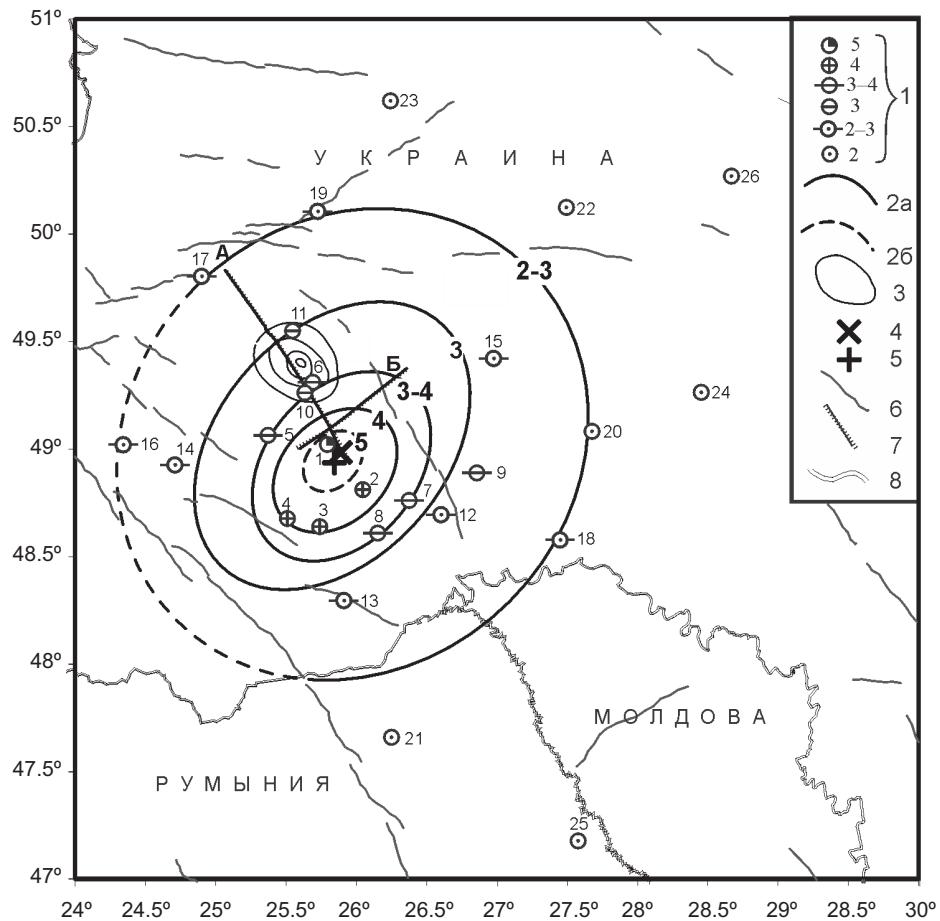


Рис. 4. Карта изосейст Чортковского землетрясения 23 сентября 2021 г. с $K_p=11.7$, $m_b=4.4$

1 – интенсивность сотрясений в баллах; 2 – изосейста Чортковского землетрясения: а – надежная, б – предполагаемая; 3 – изосейсты Микулинецкого землетрясения 01.03.2002 г. из [26]; 4, 5 – инструментальный ($\phi=25.88^\circ\text{N}$, $\lambda=48.99^\circ\text{E}$) и макросейсмический ($\phi=48.91^\circ\text{N}$, $\lambda=25.84^\circ\text{E}$) эпицентр Чортковского землетрясения; 6 – активный разлом по [23, 24]; 7 – Теребовлянский (А) и Тетеревский (Б) разломы, приведенные на рис. 22 в [26]; 8 – государственная граница.

Суммарная сейсмическая энергия событий района Буковина в 2021 г. составила $\Sigma E=5.01\cdot10^{11}$ Дж, что на порядок больше, чем значение энергии в 2020 г. ($\Sigma E=3.13\cdot10^{10}$ Дж) Помимо Чортковского землетрясения здесь зафиксировано еще шесть слабых поверхностных событий с $K_p=5.9-6.9$ и $h=2$ км [Приложение 3].

В районе **Кришана № 6** в сводный каталог вошли два поверхностных землетрясения из каталога Молдовы с $K_{расч}=9.6$ и 8.5.

Район **Трансильвания № 7** расположен в центральной части Румынии и почти полностью окружен горами (Внутренними Восточными Карпатами, Южными Карпатами и Западными Румынскими Карпатами). В этом году район представлен одним событием, зафиксированным 3 октября в $15^{\text{h}}17^{\text{m}}$ с $K_p=8.1$, $MSH=1.6$ на глубине 7 км.

В сейсмоактивном районе **Бакэу № 8**, который расположен в восточной Румынии на плато Бырлад и почти полностью окружен горами (Внутренними Восточными Карпатами, Южными

Карпатами и Западными Румынскими Карпатами), зарегистрировано шесть землетрясений с энергетическими классами $K_p=7.2-11.4$. Их суммарная сейсмическая энергия составила $\Sigma E=2.54\cdot10^{11}$ Дж. Очаги землетрясений расположены в земной коре на глубине $h=2-20$ км. Самое сильное землетрясение (4) произошло 1 августа в 17^h57^m с $K_p=11.4$, $m_b=3.8$, $h=20$ км и по данным USGS ощущалось на территории Румынии с интенсивностью до 4 баллов [Приложение 6].

Заключение. Мониторинг сейсмической активности региона «Карпаты» осуществлялся независимо силами двух организаций – ИГФ НАН Украины и ИГиС АН Молдовы. Анализ сейсмичности региона проведен на основе сводного каталога землетрясений, созданного из двух отдельных каталогов с единой оценкой энергии землетрясений.

Картина сейсмической активности региона в 2021 г. в целом не изменилась. Наиболее активным, как и в предыдущие годы, оставался район Вранча, где произошло 74% событий и была выделена основная доля сейсмической энергии – $\Sigma E=2.52\cdot10^{12}$ Дж. Здесь же отмечено 13 из 18 ощущимых событий, зафиксированных в регионе.

Выделившаяся сейсмическая энергия в Карпатском регионе в 2021 г. составила $\Sigma E=3.37\cdot10^{12}$ Дж, что ниже уровня предыдущего 2020 г. ($\Sigma E=1.11\cdot10^{13}$ Дж). Максимальное землетрясение региона зарегистрировано в горах Вранча 9 апреля с $K_p=12.2$, $m_b=4.4$ и $h=82$ км.

Наибольшие сотрясения ($I_i=6$ баллов в г. Сынту-Георге, Румыния) вызвало землетрясение 1 сентября в 10^h32^m с $K_p=11.5$, $Mw=4.4$, произошедшее в зоне Вранча на глубине $h=153$ км.

Значительное 5-балльное событие произошло 23 сентября 2021 г. с $K_p=11.7$, $m_b=4.4$, $h=5$ км в районе № 5 (Буковина, Украина). Землетрясение, получившее название «Чортковское», продолжило серию ощущимых землетрясений, приуроченных к Теребовлянскому глубинному разлому. Эпицентр землетрясения локализован вблизи места пересечения этого разлома с ортогональным ему Тетеревским глубинным разломом северо-восточного простирания. В этом же направлении вытянуты и изосейсты Чортковского землетрясения, которые удалось построить по данным о сотрясениях в 27 населенных пунктах Украины и Румынии.

В подготовке электронных приложений к данной статье принимали участие: Вербицкая О.С., Вербицкая О.Я., Гандарова Г.З., Гаранджа И.А., Герасименюк Г.А., Давыдяк О.Д., Добротвир Х.В., Карданец В.Ю., Келеман И.Н., Кикеля Л.М., Левина В.И., Лукаш Н.А., Нищименко И.М., Олийнык Г.И., Петрова Н.В., Пойгина С.Г., Прокопишин В.И., Степаненко Н.Я., Стецькив А.Т., Тону Н.А.

Электронное приложение App01_Carpathians_2021 (<http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>): 1 – Цифровые сейсмические станции сети региона Карпаты, работавшие в 2021 г.; 2 – Аналоговая и цифровые сейсмические станции сети Молдовы в 2021 г.; 3 – Сводный каталог землетрясений Карпат за 2021 год; 4 – Каталог землетрясений Карпат по данным КОМГП ИГ НАН Украины за 2021 год; 5 – Каталог землетрясений Карпат по данным Республики Молдова в 2021 году; 6 – Макросейсмический эффект ощущимых землетрясений Карпат в населенных пунктах в 2021 г.; 7 – Сведения о пунктах, для которых имеется информация о макросейсмических проявлениях ощущимых землетрясений Карпат за 2021 г.; 8 – Каталог механизмов очагов землетрясений Карпат за 2021 год.

Л и т е р а т у р а

1. Вербицкий С.Т., Пронишин Р.С., Прокопишин В.И., Стецькив А.Т., Чуба М.В., Нищименко И.М., Келеман И.Н., Герасименюк Г.А., Степаненко Н.Я. Сейсмичность Карпат в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – С. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.02> EDN: ZUVSZJ
2. Вербицкий С.Т., Пронишин Р.С., Прокопишин В.И., Стецькив А.Т., Нищименко И.М., Келеман И.Н., Герасименюк Г.А., Степаненко Н.Я., Карданец В.Ю. Сейсмичность Карпат в 2020 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.02> EDN: ATXJGJ
3. Herrmann R.B. FASTHYPO – a hypocenter location program // Earthquake notes. – 1979. – V. 50, N 2. – P. 25–37.
4. Кутас В.В., Пронишин Р.С., Руденская И.М. Использование макросейсмических данных при расчете закарпатского годографа P - и S -волн // Сейсмологический бюллетень Украины за 2002 год. – Симферополь: ИГ НАНУ, КЭС, 2004. – С. 119–126.
5. Кутас В.В., Руденская И.М., Калитова И.А. Карпатский годограф P - и S -волн и неоднородности литосферы // Геофизический журнал. – 1999. – Т. 21, № 3. – С. 45–54.
6. Jeffreys H., Bullen R. Seismological Tables. – London: British Association for the Advancement of Science, Burlington House, 1940. – 84 р.
7. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика (Труды ИФЗ АН СССР; № 32 (199)). – М.: Наука, 1964. – С. 88–93.
8. Рихтер Ч. Инструментальная шкала для магнитуд землетрясений // Слабые землетрясения. – М.: ИЛ, 1961. – С. 13–44.
9. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. – М.: Наука, 1982. – 273 с.

10. Маламуд А.С. Использование длительности колебаний для энергетической классификации землетрясений // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений, Т. II. – М.: Наука, 1974. – С. 180–192.
11. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности (Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176)). – М.: Наука, 1960. – С. 75–114.
12. Алексеев И.В. Программа определения гипоцентра землетрясения HYPOS // Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al Academiei de științe a Moldovei. – 2014. – № 2. – С. 24–28.
13. Петрова Н.В., Левина В.И. Межмагнитудные связи для создания сводного каталога землетрясений Карпатского региона // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024. – С. 65.
14. Маловичко А.А., Петрова Н.В., Левина В.И., Габсатарова И.П., Михайлова Р.С., Курова А.Д. Сейсмичность Северной Евразии в 2020 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 10–34. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.01> EDN: ARTKSQ
15. International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
16. Сейсмологический бюллетень (сеть телесейсмических станций), 2021. (2025) // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2021
17. Вербицкий С.Т., Пронишин Р.С., Прокопишин В.И., Стецкiv А.Т., Нищименко И.М., Келеман И.Н., Герасименюк Г.А. Сейсмичность Карпат в 2021 году // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – 2022. – Т. 8(74), № 4. – С. 97–162. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/seysmichnost-karpat-v-2021-godu>
18. The European-Mediterranean Seismological Centre. (2025). [Site]. – URL: https://www.emsc-csem.org/Earthquake_information/
19. United States Geological Survey. (2025). Search Earthquake Catalog // USGS [Site]. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
20. Медведев С. В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
21. Grünthal G. European macroseismic scale 1998 (EMS-98). – Potsdam, Germany: GeoForschungs Zentrum, 1998. – 101 p.
22. The Modified Mercalli Intensity Scale. Earthquake Topics // USGS [Web Site]. – URL: <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/modified-mercalli-intensity-scale>
23. База данных активных разломов Евразии. (2018). Карта активных разломов. Листы L 34, L 35, M 34, M 35. Масштаб: 1:1 000 000. [Site]. – URL: <http://neotec.ginras.ru/database.html>
24. Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., & Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. – 2022. – V. 14. – P. 4489–4503.
25. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. – 536 с.
26. Пронишин Р.С., Вербицкий С.Т., Стасюк А.Ф. Микулинецкое землетрясение 3 января 2002 года с $MLH=3.7$, $I_0=6$ (Украина) // Землетрясения Северной Евразии в 2002 году. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 300–315.

SEISMICITY of the CARPATHIANS in 2021

R.S. Pronishin¹, V.I. Levina², N.V. Petrova², N.A. Tonu³¹Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine, pronrom@gmail.com²Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Odninsk, Russia, npetrova@gsras.ru³Laboratory of Seismology of the Institute of Geology and Seismology, Moldova State University, Chisinau, Moldova, mold_ndc@yahoo.com

Abstract. Seismic observations in the Carpathian region in 2021 are described. They were carried out, as before, by two organizations from two countries: the Seismicity department of the Carpathian region of the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the Seismology laboratory of the Institute of Geology and Seismology of the Academy of Sciences of Moldova. In Ukraine, there were 23 stationary digital seismic stations with a processing center in Lviv, in Moldova – one analog and six digital stations with a processing center in Chisinau. In total, 239 earthquakes were localized in 2021. Most earthquakes were recorded in the Vrancea (177) and Northwestern (23) areas. For the first time since 2002, in the seismically active area of Bukovyna the Chortkiv earthquake of September 23, 2021 with $K_R=11.7$, m_b ISC=4.4 occurred. It was felt on the territory of Ukraine with an intensity of up to 5 points. The epicenter is localized near the intersection of Terebovlyansky and Teterevsky deep faults. The isoseisms, constructed on the basis of perceptibility in 27 settlements, are elongated in the northeast direction, like the Teterevsky fault. The maximum earthquake in the region in 2021 was registered in the Vrancea mountains on April 9 with $K_R=12.2$, m_b ISC=4.4 and $h=82$ km. The released seismic energy in the Carpathian region in 2021 amounted to $\Sigma E=3.37 \cdot 10^{12}$ J, which is lower than the level in 2020 ($\Sigma E=1.11 \cdot 10^{13}$ J).

Keywords: Carpathian region, earthquake, epicenter, source, seismic energy, energy class, magnitude, shaking intensity, seismic station, seismically active area, deep fault.

For citation: Pronishin, R.S., Levina, V.I., Petrova, N.V., & Tonu, N.A. (2025). [Seismicity of the Carpathians in 2021]. *Zemletriasenia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 32–43. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.02> EDN: YWUSFD

References

1. Verbitsky, S.T., Pronishin, R.S., Prokopishin, V.I., Stets'kiv, A.T., Chuba, M.V., Nishchimenko, I.M., Keleman, I.N., Gerasimenyuk, G.A., & Stepanenko, N.Ya. (2023). [Seismicity of the Carpathians in 2018–2019]. *Zemletriasenia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019), 39–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.02> EDN: ZUVSZJ
2. Verbitsky, S.T., Pronishin, R.S., Prokopishin, V.I., Stets'kiv, A.T., Chuba, M.V., Nishchimenko, I.M., Keleman, I.N., Stepanenko, N.Ya., & Cardanets, V.Yu. (2024). [Seismicity of the Carpathians in 2020]. *Zemletriasenia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 35–43. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.02> EDN: ATXJGJ
3. Herrmann, R.B. (1979). FASTHYPO – a hypocenter location program. *Earthquake notes*, 50(2), 25–38.
4. Kutas, V.V., Pronishin, R.S., & Rudenskaya, I.M. (2004). The use of macroseismic data in the calculation of the Transcarpathian hodograph P - and S -waves. In *Seismologicheskiy byulleten' Ukrayiny* [Seismological bulletin of Ukraine for 2002] (pp. 119–126). Simferopol, Ukraine: IGF NAS CEC Publ. (In Russ.).
5. Kutas, V.V., Rudenskaya, I.M., & Kalitova, I.A. (1999). Carpathian godograf of P - and S -waves and lithospheric heterogeneity. *Geofizicheskiy zhurnal* [Geophysical journal], 21(3), 45–54. (In Russ.).
6. Jeffreys, H., & Bullen, R. (1940). Seismological Tables. London. 84 p.
7. Rautian, T.G. (1964). [On determining the energy of earthquakes at a distance of 3000 km]. In *Eksperimental'naya seismika (Trudy IFZ AN SSSR № 32 (199))* [Experimental seismic] (pp. 88–93). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
8. Richter, C.F. (1961). *Elementarnaia seismologija* [Elementary seismology]. Moscow, Russia: IL Publ., 13–44.
9. *Instruktsiya o poriadke proizvodstva i obrabotki nabliudeni na seismicheskikh stantsiakh Edinoi sistemy seismicheskikh nabliudeni SSSR* [The instruction on order of production and processing of observations at seismic stations of the Uniform system of seismic observations of the USSR]. (1982). Moscow, Russia: Nauka Publ., 273 p. (In Russ.).
10. Malamud, A.S. (1974). [The use of the oscillation duration for the energy classification of earthquakes]. In *Magnituda i energeticheskaya klassifikaciya zemletrjasenij, T. II* [Magnitude and the energy classification of the earthquakes, V. II], (pp. 180–194). Moscow, Russia: USSR Academy of Sciences Publ. (In Russ.).
11. Rautian, T.G. (1960). [Energy of earthquakes]. In *Metody detal'nogo izuchenija seismichnosti (Trudy IFZ AN SSSR, № 9 (176))* [Methods of Detail Study of Seismicity] (pp. 75–114). Moscow, Russia: Inst. Fiz. Zemli Akad. Nauk SSSR Publ. (In Russ.).
12. Alekseev, I.V. (2024). HYPOS Earthquake Hypocenter Determination Program. Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al Academiei de științe a Moldovei, 2, 24–28.
13. Petrova, N.V. & Levina, V.I. (2024). [Intermagnitude relationships for creating a consolidated catalog of earthquakes in the Carpathian region]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Tezisy XVIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of

- seismological data. Abstracts of the XVIII International Seismological Workshop] (p. 65). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
14. Malovichko, A.A., Petrova, N.V., Levina, V.I., Gabsatarova, I.P., Mikhailova, R.S., & Kurova, A.D. (2024). [Seismicity of Northern Eurasia in 2020]. *Zemletriasenia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 10–34. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.01> EDN: ARTKSQ
 15. International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
 16. GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations, 2021. (2025). Retrieved from http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2021
 17. Verbitskiy, S.T., Pronishin, R.S., Prokopyshyn, V.I., Stets'kiv, A.T., Nishchimenko, I.M., Keleman, I.N., & Gerasimenyuk, G.A. (2022). [Seismicity of the Carpathians in 2021]. *Uchenye zapiski Tauricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Series "Geography"* [Scientific notes of the Taurida National University named after V. I. Vernadsky. Series "Geography"], 8(4), 97–162. (In Russ.). Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/seysmichnost-karpat-v-2021-godu>
 18. European Mediterranean Seismological Centre. (2025). Retrieved from https://www.emsc-csem.org/Earthquake_information/
 19. USGS. (2025). Search Earthquake Catalog. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
 20. Medvedev, S.V., Shponhoyer, V., & Karnik, V. (1965). *Mezhdunarodnaya shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 International seismic intensity scale]. Moscow, Russia: MGK Academy of Sciences USSR Publ., 11 p. (In Russ.).
 21. Grünthal, G. (1998). European macroseismic scale 1998 (EMS-98). *GeoForschungs Zentrum*, 101 p.
 22. The Modified Mercalli Intensity Scale. Earthquake Topics. USGS. (2025). Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/science/modified-mercalli-intensity-scale>
 23. *Baza dannykh aktivnyh razlomov Evrazii* [Database of active faults of Eurasia and adjacent aquatories (AFEAD)]. (2018). Map of active faults. Sheets L 34, L 35, M 34, M 35. Retrieved from <http://neotec.ginras.ru/database.htm> (In Russ.).
 24. Zelenin, E.A., Bachmanov, D.M., Garipova, S.T., Trifonov, V.G., & Kozhurin, A.I. (2022). The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data*, 14, 4489–4503.
 25. Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (1977). [New catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times through 1975]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 536 p. (In Russ.).
 26. Pronishin, R.S., Verbitsky, S.T., & Stasyuk, A.F. (2008). [Mikulynets earthquake on January 3, 2002 with $MLH=3.7$, $I_0=6$ (Ukraine)]. In *Zemletriasenia Severnoi Evrazii v 2002 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2002] (pp. 300–315). Obninsk, GS RAS Publ. (In Russ.).