

**ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ
МОЛДАВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи
У.Д.К.: 550.34 (478) (0.43.2)

**КАРДАНЕЦ
ВЛАДЛЕН ЮРЬЕВИЧ**

**МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КАРПАТСКИХ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ
МОЛДОВА КАК ОСНОВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ИСТОРИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

Специальность: 134.10 – ГЕОФИЗИКА И СЕЙСМОЛОГИЯ

Диссертационная работа на соискание учёной степени
доктора физических наук

Научный руководитель:	<i>Подпись</i>	БУРТИЕВ Рашид, доктор-хабилитат физ.-мат. наук
Научный консультант:	<i>Подпись</i>	АЛКАЗ Василе, доктор-хабилитат физ.-мат. наук, заслуженный деятель науки РМ
Автор:	<i>подпись</i>	

КИШИНЁВ 2025

**INSTITUTUL DE GEOLOGIE ȘI SEISMOLOGIE
UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA**

Cu titlu de manuscris
C.Z.U: 550.34 (478) (0.43.2)

CARDANEȚ VLADLEN

**EFFECTUL MACROSEISMIC AL CUTREMURELOR
CARPATIENE PE TERITORIUL REPUBLICII
MOLDOVA CA BAZĂ PENTRU RECUPERAREA
PARAMETRILOR CUTREMURELOR ISTORICE**

Specialitatea: 134.10 – GEOFIZICĂ ȘI SEISMOLOGIE

Teză de doctor în științe fizice

Conducătorul științific: BURTIEV Rașid,
dr. hab. în șt. fiz.-mat., conf. cerc.

Consultant științific: ALCAZ Vasile,
dr. hab. în șt. fiz.-mat., conf. cerc.,
Om Emerit al RM

Autor:

CHIȘINĂU 2025

© КАРДАНЕЦ Владлен, 2025

© CARDANET Vladlen, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИИ	6
СПИСОК ТАБЛИЦ	9
СПИСОК РИСУНКОВ	10
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	13
ВВЕДЕНИЕ	14
1. РАЗВИТИЕ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СЕЙСМИЧНОСТЬ КАРПАТСКОГО РЕГИОНА	22
1.1. Источники макросейсмических данных землетрясений Карпатского региона. Каталоги исторических землетрясений	23
1.2. Задачи макросейсмологии	27
1.3. Сбор макросейсмических данных	28
1.4. Определение интенсивности землетрясений по макросейсмической шкале. Сопоставление макросейсмических шкал	30
1.5. Карта пунктов-баллов и карта изосейст	32
1.6. Уравнение макросейсмического поля	35
1.7. Тектоническое строение Карпатского сейсмического региона	36
1.8. Коровые землетрясения	39
1.9. Подкоровые (промежуточные) землетрясения	41
1.10. Особенности промежуточных карпатских землетрясений	44
1.11. Выводы к главе 1	46
2. ТИПЫ МЕХАНИЗМА ОЧАГА ВРАНЧСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ	48
2.1. Сопоставление региональных определений механизма очага карпатских землетрясений с решениями тензора сейсмического момента	48
2.1.1. Методы исследования	48
2.1.2. Исходные данные	49
2.1.3. Результаты сопоставления решений механизма очага	50

2.2. Очаговые параметры землетрясений промежуточной глубины области Вранча	71
2.3. Особенности макросейсмического проявления карпатских землетрясений в зависимости от механизма и глубины очага	80
2.4. Влияние механизма очага подкорового землетрясения области Вранча на макросейсмический эффект	88
2.5. Выводы к главе 2	92
3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ИСТОРИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	95
3.1. Методология вычисления параметров исторических землетрясений по макросейсмическим данным	95
3.2. Факторный анализ параметров землетрясения методом главных компонент	97
3.2.1. <i>Определение оптимального числа компонентов модели</i>	101
3.2.2. <i>Построение факторной модели и интерпретация результатов</i>	104
3.2.3. <i>Критерий выбора числа факторов</i>	105
3.2.4. <i>Вычисление значений коэффициентов уравнения макросейсмического поля</i>	106
3.3. Уравнение макросейсмического поля	110
3.4. Создание карт и вычисление параметров крупнейших исторических землетрясений	112
3.5. Анализ параметров и определение типа исторических землетрясений Карпатского региона	120
3.6. Выводы к главе 3	124
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	129
БЛАГОДАРНОСТИ	139
ПРИЛОЖЕНИЯ	140
ДЕКЛАРАЦИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ	158
CURRICULUM VITAE	159

АННОТАЦИЯ

КАРДАНЕЦ Владлен, «Макросейсмический эффект карпатских землетрясений на территории Республики Молдова как основа восстановления параметров исторических землетрясений» - диссертационная работа на соискание учёной степени доктора физических наук. Кишинёв, 2025.

Структура работы: введение, 3 главы, выводы, список литературы из 127 источников, 3 приложения. Общий объём работы: 159 страниц; основная часть: 117 страниц; 74 рисунка и 24 таблицы. Результаты опубликованы в 52 научных работах.

Ключевые слова: Карпатский сейсмический регион, Вранча, макросейсмическое поле, интенсивность землетрясения, магнитуда землетрясения, механизм очага.

Цель исследования: Оценить основные параметры землетрясений и определить тип сильнейших исторических землетрясений доинструментального периода зоны Вранча Карпатского сейсмического региона, на основе дополнительных макросейсмических данных, для качественного пересмотра каталога исторических землетрясений.

Задачи исследования: собрать имеющиеся макросейсмические данные и оценить по шкале MSK-64; построить карты пунктов-баллов и карты изосейст рассматриваемых землетрясений; выполнить сравнительный анализ решений механизма очага землетрясений зоны Вранча и выделить основные типы подвижек; исследовать весомость вклада дополнительных параметров в уравнение макросейсмического поля; вычислить основные и дополнительные параметры исследуемых землетрясений; проанализировать каждое рассматриваемое историческое землетрясение и определить его тип.

Научная новизна полученных результатов: на основе собранных и обработанных макросейсмических данных создана обширная база данных по землетрясениям Карпатского региона; построены обновлённые карты изосейст исследуемых землетрясений; на основе сравнительного анализа механизма очага землетрясений выявлены три типа подвижек в очаге зоны Вранча; более точно вычислены основные и дополнительные параметры исторических землетрясений; определены тип и другие характеристики сильнейших исторических землетрясений Карпатского региона.

Решённая научная проблема: по имеющимся макросейсмическим данным восстановлены параметры и определен тип сильнейших исторических землетрясений доинструментального периода зоны Вранча Карпатского сейсмического региона.

Теоретическая значимость работы: классифицирована сейсмичность Карпатского региона по типу подвижек в очаге землетрясения; описаны методические аспекты получения и обработки макросейсмических данных, проведен анализ макросейсмических источников изучаемой территории; проведен анализ параметров механизма очага вранчских землетрясений и определены типы подвижек в очаге.

Практическая значимость работы: создана база макросейсмических данных исторических землетрясений Карпатского сейсмического региона, оценённых по шкале MSK-64; построены карты изосейст землетрясений, включающие все дополнительно найденные пункты; вычислены основные и дополнительные параметры каждого рассматриваемого землетрясения и его очага и определяется тип каждого землетрясения. Полученные параметры землетрясений для более точного каталога исторических землетрясений позволит точнее определить сейсмическую опасность территории РМ для отдельных пунктов и построить более точные карты сейсмического районирования.

Внедрение полученных результатов. Результаты были использованы в работах по сейсмическому районированию и оценке сейсмического риска территории РМ, микрорайонированию территории городов Кишинева, Кагула и Комрата; при построении модели сейсмогенной зоны Вранча в работе Гинтова и др.; а также будут использованы в дальнейших исследованиях землетрясений Карпатского региона при построении моделей сейсмичности территории Республики Молдова и сопредельных стран.

ADNOTARE

CARDANET Vladlen, „Efectul macroseismic al cutremurilor carpatice pe teritoriul Republicii Moldova ca bază pentru recuperarea parametrilor cutremurilor istorice” – teza de doctor în științe fizice. Chișinău, 2025.

Structura tezei: introducere, 3 capitole, concluzii și recomandări, lista de referințe din 127 de surse, 3 anexe. Volumul total al lucrării: 159 de pagini; partea principală: 117 pagini; 74 figuri și 24 de tabele. Rezultatele au fost publicate în 52 de lucrări științifice.

Cuvinte-cheie: Regiunea seismică Carpatică, zona Vrancea, câmp macroseismic, intensitate, magnitudine, mecanism focal, parametrii cutremurilor.

Scopul lucrării: evaluarea parametrilor principali ai cutremurilor și determinarea tipului celor mai puternice cutremure istorice din perioada pre-instrumentală a zonei Vrancea din regiunea seismică Carpatică, pe baza datelor macroseismice suplimentare, pentru o revizuire calitativă a catalogului cutremurilor istorice.

Obiectivele cercetării: colectarea datelor macroseismice disponibile și evaluarea lor pe scara MSK-64; elaborarea hărților de izoseiste ale cutremurilor luate în considerare; efectuarea analizei comparative a soluțiilor mecanismului focal de cutremure din zona Vrancea și identificarea principalelor tipurilor de mișcări; investigarea greutății contribuției parametrilor suplimentari în ecuația câmpului macroseismic; calcularea parametrilor principali și suplimentari ale cutremurilor studiate; analizarea fiecărui eveniment istoric și determinarea tipului acestuia.

Noutatea și originalitatea științifică: pe baza datelor macroseismice colectate și prelucrate, a fost creată o bază de date extinsă privind cutremurile din regiunea Carpatică; au fost elaborate hărți de izoseiste actualizate ale cutremurilor studiate; pe baza unei analize comparative a mecanismului focal de cutremur au fost identificate trei tipuri de mișcări în zona Vrancea; parametrii principali și suplimentari ai cutremurilor istorice au fost calculați mai precis; au fost determinate tipul și alte caracteristici ale celor mai puternice cutremure istorice din regiunea Carpatică.

Problema științifică soluționată: restabilirea parametrilor și determinarea tipului celor mai puternice cutremure istorice din perioada preinstrumentală a zonei Vrancea din regiunea seismică Carpatică, pentru obținerea unui catalog cu date mai precise ale cutremurilor istorice.

Semnificația teoretică: seismicitatea regiunii Carpatice este clasificată în funcție de tipul mișcărilor din focarul cutremurului; sunt descrise aspecte metodologice ale obținerii și prelucrării datelor macroseismice, se efectuează analiza surselor macroseismice ale teritoriului studiat; se efectuează analiza parametrilor mecanismului focal al cutremurilor Vrancea și se determină tipurile de mișcări în focarul.

Valoarea aplicativă: a fost creată o bază de date macroseismice ale cutremurilor istorice din regiunea seismică Carpatică, estimată pe scara MSK-64; au fost construite hărți de izoseiste ale cutremurilor, inclusiv toate punctele suplimentare găsite; au fost calculați parametrii principali și suplimentari ai fiecărui cutremur și ai focarului acestuia și a fost determinat tipul fiecărui cutremur. Parametrii obținuți asupra evenimentelor seismice cercetate pentru un catalog cu date mai precise ale cutremurilor istorice vor permite determinarea mai precisă a pericolului seismic pe teritoriului Republicii Moldova pentru punctele aparte și elaborarea unor hărți mai precise ale zonării seismice.

Implementarea rezultatelor: rezultatele au fost utilizate în lucrările de zonare seismică și evaluarea riscului seismic al teritoriului Republicii Moldova, microzonizarea teritoriului orașelor Chișinău, Cahul și Comrat; în construirea unui model al zonei seismogene a Vrancei în lucrarea lui Gintov și al., în sinteza macroseismică din zona Vrancea în Kronrod și al.; și vor fi, de asemenea, utilizate în studiile ulterioare ale cutremurilor din regiunea Carpatică în construirea modelelor de seismicitate a teritoriului Republicii Moldova și a țărilor vecine.

ANNOTATION

CARDANET Vladlen, "Macroseismic effect of Carpathian earthquakes on the territory of the Republic of Moldova as a basis for restoring the parameters of historical earthquakes." PhD thesis for the degree of Doctor of Physical Sciences. Chisinau, 2025.

Structure of the thesis: introduction, three main chapters, conclusions and recommendations, list of references from 127 sources, 3 appendices. The total volume of the work: 159 pages; main part: 117 pages; 74 images and 24 tables. The results have been published in 52 scientific papers.

Keywords: Carpathian seismic region, Vrancea zone, macroseismic field, earthquake intensity, earthquake magnitude, focal mechanism, earthquake parameters.

Purpose of the research: to evaluate the main earthquake parameters and determine the type of the strongest historical earthquakes of the pre-instrumental period of the Vrancea zone of the Carpathian seismic region, based on additional macroseismic data, for a qualitative revision of the catalog of historical earthquakes.

Research objectives: to collect the available macroseismic data and evaluate it according to MSK-64 scale; to create isoseismal maps of the earthquakes under consideration; to perform a comparative analysis of solutions of the focal mechanism of the Vrancea zone and identify the main types of movements; to investigate the weight of the contribution of additional parameters to the equation of the macroseismic field; to calculate the main and additional parameters of the studied earthquakes; to analyze each historical seismic event and determine its type.

Scientific novelty and originality: based on the collected and processed macroseismic data, an extensive database of earthquakes in the Carpathian region has been created; updated isoseismal maps of the studied earthquakes have been elaborated; based on a comparative analysis of the mechanism of the earthquake source, three types of movements in the Vrancea zone have been identified; the main and additional parameters of historical earthquakes have been more accurately calculated; the type and other characteristics of the strongest historical earthquakes in the Carpathian region have been determined.

Scientific problem solved: according to the available macroseismic data, the parameters were restored and the type of the strongest historical earthquakes of the pre-instrumental period of the Vrancea zone of the Carpathian seismic region was determined.

Theoretical significance: seismicity of the Carpathian region is classified according to the type of movements in the earthquake focus; methodological aspects of obtaining and processing macroseismic data are described, the analysis of macroseismic sources of the studied territory is carried out; the analysis of the parameters of the focal mechanism of the Vrancean earthquakes is carried out and the types of movements in the focus are determined.

Practical significance: a database of macroseismic data of historical earthquakes of the Carpathian seismic region, estimated on the MSK-64 scale, was created; earthquake isoseismal maps were elaborated, including all additional points found; the main and additional parameters of each earthquake and its focus were calculated and the type of each earthquake was determined. The obtained earthquake parameters for a more accurate catalog of historical earthquakes will make it possible to more accurately determine the seismic hazard of the RM territory and elaborate more accurate maps of seismic zoning.

Implementation of the results obtained. the results were used in works on seismic zoning and seismic risk assessment of the territory of the Republic of Moldova, micro-zoning of the territory of the cities of Chisinau, Cahul and Comrat; in creating a model of the seismogenic zone of Vrancea in the work of Gintov et al., in macroseismic data set for the strongest earthquakes of Vrancea the work of Kronrod et al.; and will also be used in further studies of earthquakes in the Carpathian region in elaborating models of seismicity of the territory of the Republic of Moldova and neighboring countries.

СПИСОК ТАБЛИЦ

Таблица 1.1. Сопоставление сейсмических шкал (Друмя и др., 2009)	31
Таблица 2.1. Основные параметры землетрясений 22 ноября 2014 г. и 23 сентября 2016 г. по данным различных агентств	81
Таблица 2.2. Параметры механизмов очагов карпатских землетрясений 2014 и 2016 гг.	86
Таблица 3.1. Описательная статистика	99
Таблица 3.2. Корреляционная матрица	100
Таблица 3.3. Объясненная совокупная дисперсия	101
Таблица 3.4. Матрица компонент	103
Таблица 3.5. Повернутая матрица компонентов	103
Таблица 3.6. Группировка признаков исходного массива данных	105
Таблица 3.7. Оценка компонентов в PCA	105
Таблица 3.8. Шкала классификации тесноты связи Чеддока	106
Таблица 3.9. Регрессионная модель интенсивности сейсмических воздействий	108
Таблица 3.10. Коэффициенты затухания для промежуточных землетрясений зоны Вранча	111
Таблица 3.11. Сильнейшие землетрясения Карпатского региона доинструментального периода	113
Таблица 3.12. Зависимость интенсивности в эпицентре от глубины очага и магнитуды подкоровых землетрясений	114
Таблица 3.13. Зависимость интенсивности в Кишинёве от глубины очага и магнитуды подкоровых землетрясений	115
Таблица 3.14. Зависимость интенсивности в эпицентре и Кишинёве от глубины очага и магнитуды коровых землетрясений 4 марта 1893 г. и 25 мая 1912 г.	116
Таблица 3.15. Основные параметры исторических землетрясений	117
Таблица 3.16. Сравнение параметров инструментальных землетрясений	117
Таблица 3.17. Сравнение параметров исторических землетрясений по данным различных каталогов	118
Таблица 3.18. Дополнительные параметры исторических землетрясений	119
Таблица A1. Параметры землетрясений области Вранча за 1977-2014 гг.	140
Таблица A2. Параметры механизма очага землетрясений области Вранча за 1977-2014 гг.	143

СПИСОК РИСУНКОВ

Рис. 1.1. Карта Карпатского региона Европы, на которой показано местоположение сейсмической области Вранча в изгибе Карпатской дуги	37
Рис. 1.2. Тектоническая схема Карпатского сейсмического региона	38
Рис. 1.3. Распределение эпицентров очагов коровых карпатских землетрясений за 1950-2014 гг. (по данным Romplus)	39
Рис. 1.4. Распределение гипоцентров очагов коровых карпатских землетрясений за 1950-2014 гг. (по данным Romplus)	40
Рис. 1.5. Распределение эпицентров очагов промежуточных землетрясений области Вранча за 1950-2019 гг. (по данным Romplus)	43
Рис. 1.6. Распределение гипоцентров очагов промежуточных землетрясений области Вранча за 1950-2019 гг. (по данным Romplus)	43
Рис. 1.7. Территория, на которой ощущаются землетрясения зоны Вранча	44
Рис. 2.1. Стереограммы механизма очага землетрясения 4 марта 1977 года в проекции нижней полусферы (зачернены области сжатия)	50
Рис. 2.2. Сравнение разных определений эпицентра и механизма землетрясений 4 марта 1977 г., 30 августа 1986 г. и 30 мая 1990 г.	51
Рис. 2.3. Землетрясение 30 августа 1986 г.	52
Рис. 2.4. Землетрясение 30 мая 1990 г.	53
Рис. 2.5. Землетрясение 31 мая 1990 г.	53
Рис. 2.6. Землетрясение 2 октября 1978 г.	54
Рис. 2.7. Землетрясение 31 мая 1979 г.	55
Рис. 2.8. Землетрясение 11 сентября 1979 г.	55
Рис. 2.9. Второе событие сейсмического дубля 1 августа 1985 г.	56
Рис. 2.10. Землетрясение 13 марта 1998 г.	56
Рис. 2.11. Землетрясение 28 апреля 1999 г.	57
Рис. 2.12. Землетрясение 6 апреля 2000 г.	57
Рис. 2.13. Землетрясение 24 мая 2001 г.	58
Рис. 2.14. Землетрясение 20 июля 2001 г.	58
Рис. 2.15. Землетрясение 30 ноября 2002 г.	59
Рис. 2.16. Землетрясение 5 октября 2003 г.	59
Рис. 2.17. Землетрясение 27 сентября 2004 г.	59
Рис. 2.18. Землетрясение 3 октября 2004 г.	60

Рис. 2.19. Землетрясение 27 октября 2004 г.	61
Рис. 2.20. Землетрясение 14 мая 2005 г.	62
Рис. 2.21. Землетрясение 18 июня 2005 г.	62
Рис. 2.22. Землетрясение 13 декабря 2005 г.	63
Рис. 2.23. Землетрясение 25 апреля 2009 г.	63
Рис. 2.24. Землетрясение 8 июня 2010 г.	64
Рис. 2.25. Землетрясение 30 сентября 2010 г.	64
Рис. 2.26. Землетрясение 1 мая 2011 г.	65
Рис. 2.27. Землетрясение 4 октября 2011 г.	65
Рис. 2.28. Землетрясение 6 июля 2012 г.	66
Рис. 2.29. Землетрясение 1 декабря 2012 г.	66
Рис. 2.30. Землетрясение 6 октября 2013 г.	67
Рис. 2.31. Землетрясение 15 октября 2013 г.	67
Рис. 2.32. Землетрясение 29 марта 2014 г.	67
Рис. 2.33. Землетрясение 10 сентября 2014 г.	68
Рис. 2.34. Землетрясение 22 ноября 2014 г.	69
Рис. 2.35. Землетрясение 7 декабря 2014 г.	69
Рис. 2.36. Распределение по глубинам очагов промежуточных землетрясений зоны Вранча за период 1940-2014 гг.	72
Рис. 2.37. Распределение по магнитудам и глубинам очагов землетрясений	73
Рис. 2.38 (а, б). Круговая диаграмма распределения азимутов простираания Stk (а) и гистограмма распределения углов падения Dp (б) нодальных плоскостей $NP1$ в очагах вранчских землетрясений	73
Рис. 2.39 (а, б). Распределения азимутов Az осей напряжения сжатия P (а) и отклонение $P1$ осей от горизонта (б)	74
Рис. 2.40 (а, б). Распределения азимутов Az осей напряжения растяжения T (а) и отклонение $P1$ осей от горизонта (б)	75
Рис. 2.41 (а, б). Распределения азимутов Az осей промежуточного напряжения B (а) и отклонение $P1$ осей от горизонта (б)	75
Рис. 2.42 (а, б). Распределения азимутов Az вектора подвижки K (а) и отклонение $P1$ от горизонта (б)	76
Рис. 2.43. Распределение по типам подвижек в очагах промежуточных землетрясений за 1940-2014 гг.	77

Рис. 2.44. Стереографические модели основных (<i>a</i> – 1-го; <i>b</i> – 2-го; <i>v</i> – 3-го) типов сейсмогенеза области Вранча по (Вольфман, Колесникова, 2014)	80
Рис. 2.45. Сравнение эпицентров землетрясений 22 ноября 2014 г. и 23 сентября 2016 г.	82
Рис. 2.46. Распределение интенсивности землетрясения 22 ноября 2014 г.	83
Рис. 2.47. Распределение интенсивности землетрясения 23 сентября 2016 г.	84
Рис. 2.48. Сравнение изосейст землетрясений 22 ноября 2014 и 23 сентября 2016 г.	85
Рис. 2.49. График спада интенсивности в направлении Кишинёва землетрясений 22 ноября 2014 г. и 23 сентября 2016 г.	85
Рис. 2.50. Стереограммы механизма очага землетрясения 22 ноября 2014 года в проекции нижней полусферы	87
Рис. 2.51. Стереограммы механизма очага землетрясения 23 сентября 2016 года в проекции нижней полусферы	87
Рис. 2.52. а - в. Макросейсмический эффект на территории Республики Молдова от вранчских очагов в зависимости от ориентации нодальных плоскостей	92
Рис. 3.1. График собственных значений	102
Рис. 3.2. Карта сейсмического районирования территории, подверженная воздействию землетрясений очага Вранча	109
Рис. 3.3. Вычисления по карте изосейст землетрясения 23 января 1838 г.	119
Рис. А1. Карта землетрясения 11 июня 1738 года	146
Рис. А2. Карта землетрясения 6 апреля 1790 года	147
Рис. А3. Карта землетрясения 26 октября 1802 года	148
Рис. А4. Карта землетрясения 26 ноября 1829 года	149
Рис. А5. Карта землетрясения 23 января 1838 года	150
Рис. А6. Карта землетрясения 17 августа 1893 года	151
Рис. А7. Карта землетрясения 10 сентября 1893 года	152
Рис. А8. Карта землетрясения 4 марта 1894 года	153
Рис. А9. Карта землетрясения 31 августа 1894 года	154
Рис. А10. Карта землетрясения 6 февраля 1904 года	155
Рис. А11. Карта землетрясения 6 октября 1908 года	156
Рис. А12. Карта землетрясения 25 мая 1912 года	157

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АНМ – Академия наук Молдовы

ВОЗ – Возможный очаг землетрясения

ГИС – Геоинформационная система

МолдГУ – Молдавский государственный университет

ПБ – пунктов-баллов (карта)

ПЦСК РАН – Постоянная центральная сейсмическая комиссия Российской академии наук

РМ – Республика Молдова

ТСМ – Тензор сейсмического момента

ЦГА МССР – Центральный государственного архив Молдавской ССР

EMSC, CSEM, MED – European-Mediterranean Seismological Centre, Strasbourg, France

EMS-98 – Европейская макросейсмическая шкала 1998

HRVD – University of Harvard, USA

INFP, ROM – Institutul National pentru Fizica Pamantului. Catalog ROMPLUS, Bucharest, Romania

ISC – International Seismological Centre, Tatchem, UK.

MOLD – Институт геологии и сейсмологии МолдГУ

MOS – Геофизическая служба Института Физики Земли РАН

MSK-64 – Шкала сейсмической интенсивности 1964

NEIC, USGS – Department of Geological Sciences at the University of Michigan, USA

PDE – Preliminary determination of Epicenters, USGS/NEIC USA.

ZUR – Institute of Geophysics, ETH, Zurich

ВВЕДЕНИЕ

Среди природных катастроф наиболее опасными являются землетрясения, ежегодно уносящие жизни десятков и сотен тысяч людей. Помимо человеческих жертв землетрясения причиняют огромные экономические убытки, повреждают инфраструктуру, приводят к нарушению экологического равновесия природной среды. Подробное исследование землетрясений позволяет нам уменьшить эти потери. Хотя текущий уровень познания землетрясений не позволяет точно определить совокупность места, времени и силы землетрясений, изучение различных аспектов приближает нас к более точной оценке сейсмичности в регионе и отдельных сейсмических событий.

Сейсмическую опасность уменьшить невозможно, можно уменьшить сейсмический риск до приемлемого уровня, снабжая инженеров–строителей, проектировщиков и других специалистов, принимающих решения, достаточной для этого информацией. Приемлемый сейсмический риск – это некоторый компромисс между уровнем сейсмической безопасности и способностью общества обеспечить её в данный момент времени (Алказ В. 2007, с. 117). Важный продукт сейсмологии – каталоги землетрясений охватывают слишком короткий, для сбора достаточного количества наблюдений над сейсмичностью, интервал времени. Период повторения крупных землетрясений составляет десятки, а иногда сотни лет, тогда как каталоги землетрясений охватывают более короткий период инструментальных наблюдений (Sandu I. 2012, 2015, с. 47). Каждый каталог представляет историю прошлой сейсмичности, и предполагается, что её характеристики в регионе сохраняются без изменений в последующие сотни лет (Новый каталог 1977, с. 5).

Сейсмичность – подверженность Земли или отдельных территорий землетрясениям. Землетрясения представляют собой отражение геологических процессов, происходящих в земных недрах, и происходят в различных по структуре и характеру развития районах Земли. Сейсмичность зависит от интенсивности тектонического процесса; от размеров блока земной коры, в котором могут накапливаться упругие напряжения; от физико-химических условий на разных глубинах; от предела прочности и предела текучести горных пород на этих глубинах и особенностей геологического строения территории (Борисов Б. 1982, с. 107).

Палеосейсмологические исследования показывают, что тектонические процессы, приводящие к возникновению очагов землетрясений, длятся миллионы лет, тогда как период инструментальных наблюдений начался только в конце XIX века (Солоненко В. 1966).

Изучение сейсмичности на различных масштабных уровнях, разработка методов оценки сейсмической опасности, исследование механизма очага землетрясения, поиск предвестников землетрясений, разработка методов их предсказания, изучение макросейсмического эффекта землетрясений, исследование внутреннего строения земной коры и мантии являются предметом систематических исследований научных коллективов специализированных институтов Японии, США, Европы, России и других стран (Sandu I. 2012).

В настоящее время уровень развития науки не позволяет предотвратить или точно спрогнозировать время, место и силу землетрясения. Самым эффективным выходом из этой трудной ситуации на данный момент является создание достоверных карт районирования сейсмической опасности, на основе которых определяются нормативы сейсмостойкого строительства. А для того чтобы оценить сейсмическую опасность какой-либо территории, необходимо собрать как можно более полную и достоверную информацию о сейсмических событиях, происходивших на этой территории с самых ранних времён и до настоящего времени (Новый каталог 1977, с. 5).

Республика Молдова расположена в зоне высокой сейсмической активности, поэтому для Молдовы является **актуальным** периодическое обновление оценок сейсмических проявлений сильнейших исторических карпатских землетрясений в нашей стране и на территории смежных государств, в связи с нахождением новых более подробных данных о проявлении сильных землетрясений Карпатского сейсмического региона.

Это необходимо для решения задач оценки сейсмической опасности, связанной с обеспечением безопасности особо ответственных объектов и сооружений в республике. Не располагая данными о прежних сильных землетрясениях, невозможно правильно определить сейсмическую опасность. Так как определение такой опасности включает периодичность сильных и катастрофических землетрясений, их максимальную силу и очаговые зоны землетрясений.

Для обеспечения безопасности проживания населения страны, для снижения возможных экономических и экологических потерь при будущих землетрясениях необходимо корректно оценить степень долговременной сейсмической опасности (Алказ В. 2007, с. 7).

Оценка в пределах Республики Молдова максимальных возможных землетрясений стала в настоящее время особенно актуальной в связи с расширяющимся гражданским строительством, а также размещением сложных в технологическом отношении и

уязвимых коммуникаций. Такая оценка была представлена в работах (Алказ В. 2007, Sandu I. 2015).

На основе собранных, уточненных и проанализированных данных о пространственном и временном проявлении землетрясений разрабатываются различные математические модели периодичности сейсмических проявлений в этом регионе. Геоинформационные технологии анализа пространственных макросейсмических данных способствуют более объективному и всестороннему проведению анализа собранных данных в сравнении с отдельно проводимыми вычислениями и предоставлению более точных результатов с меньшей погрешностью о сейсмических угрозах возможных в настоящем и будущем.

Настоящая работа по определению параметров и типа исторических землетрясений Карпатского сейсмического региона для создания более точного исторического каталога вносит вклад в решение актуальных и жизненно необходимых для страны задач по оценке сейсмической опасности территории Республики Молдова для обеспечения безопасности особо ответственных объектов и сооружений, а также для обеспечения безопасности проживания населения страны.

В работе *рассматриваются*:

- В главе 1 - сейсмичность Карпатского региона, задачи, решаемые макросейсмикой, методические аспекты получения и обработки макросейсмических данных; анализ макросейсмических источников.
- В главе 2 - проводится анализ параметров механизма очага вранчских землетрясений; факторный анализ для выявления вклада в уравнение макросейсмического поля основных параметров землетрясений и параметров механизма очага.
- В главе 3 - строятся карты пунктов-баллов и карты изосейст в ГИС-программе; подбирается наиболее подходящая для нашего региона модель макросейсмического поля, с помощью которой вычисляются основные и дополнительные параметры каждого рассматриваемого землетрясения и его очага.

Сегодня большинство параметров землетрясений определяются инструментально, но инструментальный период длится всего один век, а в Карпатском сейсмическом регионе можно более или менее уверенно его отсчитывать от землетрясений 1928-29 годов. Для составления наиболее полной картины сейсмичности региона необходимо собрать и проанализировать сведения обо всех землетрясениях, упоминаемых в различных источниках за все предыдущие века. И чтобы получить представление об

исторических землетрясениях, нужно вычислить все те параметры, которые мы получаем на основании инструментальных данных для современных землетрясений. По историческим землетрясениям у нас имеются только макросейсмические сведения, которые и являются основой определения параметров этих землетрясений.

Полученные результаты по параметрам исторических землетрясений сравниваются с достоверно известными параметрами крупнейших землетрясений инструментального периода, и на основании закономерности, выявленных для нашего региона по инструментальным землетрясениям определяется тип каждого из рассматриваемых сейсмических событий.

Связь работы с научными программами, планами и темами

Работа выполнена в лаборатории сейсмологии Института геологии и сейсмологии Молдавского государственного университета (ранее Академии Наук Молдовы) в 2013-2025 гг. Включена в рамки утвержденных правительством проектов (тем). В этот период в Институте выполнялись 4 институциональных проекта:

- 1.817.08.38. Разработка методов количественной оценки сейсмической опасности и риска в соответствии со стандартом EUROCOD 8 (сейсмостойкое строительство);
- 11.817.08.37А Разработка современных систем регистрации, хранения и управления данными в сейсмическом мониторинге территории Республики Молдова;
- 15.817.02.13А. Исследование сейсмических воздействий и движений, связанных с землетрясениями в районе Вранча, в целях повышения сейсмической безопасности Республики Молдова;
- 15.817.02.11А. Разработка методов и систем мониторинга с учетом специфических условий сейсмического района Вранча.

Кроме того, за указанный период было выполнено 2 проекта на базе экономических контрактов с Министерством строительства Республики Молдова с целью сейсмического микрорайонирования территорий городов Кишинёв и Кагул.

Цель работы:

Оценить основные параметры землетрясений и заново определить тип сильнейших исторических землетрясений доинструментального периода зоны Вранча Карпатского сейсмического региона, на основе дополнительных макросейсмических данных, для качественного пересмотра каталога исторических землетрясений.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие *задачи*:

- собрать все имеющиеся макросейсмические данные, зафиксированные в письменных источниках, по крупнейшим сейсмическим событиям исторического периода (XVIII-XX вв.), относящихся к исследуемому региону, а также за период инструментальных наблюдений;
- проверить, согласовать и оценить все собранные данные в соответствии с макросейсмической шкалой MSK-64, составить таблицы и построить карты пунктов-баллов рассматриваемых землетрясений и путём интерполяции с последующей коррекцией создать в ГИС карты изосейст землетрясений;
- выполнить сравнительный анализ решений механизма очага землетрясений зоны Вранча, полученных по методу первых вступлений Р-волн и методу тензора сейсмического момента, выделить основные типы землетрясений на основе анализа механизма очага землетрясений;
- исследовать весомость вклада дополнительных параметров, характеризующих механизм очага землетрясения, в уравнение макросейсмического поля с использованием метода главных компонент факторного анализа;
- рассчитать по коэффициентам затухания уравнения макросейсмического поля зависимость магнитуды от глубины и интенсивности в данном регионе;
- вычислить и измерить в ГИС основные и дополнительные параметры исследуемых землетрясений;
- проанализировать каждое рассматриваемое историческое землетрясение в сопоставлении с землетрясениями инструментального периода и на основе выявленных закономерностей определить его тип.

Объектом исследования являются исторические землетрясения Карпатского сейсмического региона.

Предметом исследования является определение параметров исторических землетрясений и их типа.

Теоретическая часть основывается на работах: Шебалин Н.В. 2003; Шебалин Н.В., Хромецкая Е.А. 1988; Буртиев Р.З. 2017; Друмя А.В., Степаненко Н.Я., Симонова Н.А., Алексеев И.В., Карданец В.Ю. 2009; Друмя А.В., Устинова Т.И., Шукин Ю.К. 1964; Шумила В.И. 1983; а также статьях автора, опубликованных в Бюллетене Института Геологии и Сейсмологии РМ.

Фактический материал по конкретным землетрясениям был собран из различных летописей, отчётов, каталогов, сборников и бюллетеней Молдовы, Украины, России, Румынии, Болгарии и других стран.

Основные методы, применённые в данной работе: методы сбора и обработки макросейсмических данных; методика вычисления параметров землетрясений на основе уравнения макросейсмического поля; построение карт изосейст методом интерполяции и вычисление дополнительных параметров специальным инструментарием в ГИС; методы построения механизма очага землетрясения; метод главных компонент факторного анализа для выявления вклада параметров механизма очага в уравнение макросейсмического поля. Были использованы данные, полученные методами инструментальных наблюдений. Кроме того, такие общие методы, как описательный, сравнительный, статистический и др.

Подробнее весь комплекс используемых в исследованиях методов рассматривается в соответствующей главе.

Научная новизна полученных результатов:

- на основе собранных и обработанных макросейсмических данных создана обширная база данных по землетрясениям Карпатского региона, ощущавшихся на территории Республики Молдова;
- построены дополненные новыми данными карты пунктов-баллов и карты изосейст исследуемых землетрясений на основе собранных макросейсмических данных;
- проведён сравнительный анализ решений механизма очага землетрясений, полученных двумя методами – по первым вступлениям Р-волн и по методу тензора сейсмического момента, выявлены три типа подвижек в очаге зоны Вранча;
- осуществлён факторный анализ на основе метода главных компонент параметров исследуемых землетрясений;
- на основе уравнения макросейсмического поля более точно вычислены основные параметры исторических землетрясений;
- на основе ГИС-вычислений определены дополнительные параметры исторических землетрясений;
- путём сравнения со схожими современными землетрясениями определены тип и другие характеристики сильнейших землетрясений Карпатского региона, относящихся к доинструментальному периоду.

Теоретическая ценность полученных результатов:

- классифицирована сейсмичность Карпатского региона по типу подвижек в очаге землетрясения;
- описаны методические аспекты получения и обработки макросейсмических данных в Карпатском сейсмическом регионе, проводится анализ макросейсмических источников, относящихся к рассматриваемой территории;
- проводится анализ параметров механизма очага вранчских землетрясений для определения типов подвижек в очаге;

Практическое значение полученных результатов:

- создана база макросейсмических данных исторических землетрясений Карпатского сейсмического региона, оценённых по шкале MSK-64;
- построены карты изосейст, включающие все дополнительно найденные пункты;
- на основе наиболее соответствующей для нашего региона модели макросейсмического поля вычислены основные и дополнительные параметры каждого рассматриваемого землетрясения и его очага и определяется тип каждого землетрясения.

Полученные параметры исследуемых сейсмических событий для более достоверного каталога исторических землетрясений позволит:

- точнее определить сейсмическую опасность территории Республики Молдова для отдельных пунктов и других государств Карпатского сейсмического региона;
- построить соответственно более точные карты сейсмического районирования.

Также объём собранных и обработанных данных является существенным вкладом в основу дальнейших исследований сейсмичности Карпатского региона.

Автор лично принимал участие на всех этапах работы над диссертацией в рамках Института геологии и сейсмологии МолдГУ и самостоятельно получил итоговые результаты проведенной исследовательской работы, которые были представлены в более чем 50 публикациях.

Защищаемые положения:

- собраны и обработаны по единому стандарту (MSK-64) практически все имеющиеся макросейсмические данные, зафиксированных в письменных источниках, по крупнейшим сейсмическим событиям исторического

периода (XVIII-XX вв.), относящихся к исследуемому региону, а также по землетрясениям Карпатского региона, ощущавшимся на территории Республики Молдова за период инструментальных наблюдений из всех доступных отечественных и зарубежных источников; построены карты пунктов-баллов и карты изосейст рассматриваемых землетрясений на основе собранных макросейсмических данных;

- выполнен сравнительный анализ решений механизма очага землетрясений зоны Вранча, полученный по методу первых вступлений Р-волн и методу тензора сейсмического момента, выделены основные типы землетрясений в зависимости от механизма очага землетрясения;
- рассчитана по коэффициентам затухания уравнения макросейсмического поля зависимость магнитуды от глубины и интенсивности в данном регионе; вычислены и измерены в ГИС основные и дополнительные параметры исследуемых землетрясений;
- проанализировано каждое рассматриваемое историческое землетрясение Карпатского региона в сопоставлении с землетрясениями инструментального периода и на основе выявленных закономерностей определен его тип и другие характеристики.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались: на международных конференциях докторантов в Университете АНМ (2014-2015), на международной конференции DeDuCoN-INCERCOM в Кишинёве (2016), в рамках XIV Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» в Кишинёве (2019) и в рамках Школы молодых сейсмологов в Душанбе (2019 и 2022).

Публикации: результаты работы изложены в более чем 50 публикаций специализированных изданий в стране и за рубежом.

Структура работы: аннотации, введение, 3 главы, выводы, список литературы, приложения. Общий объём работы: 160 страниц (основная часть 116 страниц, приложения 18 страниц). Включает 20 таблиц и 62 рисунка с картами и схемами в основной части, а также 2 таблицы и 12 карт в приложениях.

Ключевые слова: Карпатский сейсмический регион, зона Вранча, макросейсмическое поле, интенсивность землетрясения, магнитуда землетрясения, механизм очага землетрясения.

1. РАЗВИТИЕ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СЕЙСМИЧНОСТЬ КАРПАТСКОГО РЕГИОНА

Территория современной Республики Молдова подвержена сейсмическим воздействиям различной интенсивности от нескольких очаговых зон, в основном за пределами страны. Условно эти зоны объединяют в Карпатский сейсмический регион, в котором главную роль играет очаговая зона Вранча, перекрывающая для территории Республики Молдова степень воздействия от других очаговых зон.

На протяжении веков люди наблюдали за феноменом землетрясений и изредка фиксировали свои ощущения и последствия землетрясений. Отрывочные, но многочисленные записи о сотрясениях в Карпатском сейсмическом регионе известны с древнейших времен. Их можно найти в памятных надписях на культовых зданиях, пострадавших при землетрясениях; трудах летописцев, других писателей, путешественников; позже в работах исследователей-учёных в разных областях науки. Регулярные записи наблюдений за землетрясениями в этом регионе появились лишь в 19 веке. Также к концу 19 века относятся первые попытки сбора, систематизации и анализа сведений о сейсмических событиях, произошедших ранее, и авторы зачастую уже не являлись непосредственными очевидцами или современниками событий. Все эти наблюдения и попытки изучения феномена землетрясения можно отнести к началам макросейсмических исследований в регионе. Появились и первые карты, отображающие макросейсмическое поле землетрясения – карты изосейст (первым в мире их начал составлять Роберт Маллет, он же ввёл понятие эпицентра землетрясения) и по ним определялся макросейсмический эпицентр. Маллет составил первый каталог мировой сейсмичности, в котором по каждому землетрясению приводились: дата, местоположение, количество толчков, направление, продолжительность колебаний и их последствия. По результатам итальянской экспедиции в 1862 году он опубликовал «Великое неаполитанское землетрясение 1857 года: основные принципы сейсмологических наблюдений». Маллет также ввёл первую шкалу интенсивности землетрясений, разделив пострадавшие территории на 4 зоны (Mallet R. 1862). Одновременно в 19 веке начинает зарождаться и инструментальная сейсмология. Тогда помимо простых описательных наблюдений, даются уже количественные оценки сейсмического воздействия, задавшие новое направление в изучении землетрясений. Были сконструированы первые измерительные приборы – сейсмографы, что дало толчок количественной сейсмологии –

сейсмометрии. Определение инструментального эпицентра выявило его несоответствие с макросейсмическим (Sandu I. 2012, с. 51). В результате было введено понятие очага землетрясения – области разрыва пород с излучением упругих волн. И предложены теории механизма очага землетрясения, описывающие пространственную ориентацию подвижки разрыва и главных осей напряжения. Основные из них: модель двойного диполя, предложенная Введенской в 1956 г.; модель тензора сейсмического момента, Костровым в 1970 г. (Воронина Е. 2004).

В связи с построением различных моделей сейсмичности в целом, либо решением частных задач, встаёт вопрос каталогизации данных и комплектности данных в каталогах. Что может быть улучшено путем включения большего количества источников данных. Однако в этом случае необходимо привести к единому стандарту как сами данные, так и методы их обработки (Sandu I. 2015, с. 18).

1.1. Источники макросейсмических данных землетрясений Карпатского региона. Каталоги исторических землетрясений

Сведения о землетрясениях на территории Республики Молдова приходят к нам с очень давних времен. Первые упоминания о карпатских землетрясениях относятся к IV – V векам. Воспоминания очевидцев дошли до нас в разнообразных формах: мемуары и записки путешественников, летописи, письма, сообщения в старых газетах и журналах.

Известны летописные упоминания о землетрясениях в Киевской Руси 1091, 1107, 1122, 1170, 1196 гг. и ряда других. Однако сами описания носят часто общий характер: «Страшное разрушительное землетрясение, ужасное землетрясение».

Одно из первых хорошо задокументированных землетрясений Карпатской зоны произошло 10 мая 1230 г. Вот свидетельство Никоновской летописи об этом землетрясении. «Потряслась земля Ростовская, Суздальская и Владимирская в самую обедню, так же, как и в Киеве, и в Переславле, и в Новгороде, и по всей русской земле. Было сотрясение, и церкви каменные распались на части; в пещере, в которой был приготовлен обед для убогих, все было разбито камнями». Через несколько дней после землетрясения произошло затмение солнца, напугавшее народ. В той же летописи: «Смоленск. В лето 6738 тряслась земля, и солнце померкло».

В Юрьеве Польском был разобран Георгиевский собор при князе Святославе Всеволодовиче в 1230 г. после сильного землетрясения 3 мая. Ощущалось оно также в Чехии, дата не указана (Ешану В. и др. 1988). Это землетрясение, несомненно, было

порождено очагом Вранча, так как другие источники сильных сейсмических колебаний в центре Европы неизвестны.

В более поздние времена сведения о карпатских землетрясениях в исторических документах встречаются все чаще и чаще. Однако, только начиная с XVIII и, особенно, с XIX столетия, сведений для точного и объективного суждения о землетрясениях становится достаточно.

Для периода доинструментальных наблюдений основой послужил «Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г.» (Новый каталог 1977). Эта фундаментальная работа, в которой по старым описаниям, по тщательно собранным крупицам сведений воссозданы современные количественные характеристики давних и свежих в памяти сейсмических событий. В этом огромном и чрезвычайно важном труде можно найти сведения о месте, времени, глубине, магнитуде и интенсивности сейсмических толчков даже для старых землетрясений Карпатского региона, давностью нескольких сотен лет.

Макросейсмические данные взяты в основном из соответствующих публикаций, в некоторых случаях использовались данные из различных каталогов. Учитывая возможные сдвиги в применении макросейсмических шкал, макросейсмические данные пересматривались с единых позиций, с тем, чтобы оценки балльности по возможности соответствовали грациям шкалы MSK-1964 (Медведев С. и др. 1965) и ее модификации EMS-98 (EMS 1998). Когда для одного землетрясения были известны одна или несколько карт изосейст, все опубликованные данные рассматривались совместно. Во многих случаях были найдены дополнительные макросейсмические данные. В особенности это относится к далеким изосейстам сильных землетрясений, которые не строились авторами обследований, хотя они представляют не меньший интерес, чем изосейсты ближней зоны.

Так как карпатские землетрясения вызывают разрушения на территории многих стран Европы, данные об интенсивности сотрясений собирались специалистами многих стран, пользовавшихся разными шкалами для своих оценок. Поэтому макросейсмические оценки и карты изосейст, опубликованные разными авторами, существенно различаются.

Кроме того, среди известных сильных и умеренных землетрясений Карпат далеко не все имеют макросейсмическую характеристику, соответствующую современным требованиям и возможностям. К таким землетрясениям относятся, в частности, события 26 ноября 1829 г., 23 января 1838 г. и 6 октября 1908 года. Сведения о подобных событиях содержатся в разной степени в известных каталогах и сводках, однако специального внимания исследователей эти сейсмические события не привлекали, и они остались слабо

и не точно охарактеризованными в отношении макросейсмических проявлений, основных параметров очагов и сеймотектонических условий их возникновения.

При сборе сведений о землетрясениях, захватывающих территорию Республики Молдова, были использованы источники, которые можно разделить на три разряда: 1) непосредственные показания очевидцев, 2) описания и переработки, составленные на основании первоисточников, 3) научные статьи и монографии, посвященные вопросам геофизики и сейсмологии.

Важнейший источник сведений за предыдущие столетия имеют газетные и журнальные материалы, непосредственно описывающие со слов очевидцев события, сопровождающие землетрясения. Ряд ценных сведений получен из материалов Государственного архива Молдавской ССР (ЦГА МССР).

Географы прошлого были обязаны по мере своего продвижения в исследуемые страны письма с сообщениями в Русское географическое общество. Общество их незамедлительно публиковало. Перелистав тома «Известий географического общества», издаваемые в Петербурге, мы находим и сведения о карпатских землетрясениях.

Ко второму разряду источников следует отнести сводки сведений о землетрясениях, являющие собой материалы о них, подвергшиеся какой-либо авторской переработке. Первое место среди таких источников занимает «Каталог землетрясений Российской империи» Мушкетова и Орлова, охватывающий период до 1893 г. (Мушкетов И., Орлов А. 1893).

Профессор Новороссийского университета А. В. Клоссовский тщательно собирал и публиковал сообщения о землетрясениях на юго-западе России в Трудах метеорологической сети юго-запада России, но его деятельность охватывает только период 1893 – 1896 гг. (Клоссовский А. 1895-97). Имеются сведения о карпатских землетрясениях в сводке Защука «Бессарабская область» (Зашук А. 1862).

Бюллетень Постоянной центральной сейсмической комиссии Российской Академии наук издавался с начала XX столетия под редакцией вначале Г. В. Левицкого, а затем М. П. Никифорова (Бюллетень ПЦСК РАН 1902-1937). В Известиях Постоянной центральной сейсмической комиссии Академии наук, кроме бюллетеня, публиковались материалы об отдельных землетрясениях.

В работе Друмя, Устиновой, Щукина (Друмя А. и др. 1964) приводятся исторические сведения о землетрясениях на территории Молдовы за период 1000 – 1940

гг. Составлены таблицы с макросейсмическими данными для землетрясений 1790 – 1940 гг. и построены на их основе карты с проведенными линиями изосейст.

Румынский каталог Флоринеско сообщает сведения по землетрясениям Молдавии и Черноморского побережья (Florinesco A. 1958). Гепитес систематически печатал опросные материалы о землетрясениях в Румынии и прилежащих к Румынии странах в 1895 – 1907 гг. в ежегодниках Румынской Академии наук (Hepites S. 1890). Представляет интерес Каталог землетрясений Добруджи за 1790 – 1929 гг. составленный Попеску (Popescu G. 1938). В работе Штефанеску (Stefanescu G. 1902) приводится макросейсмическое описание сильнейших землетрясений Румынии. В монографии Атанасиу «Землетрясения на территории Румынии» (Atanasiu I. 1961) использованы также данные Флоринеско и Гепитеса. К работе прилагается хронологический список землетрясений с 1790 по 1942 год с таблицами ПБ и картами изосейст.

В книге руководителя Сейсмического сектора АН УССР Евсеева «Землетрясения Украины» и его статье «Интенсивность землетрясений Украины» автором собраны и систематизированы сведения о землетрясениях Карпатской зоны за период 1000 – 1940 гг. (Евсеев С. 1961; Евсеев С. 1969). Кроме того, послужили основой для макросейсмических исследований следующие публикации. Польский каталог Ляска, содержащий сведения по Западной Украине, доведен до 1903 г. (Laska W. 1901-1906). Венгерский каталог Ретли (Rethly A. 1952) представляет собой свод сведений о землетрясениях на территории Венгрии в границах 1918 г., т. е. с включением Закарпатья, Трансильвании, Баната и Словакии.

В Атласе карт изосейст, изданном под эгидой ЮНЕСКО, приведены карты изосейст сильнейших землетрясений Карпатского региона за 1790 – 1965 гг. (Atlas 1974).

Для пополнения и уточнения макросейсмических данных об исторических землетрясениях в Опытно-методической партии Института геофизики и геологии АН РМ был собран большой фактический материал за 1091 – 1940 гг. из архивов и библиотек и составлен макросейсмический каталог (Ешану В. и др. 1988). Много важных сведений почерпнуто из других источников.

Сведения о землетрясениях, определенных инструментально, могут быть взяты из периодических изданий: «Бюллетень западной территориальной зоны ЕССН (Крым – Карпаты)» за 1964 – 1990 гг. (Сейсмологический бюллетень 1980-95), «Сейсмологический бюллетень Украины» за 1991 – 2012 гг. (1996-2013), «Землетрясения в СССР» за 1960 – 1994 гг. (1963-2000) и «Землетрясения Северной Евразии» за 1992 – 2006 гг. (2001-2020).

Также необходимые сведения по макросейсмике можно найти в обобщенных анкетах на сайте Европейского Средиземноморского Сейсмологического Центра (EMSC), а различные параметры землетрясений на сайтах Международного Сейсмологического Центра (ISC) и Национального Института Физики Земли в Бухаресте (INFP), в их каталоге Romplus.

Обширный обзор сейсмологических исследований в исторической перспективе сделан в работе И. Санду, в которой проводится анализ подходов и методов сейсмологических исследований (детерминистский и вероятностный) в целом и применительно к Карпатскому сейсмическому региону в частности (Sandu I. 2015). Также в этой работе проведены исследования механизма очага вранчских землетрясений.

1.2. Задачи макросейсмике

Для уточнения карты сейсмического районирования территории Республики Молдова и прилегающих к ней областей соседних стран, а также для решения задач количественной оценки сейсмической опасности необходимо иметь надежные макросейсмические данные.

Исследование каждого сильного и умеренного землетрясения, когда бы оно ни произошло, имеет большое значение, как с точки зрения сейсмической истории, так и для характеристики активности очаговых областей и выяснения параметров сейсмичности. Поэтому следует максимально полно и точно характеризовать каждое из таких землетрясений не только текущих, но и прошлых, тем более в такой активной сейсмической области, как Карпатский регион, находящийся в центре Европы.

Получение детального и надежного макросейсмического материала, т. е. построение минимально искаженной картины макросейсмического поля позволяет решать на его основе ряд обратных задач макросейсмике. Решение обратных задач составляет основную сейсмологическую задачу макросейсмических наблюдений, которая не менее важна для науки, чем инженерно-экономическая задача оценки уровня повреждений зданий и сооружений. В ряде случаев решение, полученное макросейсмическими методами, может оказаться наиболее обоснованным и точным за счет привлечения большого однородного наблюдательного материала по значительной площади.

Среди многообразия проблем, решаемых методами макросейсмике, можно выделить следующие:

1. Адекватное описание и количественное определение параметров исторических и современных сейсмогенных явлений, зафиксированных неинструментальными способами.
2. Установление надёжных корреляций между инструментальными параметрами кратковременных сейсмических воздействий и параметрами остаточных явлений на поверхности и в техносфере Земли.
3. Извлечений из макросейсмических данных сведений об очагах землетрясений за всю доступную сейсмическую историю Земли.
4. Извлечение из макросейсмических данных сведений о свойствах среды, проводящих сейсмические колебания (Шебалин Н. 2003, с. 60).

Карпатские землетрясения изучены и описаны достаточно полно. Однако имеющиеся макросейсмические и инструментальные данные либо публикуются в различных источниках, либо приводятся вместе, но не сопровождаются совместным анализом. Между тем макросейсмические и инструментальные характеристики землетрясений тесно связаны между собой, и их совместный анализ позволяет выявить ошибки и неточности в исходных данных, а также характеризовать землетрясения за значительно больший период наблюдений с гораздо большей полнотой.

Сейсмические исследования внесли большой вклад в понимание природы происходящих в Карпатском регионе тектонических процессов. Однако вследствие необычайной сложности этих процессов до сих пор нет единой общепринятой концепции, которая объясняет их. Комплексные определения механизма очага карпатских землетрясений могут стать основой для выяснения новых закономерностей в физических процессах, происходящих в очагах землетрясений в регионе, и дать ценные сведения для выяснения природы происходящих в нем современных тектонических процессов.

1.3. Сбор макросейсмических данных

Макросейсмические исследования включают целый комплекс связанных между собой последовательных методов. Процесс начинается со сбора сведений о произошедшем землетрясении: наблюдения о том, в какой мере ощущалось и какие последствия имело данное землетрясение в каждом отдельном пункте, включая установление границы вдоль пунктов, где оно не проявилось на поверхности. Чем больше пунктов определено с максимальным охватом территории, тем точнее будет общая картина проявления землетрясения. Также используются инструментальные данные, полученные со станций сейсмической сети.

Для обеспечения необходимого объёма, а также необходимой точности макросейсмических наблюдений следует применять в разумном сочетании четыре основных метода макросейсмических наблюдений:

- Обследование: маршрутное обследование и изучение сохранившихся к моменту обследования прямых следов воздействия землетрясения;
- Опрос: маршрутное или гнездовое обследование с организацией направленного опроса жителей;
- Анкетирование: рассылка учреждениям и гражданам специальных опросников, сбор и систематизация ответов;
- Анализ актов: сбор страховой, дефектной, ремонтно-строительной, санитарно-медицинской, экономической и другой документации в сочетании с градуировкой применяемых в них категорий по реальным объектам.

Правильная организация макросейсмических наблюдений должна обеспечивать получение в количественной форме как генеральных характеристик макросейсмического поля, так и локальных аномалий этого поля. Получение генеральных характеристик обеспечивается:

- надёжным оконтуриванием зоны осязаемости, т.е. выявлением пунктов, где землетрясение не ощущалось, во всех азимутах от эпицентра (желательно не менее 1 пункта на 30° раствора азимутального угла эпицентра), по возможности на минимальных расстояниях от пунктов, где землетрясение ощущалось;
- надёжным выявлением эпицентральной зоны, т.е. выявлением группы компактно расположенных пунктов с максимальной балльностью примерно в центральной части зоны осязаемости;
- надёжным построением системы «дальних» изосейст (где расстояние до пунктов-баллов в разы превышает глубину очага) с балльностью $I_i < I_{\max} - 2$, где I_{\max} – максимально наблюдаемая балльность; с этой целью желательно достичь такой плотности обследования, чтобы иметь не менее одного пункта данной балльности на каждые $15^\circ - 20^\circ$ азимутального угла. Ошибка определения балльности при получении генеральных характеристик макросейсмического поля не должна превосходить ± 1 балла (Шебалин Н, Хромецкая Е. 1988, с. 18).

Для исторических землетрясений главным и зачастую единственным источником являются различные исторические документы: летописи, путевые заметки, отчёты со свидетельствами очевидцев тех времён, письма, мемуары, альманахи, газеты, а также сохранившиеся памятные надписи. Такие свидетельства часто единичны и не соответствуют выше упомянутым требованиям. И всё же, по возможности, нужно стараться соблюсти хотя бы часть критериев при изучении исторических землетрясений, чтобы дать адекватную оценку этим сейсмическим событиям.

Необходимо также упомянуть об изначальной субъективности макросейсмических данных, связанных с несовершенствами, присущими человеку. Это, прежде всего, несовершенство наших чувств (многие физические явления мы вообще не ощущаем), склонность впадать в иллюзию (даже слабое сотрясение может вызвать панику), склонность совершать ошибки (один пункт можно перепутать с другим) и склонность обманывать (намеренное искажение фактов). В итоге, основываясь на искажённых данных, мы делаем неверные выводы. Именно поэтому важно очень тщательно подходить к обработке макросейсмических данных, соблюдая научность в подходах и применении методики, чтобы результаты не могли вызвать ненужную критику, как по отдельному событию, так и по методологии в целом, что гораздо важнее (Карданец В. 2015, с. 41).

1.4. Определение интенсивности землетрясений по макросейсмической шкале.

Сопоставление макросейсмических шкал

До недавнего времени в большинстве стран Европы в качестве стандарта для оценки макросейсмической балльности сейсмических воздействий была принята шкала MSK-64 (Медведев С. и др. 1965). Эта шкала, названная по имени её авторов: Медведев, Шпонхойер, Карник, в 1964 году была рекомендована и широко использовалась в течение почти 30 лет в странах Европы в её основной форме, а также её модификации MMSK-86.

В 1992 году на XXIII Генеральной Ассамблее Европейской Сейсмологической Комиссии в Праге была представлена Европейская Макросейсмическая Шкала (EMS), которая была разработана на основе шкалы MSK-64 с учетом всех прежних достижений в этой области, и был предложен для ее использования трехлетний испытательный срок (EMS 1998). Следует отметить, что основные принципы новой шкалы не изменились по сравнению с прежней шкалой, главным образом, были введены методы, предусматривающие автоматизацию в оценке макросейсмических данных, а также уточнены определения эффекта землетрясения. После 3-х-летнего тестирования и

дальнейшего развития шкалу EMS в 1998 году было предложено принять в Европе для будущих макросейсмических исследований как шкалу EMS-98.

Ранее в европейских странах пользовались ещё 12-балльной шкалой Меркалли-Канкани-Зибера, которая была принята Международной ассоциацией сейсмологии и физики недр Земли в 1917 г. В США применяется 12-балльная модифицированная шкала Меркалли.

Невозможно идеально преобразовать оценку интенсивности землетрясения в одной шкале в оценку интенсивности в другой шкале, хотя такие таблицы существуют. В таблице 1.1 представлено сопоставление шкал, использованных в разное время для обработки макросейсмической информации землетрясений Карпатского региона.

Таблица 1.1. Сопоставление сейсмических шкал (Друмя А. и др. 2009, с. 18)

Шкала MSK-64	Шкала Росси-Форреля 1873 г.	Европейская шкала (Меркалли-Канкани-Зибера) 1917 г.	Американская модифицированная шкала (MM) 1931 г.	Шкала MMSK-86	Шкала EMS-98
I	I	I	I	I	I
II	II	II	II	II	II
III	III	III	III	III	III
IV	IV	IV	IV	IV	IV
V	V – VI	V	V	V	V
VI	VII	VI	VI	VI	VI
VII	VIII	VII	VII	VII	VII
VIII	IX	VIII	VIII	VIII	VIII
IX	X	IX	IX	IX	IX
X	X	X	X	X	X
XI	X	XI	XI	XI	XI
XII	X	XII	XII	XII	XII

Опыт показывает, что сравнение различных шкал интенсивности далеки от прямой связи, так как оценки часто зависят больше от исследователя. Определение интенсивности по одной шкале разными исследователями может отличаться, в некоторых случаях, больше, чем оценки, данные по разным шкалам. В любом случае лучше сразу приводить интенсивность к одной, принятой в исследовании, шкале.

Оценка балльности должна выполняться отдельно для каждого типа и вида объектов (ландшафт, здания типов А1, А2, Б и т.д., люди, предметы обихода).

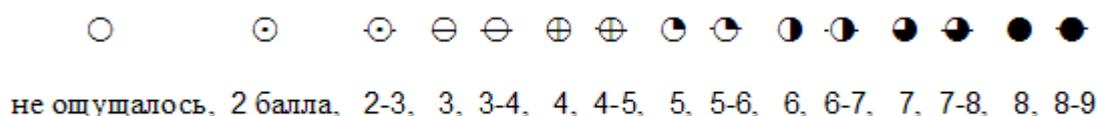
Окончательная оценка принимается исследователем в зависимости от полноты и надёжности того или иного вида данных. Во всех случаях оценки балльности должно быть известно и указано число объектов, по которым выполнена оценка балльности. Эти цифры должны указываться в результирующих таблицах, в примечаниях к каталогу и при каждом первом упоминании о балльности в данном населённом пункте. При отсутствии таких сведений считается, что балльность оценена по единичному наблюдению.

В случаях, когда в пределах одного населённого пункта имеются два или более участков с существенно различными грунтовыми или ландшафтными условиями, необходимо проводить отдельные оценки по участкам (Шебалин Н, Хромецкая Е. 1988).

1.5. Карта пунктов-баллов и карта изосейст

В результате макросейсмических оценок интенсивности (балльности) мы получаем сведения о распределении ее величины на земной поверхности. Нанеся пункты на карту с обозначением балльности, мы получаем так называемую карту «пунктов-баллов» (карта ПБ), которая является точечным представлением макросейсмического поля. На картах ПБ должны быть также нанесены пункты, из которых получены сведения о том, что землетрясение не ощущалось (конечно, на ближней территории зоны ощущаемости). Большое число точек с известной балльностью позволяет перейти от точечного к непрерывному изображению поля интенсивности – карте изосейст.

Для всех карт приняты стандартные условные обозначения с точностью до ½ балла:



✱ - эпицентр землетрясения

Возможно применение другой легенды, в которой указывается также и точность оценки балльности (или число использованных объектов).

Нагрузка карты ПБ должна быть минимальной, содержать лишь основные населённые пункты, реки, границы крупных водоёмов и государственные границы. Допускается нанесение пунктов макросейсмических наблюдений без подписывания названий населённых пунктов, в районе которых выполнены эти наблюдения. При соблюдении указанных условий масштаб карты ПБ может быть увеличен до необходимой разрешающей способности. При резком различии плотности пунктов наблюдений в

эпицентральной зоне и на периферии к карте следует давать врезки эпицентральной зоны (с выполнением указанных условий).

Карта ПБ является основным архивным макросейсмическим документом. В случае, если её авторы расходятся в оценке балльности в отдельных пунктах, на карте ставится знак "спорная балльность", а в подписи указываются варианты оценок.

Карта ПБ является неизменяемой основой различных вариантов карт изосейст. Если (например, при изучении исторических землетрясений) удаётся получить новые данные, ведущие к пересмотру или добавлению балльности в отдельных пунктах, публикация новой карты ПБ должна сопровождаться ссылками на все известные другие карты ПБ этого землетрясения и мотивировкой изменения или добавления оценок балльности.

На основе карты ПБ могут быть построены карты изосейст различных типов, в зависимости от задачи интерпретации наблюдательного макросейсмического материала. При этом не допускается изменение первичной карты ПБ: добавление или снятие отдельных пунктов, изменение оценки балльности и т.п. При решении задач оценки сейсмической опасности бывает целесообразно использовать и те, и другие карты. На картах изосейст во всех случаях (кроме карт специального назначения) должны наноситься исходные данные карты ПБ в том же объёме и с той же легендой.

Различные карты изосейст отличаются, в основном, уровнем обобщения, а также уровнем разрешённости (через 1 или через $\frac{1}{2}$ балла). Для решения задачи оценки параметров очага, как правило, строятся карты с более высокой степенью генерализации (обобщения); для решения задач оценки свойств среды – менее обобщённые карты.

Помимо различий в использовании карт изосейст с различной степенью обобщения существует и принципиальное различие в технике построения изосейст разного уровня генерализации. Оно состоит в том, что гораздо легче сформулировать и использовать строгие правила для построения более глубоко обобщённой системы изосейст, чем для построения более детальных изосейст. На каждом конкретном участке проведения части изосейсты в случае обобщения её можно представить частью кривой первого, второго, в крайнем случае, третьего-четвёртого порядка. Если отрезок изосейсты включает два, три, четыре пункта карты ПБ, эту задачу можно решить строго, причём единственным образом. Проведение более сложных кривых всегда будет в той или иной степени произвольным, и оговорить условия этого произвола практически очень сложно. Можно утверждать, что к построению изосейст в полной мере относится известное правило аппроксимации группы точек некоторой кривой: самое простое решение является самым

предпочтительным. Чем проще форма изосейсты, тем меньше пунктов нужно для её построения.

В реальных случаях точность пунктов на карте ПБ заметно уменьшается от центра к периферии. Поэтому на практике изосейсты сложной формы, отклоняющейся от круговой или эллиптической, можно надёжно строить лишь в ближней зоне, где расстояние от пункта определённой балльностью до эпицентра соизмеримо с глубиной очага (Джанузаков К. 2013, с. 13). Периферийные изосейсты, отличающиеся, как правило, значительно меньшей информационной обеспеченностью, должны иметь более простую форму.

Макросейсмические данные используются для определения следующих (в порядке приоритета) параметров очага: для текущих землетрясений – глубины, положения эпицентра, ориентации, размеров, магнитуды, сейсмического момента; для исторических землетрясений – положения эпицентра, магнитуды, глубины, а также (если возможно) ориентации, размеров, сейсмического момента.

Для построения внутренне согласованных систем изосейст по карте ПБ можно рекомендовать следующую систему правил:

1. Построение карты изосейст начинается с примерного определения положения макросейсмического эпицентра, затем приближённо оконтуривается зона осязаемости землетрясения, затем строятся индивидуальные изосейсты (лучше от более низких баллов к более высоким); особенно тщательно строятся изосейсты локальных эффектов в эпицентральной зоне.

2. Каждая индивидуальная изосейста строится с соблюдением следующих требований: ищется наиболее простая, чаще всего овальная или эллипсоидная форма изосейсты с минимальной кривизной и, по возможности, без участков отрицательной кривизны; число пунктов с низшей балльностью в пределах изосейсты должно быть примерно равно числу пунктов с балльностью данной изосейсты, оказавшихся за её пределами; при необходимости проведения участков с отрицательной кривизной (а также зон инверсий балльности), указанные отклонения от простой формы изосейст должны быть обоснованы особенно надёжными фактическими данными, во всяком случае, с несколькими (не менее 3) пунктами для каждого такого отклонения.

3. В совокупности своей индивидуальные изосейсты должны быть согласованы между собой как локально, так и в целом. Локальное согласование заключается в требовании, чтобы последовательные изосейсты в данном азимуте не были ни слишком сближенными, ни слишком удалёнными. На практике крайне редко встречаются случаи,

когда локальные значения коэффициента затухания интенсивности бывают менее 2,0 или более 10,0 – каждая такая ситуация требует обоснования фактическим материалом.

4. Согласование системы изосейст в целом заключается в двух требованиях. Первое состоит в том, чтобы площади (или средние радиусы) последовательных изосейст находились между собой в определённых отношениях, отвечающих уравнению макросейсмического поля. В частности, до расстояний 200-300 км площади (средние радиусы) изосейст (кроме изосейст ближней зоны) должны возрастать примерно в геометрической прогрессии, после 500 км – примерно в арифметической прогрессии.

Второе требование состоит в том, чтобы каждая внешняя изосейста по возможности наследовала форму ближайшей внутренней; нарушение этого правила (например, переориентация больших осей изосейст) должно быть по возможности плавным и надёжно обоснованным фактическим материалом на право не обобщения изосейсты, а право на её отклонение от простой формы с минимальной кривизной (Шебалин Н, Хромецкая Е. 1988, с. 20).

1.6. Уравнение макросейсмического поля

Уравнение макросейсмического поля основано на предположении равномерного изменения физических свойств среды и, соответственно, равномерности распространения сейсмической энергии в пространстве. При таком раскладе форма изосейст зависела бы от геометрии очага в ближней зоне, и близкой к окружности в дальней зоне. Однако, в реальности, линии равной интенсивности расходятся от эпицентра в виде эллипсов или изогнутых линий произвольной формы.

На форму изолиний влияют как общие факторы: геометрия очага; скорости волн сдвига; так и региональные: особенности геологического строения и физические свойства среды; тип грунтов и толщина грунтового слоя; уровень грунтовых вод; разница в скоростях прохождения волн в породах и т.д. Для учета влияния перечисленных факторов на интенсивность сейсмических воздействий, и повышения качества карт сейсмической опасности, необходимо построить более сложные модели затухания интенсивности сейсмического воздействия (Раутиан Т. 1982; Ризниченко Ю. 1974; Шебалин Н. 1961, 1997).

Анализ макросейсмических и инструментальных данных землетрясений промежуточной глубины очага Вранча выявил особенности распространения воздействия землетрясений: влияние землетрясений на большие площади с преобладающей ориентацией СВ-ЮЗ; зависимость, в большей степени, амплитуды сейсмических

смещений грунта от местных и региональных геологических условий, чем от магнитуды и расстояния до очага; большая изменчивость параметров сильных движений грунта; отражение изолиниями топографии земной поверхности (Ismail-Zadeh A. et al. 2007, p.12).

В ближней зоне, где $r \sim h$ (r – эпицентрально расстояние, h – глубина очага землетрясения), геометрия очага землетрясений имеет определяющее влияние на конфигурацию макросейсмического поля (Шебалин Н. 1961; Сейсмическое районирование 1980, с. 7).

Существует множество вариантов функции затухания, собранных и проанализированных в работе Р.З. Буртиева (2017, с. 195). Так как при анализе сейсмической опасности и построении карт сейсмического районирования территории Республики Молдова использовались разные функции затухания, которые дали неадекватные значения интенсивности в баллах, автором предложены обобщающие значения коэффициентов затухания интенсивности сейсмических воздействий, на основе функции затухания Н.В. Шебалина (Друмя А., Шебалин Н. 1985, с. 95).

1.7. Тектоническое строение Карпатского сейсмического региона

На Земле насчитывается несколько десятков относительно обособленных сейсмических зон, каждая из которых обладает своими характерными чертами. Территория Республики Молдова входит в состав Карпатской сейсмической зоны, которая является отдельной активной зоной альпийского орогенного пояса внутри Европейского сеймотектонического региона, связанного с взаимодействием Евразийской и Африканской литосферных плит и представляет собой сегмент Альпийско-Гималайского сейсмического пояса.

Карпатским регионом в данной работе условно принята территория, заключенная в пределах 43° – 49° северной широты и 22° – 31° восточной долготы, на которой расположены большая часть Румынии, Молдова и юго-западная часть Украины. Карпатский регион – одна из опаснейших с сейсмической точки зрения областей Европы.

На рис. 1.1 представлена карта Карпатского сейсмического региона Европы, на которой показано местоположение сейсмической области Вранча в изгибе Карпатской дуги, в месте сочленения Восточных и Южных Карпат. Из карты видно, что граница территории Республики Молдова по реке Прут отстоит на минимальном расстоянии порядка 120-130 км от области Вранча. Кишинёв находится на эпицентральной расстоянии в 210-240 км в зависимости от положения эпицентра. Столица Румынии Бухарест находится в более опасной близости от очаговой области Вранча.



Рис. 1.1. Карта Карпатского региона Европы, на которой показано местоположение сейсмической области Вранча в изгибе Карпатской дуги

В геологическом отношении регион построен весьма сложно: здесь известны тектонические структуры различного возраста – от древнейших образований в пределах фундамента до сооружений альпийского орогена. Современные тектонические процессы протекают довольно активно, и высокая сейсмичность является одним из их ярких проявлений.

Для выделения зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) были составлены карты историко-тектонического районирования территории, карта новейших движений, карта современных движений.

Карта историко-тектонического районирования содержит сведения о степени, подвижности, особенностях геотектонического развития и о глубинных разрывных нарушениях.

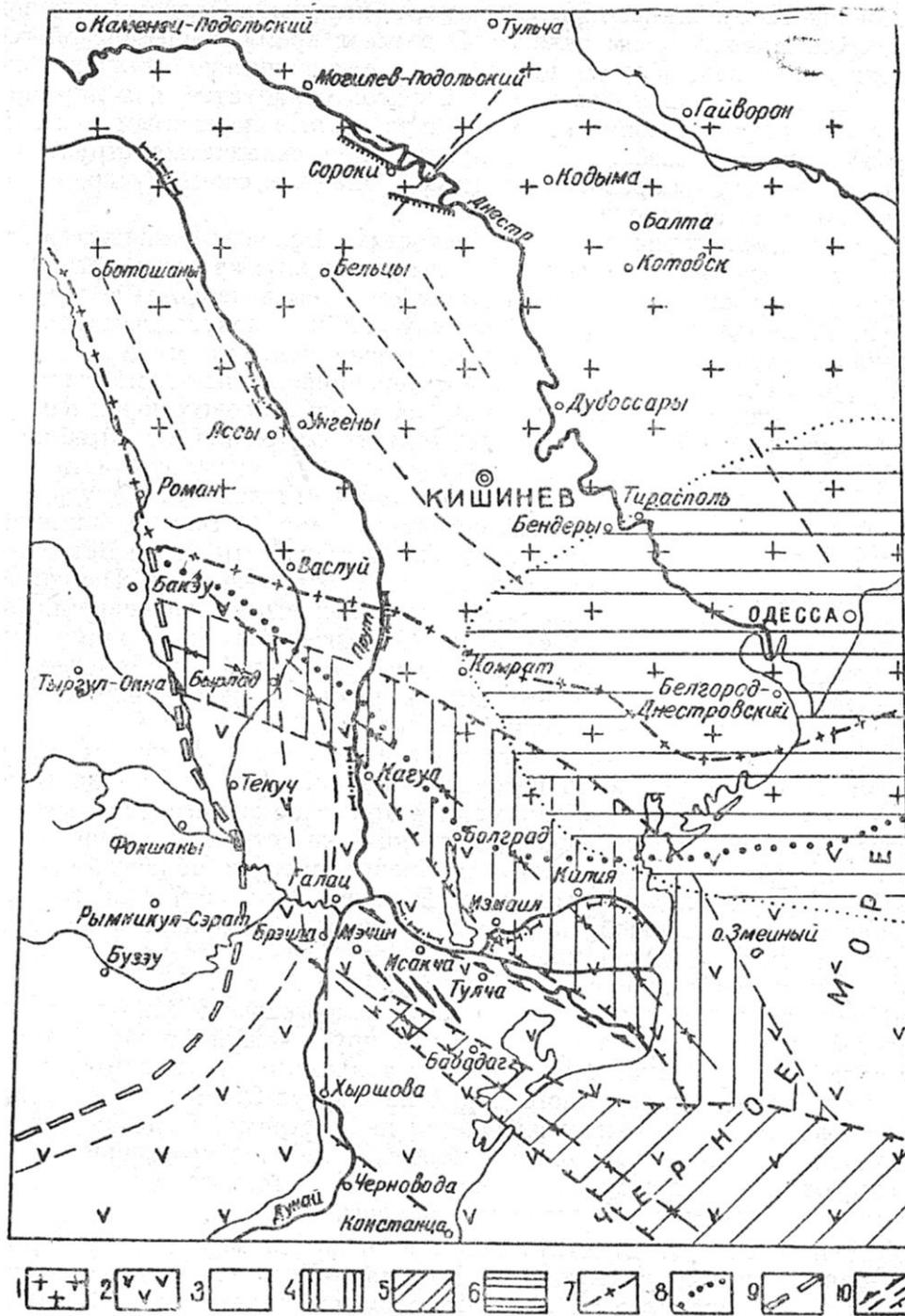


Рис. 1.2. Тектоническая схема Карпатского сейсмического региона
(Друмя А. и др. 1964, с. 12)

- 1 – область докембрийской (Русской) платформы; 2 – область эпигерцинской платформы; 3 – альпийская геосинклиналь Восточных Карпат; 4 – Предбруджская (юрская) впадина; 5 – Бабадагская грабен-синклиналь; 6 – Причерноморская впадина; 7 – граница докембрийской плиты; 8 – зона сочленения докембрийской и эпигерцинской платформ; 9 – граница глубокой части Предкарпатского краевого прогиба; 10 – тектонические нарушения

По возрасту складчатого фундамента здесь выделяются три основные области:

1. докембрийская (Русская) платформа;
2. эпигерцинская (Скифская) платформа (Добруджский кряж и его опущенная часть);
3. альпийская геосинклиналь (Восточные Карпаты и Предкарпатье).

Внутри этих областей выделяется ряд более мелких структур (2-го и 3-го порядка): склон Украинского кристаллического массива; Молдавская плита; опущенная часть докембрийской платформы; Добруджский массив; эпигерцинская плита; антиклиналь района о-ва Змеиногорского; Юрская (Преддобруджская) впадина; Бабадагская синклиналь; Причерноморская впадина; Предкарпатский передовой прогиб и некоторые другие (рис. 1.2) (Друмя А. и др. 1964, с. 5).

1.8. Коровые землетрясения

Неглубокие очаги слабых землетрясений рассеяны по всей территории Карпатского региона (рис. 1.3), включая Республику Молдова. Их глубина не превышает мощность земной коры: от поверхности до 50-60 км (рис. 1.4), у самых сильных из них магнитуда не превышает $M=5,7$, а энергия – не более $5 \cdot 10^{11-12}$ Дж. (Друмя А., Степаненко Н. 2006, с. 32).

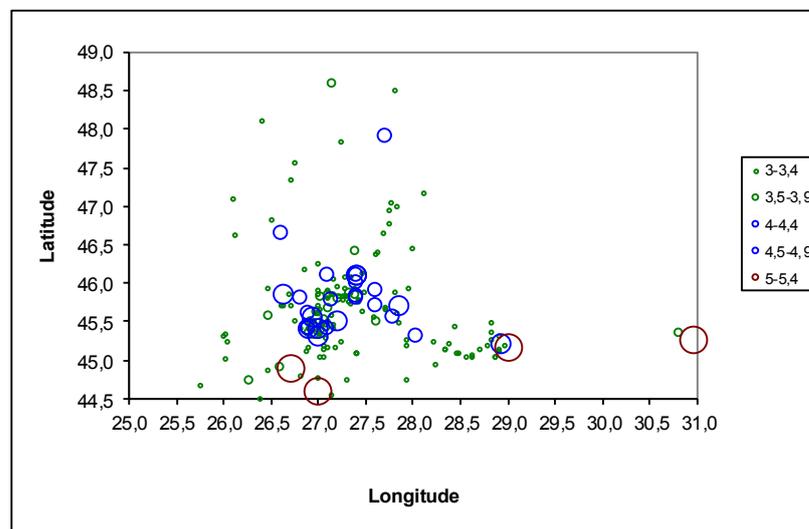


Рис. 1.3. Распределение эпицентров очагов коровых карпатских землетрясений за 1950-2014 гг. (по данным Romplus)

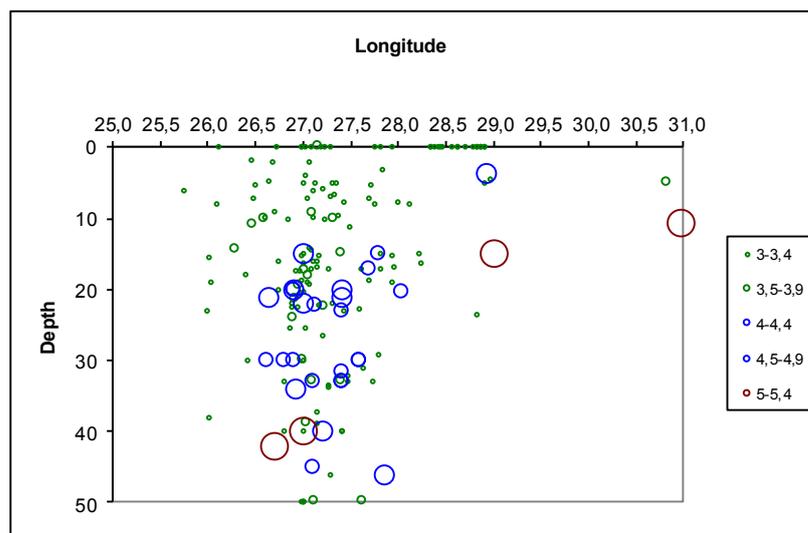


Рис. 1.4. Распределение гипоцентров очагов коровых карпатских землетрясений за 1950-2014 гг. (по данным Romplus)

Очагами таких землетрясений изобилуют зоны Придунайских разломов и междуречье Прут – Сирет. Местные очаги могут вызывать локальные макросейсмические эффекты до 7 баллов (Друмя А., Степаненко Н. 2006, с. 32).

По своей приуроченности к тектоническим элементам коровые землетрясения делятся на три основные группы. Очаги первой группы приурочены к нарушениям в фундаменте Восточно-Европейской (докембрийской) платформы, второй группы – к разломам в герцинско-кimmerийском фундаменте Северной Добруджи и ее обрамлении, третьей – к разломам в альпийском сооружении (Друмя А. и др. 1964, с. 18).

Тектонический механизм коровых очагов связан с относительно медленными, малоамплитудными движениями земной коры, а их малая энергия соответствует замедленному действию геологических процессов платформенных областей. Незначительная глубина очагов в сочетании с небольшой энергией обуславливает сравнительно малую площадь ощущаемых сотрясений. Такие высокочастотные и короткопериодные коровые очаги возникают чаще, чем глубокие. Объекты, рассчитанные на низкочастотные и длиннопериодные землетрясения области Вранча, могут быть менее устойчивыми по отношению к локальным высокочастотным коровым толчкам, даже с относительно небольшой магнитудой. Поэтому необходима детализация динамических характеристик ожидаемых воздействий от различных типов землетрясений на сооружения (Степаненко Н. и др. 2011, с. 31).

За инструментальный период наибольший макросейсмический эффект на территории Республики Молдова от коровых землетрясений не превышал 5 баллов. Наиболее сильное из них произошло 22 ноября 2014 г. восточнее массива Вранча. Интенсивность в эпицентре составляла 6-7 баллов, в Кишиневе – 4 балла. 13 ноября 1981 г. в районе румынского города Тулча произошло схожее по силе землетрясение, приуроченное к разлому Сфынтул-Георге. Сюда же к нижнему течению Дуная относится и землетрясение 3 октября 2004 г. Но оно было несколько слабее. Глубина очагов порядка 8-10 км. Ощущалось в Молдове коровое событие 7 мая 2008 г. с эпицентром вблизи острова Змеиный.

Впервые за время инструментальных наблюдений 2 апреля 1988 г. зарегистрировано коровое землетрясение на севере Республики Молдова с эпицентром вблизи водохранилища Костешты-Стынка (с. Зайканы), интенсивностью до 5 баллов (Степаненко и др. 2011, с. 32).

1.9. Подкоровые (промежуточные) землетрясения

Главнейшей и опаснейшей особенностью сейсмичности Карпатского региона является его подкоровая сейсмичность в области Вранча, расположенной на участке сочленения Восточных и Южных Карпат. Область Вранча представляет собой зону контрастных движений, которая возникла на границе поднимающейся системы горных сооружений Карпат и опускающегося Предкарпатского краевого прогиба, на участке сочленения Восточных и Южных Карпат. Карпатская складчатая дуга резко изменяет здесь свое простирание с северо-западного на широтное. Одновременно изменяется геологическое строение: преимущественно флишевые Восточные Карпаты переходят в Южные с преобладающим развитием кристаллических комплексов и редуцированным флишем (Друмя А. и др. 1964, с. 10). Именно к участку сочленения этих двух сегментов Карпат приурочены все сильные землетрясения региона, вносящие основной вклад в сейсмическую опасность территории Республики Молдовы.

Наибольшее количество очагов сильных землетрясений и максимум генерации сейсмической энергии в зоне Вранча приурочены к нижней части литосферы (100 – 200 км), расположенной непосредственно над астеносферой. Это указывает на то, что именно там происходят основные подвижки и, по-видимому, выделение материала, устремляющегося затем вверх, – так называемого «тела» Вранчи (Чекунов А. 1987, с. 4).

Согласно исследованию, в интервале глубин 60 – 180 км фиксируется поле напряжений, характерное для зон нагнетания материала с выжиманием его вверх (Щукин

Ю., Добрев Т. 1980, с. 7). Можно предположить, учитывая значения параметров скорости и плотности, что аномальное «тело», имеющее «корни» под Вранчей, образовано дериватами мантийного вещества, главным образом, очевидно, базальтоидами.

Сейсмоактивный район Вранча является структурой весьма необычной. В континентальной части Альпийско-Гималайского сейсмического пояса Евразии он напоминает лишь Памиро-Гиндукушскую зону промежуточных землетрясений, размеры которой, однако, гораздо больше. Подобно Вранче высокая концентрация очагов внутри континента и устойчивая повторяемость сильных толчков существует еще в одной точке нашей планеты. Это область Букараманга, расположенная на границе Колумбии и Венесуэлы. Территориально наиболее близкими к району Вранча областями подкорковых очагов являются Критская островная дуга с Геленским желобом океанического типа в Эгейском море и район Сицилии в Тирренском море. Эти структуры, в отличие от Вранчи, линейно вытянуты, расположены на контакте океанической и континентальной литосферы и сопровождаются зонами Беньофа (Друмя А. и др. 2009, с. 12).

Эпицентры вранчских очагов сосредоточены в пределах небольшой площади, менее одного географического градуса ($1 \times 1^\circ$, 60×80 км), характеризуются чуть ли не самой высокой концентрацией на всем земном шаре, и расположены на стыке складчатых сооружений Восточных и Южных Карпат с Предкарпатским прогибом. Эпицентральная область ограничена меридианами $26^\circ - 27^\circ$ в.д. и параллелями $45^\circ - 46^\circ$ с.ш. (рис. 1.5) и совпадает по географическому положению с горным массивом Вранча. По глубине очаги прослеживаются от 60 до 180 км в мантии, причем к востоку и юго-востоку глубина очагов уменьшается. Подкорковые очаги Вранча образуют фокальную зону, круто погружающуюся на северо-запад под Карпаты (рис. 1.6). Землетрясения обусловлены преимущественно близгоризонтальными сжимающими напряжениями, ориентированными с северо-запада на юго-восток вкrest простирания Карпатской дуги.

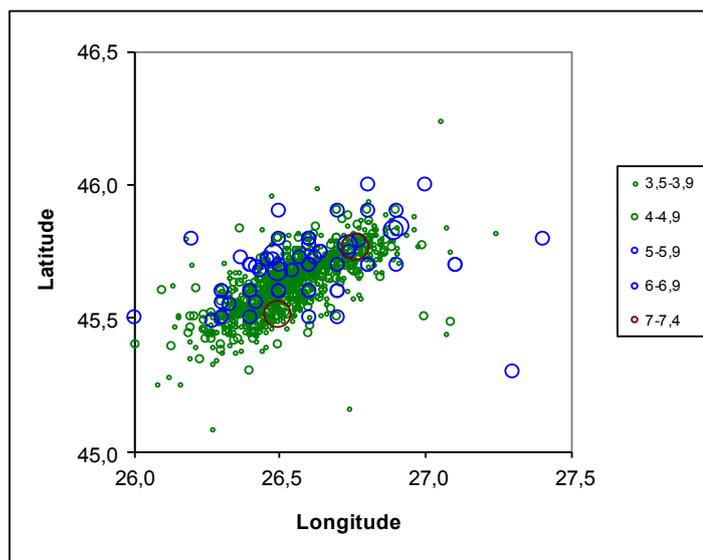


Рис. 1.5. Распределение эпицентров очагов промежуточных землетрясений области Вранча за 1950-2019 гг. (по данным Romplus)

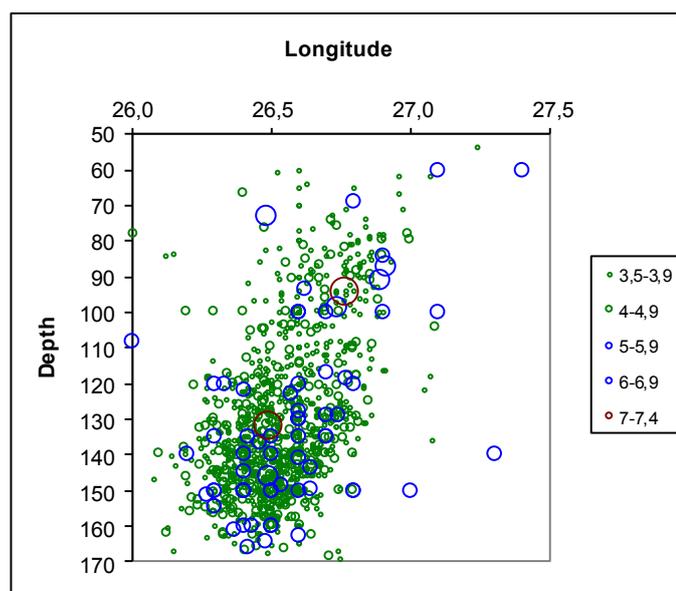


Рис. 1.6. Распределение гипоцентров очагов промежуточных землетрясений области Вранча за 1950-2019 гг. (по данным Romplus)

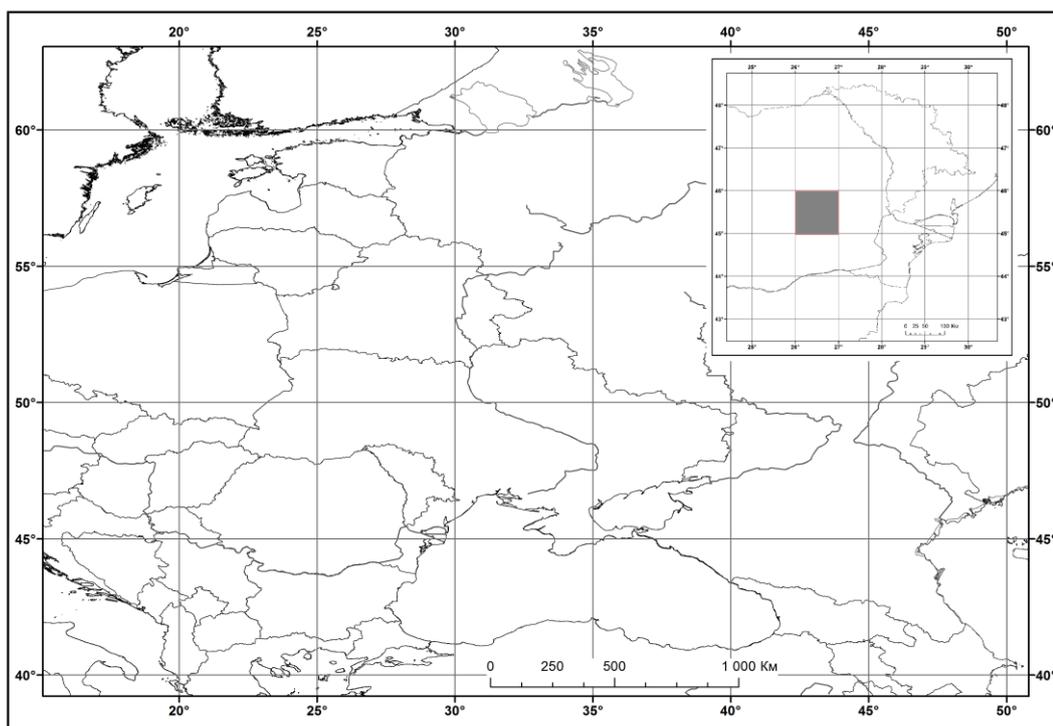
Распространение упругих волн из мантийных очагов Вранча имеет аномальный характер, проявляющийся в ориентированности потока сейсмической энергии в северо-восточном направлении. При землетрясениях 1802, 1838, 1940, 1977, 1986 и 1990 гг. произошли сотрясения силой до 3 – 4 баллов на большой территории, включающей Москву, Санкт-Петербург, Киев и другие города Восточной Европы. Область Вранча

характеризуется высокой активностью, регулярностью проявления землетрясений, устойчивостью пространственного размещения их эпицентров. Неоднократные катастрофические вранчские землетрясения вызывали существенные разрушения на территории Республики Молдова.

Исследование показало, что, между коровой и подкоровой сейсмичностью по среднегодовому числу землетрясений существует слабая связь. А статистическая зависимость между коровой и подкоровой сейсмической активностью, для землетрясений с магнитудой $M \geq 2.6$, практически отсутствует (Буртиев Р. 2017, с. 137).

1.10. Особенности промежуточных карпатских землетрясений

Энергия, выделяющаяся в очагах промежуточных карпатских землетрясений, огромна, и она распространяется не в нарушенных верхних слоях литосферы, а в однородной мантии Земли. Поэтому сильнейшие землетрясения, происходящие по несколько раз в столетие, ощущаются с большой интенсивностью (в эпицентре до 8 – 9 баллов) не только на территории Румынии, но и распространяются на большие расстояния, охватывая часть Восточной и Центральной Европы: Молдову, Украину, Болгарию, Сербию, Македонию, Россию, Белоруссию, Венгрию, Словакию, Польшу, Чехию, Грецию, Турцию (рис 1.7).



**Рис. 1.7. Территория, на которой ощущаются землетрясения зоны Вранча;
на вкладке: территория подверженная высокой опасности.**

Наиболее опасны они на территориях Румынии, Болгарии, Молдавии и юго-западной части Украины. Ощутимость же их к северу от эпицентра достигает Санкт-Петербурга, а к востоку Кавказа и Поволжья.

Каждое столетие отмечается, как правило, двумя-тремя землетрясениями, по силе своей близкими к максимально возможным в данной очаговой зоне. До недавнего времени область Вранча принималась как пространственное тело с некоторыми средними координатами. Считалось, например, что эпицентры землетрясений 10 ноября 1940 г. и 4 марта 1977 г. совпадают. Это совпадение противоречит представлению о флуктуации сейсмичности, связанной с тем, что после сильнейших землетрясений сейсмическая активность в области очага понижается, и крупные разрывы, вдоль которых происходили эти события, на долгое время превращаются в сравнительно спокойные участки.

За последние десятилетия удалось выявить размеры и расположение фокальной зоны. Выяснено, что землетрясения 1977, 1986 и 1990 гг. являются взаимосвязанными событиями. Их гипоцентральные области имели тенденцию не перекрывать друг друга при чередующихся событиях, что объясняется, вероятно, большой разрядкой напряжений вокруг очага. Землетрясения были приурочены поочередно то к северо-восточному краю очаговой зоны (1977 и 1990 гг.) с глубиной очага порядка 90 км, то к противоположному юго-западному краю (1986 г.) с глубиной порядка 140 км (Друмя А. и др. 2009, с. 13)

Характерной особенностью вранчских промежуточных землетрясений является вытянутость изосейст в направлении с юго-запада на северо-восток. Сложный характер полей интенсивности сотрясений обусловлен тремя обстоятельствами:

- 1) протяженностью очага и ориентацией плоскостей разрыва;
- 2) горизонтальной неоднородностью среды, по которой распространяются сейсмические волны;
- 3) местными грунтовыми и другими условиями в пункте наблюдений на земной поверхности.

Количественные данные о влиянии этих обстоятельств пока лишь накапливаются и обрабатываются. Сейчас можно только предположительно отнести некруговое распределение интенсивности сотрясений в эпицентральной зоне и близкой к ней области за счет первого фактора, а в далекой – за счет второго, хотя везде действуют все три.

Сильное сжатие изосейст наблюдается со стороны Трансильвании и Добруджи. Обе указанные области характеризуются большим количеством глубинных тектонических

разломов, которые и обуславливают быстрое затухание интенсивности сотрясений в северо-западном и юго-восточном направлениях.

Существенную роль в спаде интенсивности сотрясений с расстоянием играют не только крупные зоны разломов в альпийской и герцинской складчатых зонах, но и некоторые глубинные нарушения в древней докембрийской платформе.

В северо-восточном направлении, т. е. в сторону докембрийской платформы земная кора становится монолитнее, и затухание сейсмической энергии происходит медленнее, расстояние между изосейстами увеличивается. Аналогичным образом ведет себя интенсивность в противоположном направлении, в сторону Мизийской платформы.

Территория Республики Молдова, входящая в состав Карпатского сейсмического региона, подвержена сейсмической опасности очень высокого уровня. По макросейсмической шкале MSK-64 в отдельных локальных зонах юго-запада страны возможны сотрясения до 9 баллов (Друмя А. и др. 2009, с. 13).

1.11. Выводы к главе 1

- Для Карпатского сейсмического региона накоплен значительный объём макросейсмических данных, но они достаточно разрозненны и требуют единого подхода в обработке, интерпретации, систематизации и, как итог, каталогизации. Особенно эта проблема актуальна для исторических землетрясений, требующих полной переоценки каждого свидетельства. Такие попытки уже предпринимались. Тем не менее, в связи с постоянным пополнением данных за счёт нахождения всё новых исторических источников, есть необходимость заново оценить все имеющиеся к настоящему моменту в наличии данные. И уже на их основе рассчитывать параметры исторических землетрясений по уточнённым моделям затухания макросейсмического поля.
- В тектоническом отношении исследуемый регион разделяется на три, существенно отличающихся между собой, структурных области: докембрийскую (Русскую) платформу; эпигерцинскую (Скифскую) платформу и альпийскую геосинклинальную область. Для каждой из них характерны свои зоны ВОЗ. Очаги землетрясений Карпатского сейсмического региона по глубине группируются в два яруса: коровые (до 60 км) и подкоровые. Коровые землетрясения распределены по трём тектоническим зонам. Очаги первой зоны приурочены к нарушениям в фундаменте Восточно-Европейской (докембрийской) платформы, второй зоны – к

разломам в герцинско-киммерийском фундаменте Северной Добруджи и ее обрамлении, третьей – к разломам в альпийских сооружениях.

- Главнейшей и опаснейшей особенностью сейсмичности Карпатского региона является его подкоровая сейсмичность в области Вранча, расположенная на участке сочленения Восточных и Южных Карпат. С очагами в интервале глубин 60-180 км. Эпицентры вранчских очагов сосредоточены в пределах небольшой площади, менее одного географического градуса (60×80 км), и ограничены меридианами $26^\circ - 27^\circ$ в.д. и параллелями $45^\circ - 46^\circ$ с.ш.
- Характерной особенностью вранчских промежуточных землетрясений является вытянутость изосейст в направлении с юго-запада на северо-восток. В северо-восточном направлении, т. е. в сторону докембрийской платформы земная кора становится монолитнее, и затухание сейсмической энергии происходит медленнее, расстояние между изосейстами увеличивается. Это повышает уровень потенциальной сейсмической опасности для территории Республики Молдова, входящей в состав Карпатского сейсмического региона. По макросейсмической шкале MSK-64 в отдельных локальных зонах юго-запада страны возможны сотрясения до 9 баллов.

2. ТИПЫ МЕХАНИЗМА ОЧАГА ВРАНЧСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

2.1. Сопоставление региональных определений механизма очага карпатских землетрясений с решениями тензора сейсмического момента.

2.1.1. Методы исследования

Сейсмическая опасность территории Республики Молдова в значительной степени определяется влиянием промежуточных землетрясений области Вранча и коровыми землетрясениями, происходящими в юго-восточной части Румынии. Рассмотрим особенности механизма очага землетрясений этой части Карпатского региона за период 1977-2014 гг., решения которых получены двумя методами.

В первом методе для построения механизма очага сильных карпатских землетрясений, которые ощущались на территории Республики Молдова, применялась стандартная методика Введенской (Введенская А. 1969), разработанная на основе теории дислокаций. По которой определяется положение двух нодальных плоскостей разрыва, ориентация подвижек по ним, направления главных осей напряжений, снимаемых в момент землетрясения.

Исходными данными для построения механизма очага служат знаки первых смещений продольных волн, поле распределения которых на станциях вокруг очага эквивалентно полю, создаваемому при внезапном приложении на площадке скольжения равномерно распределённой в её пределах пары взаимно уравновешенных сил.

Исследование проведено на основе данных о знаках первых вступлений короткопериодных продольных волн, опубликованных в бюллетенях сети сейсмических станций Молдовы, бюллетеней Западной территориальной зоны Единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты) (Сейсмологический бюллетень 1980-1995), Сейсмологического бюллетеня Украины (Сейсмологический бюллетень Украины 1996-2014), из бюллетеней Международного сейсмологического центра (Bulletin ISC) и данных Национального института физики Земли Румынии (INFP). Углы выхода сейсмических лучей рассчитывались, исходя из регионального годографа. Решения опубликованы в работах (Друмя А. и др. 2008; Друмя А. и др. 2009; Степаненко Н. и др. 2012; Степаненко Н. и др. 2013). Для некоторых землетрясений использованы также определения других авторов (указаны в таблице Приложения 2).

Второй метод решения механизма очага некоторых сильных землетрясений получен с помощью тензора сейсмического момента (ТСМ) по методу Дзевонского с

использованием волновой формы от вступления P -волны до фундаментальных мод поверхностных волн, зарегистрированными цифровыми сейсмическими станциями мировой сети TCM, изложенному в (Dziewonski A. et al. 1981). TCM-каталог содержит данные о компонентах тензора сейсмического момента. Как известно, тензор момента M зависит от силы источника и ориентации разрыва и содержит всю информацию об очаге, которую можно получить по наблюдениям длиннопериодных волн на телесеизмических станциях. Так как механизм, полученный по знакам первых смещений, соответствует началу процесса вспарывания, а главные оси тензора сейсмического момента получены по всей сейсмограмме, то их сравнение может дать информацию о развитии процесса разрывообразования.

Сравнение определений тензора сейсмического момента, взятые из каталогов (ISC; EMSC) с полученными в ИГС РМ решениями (Друмя А. и др. 2008; Друмя А. и др. 2009; Степаненко Н. и др. 2012; Степаненко Н. и др. 2013) представляет большой интерес для рассмотрения развития процесса вспарывания и оценки применимости, избранной нами модели для описания реальных процессов в очагах.

2.1.2. Исходные данные

В задачу настоящей главы входило сопоставление результатов реконструкции поля тектонических напряжений в Карпатском регионе с использованием двух различных описанных методов, примененных к одним и тем же сильным землетрясениям.

В таблицах из приложений 1 и 2 приводятся параметры 34 очагов карпатских землетрясений за период 1977-2014 гг., а также решения механизма полученных как по стандартной методике, так и рассчитанных по тензору сейсмического момента (TCM). В таблице из приложения 1 даны магнитуды по продольным волнам M_b и по поверхностным M_s . Кроме того, приведены моментные магнитуды M_w . Четыре землетрясения имели магнитуду $6,3 \leq M_s \leq 7,2$, а остальные – с $4,4 \leq M_s \leq 5,8$. Полученные первым способом решения механизма (приложение 2) обеспечены более 50 знаками первых вступлений продольных P -волн. Коэффициент непротиворечивости знаков, которыми характеризуются сравниваемые землетрясения сравнительно высокие: 0,84 – 0,93. Следовательно, можно заключить, что сравнивались надежно полученные решения.

Параметры очагов для построенных в Институте геологии и сейсмологии РМ решений механизма очага (MOLD) и решения из каталога (Mostryukov A., Petrov V. 1994) совпадают с данными бюллетеня ISC (ISC bulletin).

2.1.3. Результаты сопоставления решений механизма очага

Рассмотрим сначала решения механизма очага четырёх сильнейших сейсмических событий с $M \geq 5,9$: 4 марта 1977 г, 30 августа 1986 г., 30 и 31 мая 1990 г.

Землетрясение 4 марта 1977 г. было мультиплетным и состояло из нескольких последовательных разрывов. Эпицентр приурочен к северо-восточной части области Вранча. Распределение знаков вступлений первичных волн на стереографической проекции таково, что нет возможности однозначно разделить их двумя нодальными плоскостями. Имеется два варианта решения механизма: по близким сейсмическим станциям и короткопериодной аппаратуре и по удаленным станциям и длиннопериодной аппаратуре. Вступления, зарегистрированные короткопериодной аппаратурой, расположенной вблизи очага, соответствует дискретному толчку, составляющему очаг. Для записей длиннопериодной аппаратурой на расстоянии от очага много больше его размера эффект дискретности исчезает, сейсмический сигнал сглаживается, и решение механизма определяет осредненный разрыв. На рисунке 2.1 приведено решение, полученное румынским сейсмологом Энеску по знакам первых вступлений P -волн, взятых только по длиннопериодной аппаратуре (Enes) (Enescu D. 1980, p. 13). В этом случае ось напряжения сжатия близгоризонтальна и ориентирована в северо-западном направлении. Ось напряжения растяжения близвертикальна. Одна из двух альтернативных плоскостей разрыва крутая, другая более пологая, простирание обеих юго-запад – северо-восток, характер движения взбросо-сдвиговой. На рисунке 2.1 также показана стереограмма механизма очага 4 марта 1977 г, рассчитанного вторым, альтернативным методом TCM (HRVD).

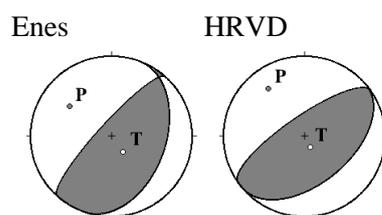


Рис. 2.1. Стереограммы механизма очага землетрясения 4 марта 1977 года в проекции нижней полусферы (зачернены области сжатия).

1)) – нодальные линии, 2) ●, 3) ○ – оси главных напряжений сжатия и растяжения соответственно; зачернены области волн сжатия

О направленности распространения разрыва в очаге можно судить по координатам очага из таблицы 1 приложения, относящимся к начальному моменту процесса, и

полученным по методу TCM (ISC). Эпицентр землетрясения 1977 г., определённый по методу TCM, смещён от эпицентра, соответствующего началу вспарывания, на 70-75 км к юго-западу (рис. 2.2). На рисунке 2.2 пунктиром показана линия развития процесса разрывообразования и отмечены координаты четырёх основных составляющих этого мультиплетного события по (Mueller G. et al. 1979, p. 17).

Несовпадение эпицентров объясняется тем, что второе решение относится к одному из последующих этапов развития процесса разрывообразования, поскольку для нахождения элементов тензора сейсмического момента используется вся сейсмограмма землетрясения, которая в процессе расчёта усредняется. Характер подвижки, взбросо-сдвиговый, остаётся сходным при разных определениях.

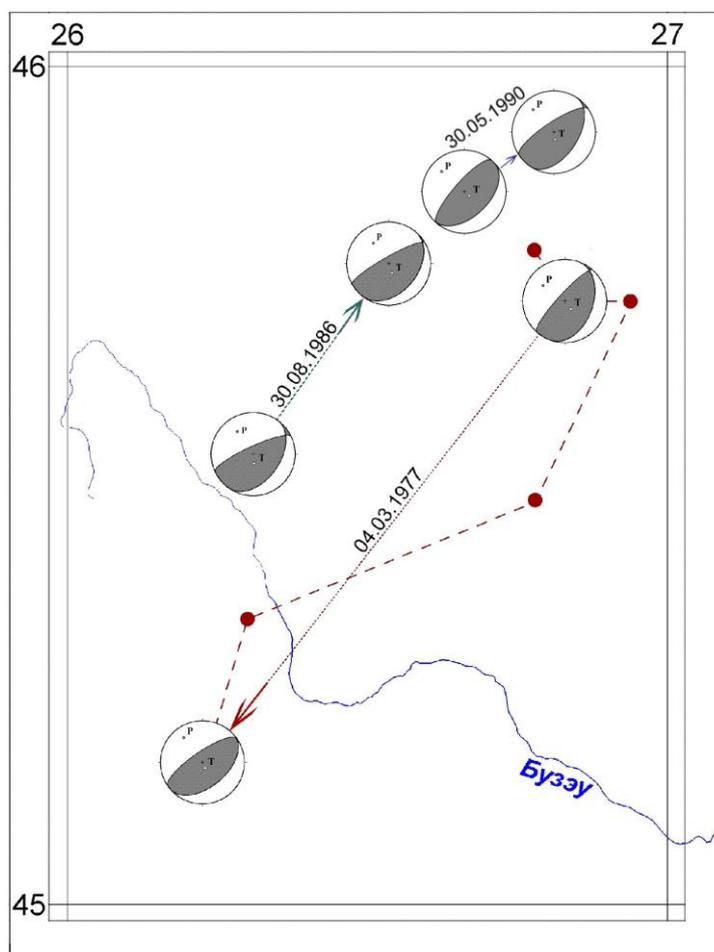


Рис. 2.2. Сравнение разных определений эпицентра и механизма землетрясений

4 марта 1977 г., 30 августа 1986 г. и 30 мая 1990 г.

Точки – эпицентры основных толчков землетрясения 1977 г.

Стрелки – направления разрывообразования

Далее следует землетрясение 30 августа 1986 г. (рис. 2.3). Гипоцентр события 30 августа 1986 г. приурочен к юго-западной окраине области Вранча и глубине порядка 130 км. Механизм очага землетрясения 1986 г., определённые первым (MP, TO) (Mostryukov A., Petrov V. 1994; Trifu C., Oncescu M. 1987, p. 728) и вторым (MOS, NEIS, HRVD) (ISC Bulletin) методами, хорошо согласуются между собой. Обе возможные плоскости разрыва имеют северо-восточное простирание. Одна из плоскостей крутая, другая пологая. Подвижки по ним представлены надвигом с небольшой компонентой левостороннего ($NP1$) и правостороннего ($NP2$) сдвигов. Ось растягивающего напряжения T – почти вертикальна, сжимающего P – близгоризонтальна и ориентирована в северо-западном направлении.

По геолого-геофизическим соображениям за действующую плоскость разрыва в очаге можно принять крутую плоскость $NP1$, совпадающую с направлением протяжённости зоны максимальной балльности и зоны афтершоков. По этой плоскости северо-западный борт разрыва надвинут на юго-восточный в соответствии с тем, что продолжается воздымание горного сооружения Карпат и надвигание Восточно-Карпатской дуги на Предкарпатский прогиб.

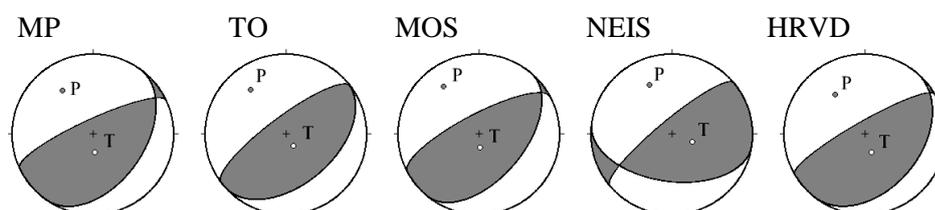


Рис. 2.3. Землетрясение 30 августа 1986 г.

О направленности разрыва можно судить, исходя из того, что эпицентр, определённый по методу TCM, смещён по отношению к эпицентру, определённому по первым вступлениям P -волн, на 25-30 км к северо-востоку (рис. 3.2). Отсюда можно сделать предположение, что разрыв в очаге распространялся с юго-запада на северо-восток. Это согласуется с макросейсмическими данными, которые подтверждают асимметричность затухания макросейсмического эффекта в этом направлении. Так, в Бухаресте на расстоянии 140 км к юго-западу от эпицентра ощущалось землетрясение интенсивностью 6-7 баллов. И в Кишинёве на расстоянии 240 км к северо-востоку от эпицентра интенсивность составила также 6-7 баллов.

В 1990 г. произошёл сейсмический дубль 30 и 31 мая. Местоположение очагов близко к таковому для землетрясения 1977 г. Механизм очага землетрясения 30 мая,

наиболее энергетически мощного события по данным MP, Зах (Захарова А. и др. 1996, с. 214) и MOS, подобен решениям механизма землетрясений 1977 и 1986 гг. Тип движения в очаге взбросо-сдвиговый. Одна из двух возможных плоскостей разрыва крутая, другая более пологая. Простираение нодальных плоскостей по касательной к Карпатской дуге. Определение решений механизма очага на основе знаков первых вступлений *P*-волн и по методу TCM (HRVD, NEIC) дали достаточно близкие результаты, что свидетельствует об унаследовании направления вспарывания на разных стадиях образования разрыва (рис. 2.4). Смещение эпицентра, определённого по методу TCM, наблюдается к северо-востоку на расстояние порядка 15 км, глубина очага уменьшается от 89 до 74 км (рис. 2.2).

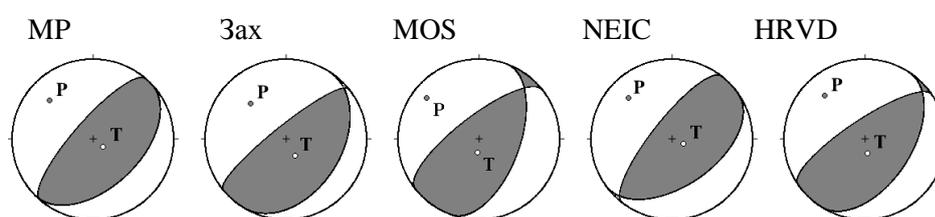


Рис. 2.4. Землетрясение 30 мая 1990 г.

Имеются решения механизма очага землетрясения 31 мая 1990 г. по методу двойного диполя (MP) и TCM (NEIC, HRVD), которые хорошо согласуются между собой (рис. 2.5).

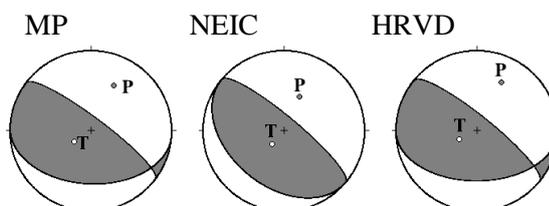


Рис. 2.5. Землетрясение 31 мая 1990 г.

Одна пологая нодальная плоскость ориентирована в субширотном направлении, вторая альтернативная плоскость крутого падения ориентирована в направлении северо-запад – юго-восток. Направление оси сжатия северо-восточное.

Время, указанное для очага землетрясения во втором способе решения – это среднее время центроида, которое запаздывает относительно времени возникновения процесса в очаге землетрясения (t_0) тем сильнее, чем выше магнитуда землетрясения.

При рассмотрении разницы во времени и координат эпицентра землетрясения 31 мая оказалось, что время в очаге по HRVD взято неверно (на 3 секунды раньше других

определений из ISC), поэтому и координаты эпицентра получились выходящими за пределы области Вранча.

Далее рассмотрим особенности решения механизма очага менее сильных промежуточных землетрясений, выполненных на основе двух разных способов.

Очаг землетрясения 2 октября 1978 г. приурочен к нижнему ярусу глубин – порядка 155 км. Надёжность определения механизма очага зависит от количества станций с известным направлением первого вступления, а также от расположения этих станций по отношению к эпицентру. Для землетрясения 2 октября эти условия довольно благоприятны, и механизм его может быть определён достаточно уверенно.

Получено решение механизма очага по 98 знакам, 15 несогласующихся знаков в (MP) и 108/5 в (Rad) (Radulian M. et al. 2002, p. 673). Одна из плоскостей имеет характер надвига с левосторонним сдвигом, вторая – с правосторонним сдвигом. Имеется решение механизма очага по второму методу (HRVD). Оба решения близки между собой (рис. 2.6). Плоскости разрыва ориентированы параллельно Восточным Карпатам. Ось близгоризонтального сжатия ориентирована в направлении северо-восток – юго-запад.

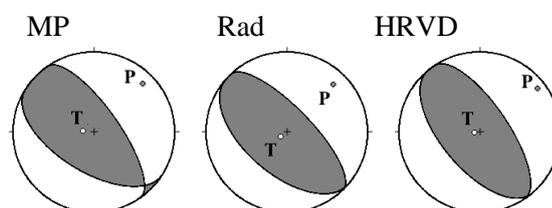


Рис. 2.6. Землетрясение 2 октября 1978 г.

Рассмотрим землетрясение 31 мая 1979. Имеется 2 близких решения классическим методом (MP и Rad) (рис. 2.7). Согласно этому решению, тип движения вдоль первой плоскости – левосторонний взбросо-сдвиг, компонента по простиранью преобладает. Сильный макросейсмический эффект в направлении на северо-восток от эпицентра согласуется с ориентацией плоскости разрыва *NP1*. Согласно решению HRVD, крутая плоскость диагонального простиранья близка по ориентации с решениями по первому способу. Вторая плоскость пологая, оси сжатия и растяжения наклонные. Глубина очага по первому вступлению волн *P* – 130 км, по второму решению HRVD – 114 км. Время в очаге по второму способу на 7 секунд больше, чем по данным ISC.

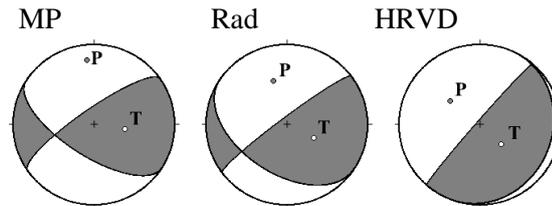


Рис. 2.7. Землетрясение 31 мая 1979 г.

Очаг землетрясения 11 сентября 1979 г. приурочен к юго-западной окраине области Вранча и к нижнему этажу глубин порядка 150 км. По первому методу имеется 2 решения механизма очага (MP и Rad). Согласно решению MP, первая плоскость – правосторонний взбросо-сдвиг, вторая плоскость – левосторонний взбросо-сдвиг. Рабочая нодальная плоскость параллельна простиранию Южных Карпат. Во втором решении Rad нодальные плоскости диагонального простирания. Одна из них пологая, другая крутая.

Решение по методу TCM (HRVD) сходно с вариантом Rad (рис. 2.8). При рассмотрении разницы во времени и координат эпицентра землетрясения 11 сентября оказалось, что время в очаге по HRVD взято неверно (на 4 секунды раньше определений из ISC), поэтому и координаты эпицентра получились выходящими за пределы области Вранча.

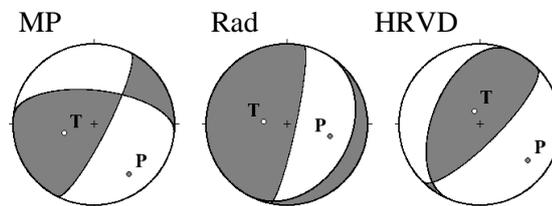


Рис. 2.8. Землетрясение 11 сентября 1979 г.

1 августа 1985 г. произошёл сейсмический дубль с интервалом в 3 часа. Направление простирания плоскости разрыва при первом событии дубля близко к простиранию очаговой области Вранча. Решение по методу TCM в каталогах не приводится.

Для второго события сейсмического дубля имеются решения (MP) и (OA) (Onicescu M. Apolozan L. 1986, p. 12), а также HRVD (рис. 2.9). В полученных первым способом решениях одна из крутых плоскостей диагонального простирания. Другая плоскость ориентирована субгоризонтально. Большой вклад вносит сдвиговая составляющая. Согласно решению HRVD в очаге произошла сбросовая подвижка. Максимальное

выделение энергии произошло на 33 км к востоку по отношению к эпицентру начала процесса разрывообразования, такое расстояние нам представляется завышенным. Эпицентр по HRVD выходит за пределы очаговой области.

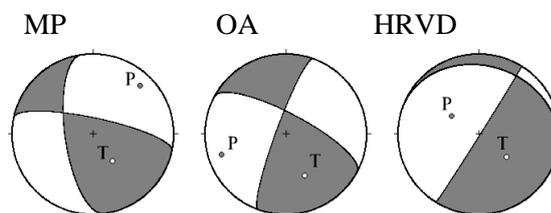


Рис. 2.9. Второе событие сейсмического дубля 1 августа 1985 г.

Магнитуда несколько выше у второго толчка дубля, а макросейсмический эффект в Молдове существенно меньше. Следовательно, особенности проявления дубля на земной поверхности обусловлены в значительной степени механизмом очага и направленностью излучения энергии.

На рисунке 2.10 показан механизм очага землетрясения 13 марта 1998, которое произошло в юго-западной части Вранча на глубине более 150 км. Знаки первых вступлений волн *P* хорошо разделяются нодальными плоскостями. Пологая плоскость имеет широтную ориентацию, как и ось промежуточного напряжения *N*. Другая крутая плоскость – диагональной ориентации. Ось сжатия направлена субмеридионально. Механизм очага носит надвиговой характер в соответствии с надвиганием Южных Карпат на Предкарпатье.

Кроме этого имеется решение механизма HRVD (рис. 2.10). Оси сжатия и растяжения наклонные, обе нодальные плоскости имеют близкое, северо-восточное – юго-западное простирание. Движение по пологой наклонной плоскости представлено надвигом, по крутопадающей плоскости – взбросом. Время в очаге на 5 секунд больше, чем в каталоге ISC.

При сравнении двух решений механизма очага 13 марта видно, что вторые из двух альтернативных крутых плоскостей близки по ориентации, а первые отличаются.

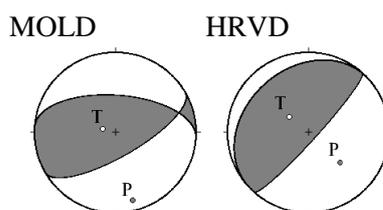


Рис. 2.10. Землетрясение 13 марта 1998 г.

Землетрясение 28 апреля 1999 г. произошло в юго-западной окраине фокальной зоны на глубине порядка 150 км. Согласно решениям первым (MOLD) и вторым (HRVD), (Bon) (Bonjer K. et al. 2002, p. 24) способами, землетрясение произошло под действием горизонтальных сил сжатия, ориентированных в субширотном направлении (рис. 2.11). Тип подвижки в очаге – надвиговый. Простираание обеих нодальных плоскостей субмеридиональное.

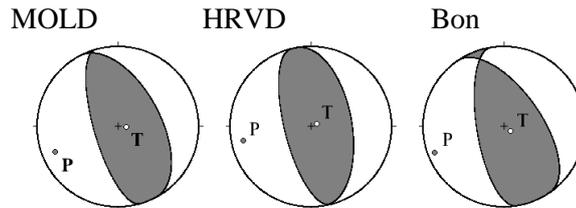


Рис. 2.11. Землетрясение 28 апреля 1999 г.

Использованные для построения механизма очага 6 апреля 2000 г. знаки первых вступлений продольных волн хорошо разделились (98/5). Полученное решение механизма очага находится в согласии с решениями TCM, представленными агентствами HRVD, CSEM, NEIC (рис. 2.12). Наблюдается наклонная ориентация осей напряжений, причём ось растяжения *P* направлена ближе к вертикали. Одна нодальная плоскость пологая, другая крутая, и по ней, по-видимому, произошла подвижка типа взброса.

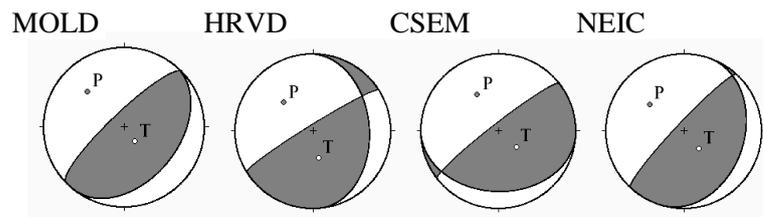


Рис. 2.12. Землетрясение 6 апреля 2000 г.

Очаг землетрясения 24 мая 2001 г. приурочен к центральной части Вранча и глубине порядка 145 км. Противоречивых первому решению знаков мало (85/6). Необычно для вранчских землетрясений большое количество станций со знаками разрезания (23 с – 62 d). Имеется несколько вариантов решения механизма очага вторым способом (рис. 2.13), которые хорошо согласуются между собой. По всем решениям крутая нодальная плоскость диагонального простираания, ось сжатия имеет субгоризонтальное положение и ориентирована на северо-запад. Однако по данным MED

начало разрыва не совпадает с другими определениями, опережает их на несколько секунд, отличаются и координаты эпицентра.

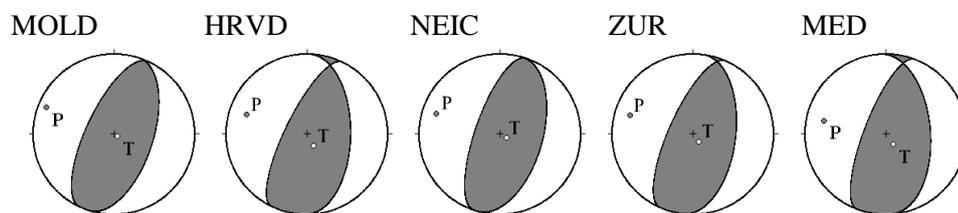


Рис. 2.13. Землетрясение 24 мая 2001 г.

Землетрясение 20 июля 2001 г. произошло в северо-восточной части области Вранча на глубине порядка 120 км. Механизм очага по методу первого вступления характеризуется сжатием в юго-западном направлении и надвиганием юго-западного борта разрыва на северо-восточный. Есть решения HRVD, MED, ZUR (рис. 2.14). Решение по первому методу ближе всего согласуется с Гарвардским. Для решения MED время в очаге отличается на 6 секунд от времени по ISC, отличаются и координаты. По данным ZUR время в очаге опережает время по другим агентствам.

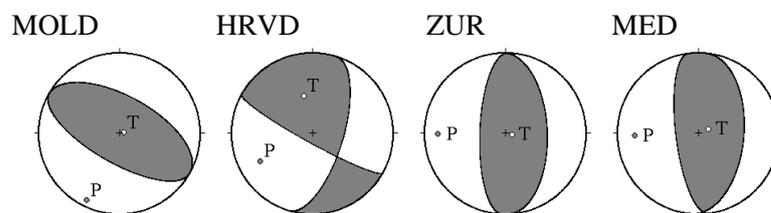


Рис. 2.14. Землетрясение 20 июля 2001 г.

Землетрясение 30 ноября 2002 г. произошло на глубине порядка 170 км в центральной части очаговой зоны. Имеется одно решение по первому методу, знаки плохо разделяются на стереографической плоскости (79/15). Приводятся 2 решения по второму методу (ZUR, MED) (рис. 2.15). Все три решения практически совпадают. Согласно им, напряжения сжатия и растяжения наклонны к горизонту. Подвижка в очаге по плоскости $NP1$ – сброс с компонентами сдвига, по $NP2$ – сдвиг с компонентами сброса. Такой тип механизма является нетипичным для области Вранча. Аномально большой явилась и глубина очага события 30 ноября 2002 г.

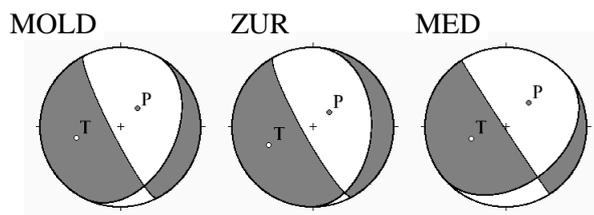


Рис. 2.15. Землетрясение 30 ноября 2002 г.

Очаг землетрясения 5 октября 2003 г. относится к юго-западной окраине Вранча и глубине порядка 150 км. Мы построили решение механизма очага землетрясения по 52/4 знакам. Северный борт разрыва надвигается на южный.

Имеется два решения по методу TCM (ZUR, MED) (рис. 2.16). Здесь вторые плоскости близки с нашим решением. Первая плоскость ориентирована диагонально. Ось сжатия имеет субширотное простирание.

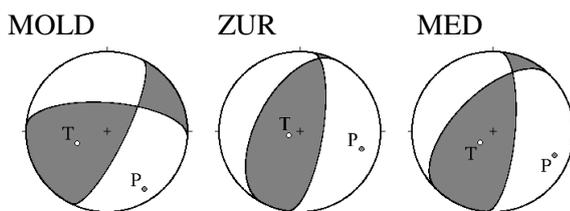


Рис. 2.16. Землетрясение 5 октября 2003 г.

Землетрясение 27 сентября 2004 г. в районе Вранча произошло в центральной части на глубине около 150 км и ощущалось на значительной части Молдовы. Возможно, оно спровоцировало месяцем спустя 27 октября разрядку накопившихся напряжений и в верхней части глубин фокальной зоны Вранча ($h \sim 100$ км).

Есть определения механизма очага, как по стандартной методике, так и по TCM: HRVD, ZUR, MED (рис. 2.17).

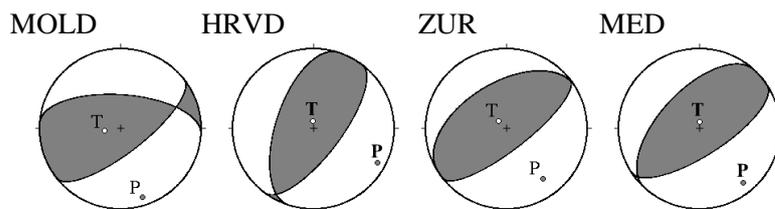


Рис. 2.17. Землетрясение 27 сентября 2004 г.

Согласно решению механизма очага, MOLD нодальная плоскость $NP1$ имеет субширотную ориентацию, плоскость $NP2$ – на северо-восток. Обе плоскости достаточно крутые, движения в очаге – взброс, сдвиговая компонента незначительна. Подобное решение характерно для землетрясений, обязанным своим происхождением тектоническим процессам Южных Карпат. Решение его очень близко совпадает с решением механизма очага 16 августа 1986 г., которое считается форшоком сильнейшего события 30 августа 1986 г.

В решениях ТСМ силы сжатия имеют субгоризонтальную ориентацию, согласно HRVD и чуть ближе к вертикали по ZUR. Меньший разброс отмечен в наклоне сил растяжения, они близвертикальны по всем решениям. Тип движения – почти чистый взброс.

В обоих типах решений вторые плоскости близки по азимутальному направлению. Рабочая плоскость по MOLD ориентирована в направлении запад-восток. Затем она, вероятно, изменила позицию на диагональное направление.

Вышеперечисленные землетрясения произошли в горах Вранча, и глубины их очагов составили 87-170 км. Землетрясение 3 октября произошло на глубине порядка 10 км в дельте Дуная (Георгиевское устье). Есть определения механизма очага события 3 октября как по ТСМ (HRVD, ZUR, MED), так и по стандартной методике (MOLD) (рис. 2.18). Все решения близки между собой, простирание обеих плоскостей: юго-восток – северо-запад. Оси напряжений сжатия ориентированы близвертикально, оси растяжения – близгоризонтально. В очаге наблюдается движение сбросо-сдвигового типа.

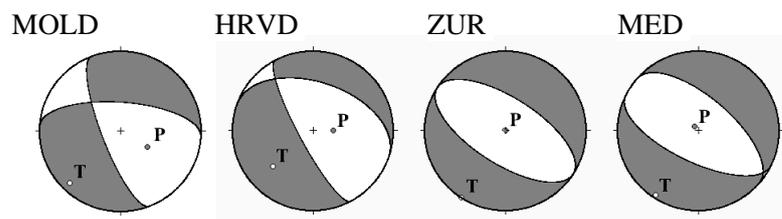


Рис. 2.18. Землетрясение 3 октября 2004 г.

Землетрясение 27 октября 2004 г. хотя и уступает по своим энергетическим характеристикам сильнейшим землетрясениям области Вранча, но значительно превосходит по магнитуде уровень сейсмического фона. Очаг землетрясения приурочен к северо-восточной части очаговой зоны Вранча и верхнему этажу глубин.

Механизм очага по первым вступлениям определён на основе 210 знаков вступлений *P*-волн (104 – сжатие, 106 – разрежение). 17 знаков не согласуются с принятым решением. Знаки хорошо разделяются на стереографической проекции. Обе возможные нодальные плоскости имеют северо-западное – юго-восточное простирание и наклонены к горизонту под углом в 46 градусов. Ось сжатия горизонтальна. Характер подвижки по обеим плоскостям надвиговой с небольшой сдвиговой компонентой.

Решения по методу тензора момента центраида HRVD, ZUR и NEIC (рис. 2.19) близки между собой и характеризуются одной крутой, ориентированной на северо-восток – юго-запад. Другая плоскость пологая, в случае которой наблюдается различие в простирании для разных авторов. Ориентация осей напряжений во всех случаях почти одинакова. Поскольку при различных вариантах расчёта крутая плоскость оказалась более устойчивой, её можно принять за возможную плоскость разрыва. По всем решениям угол с горизонтом оси сжатия немного превышает таковой оси растяжения. Очаг представлен взбросо-сдвиговой подвижкой вдоль крутой плоскости.

По решению MED очаг представлен сбросовой подвижкой вдоль крутой плоскости. При рассмотрении разницы во времени и координат эпицентра землетрясения оказалось, что время в очаге по MED взято на 3 секунды раньше определений ISC, поэтому и решение механизма явилось исключением в ряду предыдущих определений.

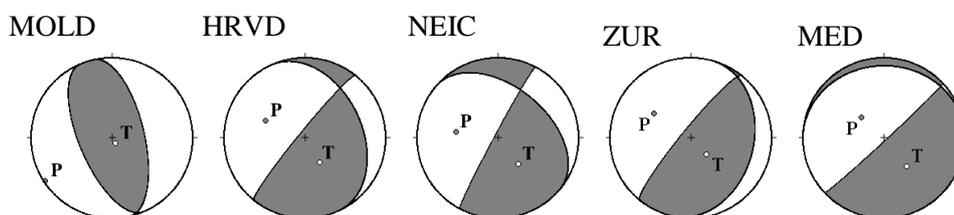


Рис. 2.19. Землетрясение 27 октября 2004 г.

Смещение эпицентра, определённого по методу TCM (HRVD), наблюдается к юго-востоку на расстояние порядка 10 км, глубина очага уменьшается от 98 до 94 км.

В решениях MOLD, HRVD и NEIC азимуты второй плоскости *NP2* близки между собой. Положение нодальной плоскости *NP1* изменилось, вероятно, в процессе разрывообразования.

Решение механизма очага 14 мая 2005 г. построенное по 102 знакам первых вступлений *P*-волн. Имеются также решения HRVD, ZUR, MED (рис. 2.20). Согласно решению механизма очага MOLD оси напряжений имеют близширотную ориентацию. Обе возможные плоскости разрыва имеют близмеридиональное простирание. В очаге

наблюдаются надвиговые подвижки с незначительной сдвиговой компонентой. Для выбора действующей плоскости разрыва мы руководствовались геологическими соображениями. По плоскости NP1 западный борт разрыва надвинут на восточный в соответствии с продолжающимся вздыманием Карпатских гор. Сопоставление с альтернативными решениями показывает хорошее согласие.

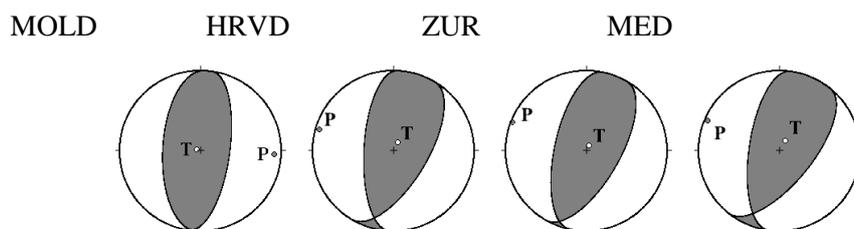


Рис. 2.20. Землетрясение 14 мая 2005 г.

Землетрясение 18 июня 2005 г. произошло в северо-восточной зоне Вранча. Согласно решению механизма очага, оси напряжений ориентированы на северо-северо-восток – юго-юго-запад.

Нодальные плоскости имеют субширотную направленность. Подвижки по обеим плоскостям представлены надвигами. Варианты решений MOLD, HRVD, ZUR и MED близки между собой (рис. 2.21).

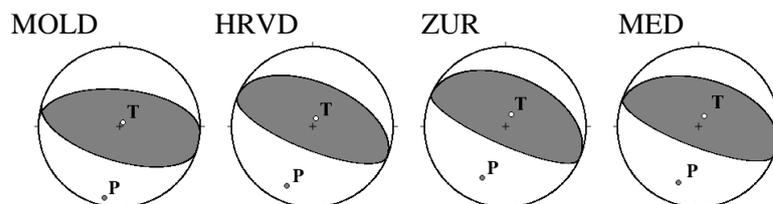


Рис. 2.21. Землетрясение 18 июня 2005 г.

Очаг землетрясения 13 декабря 2005 г., как и при землетрясении 18 июня, локализован в северо-восточной части очаговой зоны Вранча на глубине ~ 140 км.

Решение механизма очага 13 декабря MOLD выполнено по 60 знакам первых вступлений *P*-волн. Распределение знаков в стереографической проекции очень неравномерное, их разделение затруднено. Обе нодальные плоскости простираются в субширотном направлении. Подвижки по ним представлены надвигами.

Имеются решения HRVD, MED, тип движения по плоскости NP1 – почти чистый взброс (рис. 2.22). Сравнение их с решением по знакам первых вступлений показывает

согласие в ориентации осей напряжений. Совпадает тип движения в очаге по крутым плоскостям, ориентированным на северо-восток – юго-запад (надвиг). Различие наблюдается в положении вторых нодальных плоскостей, они пологие и простираются субмеридионально. В решении HRVD и MED указано время в очаге почти на 3 секунды меньше, чем по данным других агентств.

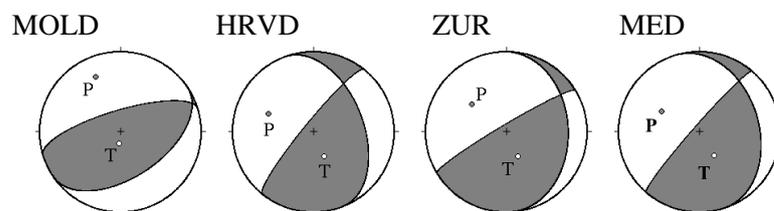


Рис. 2.22. Землетрясение 13 декабря 2005 г.

Достаточно сильное ($M_w=5,2$) землетрясение произошло 25 апреля 2009 г. на глубине порядка 100 км в центральной части Вранча. Построение выполнено по 135 знакам, 12 несогласующихся с решением знаков. Обе возможные плоскости разрыва имеют диагональное простираение и почти равные углы падения. Подвижки по плоскостям представляют надвиги с небольшой сдвиговой компонентой.

Кроме того, имеются решения механизма очага землетрясения 25 апреля, полученные с помощью тензора сейсмического момента по данным HRVD, ZUR, GCMT, NEIC, MED (рис. 2.23). Все решения хорошо согласуются между собой. Северо-западный борт разрыва надвигается на юго-восточный.

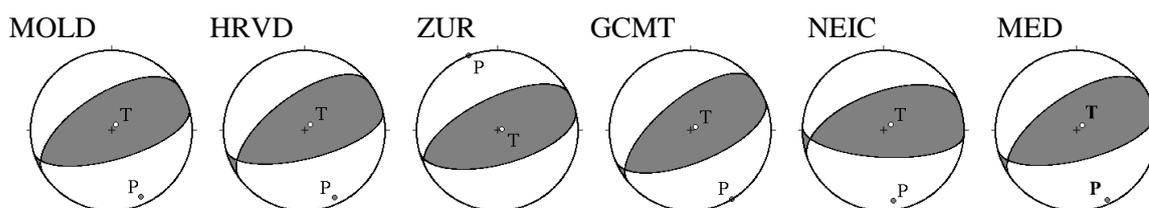


Рис. 2.23. Землетрясение 25 апреля 2009 г.

Гипоцентр землетрясения 8 июня 2010 г. находился на глубине порядка 110 км. Механизм очага этого землетрясения построен по данным о 88 знаках вступлений *P*-волны. Ориентация возможных плоскостей разрыва: северо-запад – юго-восток. Имеются решения механизма очага по методу тензора сейсмического момента: HRVD и MED (рис. 2.24). В решении HRVD наблюдается диагональная ориентация нодальных плоскостей. Тип решения согласуется в полученных вариантах. Подвижка в очаге близка к взбросу:

юго-западный борт разрыва надвигается на северо-восточный. Решение MED отличается от предыдущих по ориентации нодальных плоскостей и направлению оси сжатия. Отличаются и координаты эпицентра землетрясения от определений основных агентств.

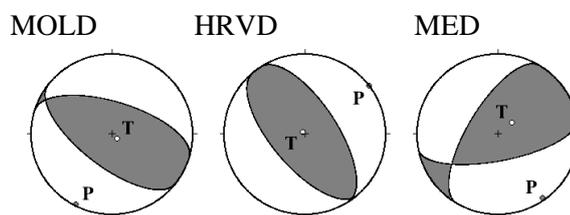


Рис. 2.24. Землетрясение 8 июня 2010 г.

Очаг землетрясения 30 сентября 2010 г. расположен на глубине порядка 140 км и приурочен к юго-западной окраине фокальной зоны Вранча. Для построения механизма очага было использовано 59 знаков. Обе нодальные плоскости ориентированы в направлении восток-запад. Разрыв в очаге произошёл под действием горизонтальной силы сжатия, направление оси которой меридиональное. По одной из плоскостей произошло надвигание северного борта разрыва на южный борт. По решению MED нодальные плоскости ориентированы диагонально (рис. 2.25).

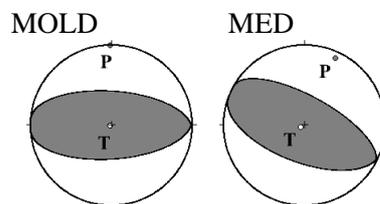


Рис. 2.25. Землетрясение 30 сентября 2010 г.

В 2011 году в Молдове произошло два ощутимых землетрясения 1 мая и 4 октября. При сравнительном анализе этих двух событий оказалось, что при небольшой разнице в размере магнитуд, в координатах эпицентра и глубинах очага решения механизма отличаются между собой. Макросейсмический эффект на территории Молдовы был сильнее 1 мая.

Для события 1 мая использовано 88 знаков. Ось напряжения сжатия P ориентирована субширотно. Обе нодальные плоскости простираются субмеридионально. Одна из них (рабочая) крутая падает на юго-запад, другая положе, имеет юго-восточное падение. Подвижка по крутой плоскости – взброс с небольшим левосторонним сдвигом.

По второму способу имеются решения MED и GFZ, которые согласуются с первым (рис. 2.26).

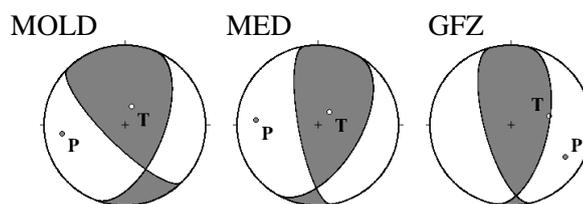


Рис. 2.26. Землетрясение 1 мая 2011 г.

Для решения механизма очага 4 октября 2011 г. использовано 89 знаков. Как и в случае землетрясения 24 мая 2001 г. отмечено большое число знаков разряжения (32 с – 57 d). Ось напряжений растяжения T ориентирована на юг, сжатия P – почти на запад. Обе нодальные плоскости ориентированы близмеридионально и характеризуются надвиговыми подвижками. Одна из нодальных плоскостей рабочая, имеет падение на северо-запад, другая на северо-восток.

По методу TCM есть решение MED, согласующееся с MOLD (рис. 2.27).

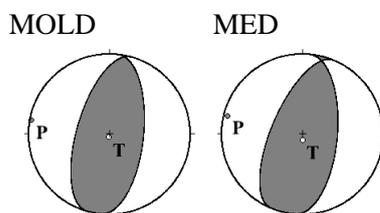


Рис. 2.27. Землетрясение 4 октября 2011 г.

Землетрясение 6 июля 2012 относится к северо-восточной части фокальной области и верхнему этажу глубин. Решение по первому типу построено по 63 хорошо разделяющимся знакам. Простираение обеих нодальных плоскостей – диагональное. Одна из нодальных плоскостей, рабочая, имеет крутое падение на северо-запад, другая пологая – на северо-восток. Решения по второму методу приводятся агентствами MED и NEIC. Решение MED согласуется с решением MOLD. Решение NEIC получилось иного типа. Нодальные плоскости расположены в направлении северо-запад – юго-восток (рис. 2.28).

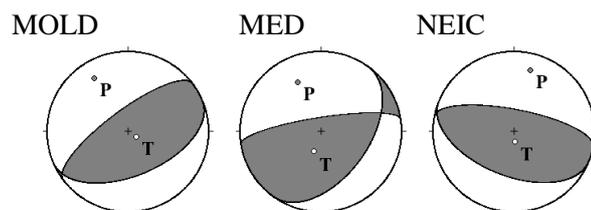


Рис. 2.28. Землетрясение 6 июля 2012 г.

Землетрясение 1 декабря 2012 г. произошло на северо-восточной границе зоны Вранча и глубине порядка 90 км. Знаки (98/22) плохо разделяются. Тип подвижки по обеим плоскостям надвиговой с небольшой сдвиговой компонентой. Решение MED в целом не противоречит первому решению (рис. 2.29). Северо-западный борт разрыва надвигается на юго-восточный.

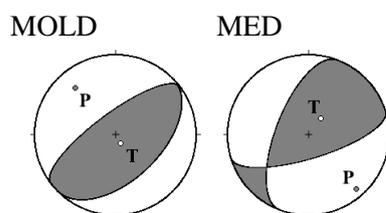


Рис. 2.29. Землетрясение 1 декабря 2012 г.

Очаг землетрясения 6 октября 2013 г. приурочен к центральной части области Вранча и глубине порядка 130 км. Получено решение MOLD механизма землетрясения по 109 знакам. Решение MOS определено по 69 знакам. Имеются также решения механизма по методу TCM: USGS, GCMT, MED, GFZ (рис. 2.30).

Землетрясение произошло под действием сил близгоризонтального сжатия и близвертикального растяжения. Горизонтальные составляющие сжимающих напряжений нормальны к Карпатской дуге в районе её изгиба. Линия пересечения плоскости, в которой располагаются оси P и T с земной поверхностью, служит касательной к горной дуге. Тип подвижки по обеим плоскостям надвиговой с небольшой сдвиговой компонентой. Такой характер механизма является типичным для промежуточных вранчских очагов.

Решения механизма очага, полученные двумя методами, хорошо согласуются между собой.

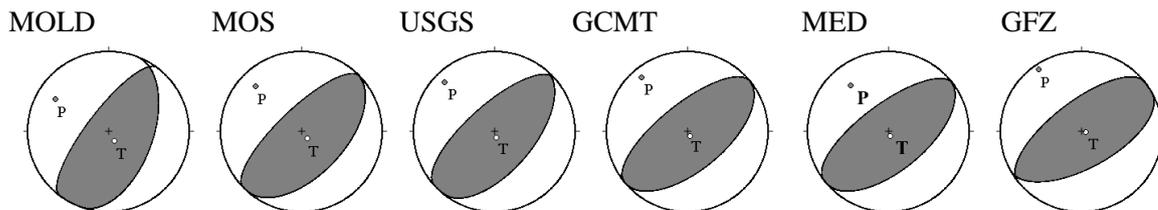


Рис. 2.30. Землетрясение 6 октября 2013 г.

Характер механизма землетрясения 15 октября 2013 г. по MOLD и MED близок к таковому для события 6 октября 2013 г. (рис. 2.31).

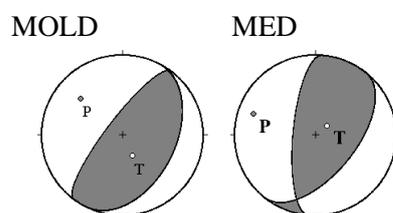


Рис. 2.31. Землетрясение 15 октября 2013 г.

Землетрясение 29 марта 2014 г. произошло в центральной части Вранча на глубине порядка 130 км. Решение механизма очага построено по 87 знакам вступлений волн *P*. Знаки хорошо разделяются на стереографической проекции. Обе нодальные плоскости ориентированы в субмеридиональном направлении. Ось сжатия близгоризонтальна и направлена на запад. Ось растяжения близвертикальна. В очаге произошла надвиговая подвижка.

В решениях GCMT, MED, GFZ сохранилась схожая ориентация нодальных плоскостей и тип подвижки по сравнению с первым решением (рис. 2.32).

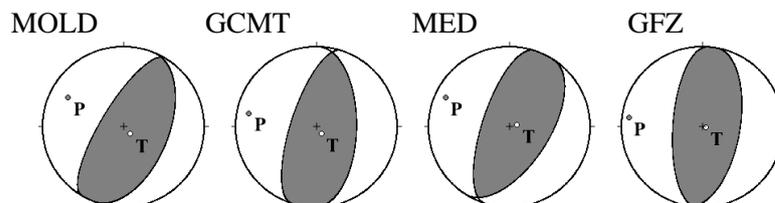


Рис. 2.32. Землетрясение 29 марта 2014 г.

В каталоге ВУС имеется решение механизма очага 10 сентября 2014 г. по 68 знакам вступлений волн P на сейсмических станциях мира. Знаки хорошо разделяются на стереографической проекции. Одна из нодальных плоскостей крутая и ориентирована в направлении северо-запад – юго-восток. Другая альтернативная плоскость пологая и ориентирована в направлении запад-восток. Ось сжатия близгоризонтальна и направлена на северо-восток. Ось растяжения близвертикальна. При изучении механизма очага выявлено, что станции Кишинёв и Малые Милешты лежат вблизи нодальной плоскости $NP2$ (поверхности, на которой смещения в продольных волнах или определённые компоненты в поперечных равны нулю). По этой плоскости произошла надвиговая подвижка. На сейсмограммах отмечена малая величина амплитуд в волне P .

Решения MED и GFZ совпадают с предыдущим (рис. 2.33).

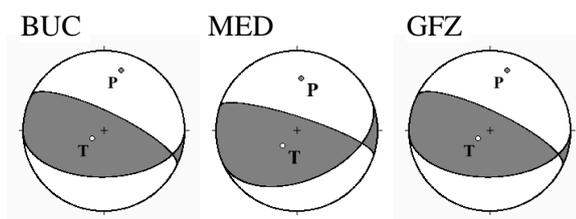


Рис. 2.33. Землетрясение 10 сентября 2014 г.

Наиболее значительным коровым событием за инструментальный период наблюдений было землетрясение 22 ноября 2014 г. с магнитудой $ML = 5,7$ и глубиной очага 40 км. Землетрясения в данной зоне продолжались вплоть до 19 января 2015 г. Был отмечен небольшой афтершок 7 декабря с $ML = 4,5$. Очаги связаны с активизацией Печенежско-Каменского разлома.

В каталоге НИФЗ (ВУС) и информационном сообщении ИОЦ ГС РАН (РАН) имеются решения механизма очага землетрясения 22 ноября по первому способу. Одна из плоскостей крутая, вторая возможная плоскость пологая. Движение в очаге возникло под действием растягивающих напряжений.

Приведены также решения механизма очага по данным: NEIC, IPGP, INGV, GCMT, MED (рис. 2.34).

Решения по данным разных центров подобны. Во всех случаях одна из нодальных плоскостей наклонена к горизонту близвертикально. Тип движения – левосторонний сдвиг с компонентами сброса. Другая альтернативная плоскость залегает как полого, так и под

большим углом. Простираение крутой плоскости согласуется с направлением Печенежско-Каменского разлома.

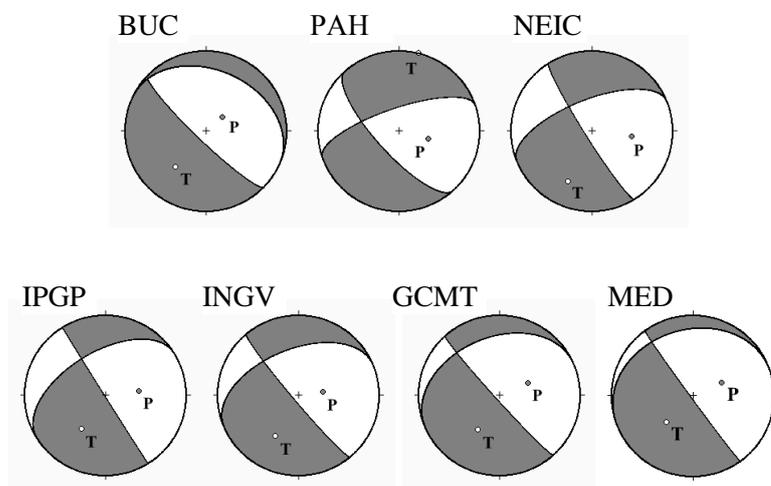


Рис. 2.34. Землетрясение 22 ноября 2014 г.

Для корового события 7 декабря 2014 г. получено решение BUC по 50 знакам. Решение MED согласуется с предыдущим (рис. 2.35). Ось растяжения близгоризонтальна, ось сжатия наклонна.

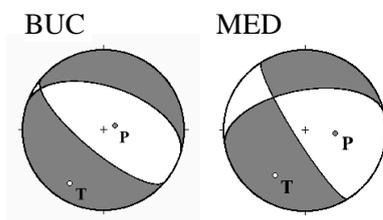


Рис. 2.35. Землетрясение 7 декабря 2014 г.

Решения механизма очага карпатских землетрясений зоны Вранча по знакам вступлений продольных волн получены с применением короткопериодной аппаратуры, а решения по методу тензора сейсмического момента (ТСМ) по длиннопериодной сейсмограмме, решения по первому вступлению *P*-волн можно отнести к самому началу процесса в очагах, а полученное по тензору момента к этапу наступления его максимальной фазы. Таким образом, получается, что различия в решениях механизма очага, полученных разными способами, свидетельствуют о сложном характере процессов вспарывания в очагах изучаемых землетрясений и вероятно об изменении ориентации

плоскости разрывов во времени. Это предположение было проверено на примере землетрясения 4 марта 1977 г.

Большинство из рассмотренных землетрясений области Вранча произошли под действием сжимающих субгоризонтальных напряжений; одно событие 30 ноября 2002 г. с глубиной очага 170 км – под действием растягивающих напряжений. Три коровых землетрясения имели сдвиго-сбросовый характер. Для промежуточных очагов характерна субвертикальная ориентировка области сжатия и соответствующей оси растяжения, а для коровых наблюдается противоположная ситуация – субвертикальная ориентация области растяжения и оси сжатия.

Сравнение решений, полученных по знакам *P*-волн, с решениями ТСМ для землетрясений 04 03 1977 г., 02 10 1978 г., 30 08 1986 г., 30 05 и 31 05 1990 г., 28 04 1999 г., 24 05 2001 г., 30 11 2002 г., 03 10 2004 г., 14 05 и 18 06 2005 г., 25 04 2009 г., 01 05 и 04 10 2011 г., 06 10 2013 г., 29 03 и 10 09 2014 г. показывает практическую их тождественность.

Для достаточно сильного землетрясения 27 10 2004 г. с $M_W = 5,8$ положение нодальной плоскости изменилось, вероятно, в процессе образования разрыва.

Для некоторых землетрясений, при одинаковом типе подвижки, отдельные различия отмечаются лишь в ориентации нодальных плоскостей и осей главных напряжений. Возможно, это связано с использованием различных методик определений механизма очага.

Тип подвижки в очагах вранчских землетрясений (надвиг, взбросо-сдвиг) в основном сохраняется, независимо от существенной разницы в положении нодальных плоскостей, полученных разными способами. Это связано с обстоятельством, что различия в положении нодальных плоскостей закономерны. Было замечено, что положение одной из нодальных плоскостей остаётся почти одинаковым для разных решений механизма очага одного и того же землетрясения, а другая нодальная плоскость в решениях разными способами отличается по простиранию на величину от 30° до 90° , но имеет практически тот же самый угол падения. В некоторых случаях решение механизма остаётся таким же, но обе плоскости повернуты на угол от 30° до 60° , сохраняя взаимное расположение. В некоторых случаях различия в положении нодальных плоскостей не имеют закономерного характера. Выявленные различия могут быть связаны, как с процессами в очаговой зоне, так и с несоответствием используемой модели очага реальным процессам.

2.2. Очаговые параметры землетрясений промежуточной глубины области

Вранча

Важной задачей является исследование динамических параметров очагов землетрясений с промежуточной глубиной. Надёжно определённый по первым вступлениям продольных волн механизм очага характеризует генеральный разрыв в очаге и поэтому позволяет существенно уточнить глубинное строение активных геологических разрывов и ориентацию в глубине: простирание, направление и угол падения, тип подвижки и даже уточнить глубину залегания очага.

Соответствие механизма очага генеральному разрыву объясняется тем, что именно на поверхности разрыва вследствие длительно развивающихся тектонических движений создаётся значительная концентрация сдвиговых напряжений, необходимая для резкого смещения горных масс в условиях больших гидростатических давлений. Начало вспарывания разрыва даёт начало сейсмическому излучению, фиксируемому в первых смещениях *P* и *S*-волн.

Задача данного раздела – определение ведущих типов сейсмогенных разрывов и их размещений на разных участках Карпатской дуги, выяснение генетической связи сейсмических и геологических параметров. Горная дуга Карпат представляет исключительно большой интерес, так как разные участки дуговой структуры, видимо, находятся на разных этапах развития.

Для построения механизма очага использовалась стандартная методика (Введенская, 1969), разработанная на основе теории дислокаций. Определяется положение двух нодальных плоскостей разрыва, ориентация подвижек по ним, направления главных осей напряжений, снимаемых в момент землетрясения.

Исходными данными для построения механизма очага служат знаки смещения в продольных волнах, поле распределения которых на станциях вокруг очага эквивалентно полю, создаваемому при внезапном приложении на площадке скольжения равномерно распределённой в её пределах системы взаимно уравновешенных сил.

В процессе работы были исследованы механизмы наиболее сильных вранчских землетрясений, происшедших за период 1940-2014 гг. Наиболее надёжные решения получены для землетрясений с $m_b \geq 3,8$ обеспеченные числом знаков первых смещений не менее 40, числом не согласующихся с найденным решением знаков не более 15%.

Очаги рассматриваемых землетрясений распределены по глубине от 80 до 172 км. Основное их число (72%) приурочено к интервалу 130-160 км (рис. 2.36). Однако к верхнему этажу глубин порядка 90 км принадлежат очаги 4 марта 1977 г. и 30 и 31 мая

1990 г. Землетрясения 22 октября и 10 ноября 1940 г., а также 30 августа 1986 г. произошли на глубине порядка 135-140 км.

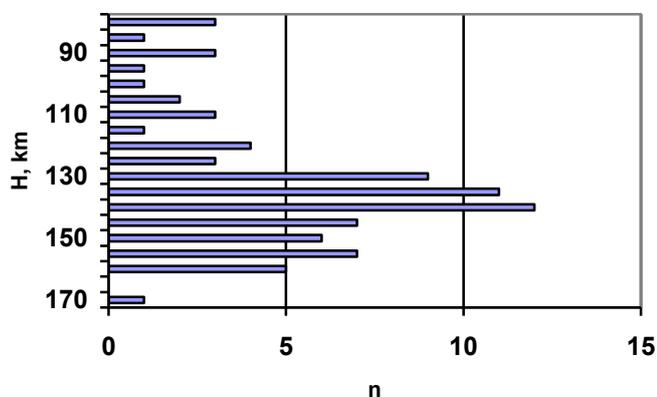


Рис. 2.36. Распределение по глубинам очагов промежуточных землетрясений зоны Вранча за период 1940-2014 гг.

Интервал магнитуд m_b , определяемых по объёмным волнам, для исследуемых землетрясений от 3,8 до 6,4. При магнитуде около значения 6,4 наступает насыщение шкалы, поэтому для некоторых наиболее сильных сейсмических событий: 22 октября 1940 г., 4 марта 1977 г., 30 мая 1990 г. даётся значение M_S , определяемое по поверхностным волнам. Наибольшее число землетрясений попадает в интервал магнитуд $m_b = 4,6-5,1$. В связи с тем, что количество сейсмических станций за последние десятилетия (особенно после землетрясения 1977 г.) значительно возросло, снизился порог магнитуд землетрясений, для которых можно построить надёжное решение механизма очага. На рисунке 2.37 показано распределение очагов землетрясений по магнитудам и глубинам. Гипоцентры землетрясений с магнитудой $M = 4-5$ приурочены к интервалу глубин 110-160 км. Землетрясения с магнитудой $M \geq 6$ отмечены на глубинах порядка 90 и 140 км.

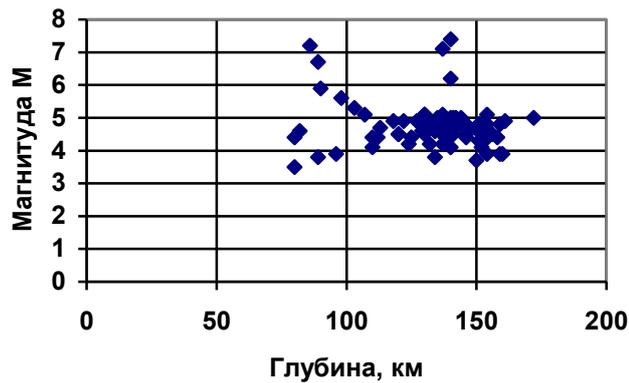


Рис. 2.37. Распределение по магнитудам и глубинам очагов землетрясений.

Положение возможных плоскостей разрыва определяется двумя координатами: азимутом падения Az и углом падения $Slip$. Направления напряжений определяются азимутом Az и углом, составленным осью с горизонтом $P1$.

На рисунке 2.38 а показана диаграмма распределения азимутов Az простирания рабочих нодальных плоскостей $NP1$.

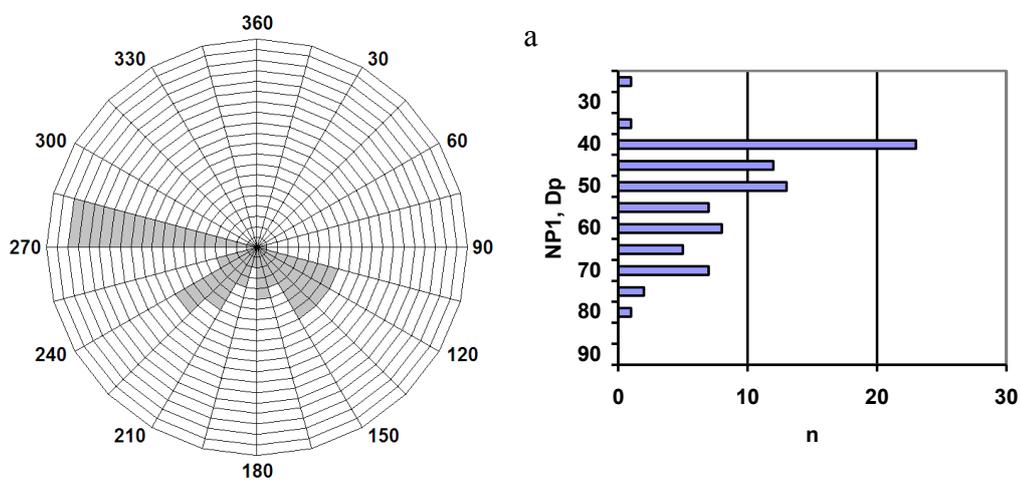


Рис. 2.38 (а, б). Круговая диаграмма распределения азимутов простирания Stk (а) и гистограмма распределения углов падения Dp (б) нодальных плоскостей $NP1$ в очагах вранчских землетрясений

Основные диапазоны азимутов нодальных (рабочих) плоскостей $NP1$ – $105-150^\circ$, $210-240^\circ$ и $270-285^\circ$. К первому диапазону приурочены землетрясения, эпицентры которых расположены в северо-восточной части области Вранча. Ко второму диапазону относятся землетрясения центральной и юго-западной части Вранча. К третьей группе

относится ряд землетрясений юго-западной части очаговой области с глубиной 133-156 км с узким диапазоном ориентации плоскости разрыва в азимуте 273-276°.

На рисунке 2.38 б показано распределение углов падения плоскостей разрыва NP1 в очагах промежуточной глубины.

Как следует из гистограммы, основное число нодальных плоскостей (75 из 80) наклонено по отношению к горизонту в интервале углов 40-70°. Исключения составляют землетрясения 15.01.1969 г., 31.05.1990 г., 21.11.1992 г., 30.11.2002 г., 17.12.2008 г.

На рисунке 2.39 а, б представлено распределение азимутов оси напряжения сжатия P (а) и отклонение её от горизонта (б) в очагах исследуемых землетрясений.

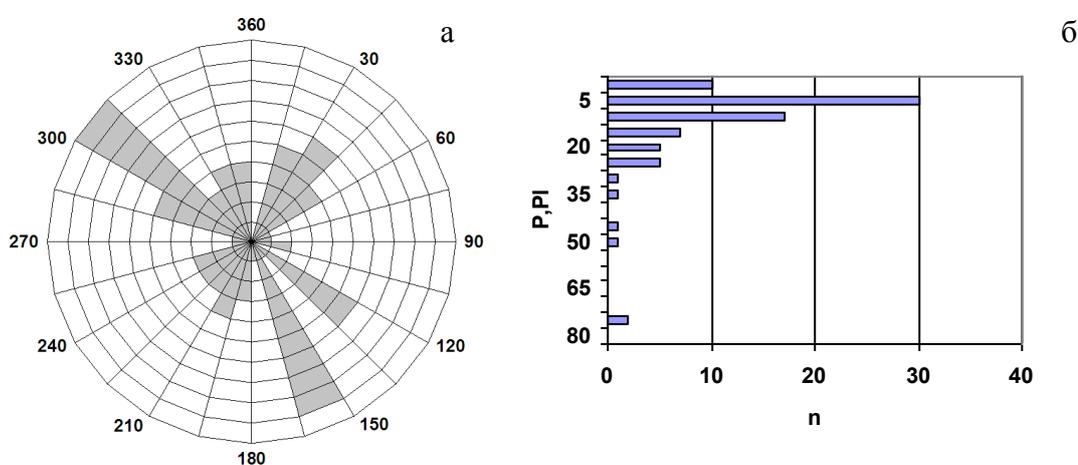


Рис. 2.39 (а, б). Распределения азимутов Az осей напряжения сжатия P (а) и отклонение Pl осей от горизонта (б).

В преобладающем числе случаев (74 из 80) оси сжимающих напряжений составляют с горизонтом углы от 0° до 25°, так что сжимающие напряжения действуют в направлении, близком к горизонтальному.

Рассмотрим азимутальное распределение оси напряжения растяжения T (рис. 2.40 а) и отклонение осей от горизонтали (рис. 2.40 б)

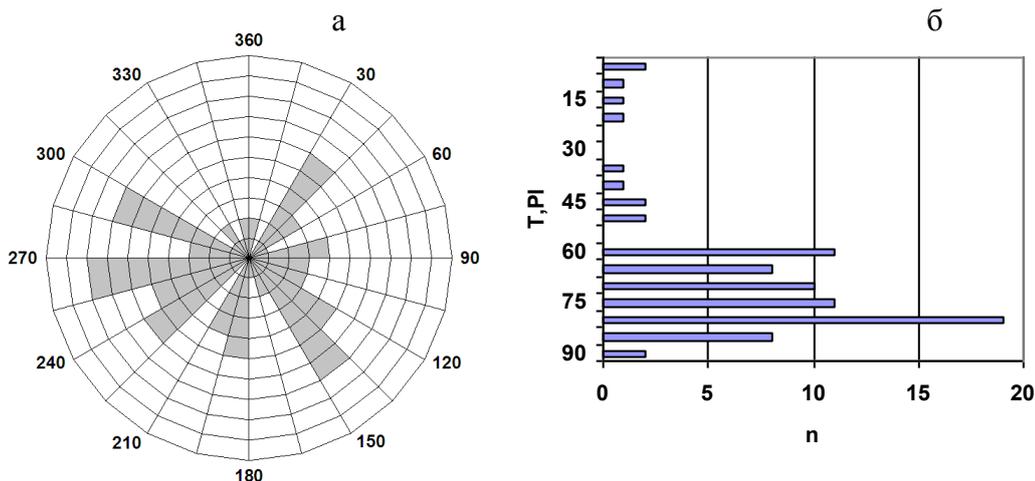


Рис. 2.40 (а, б). Распределения азимутов Az осей напряжения растяжения T (а) и отклонение Pl осей от горизонта (б).

Растягивающие напряжения для 67 из 80 образуют с горизонталью углы от 60° до 85° , т.е. для преобладающего числа землетрясений (84%) направление осей растяжения близко к вертикальному. Для четырёх землетрясений отклонение оси T от горизонтали составляет $7-20^\circ$. Это события 08.01.1988 г., 09.03.2007 г., 17.12.2008 г., 09.10.2009 г.

Для большинства землетрясений оси промежуточных – нулевых напряжений, т.е. направления, вдоль которых не происходит перемещений в очаге, направлены по простиранию хребтов, образуя с горизонтом углы не более 30° . Ось промежуточного напряжения B (рис. 2.41 а, б) для большинства землетрясений близка к горизонтальной.

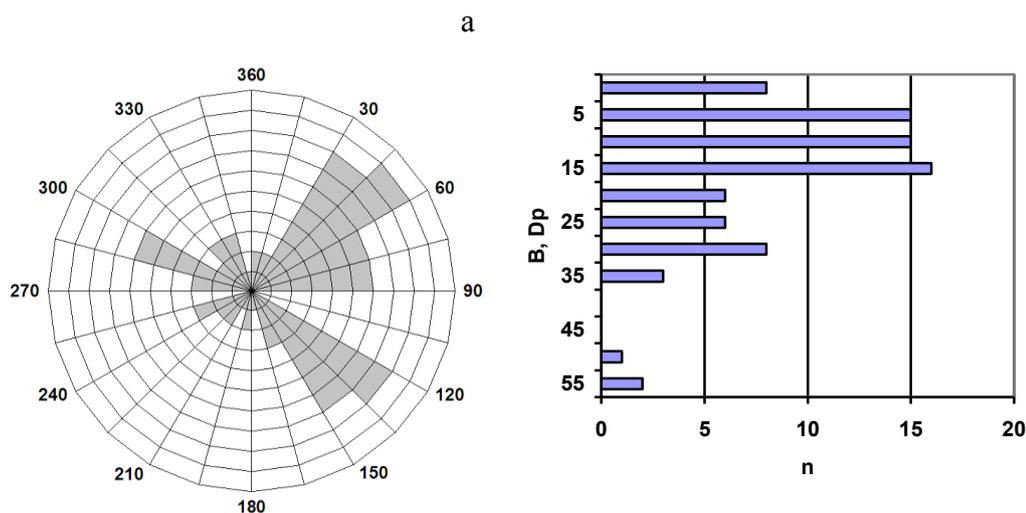


Рис. 2.41 (а, б). Распределения азимутов Az осей промежуточного напряжения B (а) и отклонение Pl осей от горизонта (б).

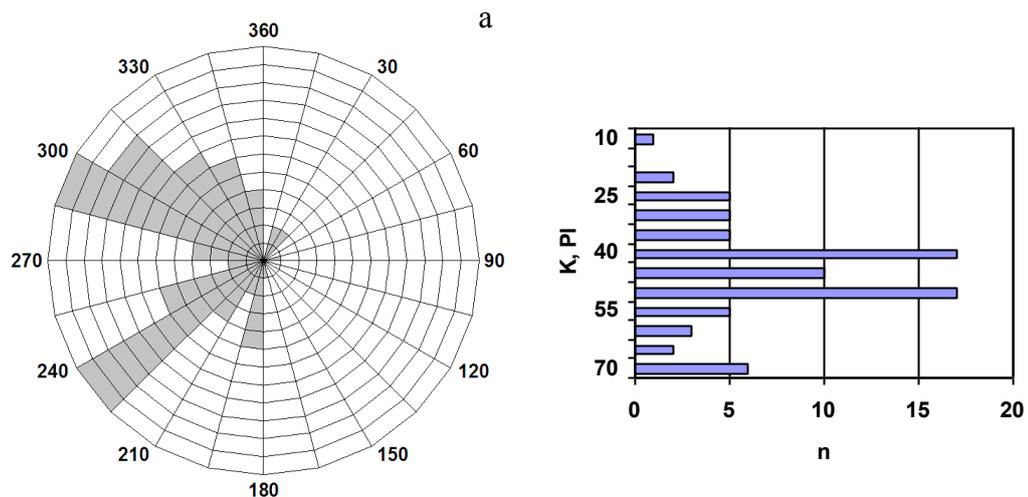


Рис. 2.42 (а, б). Распределения азимутов Az вектора подвижки K (а) и отклонение PI от горизонта (б).

Преобладающие направления вектора подвижки K (рис. 2.42 а, б) в очагах промежуточных землетрясений: юго-западное и северо-западное в диапазонах 225-255° и 285-345° соответственно.

Вектор подвижки K наклонен по отношению к горизонту в основном интервале 30-55°.

По данным о типах подвижек в очагах землетрясений, восстанавливаемых на основе решения механизма очага, можно судить о характере сейсмотектонических движений в регионе. Для определения типа сейсмодислокации полученных фокальных механизмов использовалась система классификации ориентировок, предложенная в работе (Вермишева Л., Гангус А. 1977, с. 103), где всевозможные типы смещений в очагах формально разделены на семь групп. Каждый тип однозначно определяется величиной углов между вертикалью (горизонталью) и осями главных осей напряжений P , B , T .

На рисунке 2.43 показана гистограмма распределения типов исследуемых решений механизма очага вранчских землетрясений. Отсутствуют механизмы сдвигового типа А.

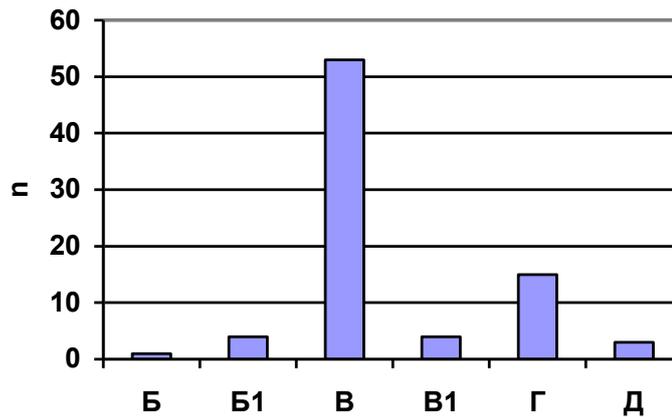


Рис. 2.43. Распределение по типам подвижек в очагах промежуточных землетрясений за 1940-2014 гг.

Б – сбросо-сдвиг, Б1 – взброс, В – надвиг, В1 – нормальный сброс, Г – сдвиго-надвиг, Д – пологий сброс со сдвигом.

Наибольшее число очагов (52) характеризуются надвиговой подвижкой (тип В). Далее по убыванию следуют типы Г, Б₁, Б, Д – сдвиго-надвиг, взброс, сбросо-сдвиг и пологий сброс со сдвигом. Таким образом, большинство очагов характеризуется наклонным положением нодальной плоскости.

Известно, что в области Вранча, расположенной в изгибе Карпатской дуги, существует два главных простирания орогенических структур: северо-западное, связанное с развитием структурных форм Восточных Карпат, и юго-восточное, отражающее особенности развития тектонических элементов Южных Карпат. Переход от одного структурного направления к другому и их взаимодействие проявляется в существовании в этом регионе отдельных структурных границ. Направление осей меняется при движении вдоль Карпатской дуги. На разных участках Карпатской дуги различаются типы тектонических движений. Механизмы очага чётко разделяются по основным типам.

Тип 1 представляет собой комбинацию двух наклонных плоскостей, ориентированных в направлении северо-запад – юго-восток. Таких решений механизма оказалось 25 (31%). Основные рабочие плоскости ориентированы в интервале азимутов 120-169°, т.е. почти параллельно к простиранию Восточных Карпат. Углы падения 34-71°. Оси сжатия ориентированы под углами 1-26° к горизонту. Оси растяжения крутые – 45-88°. Наиболее близкой к направлению оси Восточных Карпат оказывается ориентация промежуточных осей, т.е. осей пересечения нодальных плоскостей.

Резко отличается от первого типа второй тип механизма очага. Он проявился у 17 (21%) землетрясений. И представляет собой комбинацию двух плоскостей простирания запад-восток, т.е. параллельно оси Южных Карпат.

Рабочие плоскости ориентированы в узком интервале азимутов 273-276°. Оси сжатия субвертикальны и направлены субмеридионально. Вторые альтернативные плоскости располагаются менее упорядочено.

Промежуточное положение между типами 1 и 2 занимает тип 3 решений механизма очага, который проявился у 20 (25%) толчков. Он представляет собой комбинацию крутой и пологой плоскости. По крутой плоскости северо-западный борт разрыва надвинут на северо-восточный, в соответствии с продолжающимся воздыманием Карпатских гор и надвиганием на Предкарпатский прогиб. Направление плоскости разрыва параллельно касательной к изгибу горной дуги. Плоскость разрыва оказывается крутопадающей в северо-западном направлении под углами 40-71° в сторону складчатой области Карпат. Азимут – 215-254°.

Подвижки представлены надвигом с незначительной сдвиговой компонентой. Ось растягивающего напряжения T субвертикальна (52-84°), сжимающего P – субгоризонтальна (3-25°) и ориентирована в северо-западном направлении.

Тип 1 механизма очага является преобладающим у исследованных землетрясений.

У некоторых исследованных сейсмических событий (т.е. у 20% толчков) решение механизма не входят ни в один из типов (1, 2 или 3). Имело «аномальный» характер решение механизма очага событие, произошедшее 30 ноября 2002 г. в центральной части области Вранча на глубине 172 км с $m_b = 5,0$. Механизм очага – пологий сброс со сдвигом. Землетрясение 6 января 1968 г. на глубине 163 км с $m_b = 4,6$ носило характер сбросо-сдвига.

Повторное землетрясение сейсмического дубля 31 мая 1990 с очагом на глубине 90 км и с $m_b = 5,9$ было типа взброса. Нодальная плоскость широтного направления.

Событие 08.01.1988 г. произошло в крайней юго-западной части фокальной зоны на глубине порядка 140 км. Характер подвижки в очаге сбросо-сдвиговой.

Очаги землетрясений 05.09.2005 г., 17.12.2008 г. и 09.10.2009 г. располагались в северо-восточной части зоны на глубине 70-89 км. В центре стереографической проекции механизма очага находятся знаки напряжения растяжения, что является нетипичным для области Вранча. Характер механизма сбросовой. Возможно, очаги по происхождению связаны с разломом Тротуш.

Таким образом, для очагов, расположенных вблизи границ фокального образования Вранча, тип механизма изменяется с надвигового на сбросо-сдвиговый.

Чётко проявляется система сейсмогенных разрывов, типичная для островных дуг. Ведущий тип разрывов – надвиги, ориентированные вдоль простирания горной дуги. Они составляют систему субпараллельных разрывов, охватывающих восточный склон Карпат в зоне сочленения с Предкарпатским прогибом. Помимо трёх основных типов механизма очага в разных частях дуги могут существовать разрывы иного типа, имеющие меньший масштаб и связанные, по-видимому, с отдельными локальными геологическими структурами дуги.

Анализ решений механизма очага карпатских землетрясений показал, что в северо-восточной части области Вранча, связанной с развитием структурных форм Восточных Карпат, направление сил сжатия перпендикулярно простиранию этой дуги в азимуте порядка 40° . Рабочие плоскости диагонального простирания, наклонены к горизонту под углом $40-55^\circ$. В юго-западной части области Вранча, отражающей особенности развития тектонических элементов Восточных Карпат, силы сжатия действуют в субмеридиональном направлении. Рабочая плоскость субгоризонтального простирания с азимутом около 275° . Наклон плоскости составляет с горизонталью $40-45^\circ$.

Большинство из рассмотренных землетрясений произошли под действием сжимающих напряжений (P1 оси P менее 20°), три – под действием растягивающих напряжений (P1 оси T менее 20°)

Для вектора подвижки в очагах землетрясений, приуроченных к центральной части области Вранча, на стыке Восточных и Южных Карпат, наиболее опасных для территории Молдовы, характерна самая большая вертикальная (взбросовая) компонента. Северо-западное крыло разрыва надвигается на юго-восточное под углом скольжения $60-65^\circ$.

В работе (Гинтов О. и др. 2015, с. 19), на основе решений механизма очага землетрясений, представленных в статье (Степаненко Н. и др. 2014, с. 152), предпринята попытка тектонофизического и сеймотектонического анализа особенностей сейсмогенеза области Вранча. Выделены очаги трёх доминирующих типов, которые надежно аппроксимируются стереографическими моделями, а образуемые ими зоны довольно уверенно выделяются в плане и в разрезе исследуемой области (рис. 2.44).

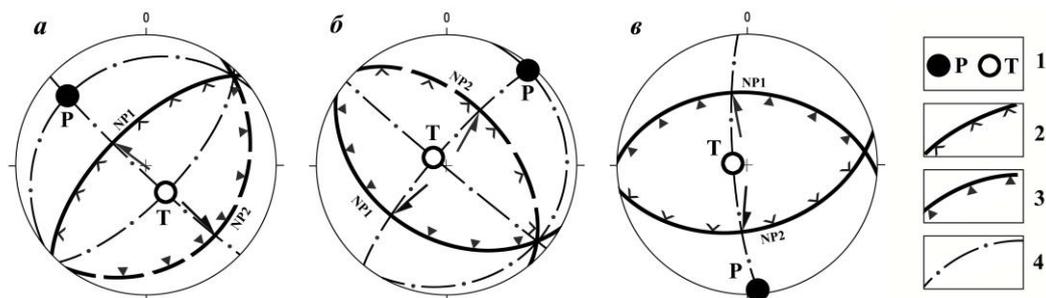


Рис. 2.44. Стереографические модели основных (а – 1-го; б – 2-го; в – 3-го) типов сейсмогенеза области Вранча по (Гинтов О. и др, 2015)

1 – оси максимального (P) и минимального (T) сжатия; 2-3 – структурно-кинематическая идентификация нодальных плоскостей: 2 – взбросы, 3 – надвиги (сплошные – плоскости предполагаемого развития реальных деформаций); 4 – проекции плоскостей парного размещения главных осей напряжений; стрелки – проекции векторов перемещения лежащего крыла разрыва (построения – на нижней полусфере).

На разных участках Карпатской дуги (Восточные, Южные Карпатах и зона их сочленения) различаются типы тектонических движений. Различия в тектонических движениях на разных участках дуги будут проявляться в характеристиках сейсмогенных разрывов. Последние устанавливаются по результатам исследования механизма очага и геологических условий возникновения землетрясений. О характере тектонических процессов, формирующих продольные и поперечные геологические структуры и обуславливающие сейсмогенез в Карпатской дуге, можно судить по результатам изучения происходящих здесь землетрясений.

2.3. Особенности макросейсмического проявления карпатских землетрясений в зависимости от механизма и глубины очага

Сейсмическая опасность территории Республики Молдова определяется влиянием как промежуточных землетрясений (60-180 км) области Вранча в изгибе Карпатской дуги, так и коровыми землетрясениями (0-60 км), происходящими в юго-восточной части Румынии (Предкарпатье и дельта Дуная) и в зоне Чёрного моря.

Макросейсмическая картина для коровых землетрясений Карпатского региона имеет определенные закономерности. Максимальная интенсивность сотрясений фиксируется в ближайших от эпицентра населённых пунктах, с расстоянием макросейсмический эффект довольно быстро убывает. Первые изосейсты повторяют

форму очага. Как правило, макросейсмический эпицентр близок или же совпадает с инструментально определенным.

Для крупных землетрясений промежуточной глубины области Вранча имеет место несовпадение макросейсмического эпицентра плейстосейстовой зоны с инструментально определенным эпицентром. Для этих землетрясений наблюдается нетипичный эффект: более значительному воздействию подвергались населенные пункты, расположенные к востоку от инструментального эпицентра.

Был сделан сравнительный анализ двух крупных землетрясений Карпатского региона с примерно одинаковой магнитудой, близкими координатами эпицентра, но с разными этажами глубин очага. Рассмотрим землетрясения 22 ноября 2014 г. и 23 сентября 2016 г., которые ощущались на территории Республики Молдова (табл. 2.1).

В таблице 2.1 приведены параметры времени, координат, гипоцентров и магнитуды землетрясений 22 ноября 2014 г. и 23 сентября 2016 г. по данным основных сейсмических служб мира (ISC, EMSC, INFP).

Таблица 2.1. Основные параметры землетрясений 22 ноября 2014 г. и 23 сентября 2016 г. по данным различных агентств

Дата	Время t_0 ч м с	φ°	λ°	h, км	Магнитуда M	Агентство
22 11 2014	19 14 17	45,86	27,15	41	$M_L=5,7$	BUC
	19 14 17	45,91	27,24	16	$M_w=5,8$	CSEM
	19 14 17	45,86	27,16	41	$M_w=5,5$; $M_b=5,6$	NEIC
	19 14 18	45,80	27,17	25	$M_w=5,7$	GCMT
23 09 2016	02 11 20	45,81	26,56	90	$M_b=5,7$; $M_D=5,8$	MOLD
	02 11 20	45,71	26,62	91,6	$M_l=5,3$; $M_w=5,7$	BUC
	23 11 20	45,71	26,62	92	$M_w=5,7$	CSEM
	23 11 24	45,8	26,6	85	$M_w=5,7$	GCMT

Из таблицы следует, что оба сейсмических события произошли на одинаковой широте, как показано на рисунке 2.45. Эпицентр корового землетрясения расположен к востоку от промежуточного примерно на $0,5^\circ$ по долготе и не относится к области Вранча. Магнитуда у обоих событий $M_w = 5,7$.

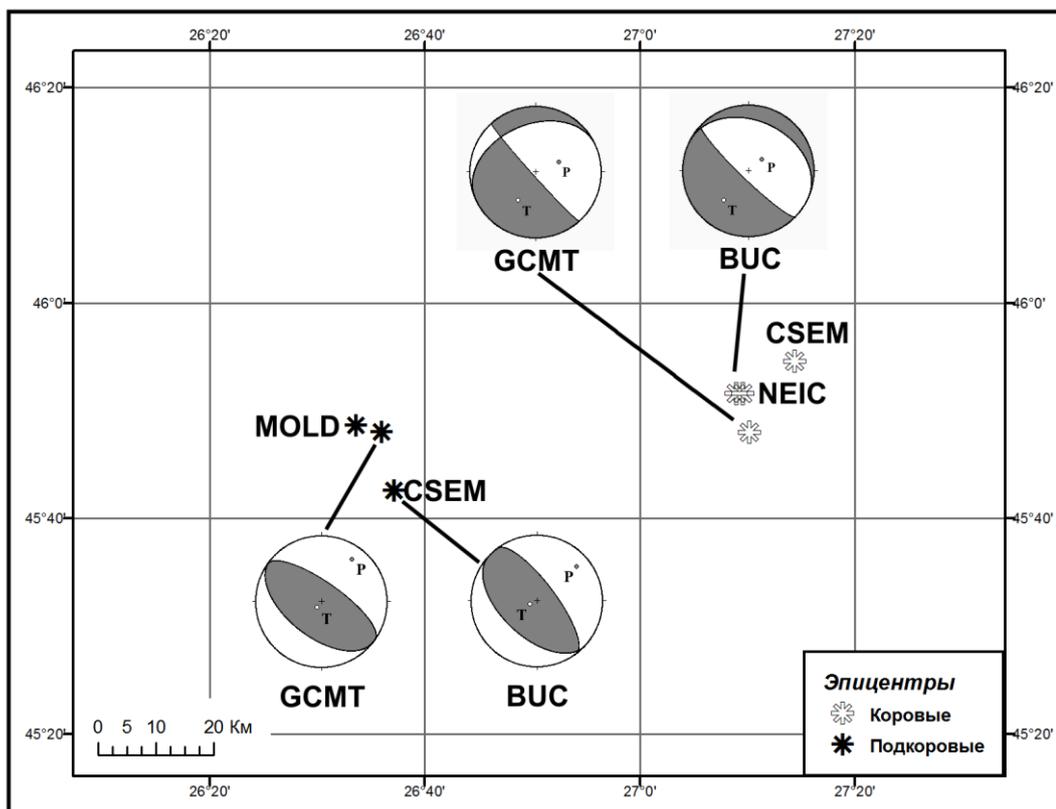


Рис. 2.45. Сравнение эпицентров землетрясений 22 ноября 2014 г. и 23 сентября 2016 г.

Землетрясение 22 ноября 2014 года оказалось наиболее значительным коровым событием за инструментальный период наблюдений. Сеть сейсмических станций Румынии отметила 75 афтершоков в течение 72 часов с наибольшей магнитудой $M = 3.1$ в интервале глубин 16-47 км. Землетрясения в данной зоне продолжались вплоть до 19 января 2015 г. Наибольшим был афтершок 7 декабря с $ML = 4.5$. Очаги связаны с активизацией Печенежско-Каменского разлома. Землетрясение ощущалось в Румынии и соседних странах: Болгарии, Молдове, Украине (ISC, EMSC, INFP).

Событие 22 ноября было рассмотрено в работах (Степаненко Н. и др. 2014, с. 152; Степаненко Н., Карданец В. 2016, с. 220), где собраны и обработаны макросейсмические данные (90 пунктов-баллов) на территории Румынии, Молдовы, Украины и Болгарии. На их основе построена карта изосейст землетрясения, представленная на рисунке 2.46.

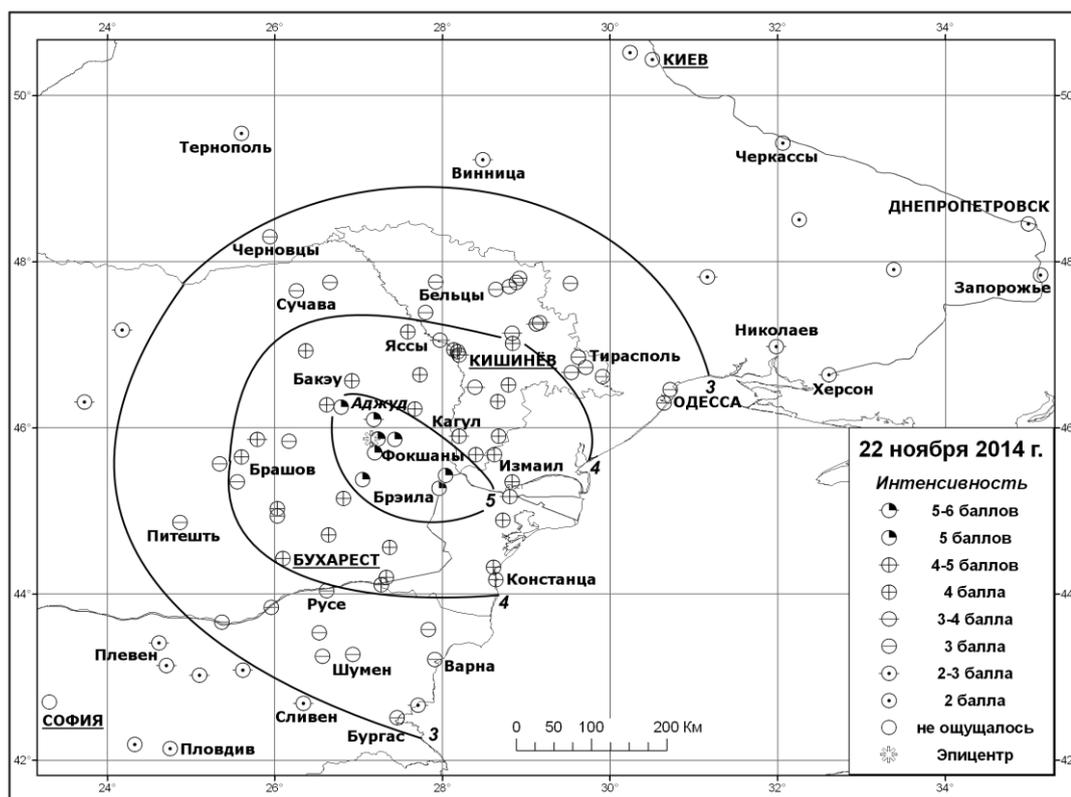


Рис. 2.46. Распределение интенсивности землетрясения 22 ноября 2014 г.

Интенсивность в эпицентре достигала 5-6 баллов. Изолиния в 5 баллов имеет овальную форму, вытянутую параллельно Печенежско-Каменскому разлому. 4-балльные колебания охватывают юго-западную часть территории Молдовы и Украины. На северо-востоке от эпицентра изолиния $I = 3$ балла проходит вдоль дуги Одесса-Винница-Черновцы. На юге – по линии Бургас-Сливен-Свиштов.

Землетрясение промежуточной глубины 23 сентября 2016 г. произошло в области Вранча в $23^{\text{h}} 11^{\text{m}}$ по всемирному времени, по данным различных агентств в пределах глубин 82-96 км. Предыдущее событие такого уровня магнитуд произошло 27 октября 2004 г. Землетрясение 23 сентября сильнее всего проявилось в восточной и южной частях Румынии, существенно отмечалось на севере Болгарии, в Молдове, на юго-западе Украины. А также ощущалось оно в Сербии и Македонии. Отголоски землетрясения дошли до Стамбула (Турция) на юге, до Тираны (Албания) на западе, до Гомеля (Белоруссия) на севере, до Харькова и Мариуполя (Украина) на востоке от эпицентра. Карта изосейст представлена на рисунке 2.47. Подробные макросейсмические данные приведены в (Степаненко Н., Карданец В. 2017, с. 18).

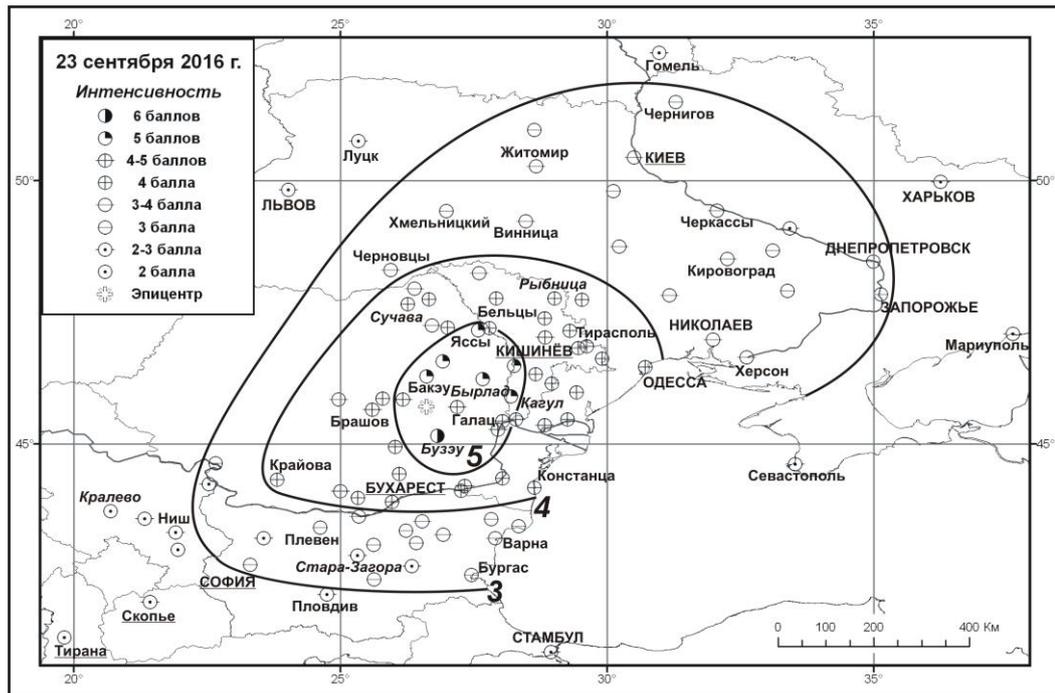


Рис. 2.47. Распределение интенсивности землетрясения 23 сентября 2016 г.

Изолиния $I = 5$ баллов окружает территорию юго-восточной Румынии и юго-запад Молдовы. Изосейста в четыре балла проходит по линии Констанца-Джурджу-Крайова на юге. Также вся территория Молдовы и юго-запад Украины (Одесская область) вошли в 4-балльную зону. Территория 3-балльной интенсивности ограничена дугой Запорожье-Чернигов-Житомир на северо-востоке и Бургас-Пловдив-София на юге.

На рисунке 2.48 показана сводная карта изосейст двух исследуемых землетрясений. Из рисунка видно заметное различие площадей территорий, охваченных колебаниями слабой интенсивности $I = 3$ балла. В случае корового события граница осязаемости доходит до Южного Буга. Для промежуточного события граница доходит до границ России и Белоруссии. При этом на юго-востоке от эпицентров к побережью Чёрного моря, а также на северо-западе изосейсты практически совпадают. Это связано с быстрым затуханием интенсивности из-за многочисленных разломов тектонических структур Добруджи и Карпат.

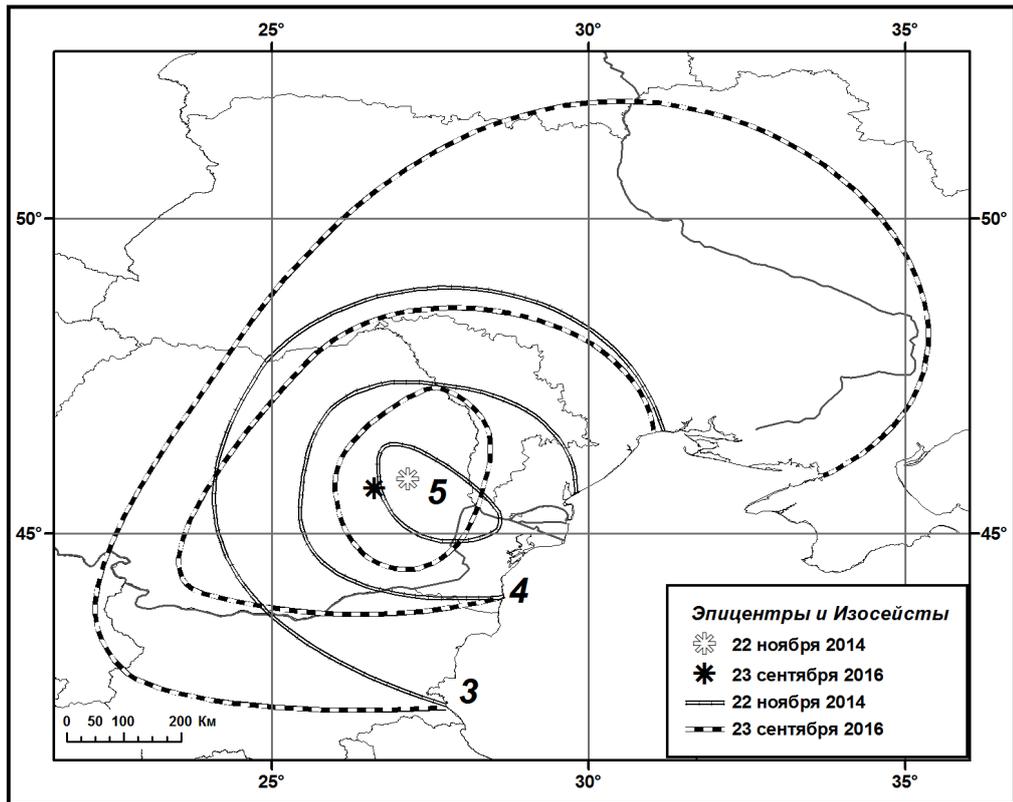


Рис. 2.48. Сравнение изосейст землетрясений 22 ноября 2014 и 23 сентября 2016

На рисунке 2.49 показана зависимость интенсивности от эпицентрального расстояния в направлении на северо-восток от эпицентра (азимут на Кишинёв) для двух типов землетрясений с близкими значениями магнитуд. Глубокое залегание очага землетрясения обуславливает большую территорию, охваченную сотрясениями.

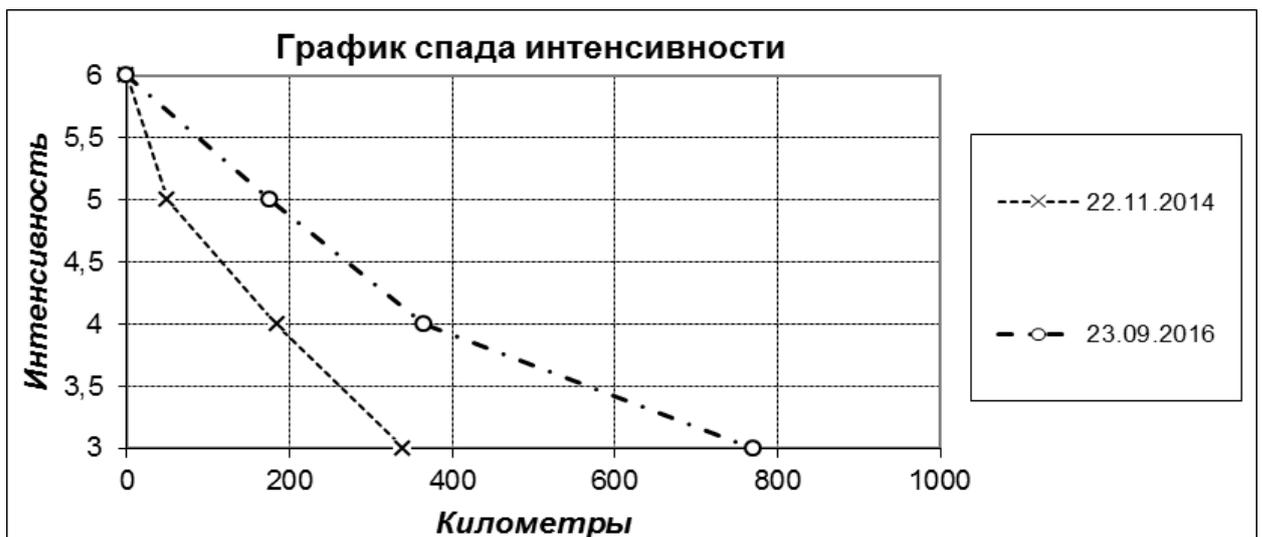


Рис. 2.49. График спада интенсивности в направлении Кишинёва землетрясений 22 ноября 2014 г. и 23 сентября 2016 г.

В каталоге ВUC (INFP) и информационном сообщении (ИОЦ ГС РАН) имеется решение механизма очага землетрясения 22 ноября 2014 г. по методу первых вступлений *P*-волн. Одна из плоскостей крутая, вторая возможная плоскость пологая. Движение в очаге возникло под действием растягивающих напряжений.

Приведены также тензорные механизмы очага по методу тензора сейсмического момента по данным MED, GCMT (ISC), USGS, IPGP, INGV (ИОЦ ГС РАН). Для землетрясения 23 сентября 2016 г. имеется решение механизма очага с помощью тензора момента центра по данным агентств MED GCMT, IPGP, USGS, GFZ, ВUC (ISC, EMSC) Решения представлены в табличном (табл. 2.2) и в графическом виде (рис. 2.50-51) в проекции нижней полусферы.

**Таблица 2.2. Параметры механизма очага карпатских землетрясений
2014 и 2016 гг.**

№	Дата	Плоскость			Плоскость			Напряжения						Источник	
		NP1			NP2			P			B		T		
		Stk	Dp	Slip	Stk	Dp	Slip	Az	P	Pl	Az	Pl	Az		Pl
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	22 11 2014	134	76	-86	295	15	-106	50	60	311	5	220	30	ВUC	
2		138	58	-39	251	58	-141	105	49	284	41	14	0	ИОЦ ГС РАН	
3		148	80	-44	248	47	-166	98	37	318	45	205	21	NEIC	
4		148	89	-57	238	33	-179	82	45	304	30	215	36	IPGP	
5		140	82	-72	247	30	-162	82	56	316	78	210	30	INGV	
6		144	87	-80	252	11	-162	65	47	324	10	225	41	MED	
7		140	84	-74	249	17	-160	67	48	318	16	216	37	GCMT	
8		128	33	92	305	57	89	13	36	2	306	78	220	GCMT	
9	23 09 2016	128	35	91	306	55	89	12	40	2	307	80	219	IPGP	
10		119	31	79	310	58	96	14	37	4	126	76	231	USGS	
11		135	35	98	306	55	84	10	32	4	311	76	162	GFZ	
12		133	32	82	323	58	95	13	49	4	138	77	248	ВUC	

Для корового землетрясения 2014 г. решения по данным разных агентств подобны (рис. 2.50). Во всех случаях одна из нодальных плоскостей наклонена к горизонту субвертикально. Тип движения – левосторонний сдвиг с компонентами сброса. Другая альтернативная плоскость залегает как полого, так и под большим углом. Простираение крутой плоскости согласуется с направлением Печенежско-Каменского разлома.

Для события 2016 г. решения механизма очага согласуются между собой (рис. 2.51). Ось растяжения *T* субвертикальна, ось сжатия *P* субгоризонтальна. Обе нодальные плоскости ориентированы в направлении северо-запад – юго-восток. Одна из них

(рабочая) наклонная, другая крутая. Тип подвижки надвиговой. Нодальная плоскость параллельна простиранию Восточных Карпат.

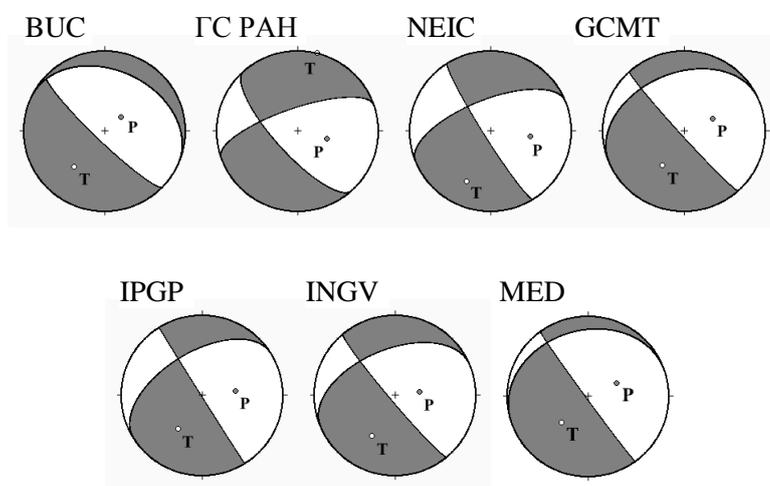


Рис. 2.50. Стереогаммы механизма очага землетрясения 22 ноября 2014 года в проекции нижней полусферы

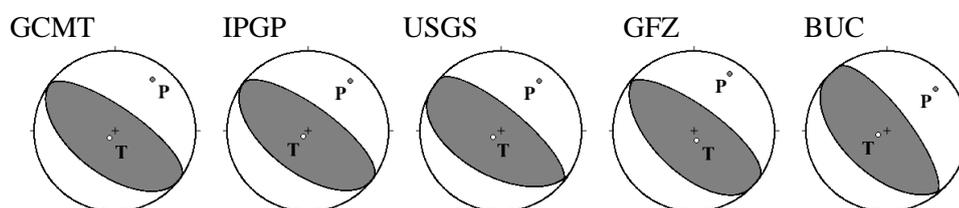


Рис. 2.51. Стереогаммы механизма очага землетрясения 23 сентября 2016 года в проекции нижней полусферы

В центре стереограмм механизма очага промежуточного землетрясения находится область сжатия, зачернённая (рис. 2.51), тогда как для корового очага (рис. 2.50) в центре располагается область разрежения.

Механизм очага корового землетрясения носит сдвиго-сбросовый характер, а механизм очага вранчского промежуточного землетрясения – надвиговой и обусловлен силами сжатия в горизонтальном направлении.

Макросейсмический и инструментальный эпицентр для корового землетрясения 2014 г. района Рымникул-Сэрат совпадают. Для промежуточного землетрясения 2016 г.

наблюдается отклонение инструментального очага от макросейсмического. При землетрясении 2016 г. область максимальных сотрясений смещена к северо-востоку от эпицентра.

2.4. Влияние механизма очага подкорового землетрясения области Вранча на макросейсмический эффект

Полученные решения механизма очага землетрясений области Вранча за период 1940 – 2014 гг. подтверждают ранее сделанные выводы о неоднородном поле напряжений в тектонической структуре региона и о сложном характере процессов разрывообразования в очагах землетрясений, происшедших в различных частях этого региона (Сагалова Е. 1969, с. 70).

Рассмотрим взаимосвязь динамических параметров очагов с геотектоническими структурами, нашедшими свое выражение на поверхности Земли.

Сопоставление установленных общих динамических свойств очагов с наиболее типичными проявлениями тектонических движений показало, что преобладающее простирание плоскости движений в очагах является продольным к простиранию основных складчатых структур горной системы и того разлома, к которому приурочены очаги изучаемых землетрясений. Это простирание параллельно границе Предкарпатского прогиба с горным сооружением. Таким образом, преобладающее направление дислокаций в очагах совпадает с видимыми на поверхности нарушениями. Характеры подвижек разрыва по геологическим данным и по интерпретации решений механизма очага сходны между собой. Движения в разрывах характеризуются явлением взбросо-сдвигов и надвигов (Вермишева Л., Гангус А. 1977, с. 103). Совпадение глубинных деформаций, возникающих в очагах, с элементами основной системы продольных геологических разрывов можно считать доказательством их генетической связи.

Сравнительный анализ различных решений механизма очага землетрясений области Вранча приводит к следующим выводам. Для землетрясений северо-восточной окраины очаговой зоны при первом толчке под действием субгоризонтального сжатия, направленного вкост простирания разломной зоны и субвертикального растяжения, происходит процесс образования разрыва, зоной сильной неоднородности в верхней мантии ограничивающий «тело Вранча». Накопленные напряжения снимаются при повторном толчке, эпицентр которого в 1977 г. располагался к юго-западу, а в 1990 г. к юго-востоку от первого толчка.

Благодаря наблюдаемому в сторону распространения разрыва эффекту Допплера усиливается интенсивность землетрясений в области первых изосейст в 1977 и 1990 г. на юго-запад от эпицентра, а в 1940 и 1986 гг. на северо-восток, усиливая макросейсмическое воздействие в сторону Республики Молдова.

Сжимающие напряжения юго-западной части эпицентральной зоны ориентированы в субмеридиональном направлении. В центральной части силы сжатия действуют в направлении, перпендикулярном к касательной к Карпатской дуге в месте ее изгиба или близком к нему. В северо-западной части направление осей сжатия меняется, их ориентация юго-запад – северо-восток (Степаненко Н. и др. 2006, с. 56).

В очагах землетрясений области Вранча простираение одной из двух возможных плоскостей разрыва направлено в соответствии с простираением Восточных и Южных Карпат и зоной их сочленения. Вторые возможные плоскости разрыва распределяются менее упорядоченно, они образуют большие углы с направлением простираения структур и разломов.

Если рассматривать первую возможную плоскость разрыва, то для промежуточных очагов характерно преобладание движений типа надвигов и взбросов.

Расположение возможных плоскостей разрыва по простираению глубинных разломов и геологических структур и закономерное распределение осей главных напряжений по отношению к тектоническим линиям свидетельствуют о том, что процессы, вызывающие наиболее сильные землетрясения с $M \geq 5$, обусловлены региональной тектоникой: с тектоническими движениями, вызывающими поднятие Карпатских гор.

В области Вранча оси сжимающих напряжений направлены вкост простираения горных систем и разломов, причем оси P близки к горизонтали, а оси растягивающих напряжений T – почти вертикальны. Простираение же одной из возможных плоскостей разрыва близко к простираению тектонических структур.

Для большинства землетрясений оси промежуточных – нулевых напряжений, т.е. направления, вдоль которых не происходит перемещений в очаге, направлены по простираению хребтов, образуя с горизонтом углы не более 30° . Вдоль этого направления обычно вытягивается объемная область очага. Предполагается, что вдоль оси промежуточных напряжений распространяется разрыв в очаге.

Южные Карпаты находятся под действием сил близгоризонтального сжатия субмеридионального направления, а Восточные Карпаты – направления юго-запад –

северо-восток. Разрушительные землетрясения области Вранча происходят в результате суммирования этих сил (Вермишева Л., Гангус А. 1977, с. 103).

Итак, в процессе исследования механизма очага землетрясений области Вранча выявлено три основных типа системы напряжений. Это система, которая характеризуется почти горизонтальными сжатиями, ориентированными в северо-восточном направлении. Она относится к северной ветви Карпатской дуги – Восточным Карпатам. Горизонтальные составляющие другой системы ориентированы в направлении, близком к нормали осевой линии Южных Карпат, в направлении север – юг. В системе третьего типа горизонтальные сжатия направлены перпендикулярно касательной изгиба Карпатской дуги, т. е. с северо-запада на юго-восток.

Механизм очага сильнейших землетрясений XX столетия (10 ноября 1940 г., 4 марта 1977 г., 30 августа 1986 г. и 30 мая 1990 г.) относится к третьему типу. Доминирующая ориентация плоскостей вспарывания северо-восток – юго-запад с большим или меньшим вкладом сдвиговой компоненты. Эта ориентация хорошо согласуется с вытянутостью изосейст в сторону Восточно-Европейской платформы.

По магнитуде наибольшим было разрушительное событие 1940 г., наименьшим – 1990 г. Глубины очагов землетрясений 1977 и 1990 гг. порядка 90 км, координаты эпицентров близки между собой. Очаг землетрясения 1977 состоял из нескольких субочагов (Бунэ В. и др. 1986, с. 126). После землетрясения 30 мая 1990 г. произошло сильное землетрясение 31 мая (сейсмический дубль).

Положение гипоцентра 1940 г. определено недостаточно точно, и данных о процессе вспарывания в очаге мы не имеем, но по аналогии с землетрясением 1986 г. можно предположить, что направление разрыва было с юго-запада на северо-восток. Очаги их залегают примерно на 50 км глубже, поэтому при одинаковой магнитуде интенсивность в эпицентре будет ниже, чем при землетрясениях типа 1977 и 1990 гг. Главные события предварялись форшоками 22 октября 1940 г. и 16 августа 1986 г.

Итак, направления распространения разрывов в очагах этих землетрясений попарно противоположны. В 1940 и 1986 гг. усиление макросейсмического эффекта происходило в направлении вспарывания (на Кишинёв). В 1977 и 1990 гг. процесс разрывообразования был с северо-востока на юго-запад. В створ максимального излучения попал Бухарест.

О направленности распространения разрыва в очаге можно судить по координатам очага, относящимся к начальному моменту процесса (Введенская А. 1969), и полученным по методу ТСМ (Dziewonski A. et al. 1981). Эпицентр землетрясения 1977 г., определённый по методу ТСМ, смещён от эпицентра, соответствующего началу

вспарывания, на 70 – 75 км к юго-западу. На рисунке 2.2 пунктиром показана линия развития процесса разрывообразования и отмечены координаты четырех основных составляющих этого мультиплетного события. Несовпадение эпицентров объясняется тем, что второе решение относится к одному из последующих этапов развития процесса разрывообразования, поскольку для нахождения элементов тензора момента центроида используется вся сейсмограмма землетрясения, которая в процессе расчета усредняется (Сагалова Е. 1969).

Исследование механизма очага землетрясений области Вранча в совокупности с данными о геологическом строении и тектоники Карпатского региона позволяет также объяснить несовпадение инструментального и макросейсмического эпицентра и плейстосейстовых зон для сильных землетрясений.

При землетрясении 1977 г. максимальная интенсивность в 8 – 9 баллов наблюдалась в разных азимутах от эпицентра в соответствии с мультиплетностью события. При землетрясениях 1986 и 1990 гг. область максимальных сотрясений смещена к северо-востоку от эпицентра, расхождение между макросейсмическим и инструментальным эпицентром составляет в первом случае примерно 60 км, во втором – 40 км. Это расхождение, отнесенное к соответствующей глубине гипоцентра, позволяет судить о положении плоскости разрыва в очаге, которая оказывается крутопадающей в северо-западном направлении под углом 65°, что совпадает с выбранной действующей плоскостью в очаге. При землетрясениях 1977 и 1990 гг. изосейсты 3-х и 4-х баллов вытянуты в сторону Москвы, а при более глубоком землетрясении 1986 г. эта вытянутость наблюдается в сторону Воронежа.

Для того, чтобы выявить влияние механизма очага подкорового землетрясения на макросейсмический эффект для Республики Молдова, были построены обобщенные макросейсмические карты за период 1991 – 2002 гг. (Друмя А. и др. 2009, с. 39) для различных направлений нодальных плоскостей (рис. 2.52. а-в). Рассматривались события с $M \cong 5$.

Визуальный анализ наблюдаемых сотрясений в зависимости от ориентации плоскости разрыва показал следующее. Увеличение интенсивности колебаний почвы наблюдается: в случае а) – в северной части республики, б) – в северо-восточном направлении, в) – к востоку. При равных величинах землетрясений наблюдаемый макросейсмический эффект проявляется сильнее в случае (б). Можно сказать, что землетрясения с ориентацией нодальных плоскостей на северо-восток – юго-запад являются наиболее опасными для территории Республики Молдова.

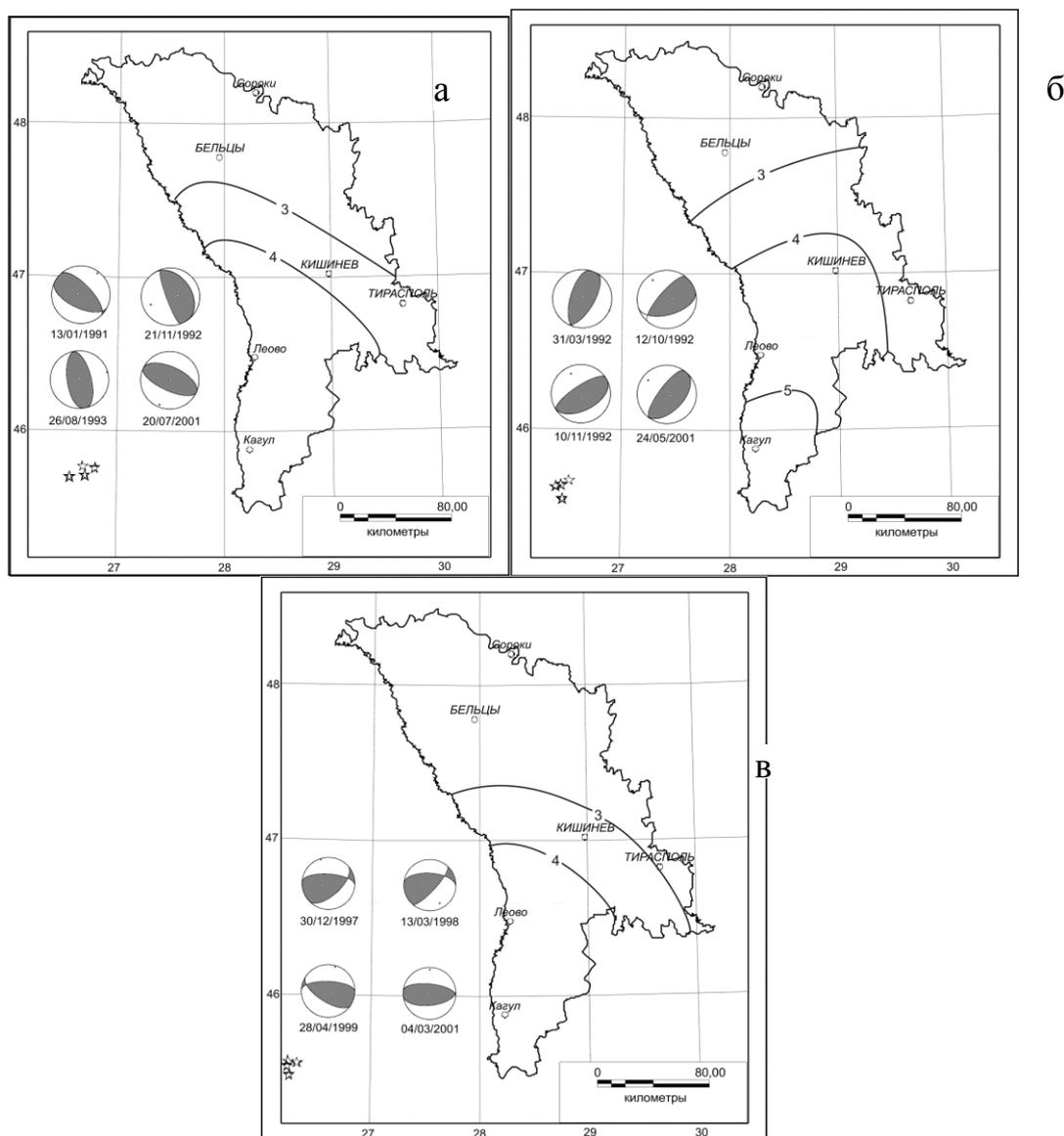


Рис. 2.52. а - в. Макросейсмический эффект на территории Республики Молдова

от вранчских очагов в зависимости от ориентации нодальных плоскостей:

а) – северо-запад – юго-восток, б) – северо-восток – юго-запад, в) – восток – запад.

Звездочкой отмечены эпицентры используемых для расчета землетрясений.

2.5. Выводы к главе 2

- На основе анализа решений механизма очага 34 карпатских землетрясений зоны Вранча, произошедших за период 1977-2014 гг., по знакам вступлений продольных волн и по методу тензора сейсмического момента (ТСМ), показал, что в небольшом сейсмогенном объёме наблюдается различная ориентация плоскостей разрыва в соответствии с приуроченностью эпицентров к различным частям Карпатской

горной дуги. Большинство из рассмотренных землетрясений области Вранча произошли под действием сжимающих субгоризонтальных напряжений; три коровых землетрясения имели сдвиго-сбросовый характер. Для промежуточных очагов характерна субвертикальная ориентировка области сжатия и соответствующей оси растяжения, а для коровых наблюдается противоположная ситуация – субвертикальная ориентация области растяжения и оси сжатия.

- Сравнение решений, полученных по знакам *P*-волн, с решениями ТСМ показывает практическую их схожесть. Для некоторых землетрясений, при одинаковом типе подвижки, отдельные различия отмечаются лишь в ориентации нодальных плоскостей и осей главных напряжений. Возможно, это связано с использованием различных методик определения решений механизма очага: начальный этап процесса разрывообразования и срединный. Поэтому для более полной характеристики очагов землетрясений в Карпатском регионе, следует применять оба метода, дополняющие друг друга. Данный подход поможет точнее определить, принадлежность того или иного землетрясения к одному из типов, имеющих место в этой части Карпатского региона.
- На разных участках Карпатской дуги идентифицированы три основных типа механизма очага землетрясения и соответствующих им макросейсмическому эффекту. Тип 1 представляет собой комбинацию двух наклонных плоскостей, ориентированных в направлении северо-запад – юго-восток. Таких решений механизма оказалось 25 (31%). При этом типе увеличение интенсивности колебаний почвы наблюдается в северной части Республики Молдова. Второй тип механизма очага проявился у 17 (21%) землетрясений. И представляет собой комбинацию двух плоскостей простирания запад-восток, т.е. параллельно оси Южных Карпат, с увеличением интенсивности колебаний к востоку. Промежуточное положение между типами 1 и 2 занимает тип 3 решений механизма очага, который проявился у 20 (25%) землетрясений. Он представляет собой комбинацию крутой и пологой плоскости. Направление плоскости разрыва параллельно касательной к изгибу горной дуги, с увеличением интенсивности колебаний в северо-восточном направлении.
- Наиболее опасными для территории Молдовы являются землетрясения центральной части области Вранча (3-й тип), приуроченной к зоне стыка Восточных и Южных Карпат. Именно такой тип механизма соответствует очагам

наиболее сильных разрушительных землетрясений XX века: 10 ноября 1940 г., 4 марта 1977 г., 31 августа 1986 г. и 30 мая 1990 г.

- Сравнительный анализ двух сопоставимых по магнитуде землетрясений, корового и подкорового (промежуточной глубины), показал, что для подкорового землетрясения наблюдается отклонение инструментального очага от макросейсмического, область максимальных сотрясений смещена к северо-востоку от эпицентра. Так как распространению сейсмических волн в северо-западном и юго-восточном направлениях препятствуют многочисленные разломы, затухание в этих направлениях происходит примерно одинаково. А в северо-восточном и юго-западном направлениях затухание интенсивности от землетрясений промежуточной глубины происходит гораздо медленнее. Поэтому ощутимые сотрясения от них охватывают намного большие площади территорий, чем от коровых землетрясений, для которых характерны концентрические зоны интенсивности правильной формы. Механизм очага корового землетрясения носит сдвиго-сбросовый характер, а механизм очага вранчского промежуточного землетрясения – надвиговый и обусловлен силами сжатия в горизонтальном направлении.

3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ИСТОРИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

3.1. Методология вычисления параметров исторических землетрясений по макросейсмическим данным

Тип любого землетрясения определяется, прежде всего, по его параметрам. И уже, исходя из этих параметров, мы получаем общее представление о каждом из землетрясений.

К основным параметрам землетрясения относятся: координаты эпицентра (в том числе и макросейсмического), глубина очага (H), магнитуда (M), интенсивность в эпицентре (I_0). Другие параметры: ориентация (простираение) очага, горизонтальная протяжённость очага, вертикальная протяжённость очага, падение плоскости разрыва, площади зон интенсивности, азимут большой оси, расстояние до наиболее удалённого пункта и др.

Для современных землетрясений все эти параметры определяются на основе полученных инструментальных данных. Что касается исторических землетрясений, то их параметры можно определить только по «косвенным» данным, вычисленных по собранным и обработанным макросейсмическим сведениям. Таким образом решается обратная задача установления параметров источника (причина) по наблюдениям (следствие).

Дополнительно проводится обмер некоторых других показателей карты пунктов-баллов и карты изосейст. Для каждой изосейсты, начиная с первой, измеряются и рассчитываются следующие элементы:

- Площадь, S_I ;
- Средний радиус, $r_I = \sqrt{(S_I/\pi)}$;
- Азимут большой оси, α_m ;
- Общее число пунктов в полосе I-го балла, n_I .

Кроме того, проводятся измерения на всей карте изосейст в целом:

- Расстояние от эпицентра до наиболее удалённого пункта;
- Азимут от эпицентра на наиболее удалённый пункт;
- Азимут от эпицентра до наиболее удалённой точки дальней изосейсты.

Труды многих сейсмологов посвящены определению параметров землетрясений, например, Н.В. Шебалин (2003), А. Исмаил-Заде (2007, 2012).

Площадь измеряется как полная площадь внутри контура данной изосейсты (т.е. с включением площади, занятой изосейстами высших баллов). В случае исторических землетрясений, для которых зачастую не хватает данных, чтобы построить изосейсты всех уровней, при определении полной площади осязаемости лучше ограничиться низшей изосейстой присутствующей на большинстве карт землетрясений. Азимут большой оси измеряется по часовой стрелке от направления к северу, от 0° до 180° . Азимуты от эпицентра до наиболее удалённых точек (пункт и изосейста) измеряются от 0° до 360° . Из двух последних азимутов более показателен азимут на дальнюю изосейсту, так как отдельные пункты присутствуют на карте не во всех направлениях. Средний радиус рассчитывается по площади, независимо от степени генерализации изосейсты.

Макросейсмический эпицентр определяется как точка внутри первой изосейсты, вблизи пункта (или пунктов) с максимально наблюдаемой балльностью, являющаяся, как правило, центром симметрии всей системы изосейст. Это требование может быть противоречивым, и тогда предпочтение отдаётся положению пункта (группе пунктов) с максимальной балльностью. Допускается определение эпицентра по математическому центру зоны наивысшего балла. В случае если выделены изосейсты локального эпицентрального эффекта смещённые в сторону от центра симметрии удалённых изосейст, по макросейсмическим данным могут фиксироваться два эпицентра – основной (нормальный) и локальный. Все случаи несовпадения эпицентров, определённых по макросейсмическим и по инструментальным данным, превышающего суммарную ошибку их определений, должны оговариваться в каталогах. Высший приоритет имеет инструментальное определение.

Использование макросейсмических данных позволяет оценить глубину очага двумя способами: по скорости спада балльности с расстоянием H_I и по соотношению инструментальной магнитуды и балльности в Эпицентре H_{IM} . Эти величины совпадают редко, но в их соотношении проявляется определённая закономерность: сеймотектонические характеристики зон, где в среднем $H_I > H_{IM}$. Если H_I и H_{IM} различаются меньше, чем в два раза, их среднее является хорошей, достаточно точной оценкой глубины. Если они различаются больше, чем в два раза, суждение о глубине становится опасным. В таких случаях следует проверить предположение о значительной вертикальной протяжённости очага, желательно также сравнить записи землетрясения в разных частотных диапазонах. В таких случаях следует публиковать оба определения, отдельно публикуется и глубина очага по инструментальным данным.

В случае менее чем двукратного расхождения двух макросейсмических определений их среднее имеет высший приоритет. При большем расхождении для неглубоких землетрясений приоритет имеет макросейсмическое определение, более близкое к инструментальному. Для глубоких землетрясений высший приоритет имеет инструментальное определение глубины.

Для исторических доинструментальных землетрясений глубина определяется только по первому способу в его различных вариантах, по формулам подобранных для специфических условий каждого сейсмического региона.

По макросейсмическим данным магнитуда в обязательном порядке определяется для исторических землетрясений. Для текущих землетрясений рекомендуется в методических целях определение магнитуды для всех землетрясений с достаточно хорошими картами пунктов-баллов и изосейст (карта пунктов-баллов – не менее 15 пунктов трёх различных балльностей, карта изосейст – не менее трёх надёжных изосейст).

Ориентация (простираение) очага определяется как средний азимут большой оси первой изосейсты (в случае сильных локальных эффектов – первой «нормальной» изосейсты). Максимальное распространение макросейсмического эффекта определяется по азимуту на наиболее отдалённую точку дальней изосейсты с учётом азимута на наиболее удалённый пункт, в котором ощущалось землетрясение. Этот параметр часто уточняет общее простираение разрывообразований в очаге.

3.2. Факторный анализ параметров землетрясения методом главных компонент

При исследовании многопараметрических процессов встаёт вопрос: какие из параметров несут значимый вклад в предлагаемую модель, нельзя ли отбросить часть параметров или заменить их меньшим числом каких-то функций от них, сохранив при этом всю информацию. В исследовании сложной природы сейсмичности факторный анализ позволяет глубже понять сущность сейсмических процессов, взаимосвязи между параметрами различных уровней (Буртиев Р., Карданец В. 2020).

Проведение анализа параметров механизма очага землетрясений Вранча, на основе модели главных компонент, помогает точнее определить, насколько эти параметры влияют на затухание интенсивности сейсмических воздействий. Значения исследуемых параметров могут быть обусловлены скрытыми факторами, неочевидными при непосредственном наблюдении. С помощью метод главных компонент факторного анализа возможно выявление причин, обуславливающих значимую корреляционную связь

между параметрами модели и определение минимального числа факторов, которые составляют наибольшую долю в дисперсии данных (Бахтин А. и др. 2007). Классическая функция затухания учитывает значения 3-х параметров: магнитуды, глубины и эпицентрального расстояния. Необходимо проверить вклад параметров механизма очага землетрясения в уравнение макросейсмического поля.

Аналізу подвергается массив сейсмических данных, состоящий из значений 15 параметров, характеризующих основные параметры землетрясения, механизм и геометрию очага области Вранча:

M_w – моментная магнитуда;

R – гипоцентральное расстояние;

Az_{im} – азимут на самый отдалённый пункт;

NP1st_k – простирание нодальной плоскости 1;

NP1dp – угол падения нодальной плоскости 1;

NP1slip – смещение нодальной плоскости 1;

NP2st_k – простирание нодальной плоскости 2;

NP2dp – угол падения нодальной плоскости 2;

NP2slip – смещение нодальной плоскости 2;

Pa_z – азимут оси сжатия;

Pp_l – угол оси сжатия;

Ва_z – азимут нейтральной оси;

Vp_l – угол нейтральной оси;

Ta_z – азимут оси растяжения;

Tr_l – угол оси растяжения.

Факторный анализ позволяет исследовать структуру взаимосвязей переменных, где каждая группа переменных будет определяться фактором, по которому эти переменные имеют максимальные нагрузки. Результатом факторного анализа является переход от множества исходных переменных к меньшему числу новых переменных – компонентам, которая при этом интерпретируется как скрытая переменная – причина совместной изменчивости (взаимосвязи) нескольких исходных переменных. Применение факторного анализа начинается с вычисления описательных статистик массива наблюдаемых значений над 15-мерными случайными величинами, характеризующие основные

параметры землетрясения, механизм и геометрию очага области Вранча. Рассматривались значения параметров 82 землетрясений, зарегистрированных в Молдове.

По значениям таблицы (таб. 3.1) видно, что величины статистических характеристик параметров имеют большой разброс, то есть их значения измерены в различных единицах, несопоставимых между собой, поэтому их следует привести к единому масштабу с помощью стандартизации:

$$X_{ij}^s = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{\sigma_j} \quad (1)$$

где X_{ij} – значение j -го параметра в i -м наблюдении, \bar{X}_j – среднее значение j -го параметра, σ_j – стандартное отклонение j -го параметра.

Таблица 3.1. Описательная статистика

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>	<i>Стандартное отклонение</i>	<i>N</i>
<i>I</i>	5,1380	1,47745	9914
<i>Mw</i>	6,8200	0,68015	9914
<i>R</i>	641,4406	776,26918	9914
<i>Azim</i>	176,8295	95,23605	9914
<i>np1stk</i>	206,0295	61,68680	9914
<i>np1dp</i>	53,7408	18,12259	9914
<i>np1slip</i>	92,1033	29,92217	9914
<i>np2stk</i>	84,7021	108,54354	9914
<i>np2dp</i>	38,8398	19,16654	9914
<i>np2slip</i>	73,3290	28,41213	9914
<i>paz</i>	209,8088	114,53092	9914
<i>ppl</i>	18,9177	10,19420	9914
<i>baz</i>	68,8550	45,65304	9914
<i>bpl</i>	12,1869	5,55001	9914
<i>taz</i>	190,5526	60,39683	9914
<i>tpl</i>	67,0351	9,75051	9914

Первое представление о наличии зависимых параметров можно получить по корреляционной матрице (таб. 3.2), которая характеризует степень корреляционной связи между параметрами исходного массива. Чем выше доля высоких корреляций, тем лучше

данные подходят для факторного анализа. Например, значение коэффициента корреляции между параметрами $np1dp$ в $NP1$ и $np2dp$ в $NP2$, составляет -0.993, что свидетельствует об очень высокой степени обратной зависимости между параметрами и является основанием для их включения в одну группу.

Таблица 3.2. Корреляционная матрица

Компоненты	Параметры функции затухания			Нодальные плоскости						Оси главных напряжений					
				NP1			NP2			P		B		T	
	M_w	$\ln R$	$azim$	$np1stk$	$np1dp$	$np1slip$	$np2stk$	$np2dp$	$np2slip$	paz	ppl	baz	bpl	taz	tpl
M_w	1,000	-,548	,192	,430	,367	,559	-,513	-,370	,066	,582	-,043	-,713	-,003	-,270	,147
$\ln R$	-,548	1,000	-,168	,040	,113	-,234	-,064	-,110	-,195	-,006	-,086	,409	,013	-,131	,067
$azim$,192	-,168	1,000	,082	,082	,103	-,108	-,083	-,005	,120	-,008	-,174	,013	-,041	,035
$np1stk$,430	,040	,082	1,000	,543	,665	-,820	-,488	-,329	,580	-,469	-,506	,379	,034	,278
$np1dp$,367	,113	,082	,543	1,000	,223	-,830	-,993	-,336	,884	,277	-,535	-,315	-,623	-,101
$np1slip$,559	-,234	,103	,665	,223	1,000	-,447	-,229	,357	,477	-,672	-,620	,092	-,040	,674
$np2stk$	-,513	-,064	-,108	-,820	-,830	-,447	1,000	,796	,323	-,862	,065	,599	-,098	,432	-,082
$np2dp$	-,370	-,110	-,083	-,488	-,993	-,229	,796	1,000	,268	-,895	-,283	,545	,397	,677	,056
$np2slip$,066	-,195	-,005	-,329	-,336	,357	,323	,268	1,000	-,093	-,327	-,006	-,354	-,250	,595
paz	,582	-,006	,120	,580	,884	,477	-,862	-,895	-,093	1,000	,036	-,688	-,232	-,672	,196
ppl	-,043	-,086	-,008	-,469	,277	-,672	,065	-,283	-,327	,036	1,000	,079	-,457	-,356	-,845
baz	-,713	,409	-,174	-,506	-,535	-,620	,599	,545	-,006	-,688	,079	1,000	,032	,169	-,242
bpl	-,003	,013	,013	,379	-,315	,092	-,098	,397	-,354	-,232	-,457	,032	1,000	,625	,048
taz	-,270	-,131	-,041	,034	-,623	-,040	,432	,677	-,250	-,672	-,356	,169	,625	1,000	-,053
tpl	,147	,067	,035	,278	-,101	,674	-,082	,056	,595	,196	-,845	-,242	,048	-,053	1,000

Наибольшая степень корреляции в матрице наблюдается между следующими параметрами (таб. 3.2):

- ,993 — $np1dp$ — $np2dp$;
- ,895 — $np2dp$ — paz ;
- ,884 — $np1dp$ — paz ;
- ,862 — $np1stk$ — paz ;
- ,845 — ppl — tpl ;
- ,830 — $np1dp$ — $np2stk$;
- ,820 — $np1stk$ — $np2stk$;
- ,796 — $np2stk$ — $np2dp$.

В методе главных компонент после вычисления корреляционной матрицы, производится её ортогональное преобразование и по значениям элементов матрицы определяются факторные нагрузки.

3.2.1. Определение оптимального числа компонентов факторной модели

Количество факторов определяется числом собственных значений корреляционной матрицы, превосходящих единицу. Из таблицы 3.3 видно, что четыре собственных значения больше единицы, то есть определено четыре фактора. Первый фактор объясняет 37,57% суммарной дисперсии, второй фактор 21,7%, третий фактор 14,38%, и четвертый 11,32%. В четвертом столбце этой таблицы (суммарный %) содержится процент дисперсии, который сохранился при проведении факторного анализа. Например, если число факторов в факторной модели равно числу признаков – в данном случае 15, т.е. группировка признаков не производится, исходная информация будет сохранена на 100%. Повёрнутая сумма квадратов нагрузок характеризует собственные значения и объяснимую дисперсию всех факторов с собственными значениями, превышающими единицу после вращения.

Во втором столбце таблицы («Всего») указываются собственные значения. В рассматриваемом примере было задано условие: значение характеристических чисел должно быть больше единицы. Максимальное значение компонентов факторной модели, в которой данный показатель превышает единицу, составляет 4. Это означает, что оптимальное число групп в факторной модели составляет 4.

Таблица 3.3. Объясненная совокупная дисперсия

Компонент	Начальные собственные значения			Сумма квадратов нагрузок для извлечений			Повёрнутая сумма квадратов нагрузок		
	Всего	% дисперсии	суммарный %	Всего	% дисперсии	суммарный %	Всего	% дисперсии	суммарный %
<i>M_w</i>	5,635	37,567	37,567	5,635	37,567	37,567	5,121	34,138	34,138
<i>azim</i>	3,255	21,697	59,264	3,255	21,697	59,264	3,041	20,272	54,411
<i>np1stk</i>	2,157	14,380	73,644	2,157	14,380	73,644	2,354	15,696	70,107
<i>np1dp</i>	1,703	11,352	84,996	1,703	11,352	84,996	2,233	14,889	84,996
<i>np1slip</i>	,926	6,176	91,172						
<i>np2stk</i>	,438	2,920	94,092						
<i>np2dp</i>	,298	1,987	96,078						
<i>np2slip</i>	,227	1,515	97,593						
<i>paz</i>	,180	1,202	98,795						
<i>ppl</i>	,079	,525	99,320						
<i>baz</i>	,055	,364	99,685						
<i>bpl</i>	,031	,204	99,889						
<i>taz</i>	,011	,074	99,963						
<i>tpl</i>	,004	,030	99,993						
<i>lnR</i>	,001	,007	100,000						

Как видно из данных, представленных в таблице 3.3, факторная модель, состоящая из 4-х факторов, сохраняет практически 85% (84.996%) исходной информации. Как отмечалось ранее, при группировке исходного массива параметров потеря информации неизбежна. Сохранение информации всего лишь на 60% считается достаточно хорошим показателем. Обычно при проведении факторного анализа используются первые главные компоненты, суммарная доля дисперсии которых превышают 60%. Учитывая, что в ходе факторного анализа число параметров сокращается в несколько раз, даже при большой потере информации, 40%, например, применение факторной модели считается целесообразным.

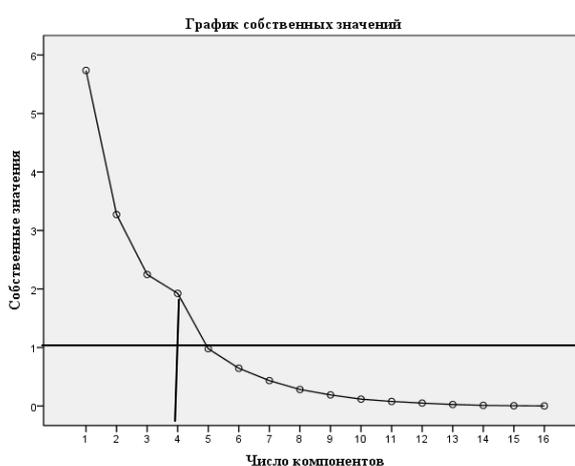


Рис. 3.1. График собственных значений

График собственных значений полезен при определении числа факторов. Количество факторов определяется числом факторов, где начинается резкий спад. После данного числа факторов исследуемая зависимость близка к горизонтальной линии, то есть замедляется убывание собственных значений. Как видно на рисунке 3.1, точка перегиба находится на 4-м факторе, то есть выделяется 4 фактора.

Этот метод используется при определении достаточного числа факторов перед вращением, целью которого является определение простой модели, где каждому параметру соответствует большое значение факторной нагрузки по одному фактору и малое по всем остальным. Факторные нагрузки определяются коэффициентами корреляции между исходными параметрами и факторами (таб. 3.4). Объяснение выявленных факторов, и включение отдельного параметра в один фактор, осуществляется по величине корреляции данного параметра с данным фактором (факторной нагрузки).

Факторный анализ основан на вращении факторов, для получения простой структуры зависимости между параметрами, где большое значение факторной нагрузки каждого параметра соответствует только одному фактору и малое по остальным. Обычно применяется вариант вращения «Варимакс», который является ортогональным, поскольку при таком вращении оси остаются расположенными под прямым углом. При ортогональном вращении каждый последующий фактор определяется так, чтобы максимизировать дисперсию, оставшуюся от предыдущих факторов, поэтому факторы оказываются независимыми, некоррелированными между собой.

Таблица 3.4. Матрица компонент

	Компоненты			
	F_1	F_2	F_3	F_4
<i>paz</i>	,959	-,126	-,076	,098
<i>np2stk</i>	-,908	,038	-,305	-,109
<i>np1dp</i>	,874	-,417	,092	,139
<i>np2dp</i>	-,874	,424	,003	-,154
<i>baz</i>	-,775	-,219	,055	,372
<i>np1stk</i>	,720	,381	,502	,124
<i>MW</i>	,675	,220	-,133	-,532
<i>taz</i>	-,549	,470	,536	-,250
<i>ppl</i>	-,052	-,924	-,066	-,338
<i>tpl</i>	,219	,765	-,368	,393
<i>np1slip</i>	,601	,716	-,153	,011
<i>np2slip</i>	-,113	,411	-,854	,094
<i>bpl</i>	-,156	,503	,736	-,093
<i>lnR</i>	-,101	-,210	,236	,865
<i>azim</i>	,170	,067	-,033	-,323

Таблица 3.5. Повернутая матрица компонент

	Компоненты			
	F_1	F_2	F_3	F_4
<i>np1dp</i>	,953	-,155	-,175	,051
<i>np2dp</i>	-,937	,125	,266	-,054
<i>np2stk</i>	-,935	-,097	-,171	-,136
<i>paz</i>	,915	,149	-,211	,215
<i>np1stk</i>	,710	,359	,532	,120
<i>tpl</i>	,029	,956	-,088	-,032
<i>ppl</i>	,078	-,901	-,389	,084
<i>np1slip</i>	,351	,785	,100	,384
<i>np2slip</i>	-,368	,630	-,607	,135
<i>bpl</i>	-,121	,131	,892	,009
<i>taz</i>	-,554	,029	,749	,049
<i>lnR</i>	,209	,039	,035	-,901
<i>MW</i>	,415	,175	-,025	,776
<i>baz</i>	-,561	-,228	-,018	-,650
<i>azim</i>	,058	-,015	,021	,368

В каждой строке повернутой матрицы компонентов (таб. 3.5), отмечается факторная нагрузка, которая имеет максимальное абсолютное значение. Например, параметр $np1dp$, максимально коррелирует с 1 фактором – величина корреляции составляет 0.953. Последующие параметры ($np2dp$, $np2stk$, $paз$, $np1stk$) также связаны с первым фактором наибольшей корреляционной связью (-0.937; -0.935, 0.915, 0.71). Таким образом, определяются факторы, к которым следует отнести параметры, что происходит однозначно. Однако, в некоторых случаях, при равных значениях нагрузок, параметр может включаться в 2 фактора одновременно, например, параметр $np2slip$, который включен в факторы $F2$ и $F3$.

После определения факторов по формуле:

$$F_i = \alpha_{i1} X_1 + \alpha_{i2} X_2 + \dots + \alpha_{ip} X_p \quad (2)$$

где X_1, \dots, X_p – параметры, $(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ip})'$ – собственный вектор корреляционной матрицы, соответствующий i -му собственному значению.

Вычисляются значения факторов F_1, \dots, F_p , которые могут быть использованы в дальнейшем в многомерном статистическом анализе.

3.2.2. Построение факторной модели и интерпретация результатов

При факторном анализе под одним фактором собираются параметры исходного массива, которые связаны наиболее тесной корреляционной связью (факторные нагрузки) с данным фактором, которые содержатся в повернутой матрице компонентов (таб. 3.5).

Применяется самый распространенный способ вращения – Варимакс (не коррелируемые факторы). Факторные нагрузки изменяются от -1 до +1 и являются аналогом коэффициента корреляции. В матрице факторных нагрузок необходимо выделить значимые и незначимые нагрузки с помощью критерия Стьюдента:

$$t = r\sqrt{N-2} / \sqrt{1-r^2} . \quad (3)$$

Как видно из таблицы 3.6, к первому фактору (F1) относятся два основных параметра нодальных плоскостей: направление и угол падения, обе нодальные плоскости взаимозависимы друг от друга. Ко второму фактору (F2) относятся смещение обеих нодальных плоскостей и углы осей сжатия и растяжения. К третьему (F3) и четвертому (F4) факторам относятся остальные параметры, взаимосвязи которых не столь очевидны.

Таблица 3.6. Группировка признаков исходного массива данных

Факторы	Исходные признаки	Коэффициенты корреляции
F1	np1dp	0.953
	np2dp	-0.937
	np2stk	-0.935
	paz	0.915
	np1stk	0.71
F2	tpl	0.956
	ppl	-0.901
	np1slip	0.785
	np2slip	0.630
F3	bpl	0,892
	taz	0.749
	np2slip	-0.607
F4	lnR	-0.901
	Mw	-0.776
	baz	-0,650
	azim	0.368

Название каждого фактора можно подобрать исходя из логики и темы исследований. Сумма квадратов нагрузок j -го фактора во всех k -параметров равна собственному значению данного фактора.

3.2.3. Критерий выбора числа факторов

Факторные оценки являются оценками каждого параметра по каждому фактору, и указывают на выбросы по фактору (таб. 3.7).

Таблица 3.7. Оценка компонентов в РСА

	КОМПОНЕНТА			
	1	2	3	4
<i>M_w</i>	,008	-,012	-,001	,347
<i>lnR</i>	,141	,091	,014	-,496
<i>azim</i>	-,025	-,040	,014	,188
<i>np1stk</i>	,158	,079	,238	-,040
<i>np1dp</i>	,201	-,061	-,036	-,059
<i>np1slip</i>	,032	,234	,015	,094
<i>np2stk</i>	-,197	-,002	-,102	,034
<i>np2dp</i>	-,194	,046	,078	,060
<i>np2slip</i>	-,123	,248	-,311	,048
<i>paz</i>	,171	,034	-,068	,003
<i>ppl</i>	,006	-,306	-,118	,115
<i>baz</i>	-,054	-,014	-,018	-,261
<i>bpl</i>	,001	-,001	,379	,011
<i>taz</i>	-,102	-,028	,308	,085
<i>tpl</i>	-,004	,346	-,090	-,107

Факторный анализ приводит к потере информации исходных данных, однако значительное уменьшение числа признаков оправдывает его применение, и помогает выявить закономерности в сейсмических процессах, которые не поддаются непосредственному наблюдению. Существует статистика КМО для каждого признака, и их сумма является общей статистикой КМО, величина которая определяет пригодность факторного анализа.

Таблица Чеддока (таб. 3.8) используется для словесной характеристики значимости коэффициентов корреляции, например, между значениями интенсивности сейсмических воздействий I и гипоцентральной расстоянием R существует отрицательная умеренная корреляционная зависимость, равная $R_{I,R} = -0,458$.

Таблица 3.8. Шкала классификации тесноты связи Чеддока

μ	0÷0.1	0.11÷ 0.3	0.31 ÷ 0.5	0.51 ÷ 0.7	0.71÷0.9	0.91 ÷ 0.99	0.991 ÷ 1
Характер связи	отсутствует	слабая	умеренная	заметная	тесная	сильная	функциональная

3.2.4. Вычисление значений коэффициентов уравнения макросейсмического поля

Макросейсмическое поле характеризуется зонами одинаковой интенсивности и линиями, разделяющими зоны изменения балльности, которые обычно бывают весьма извилисты, и этот факт ведёт к необходимости добавления в уравнение макросейсмического поля параметров: $np1stk$, $np1dp$, $np1slip$, $np2stk$, $np2dp$, $np2slip$, $paз$, ppl , baz , bpl taz , tpl , – характеризующих механизм и геометрию очага землетрясений.

Вычисление значений коэффициентов простого уравнения макросейсмического поля, которое предполагает конфигурацию изосейст в форме окружности, осуществляется с помощью множественного регрессионного анализа. Оценка значений коэффициентов регрессии осуществляется с помощью метода наименьших квадратов (МНК), и для состоятельности, несмещённости и эффективности оценок должны выполняться условия Гаусса-Маркова (Буртиев Р. 2017, с. 211).

Для получения региональных коэффициентов затухания применялась аппроксимация эллипсом макросейсмического поля, являющегося упрощенной моделью реальной картины, мозаичной по своей структуре, на основе наблюдений вранчских

землетрясений: 10.11.1940; 4.03.1977; 31.08.1986; 30.05.1990 и 31.05.1990 гг. (Kronrod T. et al. 2012, p. 271). А линии, разделяющие зоны одинаковой балльности – извилистые.

Начало координат совмещается с эпицентром исследуемых землетрясений. В каждом скользящем азимутальном створе ширины 40° с шагом дискретности 20° градусов, определяются коэффициенты уравнения затухания с помощью процедуры множественного регрессионного анализа из пакета SPSS-20. Методом наименьших квадратов подбирается линия регрессии, при которой общая сумма квадратов отклонений (Residuals) значений зависимой переменной от наблюдаемых, была наименьшей.

При проведении регрессионного анализа переменные, которые объявляются независимыми, могут быть коррелированы между собой, то есть имеет место мультиколлинеарность, что приводит к некорректности регрессионного анализа.

В множественном регрессионном анализе имеется три способа включения независимых переменных в уравнение регрессии (Буртиев Р. 2017, с. 269):

- стандартный – включаются все переменные;
- обратная пошаговая регрессия – из рассмотрения последовательно исключаются наименее значимые переменные, если статистический показатель значимости переменной F -критерия меньше вероятности значимости $\alpha=0.05$, (либо $\alpha=0.01$), и строится регрессия по оставшимся переменным. На начальном этапе в регрессию включаются все переменные;
- прямая пошаговая регрессия действует в противоположном направлении. На первом шаге в уравнение включается регрессор, который имеет наибольшее значение коэффициента корреляции с зависимой переменной и, с помощью тестовых критериев проверяется адекватность регрессии. При значимости модели включается следующий регрессор и так далее, если значимость какого-то регрессора меньше критической величины, то регрессор исключается, если больше – сохраняется.

В данном случае комбинируют прямая и обратная пошаговые регрессии, где в уравнение последовательно включаются и выключаются параметры: M_w , $\ln R$, $azim$, $np1stk$, $np1dp$, $np1slip$, $np2stk$, $np2dp$, $np2slip$, paz , ppl , baz , bpl , taz , tpl . Метод множественной регрессии позволяет определить значимость линейной связи между параметрами и интенсивностью сейсмических толчков, качество аппроксимации данных уравнением регрессии, пригодность вычисленных значений коэффициентов уравнения в целях наилучшего прогноза, а также определить значимость параметров для предсказания силы сейсмических толчков. Качество регрессионного уравнения характеризуются: оценкой

значимости коэффициентов регрессии; доверительными интервалами для коэффициентов; оценкой значимости всей регрессии; прогнозными значениями и их доверительным интервалом.

Для построения более реальной модели затухания интенсивности сейсмических толчков, по мере удаления от источника землетрясения. предлагается схема: начало координат совмещается с эпицентром исследуемых землетрясений; в каждом скользящем азимутальном створе ширины 40° с шагом дискретности 20° , определяются значения коэффициентов уравнения макросейсмического поля с помощью регрессионного анализа (таб. 3.9).

Таблица 3.9. Регрессионная модель интенсивности сейсмических воздействий

Створ	Регрессоры						
	Константа	Mw a	lnR b	Коэффициент детерминации	Вероятность значимости F-статистики	значение VIF	Индекс Дурбина- Ватсона
0-40 ⁰	9.56	0.96	-4.40	0.784	0.0	1.011	1.007
20 ⁰ -60 ⁰	8.84	1.06	-4.36	0.805	0.0	1.003	1.014
40 ⁰ -80 ⁰	9.01	1.05	-4.42	0.798	0.0	1.026	0.719
60 ⁰ -100 ⁰	11.20	0.94	-5.10	0.767	0.0	1.005	0.691
80 ⁰ -120 ⁰	10.27	1.13	-5.30	0.743	0.0	1.002	0.346
100 ⁰ -140 ⁰	6.28	1.29	-4.01	0.430	0.0	1.37	0.379
120 ⁰ -160 ⁰	6.03	1.37	-4.05	0.501	0.0	1.394	0.314
140 ⁰ -180 ⁰	5.91	1.53	-4.39	0.774	0.0	1.748	0.403
160 ⁰ -200 ⁰	7.19	1.48	-4.73	0.476	0.0	1.215	0.608
180 ⁰ -220 ⁰	9.33	1.27	-4.94	0.533	0.0	1.228	0.652
200 ⁰ -240 ⁰	9.33	1.27	-5.02	0.546	0.0	1.159	0.666
220 ⁰ -260 ⁰	4.94	1.64	-4.60	0.495	0.0	1.124	0.659
240 ⁰ -280 ⁰	3.30	2.04	-5.40	0.466	0.0	1.311	0.726
260 ⁰ -300 ⁰	7.10	1.61	-5.88	0.618	0.0	1.321	0.897
280 ⁰ -320 ⁰	9.78	1.05	-5.16	0.612	0.0	1.162	0.595
300 ⁰ -340 ⁰	9.17	1.04	-4.72	0.605	0.0	1.016	0.596
320 ⁰ -360 ⁰	7.86	1.091	-1.977	0.566	0.0	1.02	0.710
340 ⁰ -20 ⁰	9.14	0.914	-1.742	0.697	0.0	1.022	1.14

Строилась регрессионная модель интенсивности сейсмических воздействий в пунктах-баллов: на магнитуду Mw и логарифм гипоцентрального расстояния lnR , и на все параметры Mw , lnR , $azim$, $np1stk$, $np1dp$, $np1slip$, $np2stk$, $np2dp$, $np2slip$, paz , ppl , ba , bpl , taz , tpl . Тестовые критерии проверки значимости регрессии указывают на достаточно

качественную регрессию значений интенсивности сейсмических толчков на два параметра – M_w , $\ln R$.

В уравнение макросейсмического поля (4) входят главные компоненты: магнитуда M , глубина h и эпицентральное расстояние R . Наибольшее наблюдаемое значение индекса Дурбина-Ватсона составляет 1.014, следовательно, можно говорить о наличии слабой положительной автокорреляции. Значения VIF коэффициента меньше 4, следовательно, мультиколлинеарность отсутствует.

$$I = aM + b\sqrt{h^2 + R^2} + c \quad (4)$$

В результате была рассчитана сейсмическая опасность и построена карта сейсмического районирования территории Республики Молдова и соседних стран на основе полученных значений коэффициентов функции затухания (рис. 3.2) (Буртиев Р., Карданец В. 2020; Burtiev R. et al. 2020).

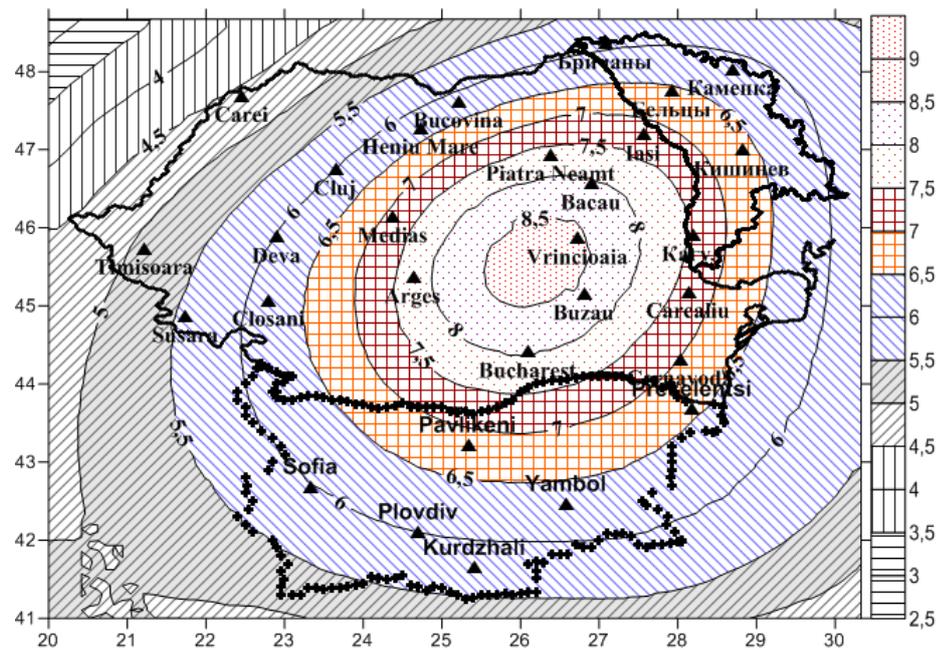


Рис. 3.2. Карта сейсмического районирования территории, подверженная воздействию землетрясений очага Вранча

В исследовании сложной природы сейсмичности факторный анализ оказался полезным для понимания сущности сейсмических процессов. Между 15 параметрами, основными и дополнительными, отражающими механизм и геометрию очага Вранча, наблюдается статистически значимая корреляционная зависимость и с помощью

факторного анализа выявлены скрытые факторы, обуславливающие связи между этими параметрами. Факторный анализ приводит к потере, содержащейся в исходных данных информации, однако значительное уменьшение числа параметров оправдывает его применение, и помогает выявить закономерности в сейсмических процессах, которые не поддаются непосредственному наблюдению. На основе полученных результатов были вычислены значения коэффициентов функции затухания по методу скользящего среднего от всех сейсмических зон.

3.3. Уравнение макросейсмического поля.

В различных каталогах исторических землетрясений оценочные данные о магнитуде землетрясений, глубине очага, координатах эпицентра и балльности в эпицентре очень приблизительны и сильно разнятся. Основой для определения параметров землетрясения по макросейсмическим данным служит уравнение макросейсмического поля, зависимости интенсивности в определённом пункте от магнитуды и глубины очага. Уравнение имеет следующий вид:

$$I_i = aM - b \lg \sqrt{\Delta^2 + H^2} + c \quad (5),$$

где M – магнитуда; Δ – эпицентральное расстояние; H – глубина очага; a , b , c – постоянные коэффициенты.

Для землетрясений Карпатского региона Н. В. Шебалиным (Друмя А., Шебалин Н. 1985, с. 169) были выведены эмпирическим путём коэффициенты затухания в направлении Кишинёва от Вранчских землетрясений промежуточной глубины. В результате получена следующая формула:

$$I_i = 1,5M - 4,5 \lg \sqrt{\Delta^2 + H^2} + 7 \quad (6).$$

Зная магнитуду M и глубину очага землетрясения H , мы можем определить интенсивность I_i в пункте, лежащем на расстоянии Δ km от эпицентра. Обратная задача решает вопрос вычисления магнитуды и глубины исходя из интенсивности в эпицентре и определённом пункте.

Для коровых событий Карпатского региона можно использовать общемировые коэффициенты в соответствующей формуле (Друмя А., Шебалин Н. 1985, с. 95):

$$I_i = 1,5M - 3,5 \lg \sqrt{\Delta^2 + H^2} + 3 \quad (7).$$

В то же время в новой работе Р.З. Буртиева (2017, с. 216) были уточнены коэффициенты затухания для землетрясений промежуточной глубины зоны Вранча, полученных для четырёх азимутальных створов (таб. 3.10). При вычислении

коэффициентов на основе сильнейших землетрясений использовались значения магнитуды M_w .

**Таблица 3.10. Коэффициенты затухания
для промежуточных землетрясений зоны Вранча**

Азимутальный интервал	Коэффициенты затухания		
	a	b	c
0-90°	1,52	-4,74	6,79
90-180°	1,63	-5,80	8,24
180-270°	2,10	-6,94	8,07
270-360°	1,41	-5,40	8,11

Рассматриваемое в этой работе направление Кишинёва попадает в азимутальный створ 0 – 90°. Соответственно были взяты коэффициенты: $a = 1.52$, $b = -4.74$, $c = 6.79$. Подставив значения, получаем следующую формулу:

$$I_i = 1,52M_w - 4,74 \lg \sqrt{\Delta^2 + H^2} + 6,79 \quad (8).$$

Но эти формулы были выведены на основе землетрясений за инструментальный (послевоенный период), где магнитуда и глубина были изначально известны. Нам же нужно эти два параметра вычислить, зная интенсивность в эпицентре и других пунктах.

Таким образом, преобразовав эти формулы для наших целей, получаем следующее:

$$M = \frac{I_i - 3 + 3.5 \lg \sqrt{\Delta^2 + H^2}}{1.5} \quad (9),$$

для коровых землетрясений и

$$M_w = \frac{I_i - 6,79 + 4,74 \lg \sqrt{\Delta^2 + H^2}}{1,52} \quad (10),$$

для промежуточных землетрясений.

При известной интенсивности в эпицентре (I_0) используются упрощённые варианты этих формул, так как расстояние от эпицентра (Δ) равно нулю:

$$M = \frac{I_0 - 3 + 3.5 \lg H}{1.5} \quad (11),$$

для коровых землетрясений и

$$M_w = \frac{I_0 - 6,79 + 4,74 \lg H}{1,52} \quad (12),$$

для промежуточных землетрясений.

В итоге у нас есть формулы с двумя неизвестными: магнитудой (M) и глубиной (H). И чтобы найти магнитуду необходимо вычислить зависимость интенсивности в эпицентре (или в любом другом пункте) и глубины очага исходя из этих формул.

Но мы более или менее точно знаем лишь интенсивность и теперь нам необходимо определиться с глубиной, какую из них выбрать. Для этого нужно составить две таблицы зависимости интенсивности, глубины очага и магнитуды: одну с интенсивностью в эпицентре и другую с интенсивность для ещё одного пункта. После чего определяем по макросейсмической шкале значение интенсивности в эпицентре и в пункте на расстоянии (Δ) какого-либо землетрясения, находим колонки с этими значениями, а в них выбираем наиболее близкие значения магнитуды (в идеале идентичные) на одной и той же глубине в обеих таблицах (пример вычислений приводится ниже).

Построив карты изосейст и определив все необходимые параметры каждого исторического землетрясения, мы можем приступить к сравнительному анализу полученных результатов с картами изосейст и параметрами важнейших землетрясений инструментального периода.

3.4. Создание карт и вычисление параметров крупнейших исторических землетрясений

Для исследования были отобраны исторические землетрясения с XVIII века по начало XX века, которые ощущались на значительной территории с интенсивностью, достигающей в эпицентре до 6 баллов, и с достаточным количеством пунктов с имеющимися свидетельствами о проявлении землетрясения. Сейсмических событий, соответствующих этим условиям, было выделено 12. Они приведены в таблице 3.11 с указанием интенсивности (в эпицентре и ещё одном пункте – Кишинёве), основного расчётного показателя используемого для определения магнитуды и глубины очага землетрясения. Все значения максимально проявленной интенсивности взяты из различных источников. Была проведена переоценка балльности по шкале MSK-64 и определена интенсивность в эпицентре.

**Таблица 3.11. Сильнейшие землетрясения Карпатского региона
доинструментального периода**

<i>№</i>	<i>Дата землетрясения</i>	<i>Интенсивность в эпицентре I_0</i>	<i>Интенсивность в Кишинёве I_1</i>
1	11-06-1738	8	6-7
2	06-04-1790	6 (6-7)	5
3	26-10-1802	8-9	7
4	26-11-1829	7-8	6
5	23-01-1838	8	6
6	17-08-1893	6-7	5
7	10-09-1893	7	4-5
8	04-03-1894	7 (7-8)	4
9	31-08-1894	7 (7-8)	5
10	06-02-1904	6	4-5
11	06-10-1908	6-7	4-5
12	25-05-1912	7	4

Вначале все собранные и обработанные данные по отобранным землетрясениям были внесены в таблицы по одному образцу, для удобства дальнейшей с ними работы. После подготовки основы, на карту были нанесены точечные данные пунктов-баллов землетрясения, далее классифицированы и оформлены в соответствии со стандартными условными обозначениями интенсивности проявления землетрясений. Участок карты и, соответственно, масштаб каждой карты землетрясения подбирался в зависимости от содержания объектов (пунктов-баллов) на карте.

Зоны интенсивности для проведения изосейст были интерполированы методом Кригинга. Из всех опробованных методик интерполяции этот дал наиболее реалистичные результаты. После чего автоматически проведены и сглажены изолинии, оконтуривающие зоны интенсивности. Далее зоны интенсивности преобразованы в полигоны, границы которых были скорректированы в соответствии с методикой построения карт изосейст. Отдалённые изосейсты приходилось проводить по большей части вручную из-за недостатка макросейсмических сведений на многих участках у границы осязаемости.

Для получения основных параметров сперва необходимо рассчитать таблицу зависимости интенсивности в эпицентре, глубины очага и магнитуды для подкорковых

землетрясений по формуле (8). Для эпицентра были взяты значения интенсивности от 5,5 до 9,5 через каждые полбалла, а глубина для подкорových землетрясений от 70 до 160 через каждые 10 км. Все полученные результаты занесены в таблицу 3.12.

Таблица 3.12. Зависимость интенсивности в эпицентре от глубины очага и магнитуды подкорových землетрясений

$I_0 \backslash H$	9,5	9	8,5	8	7,5	7	6,5	6	5,5
70	7.6	7.2	6.9	6.6	6.2	5.9	5.6	5.2	4.9
80	7.7	7.4	7.0	6.7	6.4	6.1	5.7	5.4	5.1
90	7.9	7.5	7.2	6.9	6.5	6.2	5.9	5.6	5.2
100	8.0	7.7	7.4	7.0	6.7	6.4	6.0	5.7	5.4
110	8.1	7.8	7.5	7.2	6.8	6.5	6.2	5.8	5.5
120	8.3	7.9	7.6	7.3	6.9	6.6	6.3	6.0	5.6
130	8.4	8.0	7.7	7.4	7.0	6.7	6.4	6.1	5.7
140	8.5	8.1	7.8	7.5	7.1	6.8	6.5	6.2	5.8
150	8.6	8.2	7.9	7.6	7.2	6.9	6.6	6.3	5.9
160	8.7	8.3	8.0	7.7	7.3	7.0	6.7	6.4	6.0

В качестве дополнительного пункта с интенсивностью был выбран для рассмотрения Кишинёв, как самый интересный для нас вариант. Тем более что он упоминается практически во всех значительных землетрясениях. Соотношение интенсивности в Кишинёве, глубины и магнитуды для промежуточных землетрясений рассчитывалось по формуле (6), где за эпицентральное расстояние (Δ) было принято 230 км (среднее до очаговой зоны Вранча). Расчёты проводились для интенсивности от 3,5 до 7,5 баллов с шагом в полбалла и для промежуточной глубины от 70 до 160 км через каждые 10 км. Результаты занесены в таблицу 3.13.

**Таблица 3.13. Зависимость интенсивности в Кишинёве от глубины очага
и магнитуды подкорových землетрясений**

$I_i \backslash H$	7,5	7	6,5	6	5,5	5	4,5	4	3,5
70	7.9	7.6	7.2	6.9	6.6	6.2	5.9	5.6	5.3
80	7.9	7.6	7.3	6.9	6.6	6.3	5.9	5.6	5.3
90	7.9	7.6	7.3	6.9	6.6	6.3	6.0	5.6	5.3
100	7.9	7.6	7.3	7.0	6.6	6.3	6.0	5.6	5.3
110	8.0	7.6	7.3	7.0	6.7	6.3	6.0	5.7	5.3
120	8.0	7.7	7.3	7.0	6.7	6.3	6.0	5.7	5.4
130	8.0	7.7	7.4	7.0	6.7	6.4	6.0	5.7	5.4
140	8.0	7.7	7.4	7.1	6.7	6.4	6.1	5.7	5.4
150	8.1	7.7	7.4	7.1	6.8	6.4	6.1	5.8	5.4
160	8.1	7.8	7.4	7.1	6.8	6.5	6.1	5.8	5.5

Из карты или таблицы пунктов-баллов определяем интенсивность в эпицентре (если всего один-два пункта с высшим баллом, то он и будет считаться максимальным, а если больше пунктов, то интенсивность в эпицентре на полбалла выше) и на определённом расстоянии (был выбран Кишинёв).

Так, для землетрясения 23 января 1838 года интенсивность в эпицентре составила 8 баллов, в Кишинёве ощущалось 6 баллов. В колонке 8 баллов из таблицы 4.3 и в колонке 6 баллов из таблицы 4.4 находим совпадение магнитуды на глубине 90-100 км со значением 6,9-7,0. Следует учесть, что изменение интенсивности на полбалла в эпицентре изменяет значение глубины на 30-40 км, поэтому берутся средние значения, магнитуда меняется незначительно. Такое же сравнение проводим и по другим землетрясениям и определяем коррелирующую магнитуду и глубину в обеих таблицах. Если совпадения не наблюдается, то необходимо пересчитать по формуле для коровых землетрясений. При большой разнице между интенсивностью в эпицентре (во Вранче) и в Кишинёве (обычно 3 и более балла) затухание интенсивности очень резкое и свидетельствует о коровом землетрясении.

Среди отобранных землетрясений только два оказались коровыми. Это события 4 марта 1893 года и 25 мая 1912 года. Для них был определён макросейсмический эпицентр и с учётом расстояния до Кишинёва рассчитаны значения только для интенсивности 4 балла. В эпицентре в случае обоих землетрясений ощущалось 7 баллов и, соответственно,

рассчитывалось соотношение магнитуды и глубины для этой величины. Расчёты делались для глубин 10 – 60 км с шагом 10 км (таб. 3.14). Эпицентральное расстояние для землетрясения 4 марта 1893 года – 140 км, для землетрясения 25 мая 1912 года – 200 км.

Таблица 3.14. Зависимость интенсивности в эпицентре и Кишинёве от глубины очага и магнитуды коровых землетрясений 4 марта 1893 г. и 25 мая 1912 г.

<i>Глубина (H)</i>	<i>$M_s (I_i=4, 140 \text{ км})$</i>	<i>$M_s (I_i=4, 200 \text{ км})$</i>	<i>$I_0=7$</i>
60	5.8	6.1	6.8
50	5.7	6.1	6.6
40	5.7	6.1	6.4
30	5.7	6.1	6.1
20	5.7	6.0	5.7
10	5.7	6.0	5.0

По той же методике, что и для подкоровых землетрясений были получены такие результаты: землетрясение 4 марта 1893 года произошло на глубине 20 км с магнитудой $M_S = 5,7$ ($M_W = 5,9$); землетрясение 25 мая 1912 года произошло на глубине 30 км с магнитудой $M_S = 6,1$ ($M_W = 6,2$). Как видно из таблицы магнитуда для коровых землетрясений не сильно изменяется с глубиной.

Результаты вычислений основных параметров (координаты, глубина, магнитуда и интенсивность в эпицентре) представлены в таблице 3.15. Координаты указаны для макросейсмического эпицентра, вычисленного по центральной точке плейстосейстовой зоны.

Таблица 3.15. Основные параметры исторических землетрясений.

<i>Дата землетрясения</i>	<i>Координаты</i>		<i>Глубина (км)</i>	<i>Магнитуда $M_w (M_s)$</i>	<i>Интенсивность в эпицентре</i>
	<i>с.ш.</i>	<i>в.д.</i>			
11-06-1738	45.72	27.24	90–130	6.9–7.3	8
06-04-1790	45.90	27.04	120–130	6.3–6.4	6 (6–7)
26-10-1802	45.18	26.61	120–130	7.6–7.7	8–9
26-11-1829	45.28	27.06	130–140	7.0–7.1	7–8
23-01-1838	45.35	27.32	90–100	6.9–7.0	8
17-08-1893	46.35	27.68	120–130	6.3–6.4	6–7
10-09-1893	46.25	27.58	70–80	5.9–6.0	7
04-03-1894	46.08	27.66	20	5.9 (5.7)	7 (7–8)
31-08-1894	46.29	27.84	70–90	6.2–6.3	7 (7–8)
06-02-1904	46.56	27.59	120	6.0	6
06-10-1908	45.85	27.31	100	6.0	6–7
25-05-1912	45.56	27.22	30	6.2 (6.1)	7

Для проверки использованного в работе метода были произведены вычисления данных сильнейших землетрясений XX века за инструментальный период. Результаты оказались очень близкими с инструментальными (таб. 3.16).

Таблица 3.16. Сравнение параметров инструментальных землетрясений

<i>Дата землетрясения</i>	<i>Координаты</i>		<i>Глубина по данным Romplus (км)</i>	<i>Глубина вычисленная (км)</i>	<i>Магнитуда по данным Romplus (M_w)</i>	<i>Магнитуда вычисленная (M_w)</i>
	<i>с.ш.</i>	<i>в.д.</i>				
23-11-1928	45,7	26,6	150	130	5,7	5,7
01-11-1929	45,9	26,5	160	125	6,1	6,3-6,4
29-03-1934	45,8	26,8	90	95	6,6	6,6
24-06-1940	45,9	26,6	115	120	5,9	6,0
22-10-1940	45,9	26,5	125	130	6,5	6,7
10-11-1940	45,8	26,8	150	130	7,7	7,7
04-03-1977	45,83	26,72	94	80	7,4	7,3-7,4
30-08-1986	45,54	26,31	132	125	7,1	7,3-7,4
30-05-1990	45,85	26,66	91	95	6,9	7,0
31-05-1990	45,81	26,77	87	95	6,4	6,3
27-10-2004	45,78	26,58	105	85	6,0	5,9

В таблице 3.17 предлагается сравнить полученные уточнённые основные параметры исторических землетрясений с параметрами, представленными в каталоге Romplus и Новом каталоге (1977).

Таблица 3.17. Сравнение параметров исторических землетрясений по данным различных каталогов

<i>Дата землетрясения</i>	<i>Глубина по [Новый каталог 1977] (км)</i>	<i>Глубина по каталогу Romplus (км)</i>	<i>Глубина вычисленная автором работы (км)</i>	<i>Магнитуда по [Новый каталог 1977] (M)</i>	<i>Магнитуда по каталогу Romplus (M_w)</i>	<i>Магнитуда вычисленная автором работы (M_w)</i>
11-06-1738	75-200	130	90–130	7.0	7.7	6.9–7.3
06-04-1790	75-200	150	120–130	6.9	7.1	6.3–6.4
26-10-1802	100-170	150	120–130	7.4	7.9	7.6–7.7
26-11-1829	100-170	150	130–140	6.9	7.3	7.0–7.1
23-01-1838	100-170	150	90–100	6.9	7.5	6.9–7.0
17-08-1893	80-150	100	120–130	6.1	7.1	6.3–6.4
10-09-1893	50-150	100	70–80	6.1	6.5	5.9–6.0
04-03-1894	50-150	130	20	5.8	6.5	5.9
31-08-1894	100-170	130	70–90	6.5	7.1	6.2–6.3
06-02-1904	40-90	75	120	5.9	6.6	6.0
06-10-1908	120-180	125	100	6.8	7.1	6.0
25-05-1912	20-80	90	30	6.3	6.7	6.2

Кроме этих параметров, рассчитанных по формулам, есть ещё ряд важных параметров. Они уже были получены непосредственно с карт изосейст. В первую очередь по построенным картам был определен макросейсмический эпицентр каждого землетрясения. Центр зоны наибольшей интенсивности был принят за макросейсмический эпицентр. Ещё один параметр, полученный непосредственно из таблиц атрибутов карт, – площадь зон интенсивности. При расчётах учитывались только зоны от 4 баллов и выше, так как из-за недостатка данных не во всех случаях можно было провести изосейсту в 3 балла. Были определены и направления главных осей зон интенсивности, результаты этого параметра для зоны с высшим баллом внесены в таблицу для дальнейших исследований землетрясений. Также показательными являются результаты азимутов наиболее удалённой точки дальней изосейсты и наиболее удалённого пункта, где ощущалось землетрясение, а также измерены расстояния до этих пунктов.

Все дополнительно полученные результаты занесены в таблицу 3.18.

Таблица 3.18. Дополнительные параметры исторических землетрясений

<i>Дата землетрясения</i>	<i>Площадь (км²)</i>	<i>Угол оси первой изосейсты</i>	<i>Расстояние (км)</i>	<i>Азимут на дальний пункт</i>	<i>Азимут на дальнюю изосейсту</i>
11-06-1738	420 761*	54	602	57	245
06-04-1790	619 443	51	825	66	70
26-10-1802	2 451 404	64	1 658	14	45
26-11-1829	622 997	47	931	52	48
23-01-1838	979 174	69	1 228	49	48
17-08-1893	220 960	149	471	59	86
10-09-1893	211 048	172	460	48	252
04-03-1894	90 496	65	442	62	84
31-08-1894	203 277	85	608	232	232
06-02-1904	132 716	63	352	63	243
06-10-1908	402 167	56	588	62	17
25-05-1912	126 705	175	596	34	333

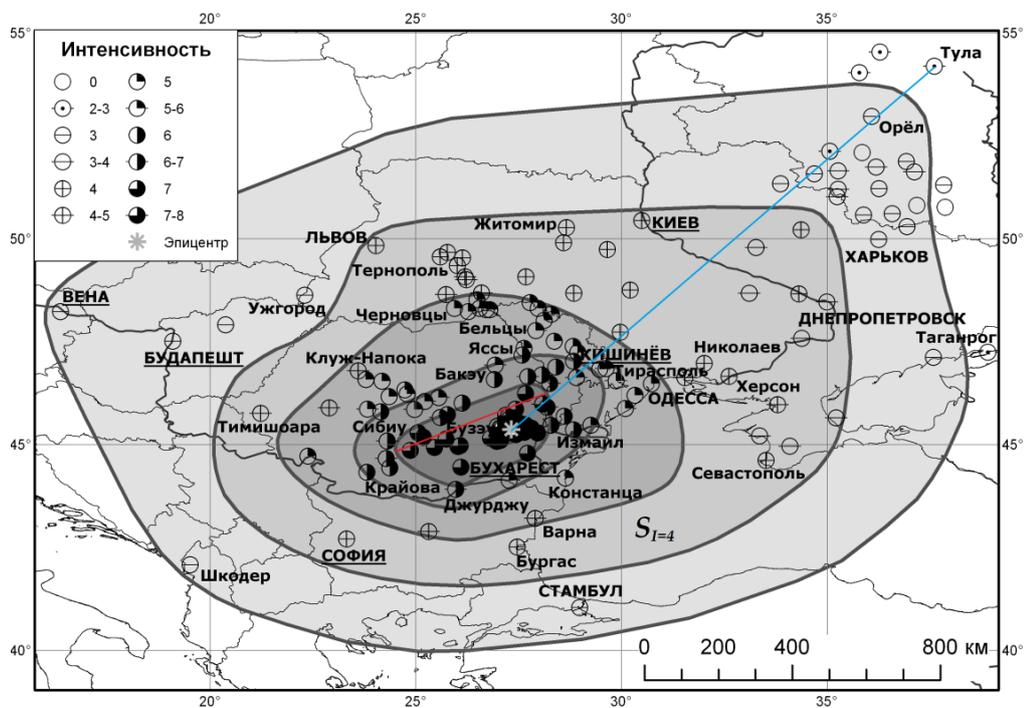


Рис. 3.3. Вычисления по карте изосейст землетрясения 23 января 1838 г.

На рисунке 3.3 представлен пример карты изосейст (23 января 1838 г.) с вычислениями дополнительных параметров землетрясений. Красная линия – большая ось плейстосейстовой зоны, указывающая азимут. Синяя линия – расстояние и азимут на наиболее отдалённый пункт зоны осязаемости землетрясения.

3.5. Анализ параметров и определение типа исторических землетрясений Карпатского региона

Полученные параметры исторических землетрясений Карпатского региона, имевших существенный эффект на территории Республики Молдова, при сравнении с закономерностями выявленными из исследований землетрясений за инструментальный период, позволяют определить тип каждого землетрясения и влияние ориентации (простираения) очага на направление максимального эффекта.

Землетрясение 11 июня 1738 г. произошло на глубине 90–130 км с магнитудой M_w от 6.9 до 7.3 и проявилось в эпицентре до 8 баллов. Разброс данных параметров этого землетрясения связан с отсутствием сведений о проявлении его в Кишинёве, по проведённым изосейстам Кишинёв попадает примерно между 6- и 7-балльной зонами. Но, учитывая то, что направление основного эффекта направлено на юго-запад, можно предположить и меньшую интенсивность в Кишинёве. В итоге были взяты оба значения (6 и 6–7 баллов) и получены результаты, указанные выше. Это – подкоровое землетрясение средней глубины. Так как окраинных пунктов с низкими баллами очень мало, то главным показателем будет азимут от эпицентра на дальнюю точку изосейсты, и он составляет 245° , а значит направление основного эффекта в сторону юго-запада (точнее ЗЮЗ). Простираение разрывов в очаге с северо-востока на юго-запад (54°). По многим параметрам оно совпадает с землетрясением 30 мая 1990 года.

Землетрясение 6 апреля 1790 г. произошло на глубине 120–130 км с магнитудой около $M_w=6.3-6.4$ и интенсивностью 6 (6–7) баллов (в Кишинёве – 5 баллов). Это – глубокое подкоровое землетрясение. Предполагается, что ориентация разрывов в очаге простирается в направлении с юго-запада на северо-восток (51°). Это направление подтверждается азимутами на дальний пункт и дальнюю точку изосейсты, которые практически совпадают (66 и 70°). Направление основного эффекта землетрясения на восток–северо-восток. За счёт значительной глубины площадь 4-балльной зоны охватила территорию около 620 тыс. км² и ощущалось на расстоянии 825 км от эпицентра.

Одно из сильнейших землетрясений за всю историю наблюдений произошло 26 октября 1802 г. на глубине 120–130 км с $M_w=7.6-7.7$ и интенсивностью 8–9 баллов (в

Кишинёве – 7 баллов). Это было самое сильное землетрясение этого региона за XVIII – XIX века. Ощущалось даже в Санкт-Петербурге (3 балла) на расстоянии 1658 км, а площадь 4-балльных сотрясений составила около 2.5 млн. км². Азимут на дальнюю точку изосейсты (45°) указывает на направление основного эффекта строго на северо-восток в сторону Москвы, но не менее существенен был эффект и на юго-запад. Простирающиеся разрывы в очаге также имеют направленность юго-запад–северо-восток.

Землетрясение 26 ноября 1829 г. произошло на глубине 130–140 км с $M_w=7.0-7.1$ и интенсивностью в эпицентре 7–8 баллов (в Кишинёве 6 баллов). Довольно глубокое подкоровое землетрясение, произошедшее в зоне Вранча. 4-балльной зоной была охвачена площадь 623 тыс. км² и ощущалось на расстоянии 930 км. Азимуты на дальний пункт и дальнюю изосейсту совпадают (52 и 48°). Направление основного эффекта и простирающиеся разрывы в очаге строго на северо-восток (47°).

Ещё одно сильное землетрясение XIX в. произошло 23 января 1838 года. Оно менее изучено, чем землетрясение 1802 г., хотя лишь немного уступает ему по интенсивности проявления, которая достигла 8 баллов в эпицентре (в Кишинёве – 6 баллов). Его глубина – порядка 90–100 км, что гораздо ближе к поверхности, поэтому магнитуда меньше ($M_w=6.9-7.0$). Также за счёт меньшей глубины территория, охваченная 4-балльными сотрясениями, составила менее 1 млн. км². Азимуты на отдалённый пункт (49°) и дальнюю изосейсту (48°) указывают, что направление основного эффекта этого землетрясения направлено строго на северо-восток, но есть дополнительный эффект ближе к восточному направлению на Таганрог. Угол оси зоны высшего балла (69°) указывает на ориентацию разрывов в очаге в направлении ВСВ.

Следующее достаточно сильное землетрясение произошло уже в конце XIX в. 17 августа 1893 г. на глубине 120–130 км с $M_w=6.3-6.4$ и интенсивностью в эпицентре 6–7 баллов (в Кишинёве – 5 баллов). Это – довольно глубокое вранчское подкоровое землетрясение, охватившее территорию в 221 тыс. км² и ощущавшееся на расстоянии до 471 км. Основной эффект землетрясения в восточном направлении (азимут на дальнюю изосейсту – 86°), дополнительный эффект направлен на северо-запад (точнее север–северо-запад). Это согласуется с ориентацией разрывов в очаге (угол оси – 149°) и локальной 5-балльной зоной в юго-восточном направлении. Если бы не препятствие в виде Восточных Карпат, зона осязчивости и основной эффект были бы гораздо больше в северо-западном направлении.

Уже менее чем через месяц произошло повторное землетрясение 10 сентября 1893 года. Его глубина составила 70–80 км, магнитуда $M_w=5.9-6.0$, а интенсивность в

эпицентре достигла 7 баллов (в Кишинёве: 4–5 баллов). Это тоже подкоровое вранчское землетрясение, но очаг находился гораздо ближе к поверхности земли, что при меньшей магнитуде выдало чуть больший эффект на поверхности в эпицентральной области. Зона в 4 балла охватила 211 тыс. км² и ощущалось на расстоянии 460 км. Азимут на дальнюю изосейсту 252° указывает на юго-западное направление основного эффекта землетрясения, что довольно типично для сильных землетрясений на глубине 90 км. Ориентация разрывов в очаге – субмеридиональная (172°). Такое различие в параметрах и проявлении этих двух землетрясений указывает на значительную независимость этих двух событий (насколько возможно в пределах общей очаговой зоны в целом).

Землетрясение 4 марта 1894 г. резко отличается от рассмотренных ранее, так как оно произошло на глубине 15–20 км, что указывает на его типично коровое происхождение. Магнитуда составила $M_s=5.7$ ($M_w=5.9$), а интенсивность в эпицентре достигла 7 (7–8) баллов (в Кишинёве – 4 балла). Ощущалось оно на относительно небольшой территории (4-балльная зона около 90 тыс. км²). Для неглубоких коровых землетрясений макросейсмический эпицентр обычно почти совпадает с точкой на поверхности над гипоцентром, т.е. формальным эпицентром. Поэтому координаты 46.1°N и 27.7°E можно считать фактическим эпицентром этого землетрясения. Макросейсмический эффект больше выражен в восточном направлении (84°), но формальный угол главной оси эпицентральной зоны (65°) входит в некоторое противоречие с этим эффектом. В данном случае это может быть связано со сложностью точно очертить конфигурацию зоны с высшим баллом из-за её небольшой протяжённости.

Землетрясение 31 августа 1894 г. произошло на глубине 70–90 км, с магнитудой $M_w=6.2–6.3$ и интенсивностью в эпицентре 7 (7–8) баллов (в Кишинёве – 5 баллов). Для подкоровых это довольно неглубокое землетрясение. Территория, охваченная 4-балльными сотрясениями, занимает 200 тыс. км², при этом событие ощущалось на расстоянии свыше 600 км. Азимут на дальний пункт и дальнюю изосейсту в 232° определяет направленность основного эффекта землетрясения с северо-востока на юго-запад, что полностью согласуется с предполагаемым простиранием разрыва в очаге, на которое указывает дополнительный локальный эффект землетрясения всё в том же юго-западном направлении. Наиболее схожее по параметрам и картине распространения с землетрясением 27 октября 2004 г. событие.

Первое существенное землетрясение XX в. в Карпатском регионе произошло 6 февраля 1904 года. Его гипоцентр находился на глубине около 120 км, магнитуда составила $M_w=6.0$, а проявилось оно в эпицентре – до 6 баллов (в Кишинёве 4–5 баллов).

Это – подкоровое вранчское землетрясение средней силы. Площадь, охваченная 4-балльными сотрясениями, составила всего 133 тыс. км², что совсем немного для такой глубины и связано с небольшой магнитудой. По имеющимся данным оно ощущалось максимум на расстоянии 352 км. На карте изосейст кроме основной выделяются ещё три 5-балльные локальные зоны. Это может быть связано как с местными условиями, так и с погрешностью в установлении балльности в населённых пунктах. Простираение разрывообразований в очаге в соответствии с основным направлением макросейсмического эффекта направлено на юго-запад (азимут на дальнюю изосейсту 243°). Простираение разрывов в очаге (63°) в направлении северо-восток – юго-запад.

Для землетрясения 6 октября 1908 г. был собран очень обширный макросейсмический материал, что сказалось на итоговой карте изосейст, где чётко выделяется изгиб Карпатской дуги, препятствующий далёкому распространению сейсмических волн. Гипоцентр землетрясения находился на глубине 100 км, при магнитуде $M_w=6.0$ интенсивность достигала 6–7 баллов (в Кишинёве – 4–5 баллов), а область 4-балльных сотрясений охватила 400 тыс. км², ощущалось на расстоянии почти 600 км. Основной эффект проявления этого землетрясения направлен на север (азимут на дальнюю изосейсту 17°), с дополнительным эффектом на северо-запад. Эта же смена простираения наблюдается и для очаговой зоны, и можно предположить, что разрывы в очаге также меняли своё направление.

Последнее из рассмотренных землетрясений произошло 25 мая 1912 г. на глубине около 30 км, с магнитудой $M_s=6.1$ ($M_w=6.2$), и интенсивностью в эпицентре 7 баллов (в Кишинёве – 4 балла). Исходя из данных о глубине и координатах (45.6°N, 27.2°E), это землетрясение относится к коровым землетрясениям зоны Вранча. Ощущалось на чуть большей территории (4-балльная зона – 127 тыс. км²), чем коровое землетрясение 4 марта 1894 г., за счёт большей магнитуды. По вытянутости изосейст на карте и азимутам дальнего пункта и дальней изосейсты (34 и 333°) основной эффект землетрясения приходится в широкий створ (что характерно для коровых) от северного до восточного направлений. Субмеридиональная ориентация разрывов в очаге подтверждает преимущественно северное направление.

Для всех землетрясений макросейсмический эпицентр (табл. 6) смещён относительно очаговой зоны Вранча к северо-востоку. Это объясняется положением самой очаговой зоны под углом 60° к поверхности земли, с поднятием именно в северо-восточном направлении.

3.6. Выводы к главе 3

- Между 15 параметрами, основными и дополнительными, отражающими механизм и геометрию очага Вранча, наблюдается статистически значимая корреляционная зависимость и с помощью факторного анализа выявлены скрытые факторы, обуславливающие связи между этими параметрами. Факторный анализ приводит к потере, содержащейся в исходных данных информации, однако значительное уменьшение числа параметров оправдывает его применение, и помогает выявить закономерности в сейсмических процессах, которые не поддаются непосредственному наблюдению.
- При анализе параметров 12 исторических землетрясений были определены их ориентировочные глубины: десять событий относятся к подкоровым и два к коровым (4 марта 1894 г. и 25 мая 1912 г.). Выяснилось, что простирание разрывов в очаге большинства подкоровых землетрясений, и, в первую очередь, самых сильных из них, имело направление юго-запад–северо-восток, в т.ч. четыре землетрясения (6 апреля 1790 г., 26 октября 1802 г., 26 ноября 1829 г., 23 января 1838 г.) с основным эффектом преимущественно на северо-восток и четыре землетрясения (11 июня 1738 г., 10 сентября 1893 г., 31 августа 1894 г., 6 февраля 1904 г.) с основным эффектом преимущественно на юго-запад, в основном с гипоцентрами на глубине ~90 км. Эта преобладающая ориентация разрывов в очаге сильных землетрясений подтверждается исследованиями сильных землетрясений инструментального периода. Простирание разрывов в очаге землетрясения 17 августа 1893 г. носило субширотную направленность, а землетрясения 6 октября 1908 г. – субмеридиональную.
- Несмотря на возможные погрешности, связанные с точностью оценки интенсивности в пунктах наблюдения, а также точностью коэффициентов уравнения макросейсмического поля в применении для конкретных сейсмических событий, удалось определить тип каждого исторического землетрясения и получить более точные значения их параметров. Полученные результаты согласуются с закономерностями, выявленными в ходе исследований землетрясений инструментального периода. Это доказывает состоятельность методов исследования макросейсмических данных и расчётов параметров, применённых в этой работе. Уточнённые параметры исторических землетрясений позволят составить более целостную картину сейсмической опасности Карпатского региона.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Данная работа посвящена комплексному анализу макросейсмического эффекта от карпатских землетрясений на территории Республики Молдова и сопредельных стран, решений механизма очага землетрясений данной зоны и определению параметров крупнейших исторических землетрясений Карпатского сейсмического региона для уточнения исторического каталога землетрясений.

1. В ходе работы были описаны обратные задачи макросейсмологии, методология сбора и обработки макросейсмических данных; проанализированы макросейсмические источники карпатских землетрясений. Собраны обширные макросейсмические данные из всех доступных исторических и современных каталогов, переоцененные по макросейсмической шкале MSK-64. На основе единой базы макросейсмических данных были построены карты пунктов-баллов и карты изосейст (приводится описание метода построения таких карт). Выявлены особенности очагов промежуточных вранчских землетрясений: вытянутость изосейст в направлении с юго-запада на северо-восток.

2. В результате сопоставления решений механизма очага землетрясений, полученных двумя методами: по первому вступлению Р-волн и по тензору сейсмического момента (ТСМ), были установлены различия, свидетельствующие о сложном характере процессов вспарывания в очагах землетрясений и изменении ориентации плоскости разрывов во времени. Это предположение было проверено и подтверждено на примере землетрясения 4 марта 1977 г. Анализ решений механизма очага землетрясений, произошедших за период 1977-2014 гг. показал, что очаги землетрясений относятся к разным этажам глубин. Большинство из рассмотренных землетрясений области Вранча произошли под действием сжимающих напряжений; одно событие под действием растягивающих напряжений. Три коровых землетрясения имели сдвиго-сбросовый характер.

Для более полной характеристики напряжённо-деформированного состояния среды в Карпатском регионе рекомендуется применять оба метода, дополняющие друг друга. Это поможет точнее отнести то или иное землетрясение к одному из типов имеющих место в этой части Карпатского региона.

3. В процессе исследования решений механизма очага землетрясений области Вранча выявлено три основных типа системы напряжений, относящихся к различным зонам данной области:

1. Восточный тип (северо-восточная часть области Вранчи – Восточные Карпаты) - характеризуется близгоризонтальными сжатиями, ориентированными перпендикулярно простиранию горной дуги.
2. Южный тип (юго-западная часть области Вранча – Южные Карпаты) характеризуется близгоризонтальными сжатиями в субмеридиональном направлении север – юг.
3. Центральный тип (зона стыка Восточных и Южных Карпат) - горизонтальные сжатия направлены перпендикулярно касательной изгиба Карпатской дуги, т. е. с северо-запада на юго-восток. Именно такой тип механизма соответствует очагам наиболее сильных разрушительных землетрясений XX века: 10 ноября 1940 г., 4 марта 1977 г., 31 августа 1986 г. и 30 мая 1990 г.

4. Выявлены закономерности макросейсмического проявления для коровых и подкоровых землетрясений Карпатского региона. Максимальная интенсивность сотрясений коровых землетрясений фиксируется в ближайших от эпицентра населённых пунктах, с расстоянием макросейсмический эффект довольно быстро убывает. Первые изосейсты повторяют форму очага. Как правило, макросейсмический эпицентр близок с инструментально определённым или же совпадает с ним. Для крупных землетрясений промежуточной глубины области Вранча имеет место несовпадение макросейсмического эпицентра с инструментально определённым. Для этих землетрясений наблюдается нетипичный эффект: более значительному воздействию подвергались населенные пункты, расположенные к востоку от инструментального эпицентра.

Был выполнен сравнительный анализ двух крупных землетрясений Карпатского региона с примерно одинаковой магнитудой, близкими координатами эпицентра, но с разными глубинами очага. Макросейсмический и инструментальный эпицентр для корового землетрясения 2014 г. района Рымникул-Сэрат совпадают. Для промежуточного землетрясения 2016 г. зоны Вранча наблюдается отклонение инструментального очага от макросейсмического. При землетрясении 2016 г. область максимальных сотрясений смещена к северо-востоку от эпицентра. Так как распространению сейсмических волн в северо-западном и юго-восточном направлениях препятствуют многочисленные разломы, затухание в этих направлениях происходит примерно одинаково. А в северо-восточном и юго-западном направлениях затухание интенсивности от землетрясений промежуточной глубины происходит гораздо медленнее. Ощутимые сотрясения от подкоровых землетрясений охватывают намного большие площади территорий, чем от коровых.

В центре стереограмм механизма очага промежуточного землетрясения находится область сжатия, тогда как для корового очага в центре располагается область разрежения. Механизм очага корового землетрясения носит сдвиго-сбросовый характер, а механизм очага вранчского промежуточного землетрясения – надвиговый и обусловлен силами сжатия в горизонтальном направлении.

5. С помощью метода главных компонент факторного анализа установлены корреляционные связи между параметрами механизма очага землетрясения и определено минимальное число факторов, которые составляют наибольшую долю в дисперсии данных. В дополнение к трём основным параметрам (магнитуды, глубины и эпицентрального расстояния) был определён вклад параметров механизма очага землетрясения в уравнение макросейсмического поля. Между 15 параметрами, основными и дополнительными, отражающими механизм и геометрию очага Вранча, установлена статистически значимая корреляционная зависимость и с помощью факторного анализа выявлены скрытые факторы, обуславливающие связи между этими параметрами. Факторный анализ приводит к потере, содержащейся в исходных данных информации, однако значительное уменьшение числа параметров оправдывает его применение, и помогает выявить закономерности в сейсмических процессах, которые не поддаются непосредственному наблюдению.

На основе полученных результатов были вычислены значения коэффициентов функции затухания по методу скользящего среднего от всех сейсмических зон. И по методике, предложенной Н.В. Шебалиным, были определены основные и дополнительные параметры крупнейших исторических землетрясений Карпатского сейсмического региона, ощущавшихся на территории Республики Молдова. Использовалось уравнение макросейсмического поля с коэффициентами, рассчитанными для этого региона.

6. Проведён анализ параметров 12 исторических землетрясений, что позволило более точно определить основные параметры каждого сейсмического события и выявить тип каждого из них. Десять землетрясений были отнесены к подкоровым землетрясениям и два к коровым. Выяснилось, что простираение разрывов в очаге большинства подкоровых землетрясений, и, в первую очередь, самых сильных из них, имело направление юго-запад–северо-восток, в т.ч. четыре землетрясения с основным эффектом преимущественно на северо-восток и четыре землетрясения с основным эффектом преимущественно на юго-запад, в основном с гипоцентрами на глубине ~90 км. Это преобладание ориентации разрывов в очаге сильных землетрясений подтверждается

исследованиями сильных землетрясений инструментального периода. Эти данные качественно дополняют имеющиеся каталоги исторических землетрясений.

Несмотря на возможные погрешности, связанные с точной оценкой интенсивности в пунктах наблюдения, а также точностью коэффициентов уравнения макросейсмического поля в применении для конкретных сейсмических событий, удалось определить тип каждого исторического землетрясения и получить более точные значения их параметров. Полученные результаты согласуются с закономерностями, выявленными в ходе исследований землетрясений инструментального периода, что подтверждает состоятельность методов исследования макросейсмических данных и расчётов параметров, применённых в этой работе.

7. В процессе работы была создана база макросейсмических данных исторических землетрясений Карпатского сейсмического региона, оценённых по шкале MSK-64 и построены карты изосейст, включающие все дополнительно найденные пункты.

Собранные на тот момент данные были опубликованы в сборнике макросейсмических данных (Kronrod T. 2013).

Полученные при сравнении решений механизма очага данные используются другими авторами при исследовании сейсмичности региона (Гинтов, Фольфман).

Уточнённые параметры исторических землетрясений позволят составить более целостную картину сейсмической опасности Карпатского региона. И будут использованы при последующих обновлениях карт сейсмического районирования территории Республики Молдова.

В дальнейших исследованиях необходимо будет более детально определить вклад в сейсмическую опасность небольших очаговых зон, как на территории Республики Молдова, так и вблизи её границ. Это обязательная составляющая при определении микрорайонирования отдельных участков территории Республики Молдова.

Также объём собранных и обработанных данных является существенным вкладом в основу дальнейших исследований сейсмичности Карпатского региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АЛКАЗ В.Г. *Основы прогноза сейсмической опасности и сейсмического риска территории Республики Молдова*. Кишинев, 2007, 229 с. ISBN 978-9975-9636-3-3
2. *Архивные материалы Центрального Государственного архива Молдавской ССР*. Фонд 205, Опись 1, ед. хр. 2879, 2901, 2967, 6236.
3. БАЛАКИНА Л.А., ВВЕДЕНСКАЯ А.В., ГОЛУБЕВА Н.В., МИШАРИНА Л.А., ШИРОКОВА Е.И. *Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений*. Москва: Наука, 1972, 198 с.
4. БАХТИН А.И., НИЗАМУТДИНОВ Н.М., ХАСАНОВА Н.М., НУРИЕВА Е.М. *Факторный анализ в геологии*. Казань: Изд-во Казанского университета, 2007, 32 с. ISBN 978-5-7493-0943-5.
5. *Бессарабия*. Ред. П.А. КРУШЕВАН. Изд. Газеты «Бессарабец», 1903, с. 147.
6. БОРИСОВ Б.А. Сильные землетрясения на Восточном Кавказе: интерпретация исторических данных и анализ геологической обстановки. В: *Известия АН СССР, Физика Земли*. 1982, №9, с. 107-122. ISSN 0367-4354.
7. БУНЭ В.И., РАДУ К., ПОЛЯКОВА Т.П. Анализ карт изосейст вранчских землетрясений 10 ноября 1940 г. и 4 марта 1977 г. В: *Детальные инженерно-сейсмологические исследования. Вопросы инженерной сейсмологии*. М.: Наука, 1986, вып. 27, с. 126-135.
8. БУРТИЕВ Р.З. *Методология оценки сейсмической опасности*. LAP, 2017, 321 с. ISBN: 978-3-659-81818-9.
9. БУРТИЕВ Р.З. Определение расстояния от точки наблюдения до элементарного источника землетрясений. In: *Buletin IGS ASM*. 2014, №1, pp. 23-29. ISSN 1857-0046
10. БУРТИЕВ Р.З., **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Модель главных компонент в сейсмичности зоны Вранча. В: *Геофизический журнал*. 2020, Т. 42, № 1, с. 11-22. ISSN 0203-3100. DOI: <https://doi.org/10.24023/gj.2020.42.1.11-22>
11. *Бюллетень Постоянной Центральной Сейсмологической Комиссии Российской АН*, 1902-1908, 1911-1913. М.-Л.: АН СССР, 1930-1937.
12. ВВЕДЕНСКАЯ А.В., ГОЛУБЕВА Н.В., РУПРЕХТОВА Л. Особенности напряжённого состояния района изгиба Карпатской дуги и параметры механизма развития очага землетрясения 4.III.1977 г. В: *Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия*. Ред. ДРУМЯ А.В. М.: Наука, 1980, с. 106-134.

13. ВВЕДЕНСКАЯ А.В. *Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций*. М.: Наука, 1969, 135 с.
14. ВЕРМИШЕВА Л.Ю., ГАНГУС А.А. Применение типизации подвижек в очагах землетрясений для решения сеймотектонических задач. В: *Физика Земли*. 1977, №3, с. 103-109. ISSN 0367-4354
15. ВИННИК Л.П. Неоднородности верхней мантии в районе вранчской зоны промежуточных землетрясений. В: *Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия*. Ред. Друмя А.В. М.: Наука, 1980, с. 41-45.
16. ВОРОНИНА Е.В. *Механика очага землетрясения*. Спецкурс. Москва: Физический факультет МГУ, 2004, 92 с.
17. ВОЛЬФМАН Ю.М., КОЛЕСНИКОВА Е.Я. Сеймотектоника очаговой области Вранча. В: *Тезисы конференции в Москве* (рукопись).
18. ГАБРИЕЛЯН Р.Г. *Эконометрика*: Методическое пособие. М.: Видное, 2008, 85 с.
19. ГИНТОВ О.Б., МУРОВСКАЯ А.В., ЕГОРОВА Т.П. и др. Глубинная сейсмогенная зона Вранча как индикатор геодинамического процесса. В: *Геофизический журнал*. № 3, Т. 37, 2015. С. 22-44.
20. ДЖАНУЗАКОВ К.Д. Региональные особенности затухания интенсивности сотрясений сильных землетрясений Кыргызстана и прилегающих к нему районов В: *Вестник Института сейсмологии НАН КР*. Бишкек, 2013, № 2, с. 11–16. ISSN 1694-7290
21. ДРУМЯ А.В., МОСКАЛЕНКО Т.П., СТЕПАНЕНКО Н.Я. Молдавия. В: *Кн. Сейсмическое районирование территории СССР*. Ред. С.В. Медведев, В.В. Попов. М.: Наука, 1980, с. 107-109.
22. ДРУМЯ А.В., СТЕПАНЕНКО Н.Я. К вопросу о сейсмичности района дельты реки Дунай. В: *Buletin IGS ASM*, 2006, №1, с. 31-36. ISSN 1857-0046
23. ДРУМЯ А.В., СТЕПАНЕНКО Н.Я., ИЛИЕШ И.И., АЛЕКСЕЕВ И.В., СИМОНОВА Н.А. Сейсмический режим области Вранча в Карпатах за период 1991-2001 гг. В: *Сейсмичность Северной Евразии. Материалы Международной конференции*. Обнинск: ГС РАН, 2008, с. 73-77. ISBN 978-5-903258-02-4
24. ДРУМЯ А.В., СТЕПАНЕНКО Н.Я. ПОЯТА И.А. Сходство и различие в процессах подготовки и проявления карпатских землетрясений 1977 и 1986 гг. В: *Карпатское землетрясение 1986 г.* Кишинёв: Штиинца, 1990, с. 5-15. ISBN 5-376-00654-9
25. ДРУМЯ А.В., СТЕПАНЕНКО Н.Я., СИМОНОВА Н.А., АЛЕКСЕЕВ И.В., **КАРДАНЕЦ В.Ю.** *Атлас карт интенсивности землетрясений Молдовы (XVIII – XXI вв.)*. Кишинёв: Elena-V.I., 2009, 154 с. ISBN 978-9975-106-45-0

26. ДРУМЯ А.В., УСТИНОВА Т.И., ЩУКИН Ю.К. *Проблемы тектоники и сейсмологии Молдавии*. Вып. 2. Кишинёв: Картя Молдовеняскэ, 1964. 120 с.
27. ДРУМЯ А.В., ШЕБАЛИН Н.В. *Землетрясение: где, когда, почему?* Кишинёв: Штиинца, 1985, 196 с.
28. ЕВСЕЕВ С.В. *Землетрясения Украины*. Изд. АН УССР, Киев, 1961. 76 с.
29. ЕВСЕЕВ С.В. Интенсивность землетрясений Украины. В: *Сейсмичность Украины*. Киев: Наукова думка, 1969, с. 32-55.
30. *Единая геофизическая служба Российской академии наук*. Доступно: http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm
31. ЕМАНОВ А.А. *Сейсмические активизации блоковой структуры в условиях сжатия: На примере Алтае-Саянской области*. Новосибирск, 2006, 159 с. ISBN 978-5-7692-0738-4
32. ЕШАНУ В.М., СКОВИТИН А.И., ЧЕКАН М.С. Каталог карпатских землетрясений (макросейсмические данные). В: *Отчёт Молдавской опытно-методической партии*. Кишинёв, 1988, Т. 1-4.
33. *Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья*. Под ред. В.П. Солоненко. Москва: Наука, 1966, 231 с.
34. ЗАХАРОВА А.И., ЧЕПКУНАС Л.С., КОЛОМИЕЦ М.В. и др. Сильные землетрясения мира. В: *Землетрясения в СССР в 1990 году*. РАН. Москва, 1996, с. 217-122.
35. ЗАЩУК А. *Материалы для географии и статистики России, собранные офицерами генерального штаба Бессарабской области*, т. III. С.-Петербург, 1862, с. 121.
36. *Землетрясения в СССР за 1960-1994 гг.* М.: Наука, РАН, 1963-2000.
37. *Землетрясения Северной Евразии за 1995 – 2019 гг.* Обнинск: ГС РАН, 2001-2023. ISSN 1818-6254
38. ИОСИФ Т., РАДУ К., САВАРЕНСКИЙ Е.Ф. Механизмы очагов некоторых карпатских землетрясений. В: *Изучение внутреннего строения Земли по сейсмическим данным*. Бюлл. Совета по сейсмологии АН СССР. М., 1963, №15. с. 146-167.
39. ИОЦ ГС РАН *Информационное сообщение о землетрясении в Румынии 22 ноября 2014 г.* Доступно: http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/ceme/quake_stat.pl?sta=20144272&l=0
40. **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Вклад И.М. Сухова в макросейсмические исследования Карпатских землетрясений. В: *Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al AȘM*, 2015, N1-2, pp. 36-41. ISSN 1857-0046

41. **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Особенности макросейсмического проявления карпатских землетрясений в зависимости от механизма и глубины очага В: *Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al AȘM*, 2016, N 2, pp. 106–112. ISSN 1857-0046
42. *Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия*. Ред. ДРУМЯ А.В. М.: Наука, 1980, 272 с.
43. *Карпатское землетрясение 1986 г.* Ред.: А.В. ДРУМЯ, Н.В. ШЕБАЛИН, Н.Н. СКЛАДНЕВ, С.С. ГРАФОВ, В.И. ОЙЗЕРМАН. Кишинев: Штиинца, 1990, 334 с. ISBN 5-376-00654-9
44. *Каталог карпатских землетрусів за 1955-1967 р.* Киев: Наукова думка, 1958-1971.
45. КИРОВ К. *Землетресения в България през годините 1931-1940*. София: Ц.М.И., 1941, 110 с.
46. КЛОССОВСКИЙ А. Метеорологическое обозрение. В: *Труды метеорологической сети юго-запада России в 1892 – 1896 гг.* Одесса, 1895 – 1897.
47. КОЛЕСНИКОВ Ю.М., АНДЕРЖАНОВ Ш.С. *Использование ArcView GIS 3.0 в сейсмологии и при оценке сейсмического риска*. Доступно: http://loi.sccc.ru/gis/razlgis/ecommm/Emergency/av_sesmology.htm
48. КРАСНОРАМЕНСКАЯ Т.Г. *ГИС в решении задач корреляции разломно-блоковых структур и сейсмичности Алтае-Саянской складчатой области*. Иркутск, 2008, 152 с.
49. *Математические методы психологического исследования*. Факторный анализ. Доступно: http://gym42.ru/stat/Book/Data/page_2_8_2.htm.
50. МЕДВЕДЕВ С.В.(Москва), ШПОНХОЙЕР В.(Иена), КАРНИК В. (Прага). *Шкала сейсмической интенсивности MSK - 64*. М.: Изд-во МГК АН СССР, 1965, 11 с.
51. *Московские ведомости*. 1802, №85.
52. МУШКЕТОВ И.В., ОРЛОВ А.П. *Каталог землетрясений Российской империи*. Записки Русского географического общества, т. 26. Санкт-Петербург: Типография Императорской АН, 1893, 582 с.
53. МХИТАРЯН В.С., АРХИПОВА М.Ю., СИРОТИН В.П. *Эконометрика*. М.: ЕАОИ, 2008, 144 с. ISBN 978-5-374-00485-8
54. НИКОНОВ А.А. *Землетрясения. (Прошлое, современность, прогноз)*. М.: Знание, 1984, с. 73.
55. НИКОНОВ А.А. *Сильнейшее в Восточной Европе карпатское землетрясение 26 октября 1802 г. – новые материалы и оценки*. М.: ДАН, 1996, т. 347, №1, с. 99 – 102. ISSN 0869-5652

56. *Новый каталог сильных землетрясений с древнейших времён до 1975 г.* Ред. Н.В. КОНДОРСКАЯ, Н.В. ШЕБАЛИН. М.: Наука, 1977, 536 с.
57. *Памятники искусства Советского Союза. Украина и Молдавия.* Справочник-путеводитель. М.: Искусство, 1982, 496 с.
58. РАУТИАН Т.Г. и др. Макросейсмическое проявление землетрясений и очаговые спектры В: *Вопросы инженерной сейсмологии*. М.: Наука, 1982, вып. 23, с. 74–82. ISSN 0134-7449
59. РИЗНИЧЕНКО Ю.В. Энергетика макросеймики. В: *Изв. АН СССР. Физика Земли*. Москва, 1974, № 8, с. 3–10. ISSN 0002-3337
60. РИЗНИЧЕНКО Ю.В., ДРУМЯ А.В., СТЕПАНЕНКО Н.Я., СИМОНОВА Н.А. Сейсмичность и сейсмическая опасность Карпатского региона. В: *Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия*. Ред. Друмя А.В. М.: Наука, 1980, с. 46 – 85.
61. САГАЛОВА Е.А. К вопросу о сейсмическом районировании территории Буковины. В: *Сб. Сейсмичность Украины*. Киев: Наукова думка, 1969, с. 70-80.
62. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны Единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым – Карпаты за 1970-1992 гг.)*. Киев: Наукова Думка, 1980-1995.
63. *Сейсмологический бюллетень Украины за 1993 – 2013 гг.* Симферополь: ИГ НАНУ, КЭС ОСОБЗ, 1996 – 2014.
64. СИДЕНКО А.В., ВИШНЯКОВ В.В., ИСАЕВ С.М., *Теория статистики*. Учебник. М.: МАКС–Пресс, 2011, 376 с. ISBN 978-5-317-03747-4
65. СИМОНОВА Н.А. Напряжения и разрывы в очагах землетрясений Восточных Карпат В: *Новые данные по сейсмичности и тектонике территории Молдавской ССР*. Кишинёв: Штиинца, 1975, с. 43-51.
66. СТЕПАНЕНКО Н.Я., АЛЕКСЕЕВ И.В., СИМОНОВА Н.А. Механизмы очагов землетрясений области Вранча, происшедших после событий 30, 31 мая 1990 года. В: *Buletinul Institutului de Geofizică si Geologie al AŞM*, 2005, N1, pp. 27-34. ISSN 1857-0046
67. СТЕПАНЕНКО Н.Я., ДРУМЯ А.В., СИМОНОВА Н.А. Сильнейшие землетрясения Карпатского региона в XVIII – XX вв. В: *Buletinul Institutului de Geofizică si Geologie al ASM*, 2006, N1, pp. 37-64. ISSN 1857-0046

68. СТЕПАНЕНКО Н.Я., **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Карпатские землетрясения 1821 и 1829 годов (Макросейсмический каталог). В: *Buletinul IGS ASM*, №1, 2013. С. 82-95. ISSN 1857-0046
69. СТЕПАНЕНКО Н.Я., **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Карпатское землетрясение 23 января 1838 года (Макросейсмический каталог). В: *Buletinul IGS ASM*, №1, 2013. С. 96-116. ISSN 1857-0046
70. СТЕПАНЕНКО Н.Я., **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Карпатские землетрясения за период с 1868 по 1893 гг. (Макросейсмический каталог). В: *Buletinul IGS ASM*, №2, 2013. С. 61-82. ISSN 1857-0046
71. СТЕПАНЕНКО Н.Я., **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Карпатские землетрясения 1894 года (Макросейсмический каталог). В: *Buletinul IGS ASM*, №1, 2014. С. 39-56. ISSN 1857-0046
72. СТЕПАНЕНКО Н.Я., **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Макросейсмическая основа прогноза сейсмической опасности на территории Республики Молдовы. Карпатские землетрясения 1738 и 1790 гг. В: *Buletinul IGS ASM*, №1, 2012. С. 5-16. ISSN 1857-0046
73. СТЕПАНЕНКО Н., **КАРДАНЕЦ В.** Особенности проявления сильнейших коровых и промежуточных землетрясений области Вранча. В: *Buletinul INCERCOM, Institutul de cercetări științifice în construcții, N7*. Chișinău, 2016, с. 86-109. ISSN 1857-3762
74. СТЕПАНЕНКО Н.Я., **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Сопоставление региональных определений механизмов очагов Карпатских землетрясений с решениями тензора момента центроида В: *Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского*. Сер. География, Геология. Симферополь, 2016, т. 2(68), № 4, с. 220–248. ISSN 2413-1717
75. СТЕПАНЕНКО Н.Я., **КАРДАНЕЦ В.Ю.**, СИМОНОВА Н.А. Особенности сейсмического процесса в Карпатском регионе в 2014 году. *Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского*. Сер. География. Симферополь, 2014, т. 27(66), №2, с. 152-168. ISSN 2413-1717
76. СТЕПАНЕНКО Н.Я., СИМОНОВА Н.А., **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Макросейсмический эффект коровых землетрясений на территории Молдовы. В: *Buletin IGS ASM*, №1, 2011, с. 31-50. ISSN 1857-0046
77. СТЕПАНЕНКО Н.Я., СИМОНОВА Н.А., **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Пространственные вариации осей главных напряжений в очагах землетрясений области Вранча. В: *Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 год*. Севастополь, НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013, с. 46-56.

78. СТЕПАНЕНКО Н.Я., СИМОНОВА Н.А., **КАРДАНЕЦ В.Ю.** Сравнительный анализ механизмов очагов землетрясений области Вранча, полученных двумя методами. В: *Buletin IGS ASM*, №1, 2012, с. 17-32. ISSN 1857-0046
79. СТЕПАНЕНКО Н.Я., СИМОНОВА Н.А., МОСКАЛЕНКО Т.П. Особенности поля интенсивности сотрясений от карпатских подкорковых очагов. В: *Методы оценки сейсмической опасности*. Кишинев: Штиинца, 1984, с. 94-101.
80. СУХОВ И.М. Землетрясение 10 ноября 1940 г. в Молдавии и вопросы сейсморайонирования юго-западной части СССР. В: *Бюлл. Сов. по сейсм., Вопросы сейсмического районирования*. №8, 1960, с. 93 – 98.
81. ХАРМАН Г. *Современный факторный анализ*. М., 1972. 486 с.
82. ЦШОХЕР В.О., ТИЩЕНКО В.Г., ПОПОВ В.В. Карпатские землетрясения 22 октября и 10 ноября 1940 г. В: *Отчет комиссии АН СССР по обследованию последствий землетрясений в МССР и областях Западной Украины*. Рукопись, 1941.
83. ЧЕКУНОВ А.В. Тектоническая модель сейсмоактивного района Вранча. В: *Геологический журнал*, 1987, №4, т.47, с. 3 – 11. ISSN 0375-7974
84. ШЕБАЛИН Н. В. Балльность. магнитуда и глубина очага землетрясений. В: *Землетрясения в СССР*. Москва: Наука, 1961, с. 126–138.
85. ШЕБАЛИН Н.В. Количественная макросейсмика (фрагменты незавершённой монографии). Проблемы макросейсмики. В: *Вычислительная сейсмология*. М.: ГЕОС, 2003, вып. 34, с. 57–201. ISSN 0869-8354
86. ШЕБАЛИН Н. В. *Сейсмическое районирование территории СССР*. 1980.
87. ШЕБАЛИН Н.В., ХРОМЕЦКАЯ Е.А. Методические аспекты получения и интерпретации макросейсмических данных. В: *Землетрясения в СССР за 1988 год*. М: Наука, 1991, с. 9-21.
88. ШУМИЛА В.И. *Статистические модели интерпретации и прогноза поля сейсмической интенсивности*. Кишинёв, Штиинца, 1983, 104 с.
89. ШУМИЛА В.И. Унифицированный каталог землетрясений Карпатского региона и сейсмологические базы данных. В: *Отчет о научно-исследовательской работе по теме “Исследование сейсмогенеза и сейсмической опасности Карпатского региона”*. ИГГ АН МССР, Кишинев, 1991.
90. ЩУКИН Ю.К., ДОБРЕВ Т.Д. Глубинное геологическое строение, геодинамика и геофизические поля очаговой зоны Вранча. В: *Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия*. Ред. Друмя А.В. М.: Наука, 1980, с. 7–13.
91. ATANASIU I. *Cutremurele de pământ din România*. Acad. RPR, Bucureşti, 1961, 275 p.

92. BASIMOV, M. *Mathematical methods in psychological research*. LAP, Lambert Academic Publishing, 2011, 192 p. ISBN 978-3-8442-0703-5
93. BONJER, K.P., ONCESCU, L., RIZESCU. T. et. al. Source- and Site-Parameters of the April 28, 1999. In: *International Conference Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction*. Bucharest, Romania, 2002, pp. 24-26.
94. *Bulletin of the International Seismological Centre for 1970-2023*. International Seismological Centre, 2025. On-line Bulletin: <http://www.isc.ac.uk/> Bull. Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
95. BURTIEV R. Seismic Hazard assessment method based on the stochastic models of seismicity In: *Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*. Tsukuba, Japan, 2017, v. 51, pp. 22–38. ISSN 0387-5404
96. BURTIEV R., ALCAZ V., **CARDANETS V.** Probabilistic Seismic Hazard Analysis on the Base of the Stochastic Models of Seismicity. In: *Indian Journal of Applied Research*. 2016, v. 6, issue 8, pp. 454-466. IF: 3,919. ISSN 2249-555X
97. BURTIEV R., ALCAZ V., TROIAN S., **CARDANETS V.** Factor analysis in seismology. In: *International Journal of Advanced Research*. 2020. V. 8(02). 1268-1285. IF: 7,33. ISSN 2320-5407 DOI: 10.21474/IJAR01/10576
98. *Catalogue of earthquake, part 3. Atlas of isoseismal maps*. UNDP-UNESCO. Skopje, 1974, 275 p.
99. DZIEWONSKI A., CHOU T., WOODHOUSE J. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. In: *J. Geophys Res.* 1981, v. 86, №B4, pp. 2825-2852. DOI:10.1029/JB086iB04p02825
100. *EMSC, Earthquake information Euro-Med seismicity*. Real Time Seismicity <http://www.emsc-csem.org/Earthquake/seismologist.php>
101. ENESCU D. Contributions to the knowledge of the focal mechanism of the Vrancea strong earthquake of March 4, 1977. In: *Rev. Roum. Geol., Geophys., Geogr.*, 1980, t. 24, N1, pp. 3-18. ISSN 0035-340X
102. *European Macroseismic Scale 1998*. Ed. G. GRÜNTAHL. Conseil de L'Europe Cahiers de centre Europeen de Geodinamique et de Seismologie. Vol. 15. Luxembourg, 1998. ISBN 92-871-3798-3
103. FLORINESCO A. *Catalogue des tremblements de terre ressentis sur le territoire de la RPR*. Bucuresti, 1958, 167 p.
104. GEORGESCU E.S. The partial collapse of Coltzea tower during the Vrancea earthquake of 14/26 October 1802: the historical warning of long-period ground motion site effect in

- Bucharest. In: *International Conference Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction*. Oct. 24-26, Bucharest, 2002., p. 113.
105. HEPITES St. Registrul cutremurelor de pământ din România. 1838-1893. In: *Analele Inst. Meteor. al Rom.* T. 6, 1890.
106. *Institutul Național pentru Fizica Pământului C.P. MG-2*. București - Măgurele. România. Disponibil: <http://www1.infp.ro/arhiva-in-timp-real/>
107. ISMAIL-ZADEH A., KEILIS-BOROK V. I., SOLOVIEV A. A. Numerical modelling of earthquake flow in the southeastern Carpathians (Vrancea): effect of a sinking slab In: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1999, v. 111, Is. 3–4, pp. 267–274. ISSN 0031-9201
108. ISMAIL-ZADEH A., MATENCO L., RADULIAN M., CLOETINGH S., PANZA G. Geodynamics and intermediate-depth seismicity in Vrancea (the southeastern Carpathians): Current state-of-the art In: *Tectonophysics*, 2012, v. 530, pp. 50–79. DOI:10.1016/j.tecto.2012.01.016. ISSN 0040-1951
109. ISMAIL-ZADEH A., SOKOLOV V., BONJER K. Tectonic stress, seismicity and seismic hazard in the southeastern Carpathians In: *Nat. Hazards. Springer*, 2007, pp. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9039-5>. ISSN 0921-030X
110. KRONROD T., RADULIAN M., PANZA G. Integrated transnational macroseismic data set for the strongest earthquakes of Vrancea (Romania) In: *Tectonophysics*. 590 (3). 2013. P. 1–23. DOI:[10.1016/j.tecto.2013.01.019](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.019)
111. LASKA W. Die Erdbeben Polens. In: *Mitteilungen der Erdbeben-Kommission der Kais. Wien. Acad. Wiss. Neue Folg.* № 1-20 (1901-1906).
112. MOSTRYUKOV A.O., PETROV V.A. Catalogue of focal mechanisms of earthquakes 1964-1990. In: *Materials of the World Data Center*. Moskow, 1994, 87 p.
113. MULLER G., BONJER K.-P., STOCKL H. Procesul de rupere dedus din soluția planului de falie și analiza evenimentului multiplu. In: *Cercetari seismologice asupra cutremurului din 4 martie 1977*. București. 1979, pp.17-38.
114. ONCESCU M.C., APOLOZAN L. Dubletul seismic de la 1 august 1985. In: *St. și cerc. de geol., geof., geogr.* V. 24, 1986, pp. 12-16. ISSN 0039-396X
115. PAMFILE T. *Mitologia românească III. Pământul. După credințele poporului român*. București, 1924, 55 p.
116. POPESCU G. Cutremurele de pământ din Dobrogea. In: *Analele Dobrogei, an. XIX*, v. 1. Cernăuți, 1938, pp. 22-26.

117. RADU C. The tectonic stress and tectonic motion direction in Romania In: *Proceedings of the Seminar on seismic zoning map*. UNESCO: Skopje, 1976, v. 1, pp. 84-100.
118. RADU C., UTALE A. The Vrancea (Romania) earthquake of October 26 1802. In: *XXXIII General Assembly of the Europ. Seism. Commis. Activity report 1990 – 1992 and Proceedings*. Prague, 1994, v. 1, pp. 110 – 114.
119. RADULIAN M., POPESCU E., BALA A., UTALE A. Catalog of fault plane solution for the earthquakes occurred on the Romanian territory. In: *Rom. Journ. Phys.*, 47, 2002, pp. 663-683. ISSN 1221-146X
120. RETHLY A.A *Karpatmedencek Foldrengescei (455-1918)*. Budapest: Acad., Kiado, 1952, 152 p.
121. *Romplus catalogue RoNet analog seismograms Hypo/Hypoplus program (ROMPLUS)*. www.infp.ro/catal/catal.html.
122. SANDU I. Cronologia evoluției conceptuale asupra seismelor. In: *Buletinul IGS ASM*, №1, 2012, pp. 47-62. ISSN 1857-0046
123. SANDU I. *Influența parametrilor sursei seismice Vrancea și condițiilor de sol asupra efectului seismic în Republica Moldova*. Teza de doctor în științe fiz.-mat. Chișinău, 2015, 170 p.
124. SMITH L. I. *A Tutorial on Principal Components Analysis*. 2002. 26 p.
125. *SPSS Trends 14.0. (2005)*. Chicago. 2006, 165. Retrieved from <http://www.spss.com/worldwide>.
126. ȘTEFANESCU Gr. Cutremurele de pământ în România în timp de 1391 de ani, de la 455 pînă la 1874. Anal. Acad. Rom. In: *Mem. Sect. Științe* (11), vol. XXIV, București, 1902, pp. 1-34.
127. TRIFU C.I., ONCESCU M.C. Fault geometry of August 30 1986 Vrancea earthquake. In: *Annales de Geophysique*, 1987, B5, N6, pp. 727-729. ISSN 0992-7689

БЛАГОДАРНОСТИ

Хочу выразить признательность и благодарность научному руководителю док.-хаб. Р.З. Буртиеву и консультанту док.-хаб. В.Г. Алказу; отдельно отметить вклад и неоценимую помощь соавтора большинства научных работ док. Н.Я. Степаненко. Также выражаю благодарность сотрудникам ИГС, среди которых: Н.А. Симонова, В.Б. Ботнару, В.Н. Гинсарь, Е.С. Исичко, И.Н. Никоара, К.М. Спиан, М.В. Пыльцова, П.П. Павлов. Специалистам в этой области, сделавших ценные замечания к работе: И.С. Санду, Ю.В. Семёновой, А. В. Муровской, О.В. Арьясовой.

Особая благодарность за постоянную поддержку и вдохновение на протяжении всего времени работы над диссертацией А.Г. Хакимову.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1.

Таблица А1. Параметры землетрясений области Вранча за 1977-2014 гг.

<i>№</i>	<i>Дата</i>	<i>Время ч м с</i>	<i>Координаты φ°, N λ°, E</i>	<i>Магнитуда</i>	<i>Глубина км</i>	<i>Источник</i>
1	04 03 1977	19 21 54	45,83 26,72	Mb=6,4, Ms=7,2	86	ISC
		19 22 10	45,23 26,17	Mb=6,4	84	HRVD
2	02 10 1978	20 28 52	45,72 26,54	Mb=4,9	161	ISC
		20 28 52	45,70 26,70	Ms=5,0	140	BUC
		20 28 54	45,24 26,43	Mb=5,0	154	HRVD
3	31 05 1979	07 20 06	45,63 26,47	Mb=5,1	130	ISC
		07 20 06	45,60 26,40	Ms=5,1	120	BUC
		07 20 13	45,47 26,40	Mb=5,1	114	HRVD
4	11 09 1979	15 36 54	45,59 26,31	Mb=5,0	154	ISC
		15 36 54	45,60 26,50	Ms=5,3	158	BUC
		15 36 50	45,45 25,88	Mb=5,1	143	HRVD
5	01 08 1985	14 35 00	45,73 26,52	Mb=5,1	105	ISC
		14 35 03	45,76 26,52	Mw=5,0	107	BUC
		14 35 06	45,77 26,95	Mb=5,2	103	HRVD
6	30 08 1986	21 28 36	45,52 26,49	Ms=7,1	131	BUC
		21 28 35	45,54 26,31	Mb=6,3	137	ISC
		21 28 35	45,64 26,38	Mb=6,6, Ms=6,9	132	MOS
		21 28 35	45,55 26,32	Mb=6,4, Ms=6,9	132	NEIS
		21 28 51	45,76 26,53	Mb=6,3, Mw=7,2	133	HRVD
7	30 05 1990	10 40 06	45,85 26,66	Mb=6,4	89	ISC
		10 40 06	45,88 26,67	Ms=7,3	90	BUC
		10 40 06	45,90 26,66	Mb=6,7	84	MOS
		10 40 06	45,84 26,67	Mb=6,7	89	NEIC
		10 40 13	45,92 26,81	Mb=6,7, Mw=6,9	74	HRVD
8	31 05 1990	00 17 48	45,81 26,77	Mb=5,9	90	ISC
		00 17 48	45,81 26,77	Mb=6,1	88	NEIC
		00 17 45	45,67 26,00	Mw=6,3	87	HRVD
9	13 03 1998	13 14 38	45,57 26,26	Mb=4,7	156	ISC
		13 14 43	45,61 26,30	Mb=5,0	151	HRVD
10	28 04 1999	08 47 55	45,48 26,22	Mb=5,1	150	ISC
		08 47 58	45,51 26,08	Mb=5,1	144	HRVD
		08 47 56	45,49 26,27	Mw=5,0	159	NEIC
11	06 04 2000	00 10 39	45,73 26,58	Mb=4,9	137	ISC
		00 10 42	45,61 26,56	Mw=5,2	122	HRVD
		00 10 39	45,74 26,58	Mw=5,4	150	CSEM
		00 10 38	45,72 26,58	Mb=5,0	135	NEIC
12	24 05 2001	17 34 01	45,69 26,42	Mb=4,8	144	ISC
		17 34 06	45,87 26,49	Mw=5,2	139	HRVD
		17 34 07	45,74 26,62	Mb=5,1	143	MED
		17 34 01	45,74 26,40	Mb=5,1	144	ZUR
13	20 07 2001	05 09 40	45,74 26,71	Mb=4,9	127	ISC
		05 09 44	45,66 26,73	Mb=4,8	134	HRVD

№	Дата	Время ч м с	Координаты φ°, N λ°, E	Магнитуда	Глубина км	Источник
		05 09 46	45,88 26,82	Mw=4,8	125	MED
		05 09 39	45,74 26,73	Mw=4,8	129	ZUR
14	30 11 2002	08 15 47	45,69 26,50	Mb=5,0	172	ISC
		08 15 46	45,73 26,57	Mw=4,8	156	ZUR
		08 15 47	45,65 26,80	Mw=5,0	171	MED
15	05 10 2003	21 38 17	45,65 26,32	Mb=4,5	152	ISC
		21 38 17	45,67 26,33	Mw=4,5	153	ZUR
		21 38 17	45,59 26,43	Mw=4,4	144	MED
16	27 09 2004	09 16 23	45,67 26,43	Mb=4,8	151	ISC
		09 16 24	45,74 26,56	Mw=4,8	154	HRVD
		09 16 23	45,64 26,60	Mw=4,8	146	MED
		09 16 23	45,70 26,48	Mw=4,8	150	ZUR
17	03 10 2004	09 02 01	45,18 28,94	Ms=4.1 Mb=5.0	8	ISC
		09 02 07	45,20 28,56	Mw=4,8	12	HRVD
		09 02 07	45,18 29,07	Mw=4,7	17	MED
		09 02 06	45,20 28,97	Mw=4,7	9	ZUR
18	27 10 2004	20 34 36	45,78 26,58	Mb=5,6	98	ISC
		20 34 37	45,73 26 67	Mw=5,8	94	HRVD
		20 34 37	45,79 26,62	Mb=5,8 Mw=5,9	96	NEIC
		20 34 36	45,79 26,62	Mw=5,8	78	ZUR
		20 34 33	45,65 26,79	Mw=5,9	96	MED
19	14 05 2005	01 53 21	45,68 26,44	Mb=5,1	149	ISC
		01 53 21	45,67 26,48	Mw=5,2	139	HRVD
		01 53 20	45,68 26,44	Mw=5,3	135	ZUR
		01 53 20	45,71 26,59	Mw=5,2	137	MED
20	18 06 2005	15 16 41	45,74 26,68	Mb=4,9	138	ISC
		15 16 42	45,67 26,50	Mw=5,0	138	HRVD
		15 16 42	45,71 26,70	Mw=5,0	144	ZUR
		15 16 42	45,71 26,69	Mw=5,0	138	MED
21	13 12 2005	12 14 45	45,72 26,63	Mb=4,6	134	ISC
		12 14 42	45,82 26,69	Mw=4,8	138	HRVD
		12 14 44	45,78 26,79	Mw=4,8	125	ZUR
		12 14 42	45,66 26,75	Mw=4,8	132	MED
22	25 04 2009	17 18 48	45,70 26,54	Mb=5,3	102	ISC
		17 18 53	45,64 26,73	Mw =5,2	90	HRVD
		17 18 47	45,74 26,73	Mw =4,4	75	ZUR
		17 18 48	45,72 26,80	Mw =5,2	86	MED
		17 18 50	45,59 26,71	Mw=5,2	107	GCMT
		17 18 48	45,65 26,60	Mw =5,3	100	NEIC
23	08 06 2010	15 16 10	45,62 26,38	Mb=4,4	115	ISC
		15 16 12	45,57 26,42	Mw=4,3	103	HRVD
		15 16 10	45,72 26,73	Mw=4,3	98	MED
24	30 09 2010	05 31 23	45,55 26,34	Mb=4,3	141	ISC
		05 31 22	45,50 26,31	Mw=4,4	162	MED
25	01 05 2011	02 24 16	45,62 26,42	Mb=4,6	140	ISC
		02 24 15	45,61 26,49	Mw=4,8	137	MED

№	Дата	Время ч м с	Координаты φ°, N λ°, E	Магнитуда	Глубина км	Источник
		02 25 04	45,58 26,46	Mw=4,8	133	GFZ
26	04 10 2011	02 40 48	45,58 26,46	Mb=4,6	136	ISC
		02 40 46	45.50 26,58	Mw=4,7	137	MED
27	06 07 2012	22 48 00	45,74 26,65	Mb=4,4	111	ISC
		22 48 00	45,68 26,67	Mw=4,4	127	MED
		22 48 00	45,68 26,67	Mb=4,4	113	NEIC
28	01 12 2012	20 52 07	45,79 26,74	Mb=4,7	90	ISC
		20 52 07	45,75 26,76	Mw=4,3	76	MED
29	06 10 2013	01 37 21	45,64 26,69	Mb=5,3	134	ISC
		01 37 20	45,68 26,54	Mb=5,4	131	MOS
		01 37 23	45,67 26,55	Mw=5,3	120	GFZ
		01 37 23	45,62 26,71	Mw=5,3	133	USGS
		01 37 21	45,66 26,68	Mw=5,3	103	MED
		01 37 21	45,66 26,59	Mw=5,3	130	GCMT
30	15 10 2013	19 13 12	45,60 26,59	ML=4,9	138	ISC
		19 13 12	45,60 26,55	Mw=4,7	141	MED
		19 18 05	45,61 26,47	ML=5,0	134	BUC
		19 18 07	45,55 26,57	Mw=4,7	125	GCMT
		19 18 05	45,72 26,60	Mw=4,7	121	MED
		19 18 05	45,68 26,48	Mw=4,7	111	GFZ
		19 45 57	45,59 26,46	ML=4,8	105	BUC
		19 46 08	45,70 26,50	Mw=4,5	112	GFZ
31	29 03 2014	19 18 05	45,61 26,47	ML=5,0	134	BUC
		19 18 07	45,55 26,57	Mw=4,7	125	GCMT
		19 18 05	45,72 26,60	Mw=4,7	121	MED
		19 18 05	45,68 26,48	Mw=4,7	111	GFZ
32	10 09 2014	19 45 57	45,59 26,46	ML=4,8	105	BUC
		19 46 08	45,70 26,50	Mw=4,5	112	GFZ
		19 45 58	45,60 26,45	Mw=4,4	106	MED
33	22 11 2014	19 14 17	45,86 27,15	ML=5,7	41	BUC
		19 14 13	45,89 27,23	Ms=5,5 Mb=5,7	40	ИОЦ ГС РАН
		19 14 17	45,86 27,16	Mw=5,5 Mb=5,6	41	NEIC
		19 14 17	45,86 27,16	Mw=5,6	43	IPGP
		19 14 17	45,80 27,30	Mw=5,6	31	INGV
		19 14 17	45,91 27,24	Mw=5,8	16	MED
		19 14 18	45,80 27,17	Mw=5,7	25	GCMT
34	07 12 2014	21 04 05	45,88 27,17	ML=4,5	40	BUC
		21 04 05	45,84 27,18	Mw=4,4	32	MED

Таблица А2. Параметры механизма очага землетрясений области Вранча
за 1977-2014 гг.

№	Дата	Нодальные плоскости						Оси главных напряжений						Источник
		NP1			NP2			P		N		T		
		Stk	Dp	Slip	Stk	Dp	Slip	Az	Pl	Az	Pl	Az	Pl	
1	04 03 1977	222	71	99	20	20	69	307	25	40	8	147	64	Enes
		235	62	92	50	28	86	323	17	54	2	151	73	HRVD
2	02 10 1978	122	37	71	325	55	104	45	9	137	11	278	75	MP
		131	34	8	316	56	93	44	11	134	3	236	79	Rad
		140	39	85	326	51	94	53	6	144	3	263	83	HRVD
3	31 05 1979	235	68	47	123	47	149	354	12	254	39	98	48	MP
		233	80	65	124	27	159	343	31	238	25	116	49	Rad
		221	85	92	23	6	72	309	40	41	2	133	50	HRVD
4	11 09 1979	276	45	45	27	71	49	145	16	42	38	264	48	MP
		210	13	107	12	77	86	105	32	13	4	278	58	Rad
		202	29	70	45	63	101	127	17	220	10	338	70	HRVD
5	01 05 1985	282	67	42	172	52	150	44	10	395	43	143	45	MP
		200	76	150	298	61	16	252	10	358	57	156	31	OA
		288	9	-14	32	88	-98	293	46	32	8	130	42	HRVD
6	30 08 1986	245	69	102	35	24	62	326	23	61	11	174	64	MP
		233	65	92	49	25	87	322	20	52	1	146	70	TO
		242	62	100	40	30	70	324	17	56	11	176	71	MOS
		230	70	69	98	29	35	336	22	222	8	110	60	NEIC
		240	72	97	39	19	70	324	27	58	6	160	63	HRVD
7	30 05 1990	221	63	88	46	27	94	312	18	222	2	126	72	MP
		231	71	96	32	20	72	316	26	49	6	151	63	Зах
		232	58	108	20	36	63	309	11	42	15	184	71	MOS
		218	62	82	55	29	105	314	17	222	7	110	72	NEIC
		236	63	101	33	29	70	318	17	51	9	168	70	HRVD
8	31 05 1990	93	23	58	307	71	102	27	25	123	12	236	62	MP
		130	20	90	310	70	90	25	40	130	0	220	65	NEIC
		90	26	54	309	69	106	27	22	123	15	244	63	HRVD
9	13 03 1998	274	40	136	42	64	58	152	13	56	26	264	60	MOLD
		227	12	96	42	78	89	133	33	42	1	310	57	HRVD
10	28 04 1999	164	57	96	332	34	80	248	10	340	6	92	78	MOLD
		166	54	88	350	36	93	258	9	2	2	80	66	HRVD
		171	53	106	325	40	69	249	5	340	13	122	78	Bon
11	06 04 2000	226	70	93	39	20	83	314	25	56	3	141	65	MOLD
		238	81	106	356	18	29	315	34	56	16	167	51	HRVD
		232	79	81	92	14	129	330	33	234	9	131	55	CSEM
		223	78	96	18	14	66	308	32	42	6	140	57	NEIC
12	24 05 2001	205	52	93	18	38	86	292	6	23	3	118	84	MOLD
		206	60	104	1	33	67	288	14	21	43	150	71	HRVD
		201	60	103	356	62	69	282	14	15	11	141	72	MED
		204	57	100	7	34	78	287	12	19	8	143	76	ZUR
13	20 07 2001	120	50	96	299	40	86	206	5	296	4	78	84	MOLD

№	Дата	Нодальные плоскости						Оси главных напряжений						Источник
		NP1			NP2			P		N		T		
		Stk	Dp	Slip	Stk	Dp	Slip	Az	Pl	Az	Pl	Az	Pl	
		17	48	162	119	77	44	242	18	132	45	347	39	HRVD
		182	55	92	358	35	87	270	10	1	2	102	80	ZUR
		5	31	100	173	59	84	268	14	176	5	67	75	MED
14	30 11 2002	150	80	-105	26	18	-36	40	52	154	14	254	34	MOLD
		151	75	-100	3	18	-59	47	59	153	9	248	29	ZUR
		147	88	-104	51	14	-7	43	45	148	14	251	42	MED
15	05 10 2003	274	50	126	26	64	44	147	9	68	28	248	47	MOLD
		208	33	106	9	58	80	106	13	14	9	251	74	ZUR
		225	38	123	05	59	67	111	11	17	20	228	67	MED
16	27 09 2004	274	44	123	52	56	62	162	6	70	23	262	68	MOLD
		198	40	75	37	52	102	118	6	210	10	357	79	HRVD
		238	30	95	52	60	87	144	15	54	2	315	74	ZUR
		223	37	39	57	53	98	141	8	232	7	28	80	MED
17	03 10 2004	159	64	-46	274	50	-148	120	48	220	40	224	6	MOLD
		152	70	-72	289	27	-129	88	61	325	17	228	23	HRVD
		123	45	-90	303	45	-90	88	90	303	0	213	0	ZUR
		116	47	-100	311	44	-79	317	82	123	7	213	2	MED
18	27 10 2004	157	46	104	317	46	76	237	1	328	10	147	81	MOLD
		335	19	27	219	81	107	294	34	37	17	149	51	HRVD
		310	24	13	208	85	114	278	35	26	23	142	45	NEIC
		14	14	66	219	77	96	304	32	38	6	137	58	ZUR
		47	86	-94	268	6	-50	313	49	47	4	141	41	MED
19	14 05 2005	183	40	86	08	50	94	93	5	186	3	292	84	MOLD
		183	50	71	31	44	111	286	3	196	14	29	76	HRVD
		192	47	78	30	45	103	291	1	201	9	28	81	ZUR
		188	49	68	39	45	114	293	2	202	16	31	73	MED
20	18 06 2005	107	44	95	275	40	80	192	6	282	6	38	82	MOLD
		112	58	90	293	32	90	203	13	113	0	22	77	HRVD
		114	65	91	293	25	88	204	20	294	1	26	79	ZUR
		111	62	93	285	28	84	199	17	290	3	28	73	MED
21	13 12 2005	253	60	100	56	30	76	336	16	67	8	184	73	MOLD
		219	76	112	339	26	33	292	28	34	22	156	53	HRVD
		239	80	112	358	15	39	309	33	48	11	154	53	ZUR
		221	81	104	343	17	33	299	34	39	14	148	52	MED
22	25 04 2009	237	40	78	74	50	102	156	6	246	8	36	79	MOLD
		233	42	73	76	51	105	156	5	246	11	44	78	HRVD
		243	46	82	75	44	98	339	0	249	5	76	84	ZUR
		230	46	77	68	46	102	149	0	239	9	58	81	GCMT
		249	39	71	93	53	105	172	7	264	11	270	52	NEIC
		235	43	74	76	49	104	156	3	247	11	49	79	MED
23	08 06 2010	128	46	106	287	46	74	207	1	298	11	130	80	MOLD
		140	45	85	327	46	95	53	0	143	4	317	86	HRVD
		211	49	54	79	53	124	145	2	237	26	51	64	MED
24	30 09 2010	274	44	94	86	44	84	359	0	90	4	270	88	MOLD
		299	50	95	111	40	84	25	5	116	4	240	84	MED

№	Дата	Нодальные плоскости						Оси главных напряжений						Источник
		NP1			NP2			P		N		T		
		Stk	Dp	Slip	Stk	Dp	Slip	Az	Pl	Az	Pl	Az	Pl	
25	01 05 2011	153	62	64	22	38	130	262	14	167	24	20	62	MOLD
		170	63	68	31	34	126	275	15	180	19	41	65	MED
		165	54	73	12	40	111	267	8	176	14	38	76	GFZ
26	04 10 2011	196	46	98	6	44	84	280	1	10	5	182	86	MOLD
		203	48	102	5	43	77	284	3	15	9	178	81	MED
27	06 07 2012	233	60	94	67	32	85	328	14	236	6	120	76	MOLD
		261	70	109	36	28	49	335	22	74	18	199	61	MED
		281	59	84	112	32	100	15	13	284	5	173	76	NEIC
28	01 12 2012	233	60	93	46	30	86	320	15	42	4	150	76	MOLD
		201	46	48	73	57	125	139	6	232	29	38	61	MED
29	06 10 2013	217	60	98	20	32	82	302	15	33	8	148	74	MOLD
		226	58	91	43	32	88	315	13	45	1	140	77	MOS
		228	53	95	40	37	84	315	8	45	4	160	81	USGS
		229	50	94	42	40	85	316	5	46	3	169	84	GCMT
		233	52	92	50	38	88	321	17	51	1	153	83	MED
		232	49	84	61	41	97	326	4	236	5	97	84	GFZ
30	15 10 2013	217	67	104	27	23	69	312	21	35	4	154	58	MOLD
		185	59	70	39	36	119	289	12	195	17	52	69	MED
31	29 03 2014	184	50	86	10	40	110	277	5	186	4	94	85	MOLD
		211	59	95	22	31	82	298	14	29	4	134	76	GCMT
		198	53	81	33	37	102	295	8	204	7	73	79	MED
		198	55	100	1	37	76	281	9	12	8	144	78	GFZ
32	10 09 2014	296	63	104	89	30	66	16	14	109	13	238	70	BUC
		288	59	98	93	32	78	16	15	102	6	196	76	GFZ
		288	70	107	67	26	51	5	23	102	16	224	61	MED
33	22 11 2014	134	76	-86	295	15	-106	50	60	311	5	220	30	BUC
		138	58	-39	251	58	-141	105	49	284	41	14	0	ИОЦ ГС РАН
		148	80	-44	248	47	-166	98	37	318	45	205	21	NEIC
		148	89	-57	238	33	-179	82	45	304	30	215	36	IPGP
		140	82	-72	247	30	-162	82	56	316	78	210	30	INGV
		140	84	-74	249	17	-160	67	48	318	16	216	37	GCMT
		144	87	-80	252	11	-162	65	47	324	10	225	41	MED
34	07 12 2014	130	59	-78	289	33	-108	68	72	304	10	212	14	BUC
		148	75	-56	259	37	-154	95	49	318	33	213	23	MED

Примечание. Агентства: MOLD – Институт геологии и сейсмологии АН РМ; HRVD – University of Harvard (Гарвардский центр США); MOS – Геофизическая служба Института Физики Земли РАН; CSEM, MED – Centre Seismologique Euro-Mediterraneen, Strasbourg, France; NEIC – The Department of Geological Sciences at the University of Michigan, USGS/NEIC USA; ROM – National Institute of Earth Physics, Bucharest, Romania; ZUR – Institute of Geophysics, ETH, Zurich; PDE – Preliminary determination of Epicenters, USGS/NEIC USA.

Землетрясение 11 июня 1738 г.

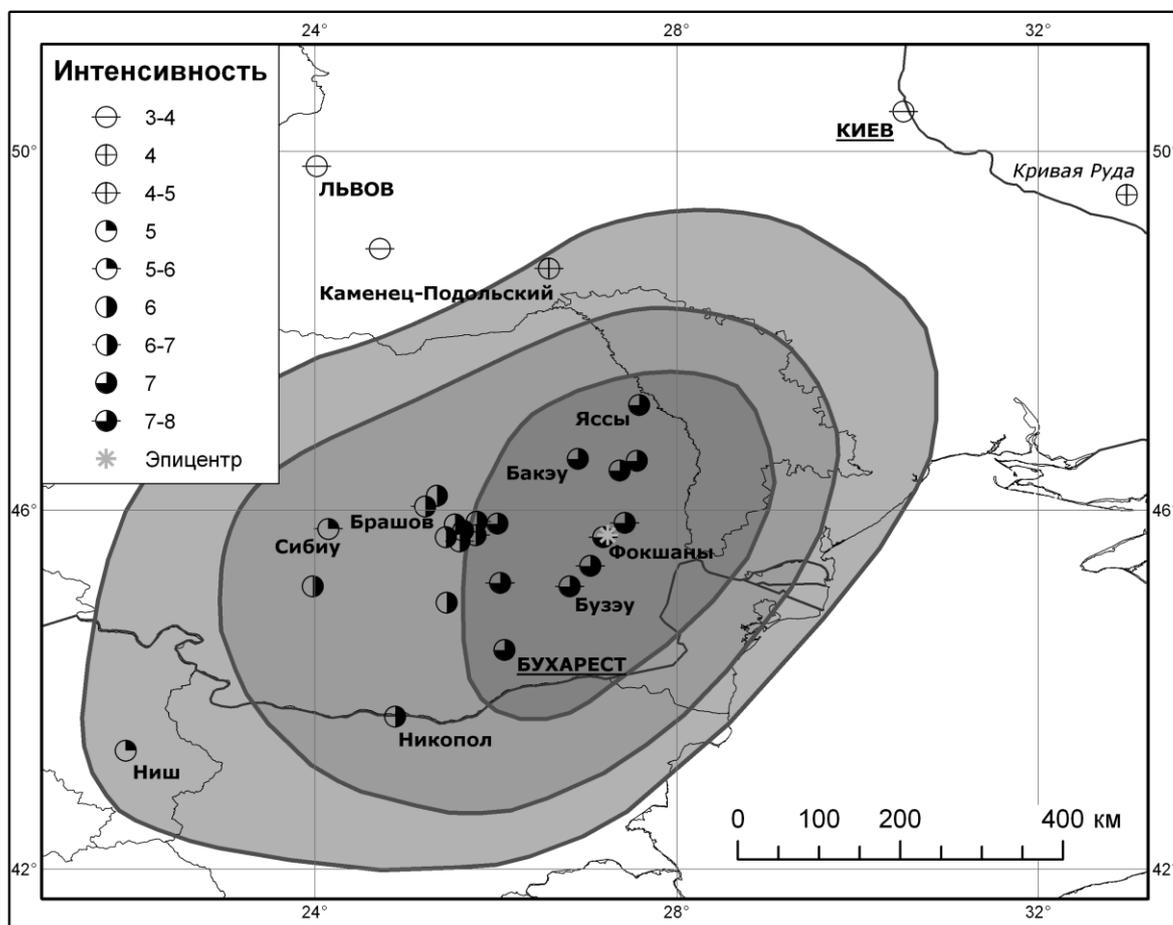


Рис. А1. Карта землетрясения 11 июня 1738 года

Землетрясение 6 апреля 1790 г.

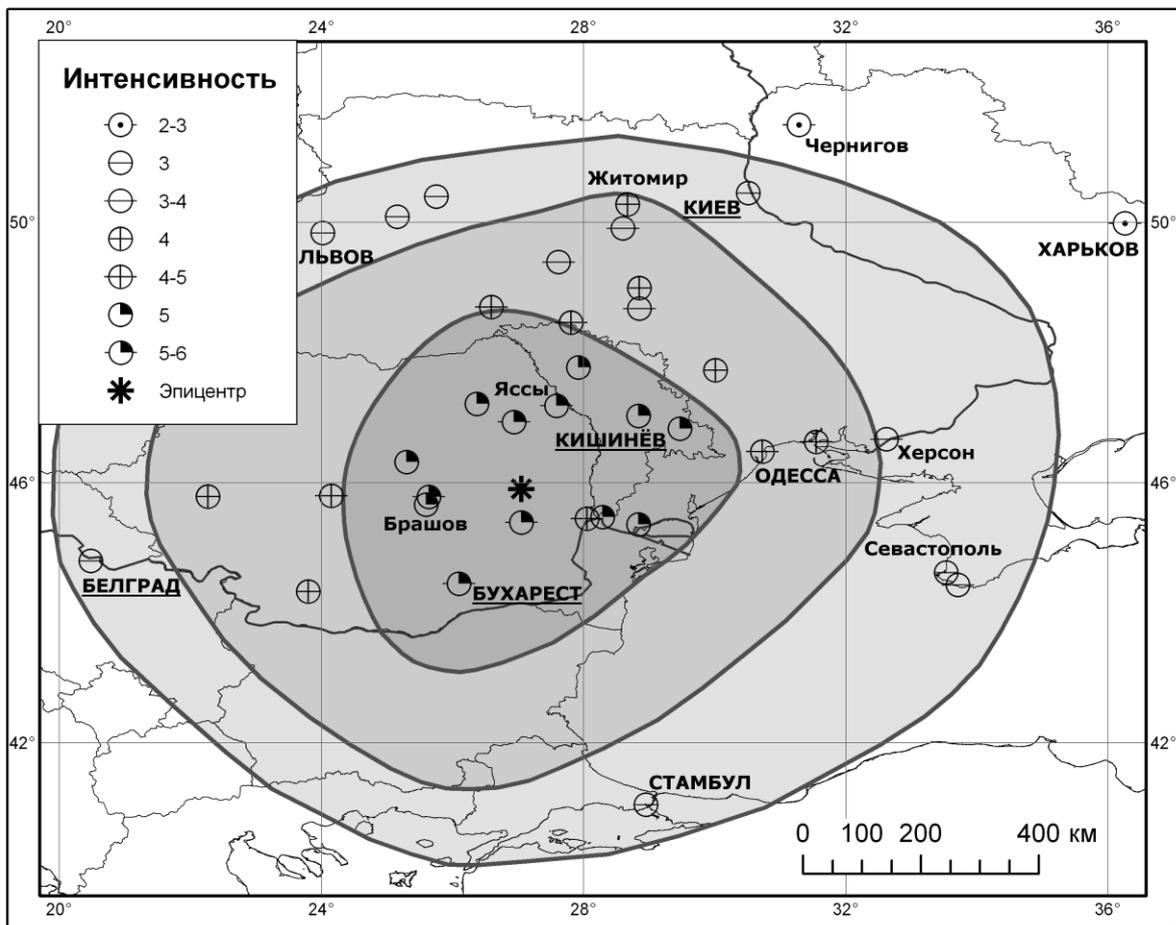


Рис. А2. Карта землетрясения 6 апреля 1790 года

Землетрясение 26 октября 1802 г.

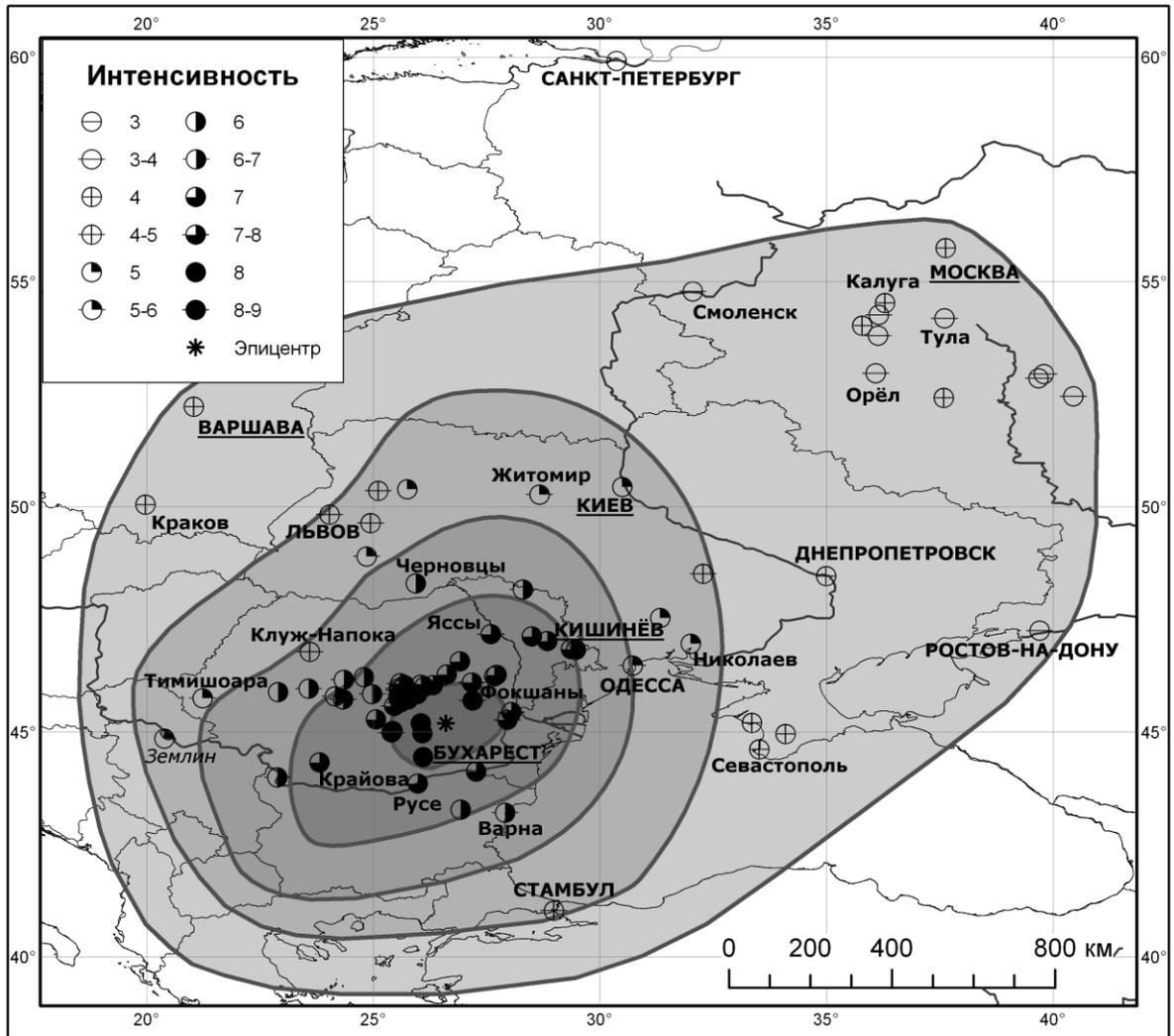


Рис. А3. Карта землетрясения 26 октября 1802 года

Землетрясение 23 января 1838 г.

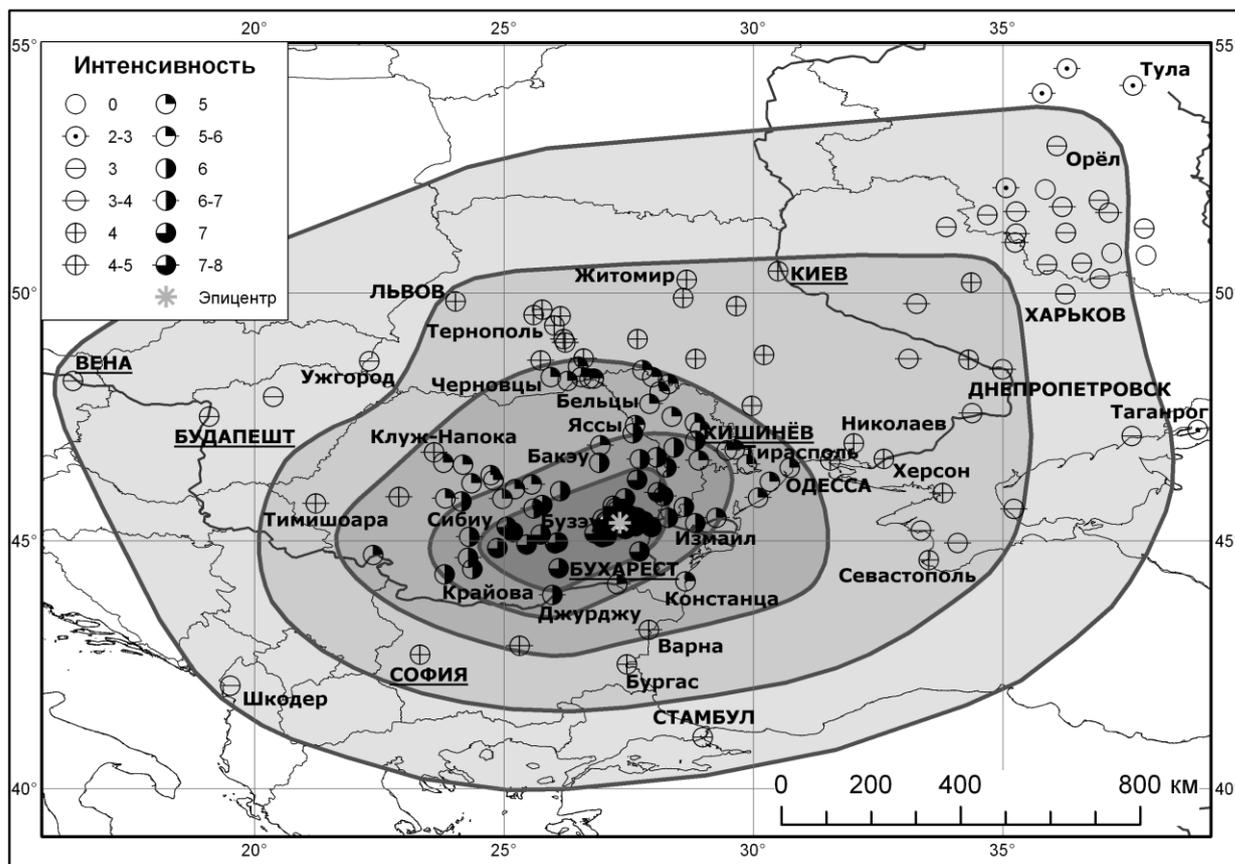


Рис. А5. Карта землетрясения 23 января 1838 года

Землетрясение 17 августа 1893 г.

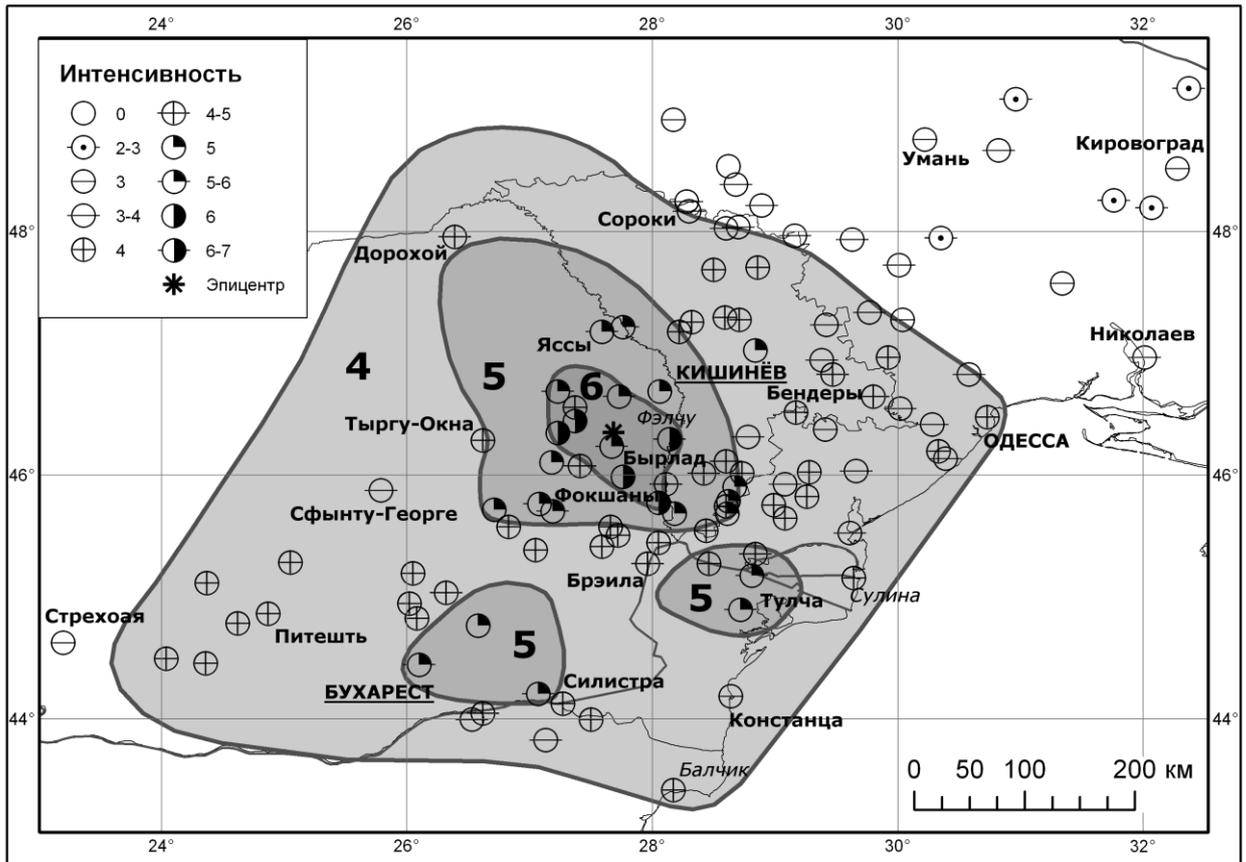


Рис. А6. Карта землетрясения 17 августа 1893 года

Землетрясение 10 сентября 1893 г.

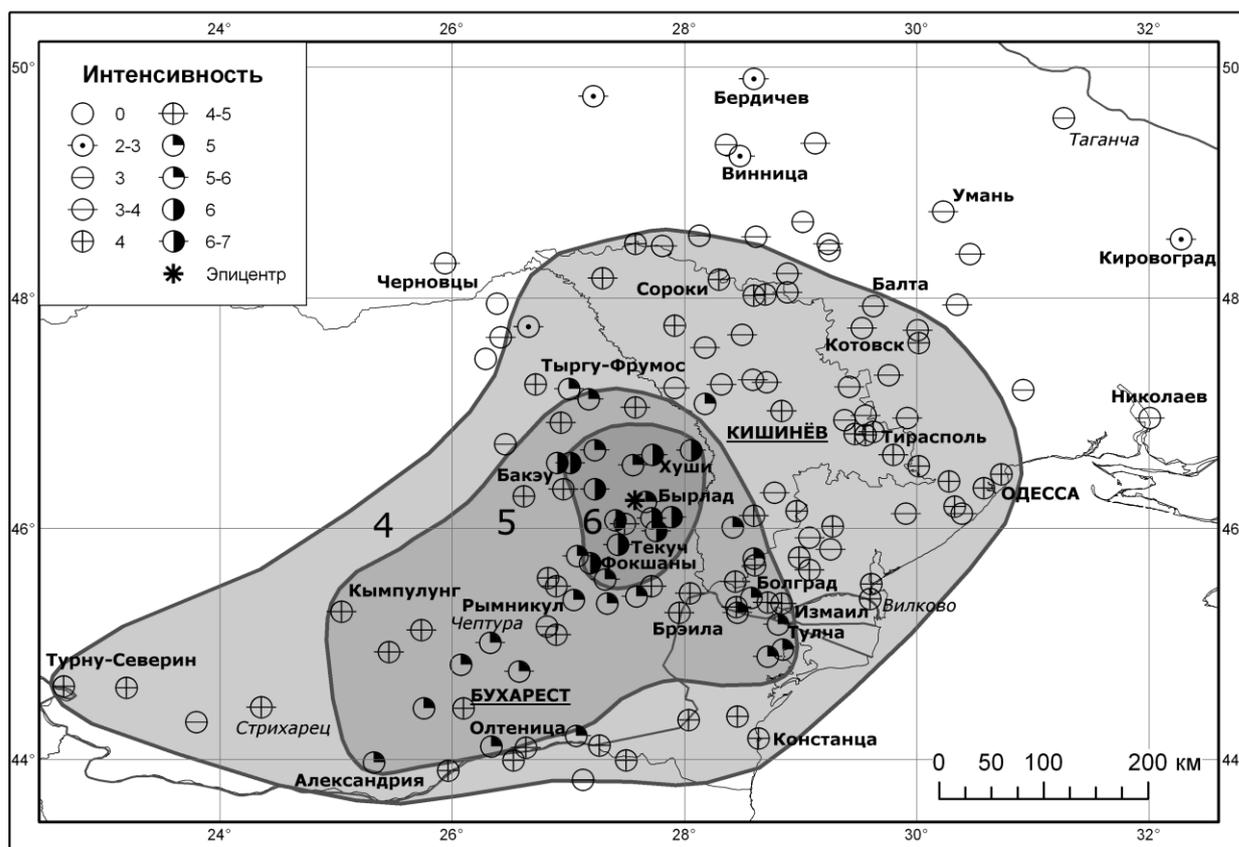


Рис. А7. Карта землетрясения 10 сентября 1893 года

Землетрясение 4 марта 1894 г.

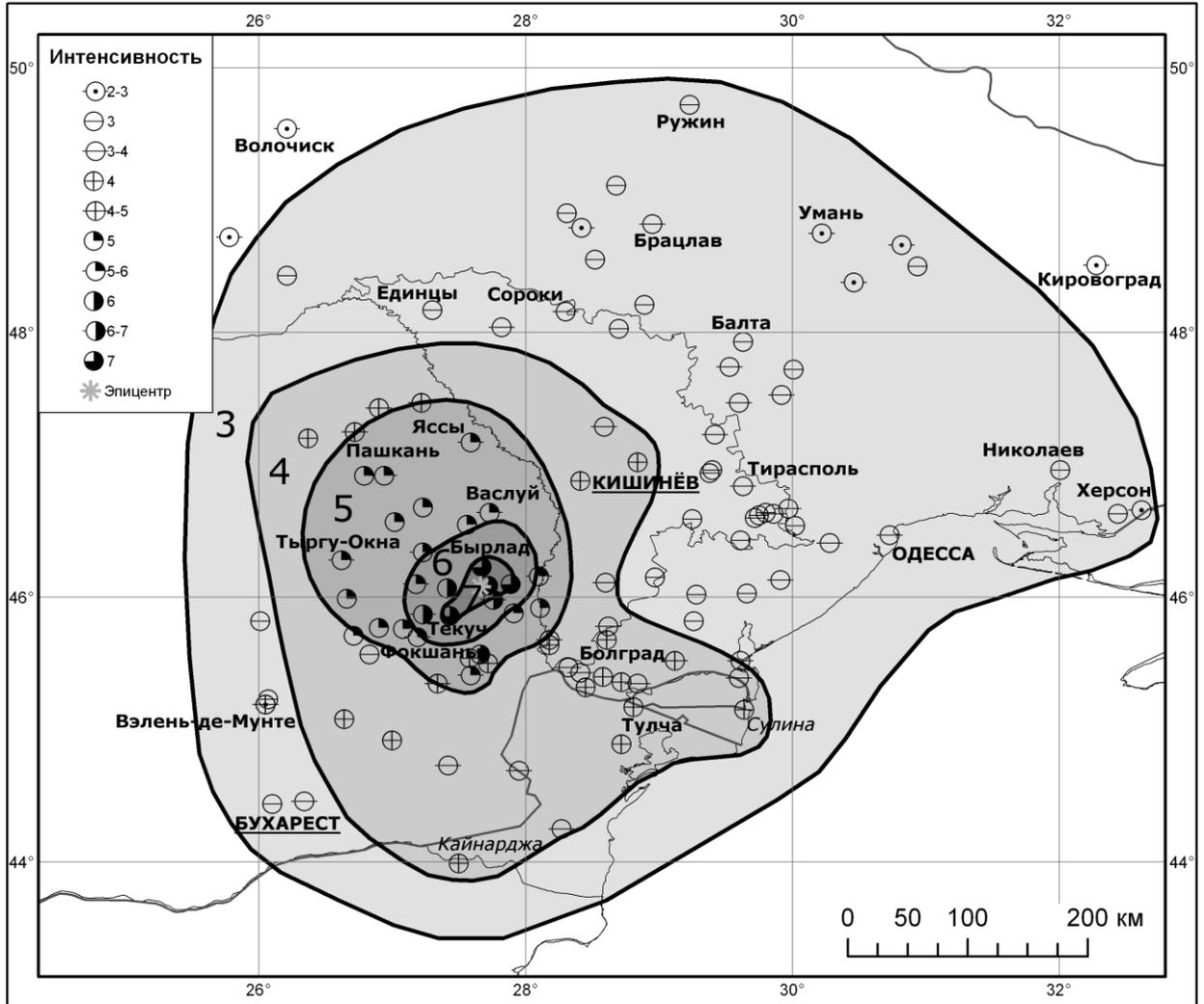


Рис. А8. Карта землетрясения 4 марта 1894 года

Землетрясение 31 августа 1894 г.

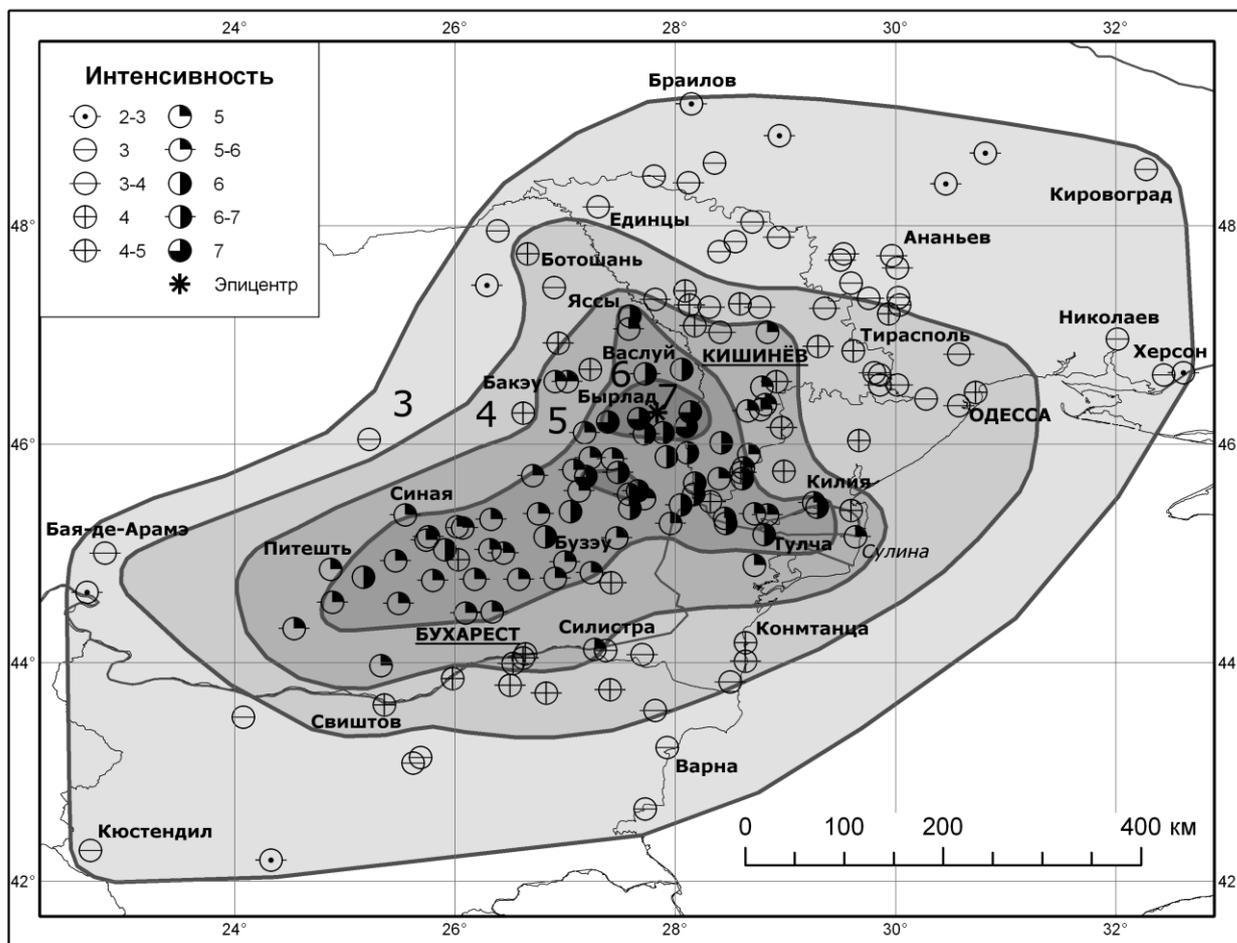


Рис. А9. Карта землетрясения 31 августа 1894 года

Землетрясение 6 февраля 1904 г.

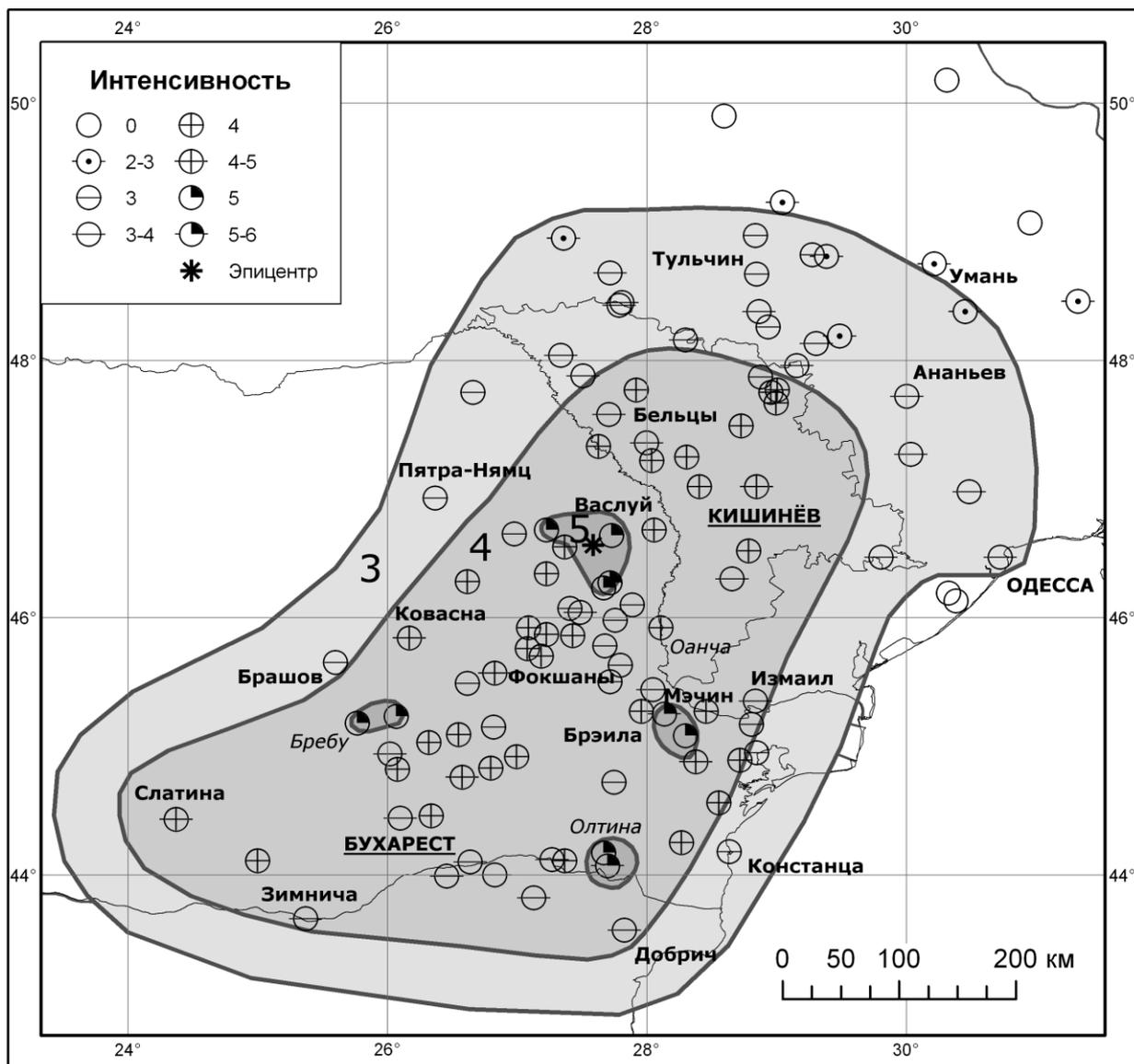


Рис. А10. Карта землетрясения 6 февраля 1904 года

Землетрясение 6 октября 1908 г.

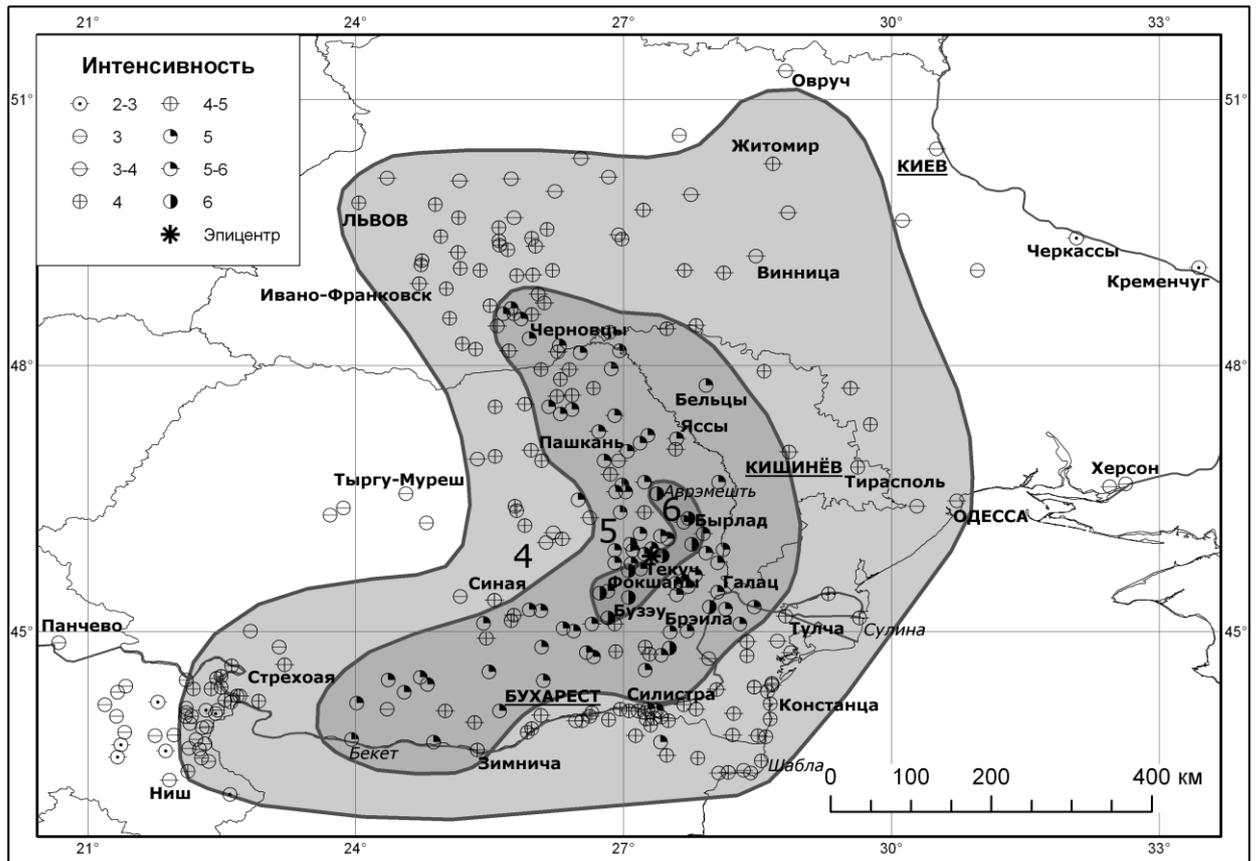


Рис. А11. Карта землетрясения 6 октября 1908 года

Землетрясение 25 мая 1912 г.

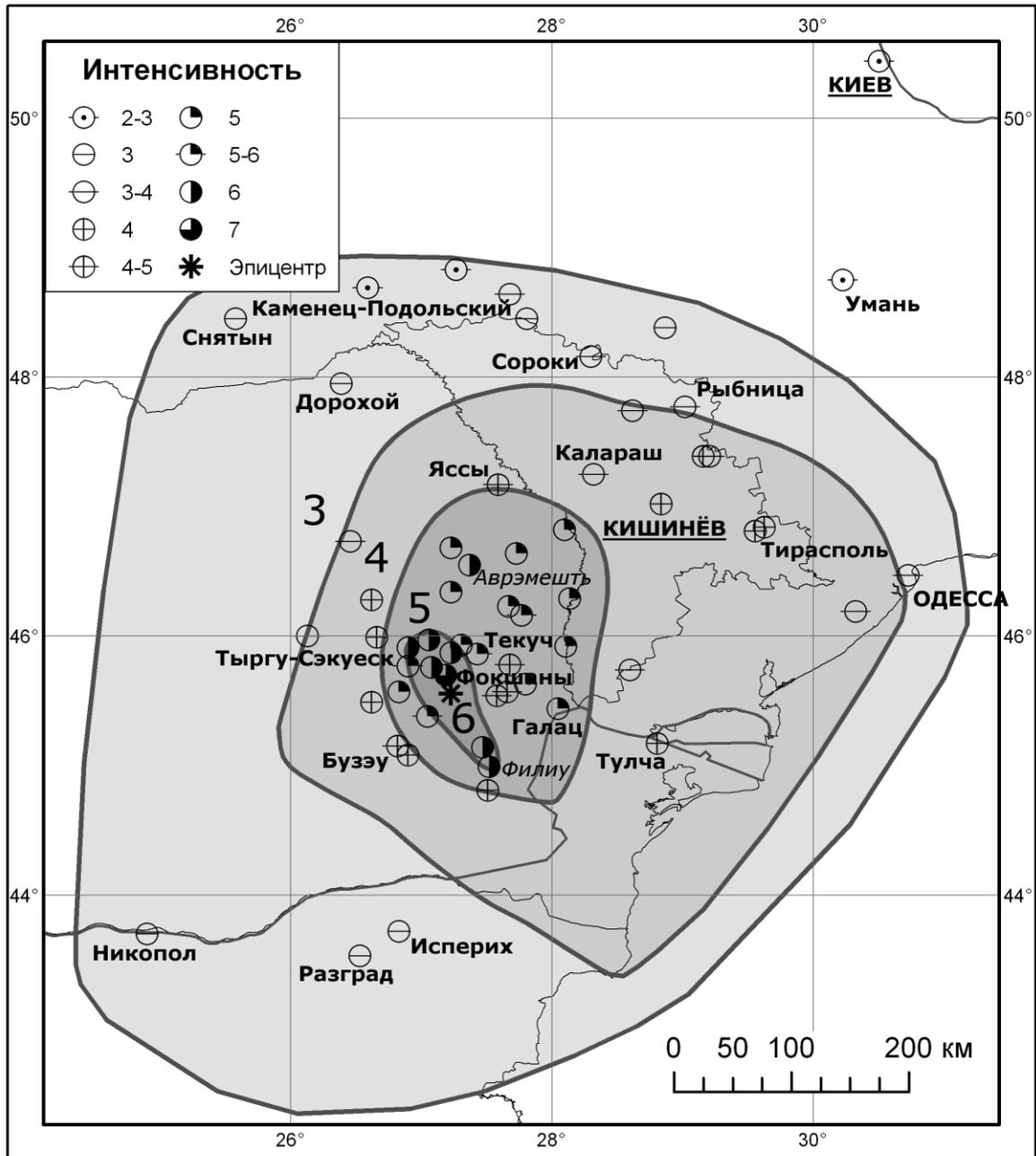


Рис. А12. Карта землетрясения 25 мая 1912 года

ДЕКЛАРАЦИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

Нижеподписавшийся, заявляю под личную ответственность, что материалы, представленные в докторской диссертации, являются результатом личных научных исследований и разработок. Осознаю, что в противном случае, буду нести ответственность в соответствии с действующим законодательством.

Карданец, Владлен

17. 03. 2025

CURRICULUM VITAE

Ф.И.О.: КАРДАНЕЦ Владлен Юрьевич

Дата рождения: 11 июля 1979

Место рождения: Кишинёв, РМ

Гражданство: Республика Молдова

Контакты:

Тел: 067359960, 022725784

E-mail: igs-seismolab@yandex.ru, vladlen.cardanet@gmail.com

Образование:

2013-2016 – Университет Академии Наук Молдовы, аспирантура, сейсмология и геофизика

2011-2013 – Тираспольский Государственный Университет в Кишинёве, магистратура, геоинформатика

2006-2010 – Тираспольский Государственный Университет в Кишинёве, география

Профессиональная деятельность:

2007 – *настоящее время* – лаб. Сейсмологии, Институт Геологии и Сейсмологии МолдГУ

Адрес: ул. Г. Асаки, 60/3. Тел.: 022739027, Email: cancelarie@geology.md

Должности: научный сотрудник, инженер-геофизик

Область научных интересов:

Макросейсмическое проявление землетрясений, механизм очага землетрясения.

Научные проекты:

2021-2023 – REDACt, Rapid Earthquake Damage Assessment ConsorTium, BSB-966, координатор в РМ.

Стажировки и конференции:

International Training Seminar on Earthquake Engineering and Disaster Management, Istanbul Technical University, Earthquake Engineering and Disaster Management Institute. Май 2014.

Международная научная конференция DeDuCoN-INCERCOM, Кишинёв, 23-24 апреля 2015.

Научная конференция, посвященная 110-летию бессарабского геолога И.М. Сухова. Кишинев, 14-15 мая 2015.

Национальный симпозиум, посвященный 75-летию землетрясения во Вранче 10 ноября 1940 года. UTCB, Бухарест, 10 ноября 2015.

XIV Международная сейсмологическая школа "Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных". Кишинев, 9-13 сентября 2019.

Школа молодых сейсмологов стран СНГ в Душанбе, Таджикистан, 23-29 сентября 2019.

Школа молодых сейсмологов стран СНГ в Душанбе, Таджикистан, 19-24 декабря 2022.

Научные работы: монографии – 2, статьи – 45, тезисы – 5.