

ЎЗБЕКИСТОН RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

SEISMOLOGIYA MUAMMOLARI

№ 1

ТОМ 4

2022

ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОЛОГИИ

Jurnal 2019-yildan yiliga ikki marta nashr etiladi

Журнал издается с 2019 года по два номера в год

TAHRIRIYAT A'ZOLARI:

V.A. Rafikov (tahririyat kengashi raisi) – *geografiya fanlari doktori*
K.N. Abdullabekov (bosh muharrir) – *fizika-matematika fanlari doktori, akademik*
U.A. Nurmatov (mas'ul kotib) – *fizika-matematika fanlari nomzodi*
X.A. Akbarov – *geologiya-mineralogiya fanlari doktori, akademik*
D.Kh. Atabayev – *geologiya-mineralogiya fanlari doktori*
T.L. Ibragimova – *fizika-matematika fanlari doktori*
V.A. Ismoilov – *geologiya-mineralogiya fanlari doktori*
S.X. Maksudov – *fizika-matematika fanlari doktori*
B.S. Nurtayev – *fizika-matematika fanlari nomzodi*
SH.S. Rajabov – *geologiya-mineralogiya fanlari doktori*
L.A. Hamidov – *fizika-matematika fanlari doktori*
L.N. Mixaylova – *fizika-matematika fanlari doktori*
K.E. Abdрахmatov – *geologiya-mineralogiya fanlari doktori*
G.D. Etirmishli – *geologiya-mineralogiya fanlari doktori*
P. Aminzoda – *geologiya-mineralogiya fanlari nomzodi*
A.I. To'ychiev – *fizika-matematika fanlari doktori*
A.X. Ibragimov – *fizika-matematika fanlari nomzodi*
Sh.S. Yusupov – *geologiya-mineralogiya fanlari doktori*
V.R. Yusupov – *geologiya-mineralogiya fanlari falsafa doktori PhD*
Robert Mellors – *geologiya-mineralogiya fanlari falsafa doktori PhD*
Kevin Mackey – *geologiya-mineralogiya fanlari falsafa doktori PhD*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В.А. Рафиков (председатель редакционного совета) – *доктор географических наук*
К.Н. Абдуллабеков (главный редактор) – *доктор физико-математических наук, академик*
У.А. Нурматов (ответственный секретарь) – *кандидат физико-математических наук*
Х.А. Акбаров – *доктор геолого-минералогических наук, академик*
Д.Х. Атабаев – *доктор геолого-минералогических наук*
Т.Л. Ибрагимова – *доктор физико-математических наук*
В.А. Исмаилов – *доктор геолого-минералогических наук*
С.Х. Максудов – *доктор физико-математических наук*
Б.С. Нуртаев – *кандидат физико-математических наук*
Ш.С. Раджабов – *доктор геолого-минералогических наук*
Л.А. Хамидов – *доктор физико-математических наук*
Л.Н. Михайлова – *доктор физико-математических наук*
К.Е. Абдрахматов – *доктор геолого-минералогических наук*
Г.Д. Етирмишли – *доктор геолого-минералогических наук*
П. Аминзода – *кандидат геолого-минералогических наук*
А.И. Тўйчиев – *доктор физико-математических наук*
А.Х. Ибрагимов – *кандидат физико-математических наук*
Ш.С. Юсупов – *доктор геолого-минералогических наук*
В.Р. Юсупов – *доктор философии (PhD) по геолого-минералогическим наукам*
Роберт Меллорс – *доктор философии (PhD) по геолого-минералогическим наукам*
Кевин Мэкки – *доктор философии (PhD) по геолого-минералогическим наукам*

Manzil: Toshkent shahri, Shayxontohur tumani, Zulfiyaxonim k., 3-uy. Tel.: +99871 241-51-70, 241-32-22; Fax: +99871 241-74-98. E-mail: seismologiya@mail.ru. Jurnal sayti: www.seismos.uz.

Адрес: г. Ташкент, Шайхантахурский район, ул. Зулфияхоним, 3. Тел.: +99871 241-51-70, 241-32-22; Fax: +99871 241-74-98. E-mail: seismologiya@mail.ru. Сайт журнала: www.seismos.uz.

Jurnal O'zbekiston Respublikasi Matbuot va axborot agentligida 08.04.2019-yil
1013-raqam bilan ro'uxatdan o'tgan.

Журнал зарегистрирован Агентством по печати и информации Республики Узбекистан 08.04.2019 г.
Регистрационный номер 1013.

УДК 550.348 (575.1)

**В.А.Исмаилов, У.А.Нурматов, А.Х.Ибрагимов, Ш.И.Ёдгоров,
Э.М.Ядигаров, Б.У.Актамов, Б.Ш.Бозоров**

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

О ПОСЛЕДСТВИЯХ БАЙСУНСКОГО-3 (ЧИЛАНЗАРСКОГО) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 12 МАЯ 2022 ГОДА

V.A.Ismailov, U.A.Nurmatov, A.X.Ibragimov, Sh.I.Egorov, E.M.Yadgarov, B.U.Akmatov, B.Sh.Bozorov
2022 YIL 12 MAYDAGI BOYSUN-3 (CHILONZOR) ZILZILASI QIBATLARI HAQIDA

Annotasiya. Maqolada 2022-yil 12 mayda sodir bo'lgan Baysun-3 (Chilonzor) zilzila zonasining seysmotektonik xususiyatlarini o'rganish natijalari, Janubiy O'zbekistonning seysmogen zonalari va ularning chegaralarida yuzaga kelgan zilzilalar haqida ma'lumot keltirilgan. Zilzila o'chog'i va uning atrofidagi hududlarda o'tkazilgan instrumental va makroseysmik tekshiruv natijalari hamda ular asosida tuzilgan zilzila izoseysi xaritasi keltirilgan.

Kalit so'zlar: makroseysmik epitsentr, izoseyst xaritasi, seysmogen zonasi, zarar, intensivlik.

В.А.Исмаилов, У.А.Нурматов, А.Х.Ибрагимов, Ш.И.Ёдгоров, Э.М.Ядигаров, Б.У.Актамов, Б.Ш.Бозоров

О последствиях Байсунского-3 (чиланзарского) землетрясения 12 мая 2022 года

Аннотация. Изложены результаты изучения сейсмотектонических особенностей очаговой зоны Байсунского-3 (Чиланзарского) землетрясения, возникшего 12 мая 2022 г., информация о сейсмогенных зонах Южного Узбекистана и возникших в их пределах землетрясениях. Приведены результаты инструментального и макросейсмического обследования, проведенного в очаговой области и прилегающих территориях и составлена на их основе карта изосейсы происшедшего землетрясения.

Ключевые слова: макросейсмический эпицентр, карта изосейст, сейсмогенная зона, повреждение, интенсивность.

V.A.Ismailov, U.A.Nurmatov, A.X.Ibragimov, Sh.I.Yodgorov, E.M.Yadigarov, B.U.Akmatov, B.Sh.Bozorov
About the consequences of the baysun-3 (chilanzar) earthquake on may 12, 2022

Abstract. The article presents the results of studying the seismotectonic features of the focal zone of the Baysun-3 (Chilanzar) earthquake that occurred on May 12, 2022, information about the seismogenic zones of Southern Uzbekistan and the earthquakes that occurred within them. The results of instrumental and macroseismic surveys conducted in the focal area and adjacent territories and a map of the isoseis of the earthquake that occurred based on them are presented.

Key words: macroseismic epicenter, isoseist map, seismogenic zone, damage, intensity.

Введение. 12 мая 2022 г. в 10:27:44 по Гринвичу (15 ч 35 мин по Ташкентскому времени) на территории Сурхандарьинской области Южного Узбекистана произошло сильное землетрясение. Ближайшие к эпицентру станции «Байсун» и «Зарабоғ», расположенные на расстоянии 32 км и 35 км соответственно, зарегистрировали землетрясение со следующими параметрами: долгота: $\lambda = 67,02089$, широта: $\gamma = 37,95089$, глубина $H = 15,0$ км, $M_b = 5,8$, $M_L = 5,7$, ощущавшееся в населенных пунктах эпицентральной зоны с интенсивностью 6-7 баллов по шкале MSK-64 [1].

За период 12-14 мая зарегистрированы 3 афтершока: первый в 22:50 по Гринвичу 12 мая, долгота: $\lambda = 67,07102$, широта: $\gamma = 37,91029$, глубина $H = 10,0$, $M_L = 2,8$; второй 13 мая 2022 г. в 09:11 по Гринвичу, долгота: $\lambda = 67,09161$, широта: $\gamma = 37,99035$, глубина $H = 10,0$, $M_L = 2,6$; третий 13 мая 2022 г. в 23:05 по Гринвичу, долгота: $\lambda = 67,09161$, широта: $\gamma = 37,99035$, глубина $H = 10,0$, $M_L = 2,6$.

Инструментальные данные. Положение эпицентра Байсунского-3 (Чиланзарского) землетрясения определено по данным 29 сейсмических станций Республиканского центра сейсмопрогностического мониторинга МЧС РУз («Байсун», «Зарабоғ», «Чарвак», «Джизак», «Ташкент», «Тамдыбулак», «Фергана», «Агалик», «Пачкамар», «Бухоро», «Чодак» и др.) (табл. 1).

Таблица 1

**Основные параметры землетрясения 12 мая 2022 г. в 10:27:44 (по Гринвичу) $M_s = 5,8$,
по данным различных сейсмологических станций**

Станция		t, (чч:мм:сс), по Гринвичу	R, км	H, км	Магнитуда	
					M _b	M _L
Агалик	AGL	10:28:11	158	15	6,1	
Арнасой	ARN	10:28:25	280		6	
Янгийўл	YANG	10:28:45	437		6,3	6
Бойсун	BSN	10:27:51	32		5,6	4,9
Бухоро	BKHM	10:28:17	197		6,2	6,4
Чодак	CHDK	10:28:48	463		6	5,9
Чимган	CHMG	10:28:49	470		6,6	
Чимион	CHMI	10:28:49	470		6,1	5,1
Чорвок	CHRV	10:28:48	240		6,8	6,6
Жиззах	DJZ	10:28:21	430		4,9	
Андижон	DJAN	10:28:42	495		6,1	5,6
Фарғона	FRG	10:28:51	369		6	
Газли	GZL	10:28:36	235		5,9	
Корасой	KARA	10:28:21	525		5,7	
Косонсой	KSNS	10:28:54	115		5,8	
Китоб	KTB	10:28:03	578		5,8	6
Кулкудук	KLK	10:29:02	442		6,3	
Мингтут	MINT	10:28:45	556		3,7	
Мамай	MAM	10:28:59	404		6,4	
Назарбек	NZB	10:28:41	63		6	5,6
Пачкамар	PKM	10:27:56	174		5,5	5,7
Самарқанд	SMR	10:28:12	425		6,1	7,1
Сўх	SOKH	10:28:44	471		6	
Шохимардон	SKHM	10:28:50	448		6,2	
Тамдибулок	TMD	10:28:46	455		5,7	5,5
Товоксой	TVKS	10:28:47	391		6	
Тахтакупир	TTP	10:28:39	36		5,5	
Зарабоғ	ZRB	10:27:52	479		5,3	
Хумсон	KHMS	10:28:50	521		6,1	

Акселерограммы основного толчка на двух станциях (Байсун и Зарабаг) приведены на **рис. 1 и 2.**

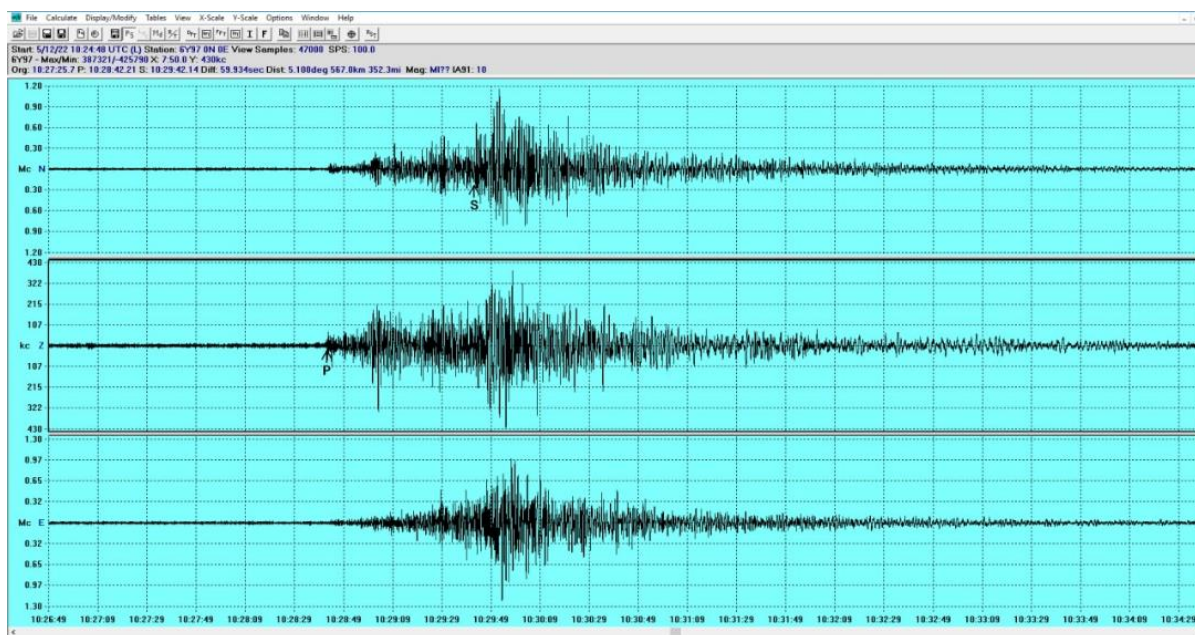


Рис. 1. Акселерограмма Байсунского-3 (Чиланзарского) землетрясения 12 мая 2022 г. на ст. «Байсун». Осадочные породы. R = 32 км. Ускорения: Z – 0,0372 g; E – 0,0372 g; N – 0,0297 g. Инструментальная интенсивность – 5 баллов.

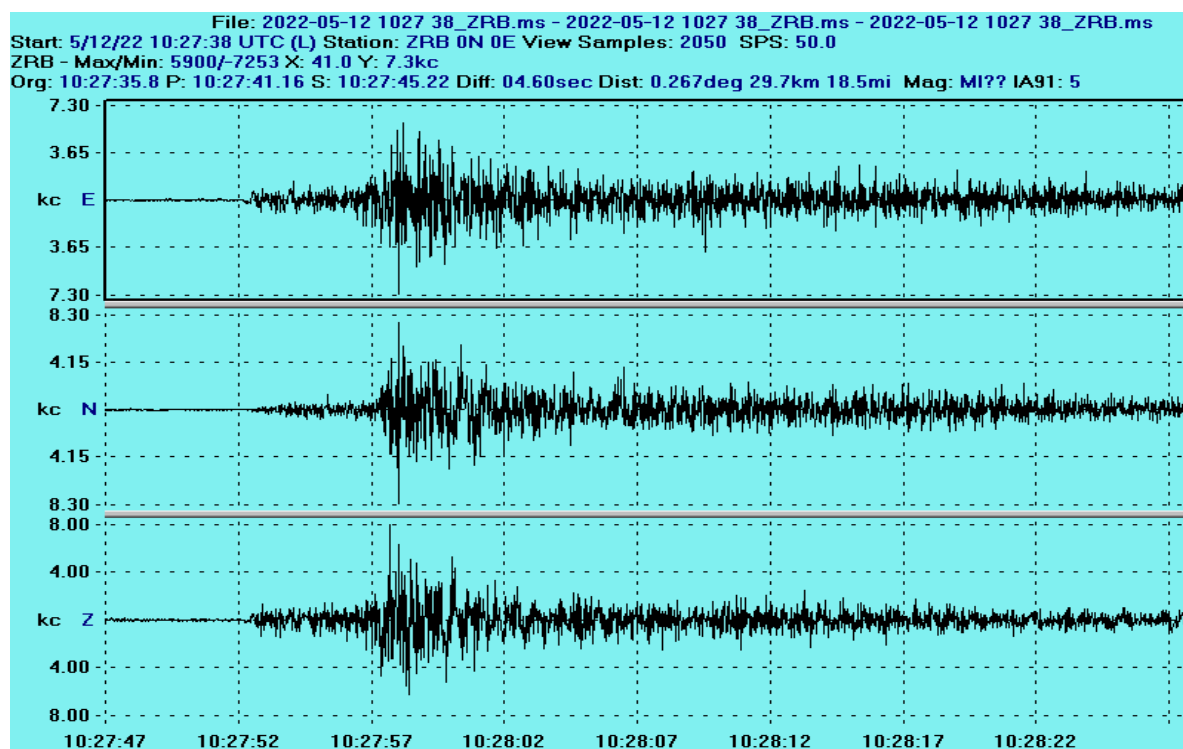


Рис. 2. Акселерограмма Байсунского-3 (Чиланзарского) землетрясения 12 мая 2022 г. на ст. «Зарабаг». Скальная порода. R = 35 км. Ускорения: Z – 18,06 см/с²; E – 20,69 см/с²; N – 20,27 см/с². Инструментальная интенсивность – 5 баллов.

Сеймотектоническая обстановка эпицентральной зоны. Эпицентр землетрясения приурочен к Сурхантау-Шерабад-Келифской сейсмогенной зоне, выделенной Р.Н.Ибрагимовым, У.А.Нурматовым и др. [1] (рис. 3). Сурхантау-Шерабад-Келифская сейсмогенная зона представлена системой кулисообразно расположенных нарушений, осложняющих Сурхантауское, Келиф-Шерабадское и Шерабад-Саркамьшское антиклинальные поднятия. Морфология разломов взбро-

сы, надвиги с северо-западным падением. Время заложения разломов – начало альпийского тектонического цикла. Система разломов активно развивалась в четвертичном периоде, амплитуда перемещений доходит до 3000 м.

В пределах зоны динамического влияния разломов активно развиты флексурно-разрывные складки, осложненные более мелкими разрывными нарушениями. Северо-восточная часть разломной зоны отличается наличием высокой плотности мегатрещин в зоне ее динамического влияния. Это свидетельствует о современной активности разломной зоны.

В сейсмическом отношении сейсмогенные зоны Южного Узбекистана подразделяются на две категории. К первой относится Гиссаро-Кокшаальская. Эта самая высокопотенциальная сейсмогенная зона территории Южного Узбекистана. В пределах ее в 1907 г. возникли парные Каратагские землетрясения с $M = 7,4$ и $M = 7,3$. По результатам исследований, Р.Н.Ибрагимов Чуянчинское землетрясение, возникшее через три дня того же года с $M = 6,3$, относит к отдельному землетрясению этой серии. Это землетрясение отнесено к сильным афтершокам Каратагских землетрясений [2]. По оценкам Р.Н.Ибрагимова и др. [1], сеймотектонический потенциал этой зоны оценен равным $M \leq 7,5$. Сейсмический потенциал остальных сейсмогенных зон территории не превышает $M = 6,5$. Сурхантау-Шерабад-Келифская сейсмогенная зона, в пределах которой 12 мая 2022 г. возникло Байсун-3 (Чиланзарское) землетрясение, отнесено ко второй категории с сеймотектоническим потенциалом $M \leq 6,5$. Сейсмический потенциал остальных сейсмогенных зон Южного Узбекистана также не превышает $M \leq 6,5$. Об этом свидетельствует возникшее в 1935 г. Байсунское землетрясение с $M = 6,2$, с интенсивностью $I = 7-8$ баллов, происшедшее в зоне сочленения двух сейсмогенных зон – Байсун-Кугитангской и Сурхантау-Шерабад-Келифской. Все остальные землетрясения, возникшие в пределах сейсмогенных зон Южного Узбекистана, не превышали $M = 5,2$.

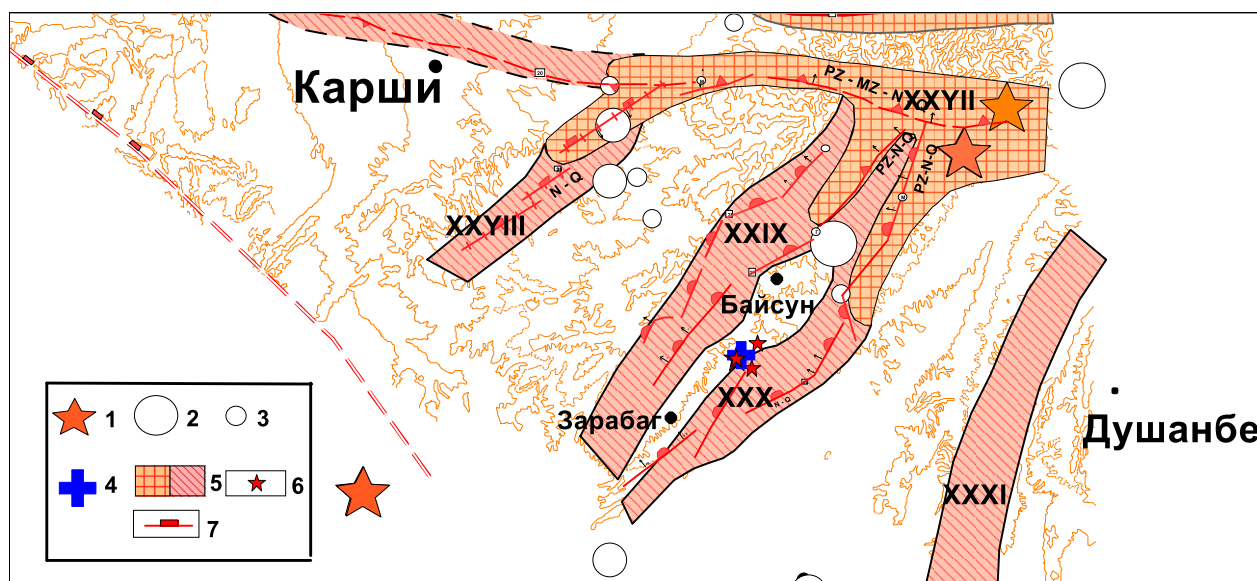


Рис. 3. Сейсмогенные зоны Южного Узбекистана и эпицентры сильных (с $M \geq 5,0$) землетрясений. Эпицентры землетрясений: 1 – Каратагских 1907 г. с $M \geq 7,0$; 2 – с $M \geq 6,0$; 3 – с $M \geq 5,0$; 4 – эпицентр землетрясения 12 мая 2022 г.; 5 – сейсмогенные зоны: с сейсмическим потенциалом $M \leq 7,5$ и $M \leq 6,5$; 6 – эпицентры афтершоков; 7 – разломы земной коры. **Сейсмогенные зоны:** XXVIII – Гиссаро-Кокшаальская; XXVIII – Кызылдарьинско-Лянгар-Караильская; XXIX – Байсун-Кугитангская; XXX – Сурхантау-Шерабад-Келифская; XXXI – Бабатаг-Кейкитауская.

Предыдущая сейсмическая активизация Сурхантау-Шерабад-Келифской сейсмогенной зоны отмечена в 1968 г. возникновением второго Байсунского землетрясения. Сила землетрясения $M = 4,8$, интенсивность $I = 6-7$ баллов [3]. Следующая активизация сейсмогенных зон Южного Узбекистана наблюдалась в 1999 и 2000 гг. с возникновением парных Камашинских землетрясений с $M = 5,0$ и $M = 5,1$ в Кызылдарья-Лянгар-Караильской сейсмогенной зоне.

За период инструментальных наблюдений Байсунское-3 (Чиланзарское) землетрясение 12 мая 2022 года с $M = 5,8$ является третьим и самым сильным, произошедшим в Сурхантау-

Шерабад-Келифской сейсмогенной зоне. До этого события зона не проявилась возникновением сильного землетрясения с магнитудой $M \geq 5$. Несмотря на отсутствие сильных землетрясений как за исторический, так и за период инструментальных наблюдений сейсмический потенциал зоны Р.Н.Ибрагимовым и др. [3] оценен равным $M \leq 6,5$. Основанием для такой оценки являлись геолого-геофизические особенности территории, характер новейших и современных движений земной коры, особенности геологического строения и др. Результаты оценки потенциала территории подтвердились и данными кластерного анализа комплекса геолого-геофизических данных [4]. Энергия произошедшего Байсунского-3 (Чиланзарского) землетрясения 12 мая не превышает ранее прогнозированной величины.

Анализ сейсмической обстановки территории Южного Узбекистана показывает, что за последние годы количество слабых землетрясений значительно возросло. Особенно высокая их концентрация наблюдалась в пределах очаговых областей ранее происшедших сильных землетрясений: Каратагских (1907 г.), Камашинских (1990-2000 гг.), а также в межочаговых участках сейсмогенных зон (рис. 4). Сила некоторых из этих землетрясений доходила до $M = 3,8$. Вместе с этим, некоторые участки сейсмогенных зон отличались отсутствием очагов слабых землетрясений. Из-за отсутствия статистики землетрясений в сейсмогенной зоне оценить вероятность возникновения сильного землетрясения на основе активизации слабых землетрясений или наличием участков сейсмического затишья не представлялось возможным.

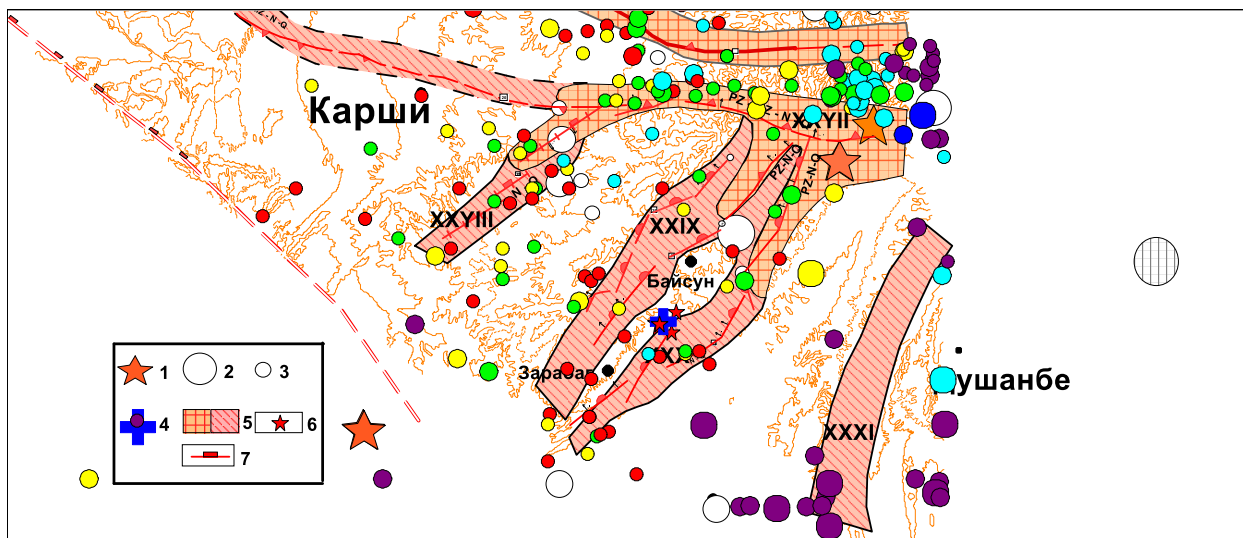


Рис. 4. Карта эпицентров землетрясений Южного Узбекистана за 2021 г. (составлена на основе оперативных каталогов землетрясений РЦСМ МЧС РУз). Эпицентры землетрясений с: 1 – $M \geq 7,0$; 2 – с $M \geq 6,0$; 3 – с $M \geq 5,0$; 4 – эпицентр землетрясения 12 мая 2022 г.; 5 – сейсмогенные зоны: с сейсмическим потенциалом $M \leq 7,5$ и $M \leq 6,5$; 6 – эпицентры афтершоков; 7 – разломы земной коры. Цветными кружками обозначены эпицентры слабых землетрясений (с $M \leq 2,9$; $M \geq 3,0$; $M \geq 4,0$), с разной глубиной очагов.

Проведенный анализ сеймотектонической обстановки района возникновения Байсунского-3 землетрясения 12 мая 2022 г. свидетельствует о том, что очаг землетрясения приурочен к сейсмогенному разлому, который ранее был обозначен сейсмоопасным. Сила землетрясения не превышала прогнозируемую ранее величину. В пределах территории Южного Узбекистана имеется ряд участков, где концентрация слабых землетрясений с высоким значением. Особенно настораживает очаговая зона Каратагских землетрясений, которая в течение 115 лет находится в состоянии относительного сейсмического покоя, и участок Гиссаро-Кокшаальской сейсмогенной зоны между очагами Каратагских (1907 г.) и Камашинских (1999 г. и 2000 г.) землетрясений.

Результаты макросейсмических обследований. Макросейсмические исследования последствий Байсунского-3 (Чиланзарского) землетрясения проведены на территории населенных пунктов (табл. 2).

Таблица 2

Макросейсмические данные о землетрясении Байсун-3 (Чиланзар) 12 мая 2022 г.

№	Населенный пункт	Объект	Интенсивность	r, км	φ°, N	λ°, E
1	Чиланзар МФЙ	Школа № 45	6	1.2	67.03	37.94
2	Чиланзар МФЙ	Детский сад № 12	6-7	1.3	67.03	37.95
3	Чиланзар МФЙ	Индивидуальный дом	6	1.4	67.04	37.93
4	Кофрун МФЙ	Школа № 32	6-7	24.3	67.24	38.09
5	Бешэркак МФЙ	Школа № 42	6	11.5	67.16	37.96
6	Сайроб МФЙ	Школа № 41	5	13.5	66.97	38.07
7	Мунчок МФЙ	Школа № 37	5	9.9	67.01	38.04
8	Хатак МФЙ	Зд. участка	5	15.6	66.86	37.95
9	Эгарчи МФЙ	Индивидуальный дом	5	6.1	67.05	37.90
10	Шуроб МФЙ	Школа № 20	5	27.4	66.94	38.19
11	Дарбанд МФЙ	Школа № 61	5	28.5	67.01	38.21
12	Кучкак МФЙ	Школа № 7	5	33.1	67.19	38.22
13	Корабуйин МФЙ	Школа № 33	5	30.1	67.19	38.19
14	Райцентр Байсун	Школа № 1	5	31.7	67.20	38.21
15	Райцентр Байсун	Школа № 39	5	32.9	67.39	38.17
16	Пудина МФЙ	Школа № 49	5	23.3	67.18	38.12
17	Омонхона МФЙ	Школа № 35	5	38.8	67.33	38.21
18	Пулхоким МФЙ	Школа № 28	5	36.5	67.36	38.15
19	Пашкурт МФЙ	Школа № 12	5	25.9	67.20	38.14
20	Райцентр Дехканадаб	АБК Дехканабад-Калий	4	64.9	66.43	38.30

Макросейсмические исследования последствий Байсун-3 (Чиланзар) землетрясения показали следующие результаты:

1. Наиболее сильные повреждения зданий наблюдались в пределах населенных пунктов Чиланзар, Кафрун и Бешэркак, которые находились в эпицентральной зоне. Здесь в индивидуальных домах и в двухэтажном кирпичном здании школы и детского сада зарегистрированы повреждения 2 и 3 степени, согласно ГОСТ Уз836-97 [5].

2. В населенных пунктах Кучкак, Карабуйин, Хатак, Эганчи, Пулхоким здания менее повреждены. Здесь наблюдаются, в основном, повреждения 1 степени, т. е. волосяные трещины в углах комнат, над оконными и дверными проемами, осыпание небольших кусков штукатурки и др. В населенных пунктах Сайроб, Мунчок, Дарбанд, Шураб, расположенных наиболее близко к эпицентральной зоне, в некоторых индивидуальных домах наблюдаются повреждения 2 степени, т. е. сквозные трещины в перегородках и в перемычках над проёмами, откалывание больших кусков штукатурки.

3. В связи с тем, что наиболее большие повреждения зданий зарегистрированы в населенных пунктах Чиланзар, Кафрун и Бешэркак, охарактеризуем некоторые из них.

- Здания школы № 45 (постройка 1970 г.) и детского сада № 12 (введен в эксплуатацию в 2021 г.) расположены в населенном пункте Чиланзар. Ниже на рис. 5, 6 приведены некоторые характерные участки повреждения. В здании имеются повреждения в виде диагональных трещин, осыпания больших кусков штукатурки со стен и потолков.



Рис. 5. Повреждение (диагональные трещины и обрушение большого куска штукатурки) стены учебного класса физики.



Рис. 6. Повреждение (глубокие сквозные трещины по всей стене, вывалы мелких блоков и обрушение большого куска штукатурки) стены здания детского сада.

- Индивидуальный дом, построенный из местного строительного материала пахси, расположенный в кишл. Чиланзар. Повреждена стена, обрушение большого куска штукатурки на 1-3 см (рис. 7).



Рис. 7. Повреждение (широкое раскрытие трещин в стыках стен и потолка. Диагональные, вертикальные и горизонтальные трещины в несущих конструкциях, обрушение большого куска штукатурки) стены дома.

- Здание школы № 32 в Кафруне. Здание двухэтажное, кирпичное, построенное в 2007 г. На рис. 8 приведены некоторые поврежденные участки.





Рис. 8. Повреждение (широкое раскрытие трещин в стыках стен и потолка, глубокие сквозные трещины) стены здания.

• Здание школы № 42 в Бешэркаке. Здание двухэтажное, кирпичное, построенное в 2007 г. На рис. 9 приведены некоторые поврежденные стены спортивного зала.



Рис. 9. Повреждение (глубокие сквозные трещины и сдвиг плиты) стены спортивного зала.

На основании территориального анализа повреждений зданий установлены макросейсмические эффекты Байсун-3 (Чиланзар) землетрясения (рис. 10).

На карте изосейст Байсун-3 (Чиланзар) землетрясения 12.05.2022 г. обобщены результаты точечной оценки сейсмического эффекта и выделены зоны: 6 баллов, которая расположена в эпицентральной зоне, 5- и 4-балльные зоны, а также приведено место расположения очага землетрясения.

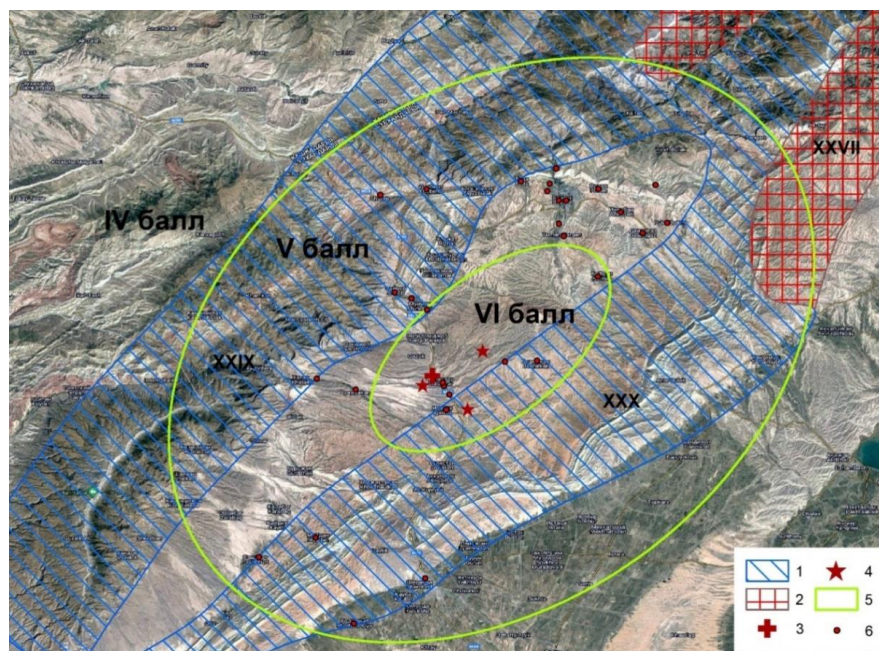


Рис. 10. Карта изосейст землетрясения Байсун-3 (Чиланзар) 12.05.2022 г. 1 – сейсмогенная зона с сейсмическим потенциалом $M \leq 6,5$; 2 – сейсмогенная зона с сейсмическим потенциалом $M \leq 7,5$; 3 – эпицентр землетрясения 12 мая 2022 г.; 4 – три афтершока; 5 – изосейты 6-, 5-, 4-балльные зоны; 6 – место макросейсмических исследований.

Рекомендации по итогам макросейсмических обследований

1. Создать экспертную группу из числа специалистов по сейсмостойкости сооружений и сейсмической безопасности населения и территории с включением представителей Министерства народного образования, Министерства высшего и среднего специального образования, Госкомархитектурного управления Республики Узбекистан и др. заинтересованных организаций для решения вопроса о дальнейшем функционировании зданий школ № 45, № 32, № 42, № 41 и № 33, а также здания детского сада № 12.

2. В связи с тем, что в эпицентральной зоне (населенный пункт Чиланзар) практически все здания испытали повреждения второй и третьей степени, рекомендуем составить перечень индивидуальных домов, подлежащих текущему, капитальному и восстановительному ремонту или к сносу.

3. Провести с населением просветительскую работу по строительным нормам и правилам сейсмостойкого строительства в сейсмоактивных районах и методах по укреплению существующих сейсмоустойчивых зданий.

Литература

1. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64 // Сейсмическое районирование СССР (Ред. С.В. Медведев). - М.: Наука, 1968. - С. 158-162.
2. Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений. - Т.: ГИДРОИНГЕО, 2002. - 132 с.
3. Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.А., Садыков Ю.М. и др. Карта «Сейсмогенные зоны Узбекистана и прилегающих территорий». М: 1:1600000. Государственное научно-производственное предприятие «Картография» Госкомземкадастр, 2011 г.
4. Хусанбаев Д.Д., Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.А. Сейсмотектонический потенциал земной коры и оценка Ммах сейсмогенных зон. Гл.6. кн. Сейсмическое райо-

нирование и прогноз землетрясений. - Т.: ГИДРОИНГЕО, 2002. - С. 59-75.

5. ГОСТ Уз836-97. Шкала для определения интенсивности землетрясения в пределах от 6 до 10 баллов. Издание официальное. Госархитектстрой РУз. - Т., 1997. - 9 с.

SEYSMIK XAVFNI BAHOLASH VA SEYSMIK RAYONLASHTIRISH

УДК 550.34

Р.С. Ибрагимов, Т.Л. Ибрагимова, М.А. Мирзаев

*Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан
ibrroma@yandex.ru*

О ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНОГО (С МАГНИТУДОЙ $M \geq 6,0$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В БЛИЖАЙШИЕ НЕСКОЛЬКО ЛЕТ В ПРЕДЕЛАХ ЮЖНО- ФЕРГАНСКОЙ СЕЙСМОАКТИВНОЙ ЗОНЫ

Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A.

**Janubiy-Farg'ona seismafaol zonasida yaqin yillar ichida kuchli ($M \geq 6,0$ magnitudali) zilzila bo'lish
haqida**

Аннотасија. Tarixiy va seysmik kuzatuv davrida magnitudasi $M \geq 6,0$ bo'lgan ko'pgina talofatli zilzilalar bo'lib o'tgan Janubiy-Farg'ona seysmafaol zonasining yer qobig'i kuchlangan xolati va seysmik rejimi o'rganilgan. Janubiy-Farg'ona seysmafaol zonasining markaziy qismida $K \geq 12$ ($M \geq 4,5$) energetik klassdagi zilzilalar bo'yicha uzoq muddatli seysmik sokinlik kuzatilmogda. Butun xudud bo'yicha kichik zilzilalar ko'payganligi xamda zilzila qaytarilishi grafingining og'ish burchagining anomal fluktuatsiyasi kuzatilmogda. Janubiy-Farg'ona seysmafaol zonasi yer qobig'inining zamonaviy kuchlangan xolati zilzila o'chog'i mexanizmlaridan foydalangan xolda kataklastik usul bilan seysmik faollashuv joylari qidirildi. Kuchli zilzilalar bo'lishi mumkin bo'gan, past qiymatli samarali xar tomonlama bosimni va maksimal urinma kuchlanishlari mavjud bo'lgan xududlar aniqlandi. Yer qobig'ining kuchlangan xolatining o'ziga xos xususiyatlari hisobga olib xamda seysmik rejimning bashoratlash parametrlarini jamlagan xolda Janubiy-Farg'ona seysmafaol zonasida yaqin yillarda $M \geq 6,0$ magnitudali zilzila bo'lishi mumkin bo'lgan ikkita xudud aniqlandi.

Таянч со'злар: seysmik sokinlik, seysmik faollik, seysmik bo'shliq, qaytarilish davri, zilzila bashorati, kuchlanganlik xolati, kuchlanganlik xolati.

Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А.

**О возможности возникновения сильного (с магнитудой $M \geq 6,0$) землетрясения в ближайшие не-
сколько лет в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны**

Аннотация. Проведено исследование напряженного состояния земной коры и сейсмического режима Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны, в пределах которой за исторический и инструментальный период времени произошло множество разрушительных землетрясений с магнитудой $M \geq 6,0$. В центральной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны выявлен участок, в котором на текущий момент времени отмечается длительное сейсмическое затишье по землетрясениям с энергетическим классом $K \geq 12$ ($M \geq 4,5$). По всей протяженности области сейсмического затишья отмечается сейсмическая активизация по землетрясениям младших энергетических классов, а также аномальные флуктуации угла наклона графика повторяемости землетрясений. Для локализации места возможной сейсмической активизации проведена реконструкция современного напряженного состояния земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны методами катакластического анализа разрывных смещений, с привлечением механизмов очагов землетрясений. Определены участки с низкими значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений, в которых, как правило, реализуются сильные землетрясения. С учетом особенностей напряженного состояния земной коры, по совокупности прогностических параметров сейсмического режима в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны выделены две области, в которых в ближайшие годы могут произойти землетрясения с магнитудой $M \geq 6,0$.

Ключевые слова: сейсмическое затишье, сейсмическая активизация, сейсмическая брешь, график повторяемости, прогноз землетрясений, напряженное состояние, реконструкция напряжений.

Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A.

About the possibility of a strong (with a magnitude of $m \geq 6,0$) earthquakes in the next few years within the south fergana seismic zone

Abstract. The research of South-Fergana seismic active zone crustal stress state and seismic regime in which many destructive earthquakes with magnitude $M \geq 6,0$ have happened during historical and instrumental period of time has been carried out. The area, where long seismic quiescence of earthquakes with energy class $K \geq 12$ ($M \geq 4,5$) is observed at the current moment of time, has been revealed in the central part of South-Fergana seismic active zone. Along the entire length of the seismic quiescence area, seismic activation is noted for earthquakes of lower energy classes, as well as anomalous fluctuations of the repeatability graph angular coefficient. To localize the place of possible seismic activation the current stress of earth's crust in the South Fergana seismic active zone was reconstructed according to focal earthquake mechanisms by the methods of cataclastic analysis of displacements. Areas with low values of effective confining pressure and maximum shear stresses are determined, as a rule, in them strong earthquakes are realized. Taking into account the stressed state of the Earth's crust, the prognostic parameters of the seismic regime within the South Fergana seismic active zone identified Two areas in which earthquakes with magnitude $M \geq 6,0$ may occur in the coming years was identified taking into account the stressed state of the Earth's crust by the prognostic parameters of the seismic regime within the South Fergana seismic active zone.

Key words: seismic lull, seismic activation, seismic gap, recurrence plot, earthquake forecast, stress state, stress reconstruction.

Подавляющее большинство сильных землетрясений территории Узбекистана происходит в достаточно узких протяженных зонах, направление которых совпадает с простиранием активных разломов земной коры. На основе сейсмологических и сеймотектонических данных [1-3] на исследуемой территории выделены девять сейсмоактивных зон: Ташкентская (1), Южно-Ферганская (2), Восточно-Ферганская (3), Нурекатино-Ангренская (4), Северо-Ферганская (5), Южно-Узбекистанская (6), Амударьинская (7), Газли-Каратагский фрагмент Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны (8) и Северо-Тамдынская зона (9). Сейсмоактивные зоны территории Узбекистана приведены на **рис. 1**. Здесь же показаны эпицентры ощутимых и сильных землетрясений, начиная с исторического периода времени. Данное исследование посвящено изучению текущей сейсмологической обстановки в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне.

Южно-Ферганская сейсмоактивная зона (2) в восточной части объединяет систему Южно-Ферганских разломов и одноименную флексурно-разрывную зону, а в западной части охватывает область динамического влияния Бесапанского разлома [3]. На востоке эта зона протягивается в субширотном направлении по северным склонам Алайского и Туркестанского хребтов. Длина зоны 700 км, ширина 40-50 км.

В пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны произошло множество землетрясений с магнитудой $M \geq 6,0$. К наиболее сильным землетрясениям западной части данной зоны относятся сейсмические события: историческое землетрясение 1892 г. с магнитудой $M = 6,1$ в районе пос. Нурата и два Ура-Тюбинских землетрясения 1897 г. с магнитудой $M = 6,6$ и $M = 6,7$, произошедшие с интервалом в два часа на расстоянии 50 км друг от друга. Наиболее сильные землетрясения центральной части зоны – историческое Костакозское землетрясение 1888 г. с магнитудой $M = 6,2$, а также три землетрясения, произошедшие за последние 50 лет: Исфара-Баткенское 1977 г. с магнитудой $M = 6,4$; Чимионское 1982 г. с магнитудой $M = 5,8$ и Канское 2011 г. с магнитудой $M = 6,1$. Наиболее сильными землетрясениями восточной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны считаются два Куршабских землетрясения 1924 г. с магнитудой $M = 6,4$ и $M = 6,5$, возникшие в области сочленения Южно-Ферганской зоны с восточным окончанием Восточно-Ферганской сейсмоактивной зоны (3). Макросейсмический эффект от каждого из этих землетрясений составлял не менее 7-8 баллов по шкале MSK-64.

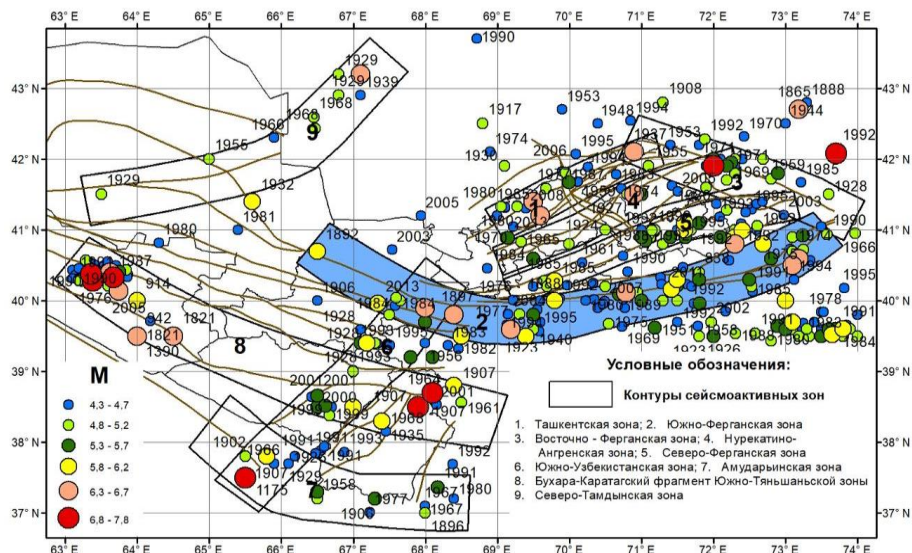


Рис. 1. Сейсмоактивные зоны территории Узбекистана и эпицентры ощутимых и сильных землетрясений, произошедших с исторического периода времени. Синим цветом показана Южно-Ферганская сейсмоактивная зона.

Сейсмичность и сейсмический режим Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны

На рис. 2 приведена карта эпицентров землетрясений исследуемого района, построенная по региональному каталогу, составленному в Институте сейсмологии АН РУз, а также местоположение активных разломов земной коры по версии [3]. Региональный каталог землетрясений территории Узбекистана включает параметры исторических и инструментальных событий. В качестве основной характеристики для классификации землетрясений по величине в региональном каталоге длительное время (до 2003 г.) использовался энергетический класс землетрясений K , определяемый по сумме амплитуд объемных P - и S -волн, зарегистрированных короткопериодной аппаратурой [4, 5]. Энергетический класс связан с высвобожденной при землетрясениях сейсмической энергией E зависимостью $K = lgE$ (Дж). В различные временные промежутки двух последних десятилетий для количественной характеристики величины землетрясений использовались следующие типы магнитуд: M_b , $MPVA$, M_s , MLH . Связь между энергетическим классом землетрясения K и перечисленными типами магнитуд, присутствующими в региональном каталоге, осуществлялась на основе зависимостей [6], полученных для землетрясений Центральной Азии.

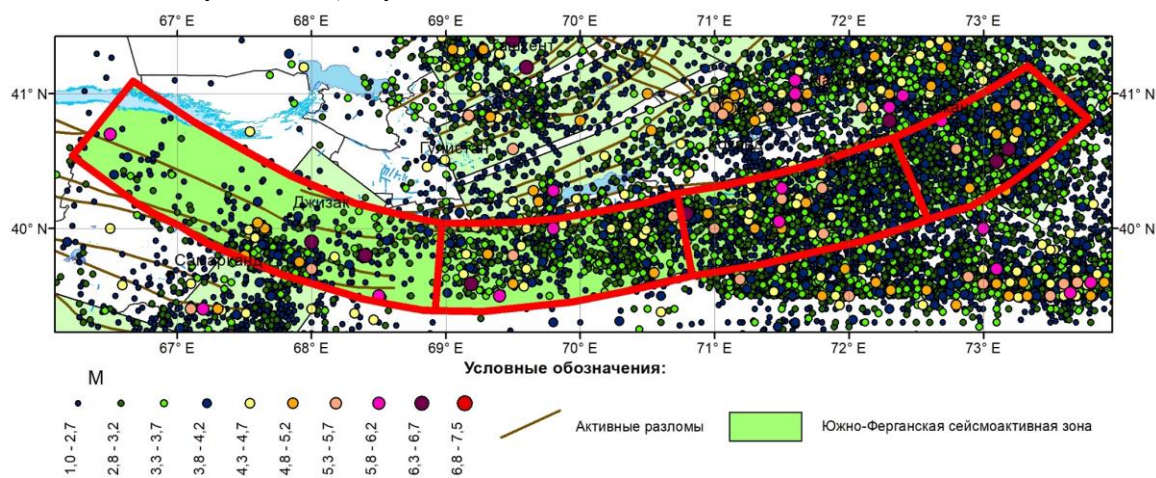


Рис. 2. Карта эпицентров инструментальных и исторических землетрясений Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны.

На рис. 3 показан график повторяемости землетрясений Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны, построенный по землетрясениям с магнитудами от $M = 3,0$ до $M = 6,5$ при их полумагнитудной классификации по величине (построения сделаны для магнитуды MLH). При построении зависимости Гутенберга-Рихтера $\lg N = a - bM$ учитывались сроки представительной регистрации землетрясений каждого магнитудного уровня [7]. Поскольку сейсмические события распределены в пределах сейсмоактивной зоны неравномерно, мы разделили Южно-Ферганскую сейсмоактивную зону на четыре сегмента, нумерация которых начинается с запада. Отдельно, для каждого из этих сегментов, также были построены графики повторяемости землетрясений. В табл. 1 показаны зависимости Гутенберга-Рихтера для всей сейсмоактивной зоны и отдельных ее сегментов. Так, сейсмическая активность (параметр a в зависимости Гутенберга-Рихтера) в самом западном сегменте зоны (сегмент 1) существенно ниже, чем в трех других сегментах. Вместе с тем, достаточно низкое значение углового коэффициента графика повторяемости (параметр b в зависимости Гутенберга-Рихтера) в этом сегменте зоны свидетельствует о том, что наиболее сильные (с магнитудой $M \geq 5,5$) землетрясения здесь повторяются не реже, чем в остальных сегментах, расположенных восточнее. В табл. 2 приведены средние для Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны и различных ее сегментов периоды повторения землетрясений с магнитудой, большей или равной заданной, в диапазоне магнитуд от $M = 3,0$ до $M = 6,5$.

Таблица 1

Зависимости Гутенберга-Рихтера для различных частей Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны

Южно-Ферганская зона	Зависимость Гутенберга-Рихтера
Вся зона	$\lg N = 3,6913 - 0,8284M$
Сегмент 1 (Запад)	$\lg N = 2,1290 - 0,6811M$
Сегмент 2	$\lg N = 3,3685 - 0,9048M$
Сегмент 3	$\lg N = 3,3264 - 0,8559M$
Сегмент 4 (Восток)	$\lg N = 3,2696 - 0,8419M$

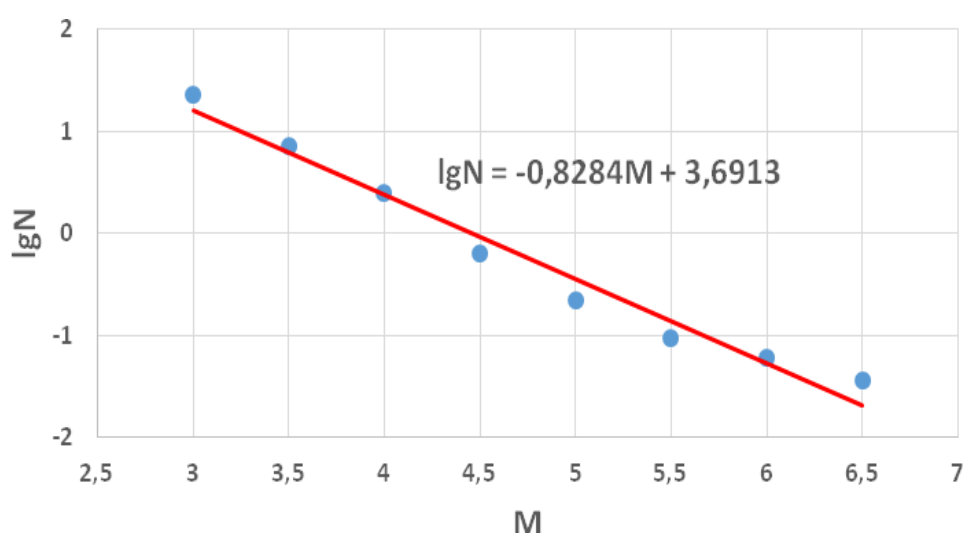


Рис. 3. График повторяемости землетрясений Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны.

Средняя частота возникновения землетрясений различных магнитуд в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне и в различных ее сегментах

	$M \geq 3,0$	$M \geq 3,5$	$M \geq 4,0$	$M \geq 4,5$	$M \geq 5,0$	$M \geq 5,5$	$M \geq 6,0$	$M \geq 6,5$
Вся зона	2-3 недели	1,5-2 месяца	5-6 месяцев	1 год	2,5-3 года	7-8 лет	18-20 лет	45-50 лет
Сегмент 1 (запад)	9-10 месяцев	1,5-2 года	3,5-4 года	8-9 лет	18-19 лет	40-45 лет	90-100 лет	200-250 лет
Сегмент 2	2-3 месяца	7-8 месяцев	1,5-2 года	5-5,5 лет	14-15 лет	40-45 лет	110-120 лет	300-350 лет
Сегмент 3	2-2,5 месяца	5-6 месяцев	1-1,5 года	3-3,5 лет	8-10 лет	20-25 лет	60-70 лет	160-180 лет
Сегмент 4 (восток)	2-2,5 месяца	5-6 месяцев	1-1,5 года	3-3,5 лет	8-9 лет	20-25 лет	55-65 лет	150-170 лет

Средний период повторения сильных (с магнитудой $M \geq 5,0$) землетрясений во всей сейсмоактивной зоне составляет 2,5-3 года, а землетрясения с максимальной наблюдавшейся магнитудой ($M \geq 6,5$) повторяются в среднем один раз в 45-50 лет. Для различных сегментов сейсмоактивной зоны периоды повторения землетрясений различных магнитуд могут отличаться между собой в несколько раз.

Исходя из даты последнего землетрясения с магнитудой $M \geq 5,0$ в каждом сегменте и средних периодов повторения сейсмических событий такой величины по графику повторяемости (зависимость Гутенберга - Рихтера), была рассчитана вероятность возникновения сильного (с магнитудой $M \geq 5,0$) землетрясения на текущий момент времени в предположении, что такие события образуют Пуассоновский поток. На рис. 4 приведено районирование исследуемой зоны по описанному выше принципу.

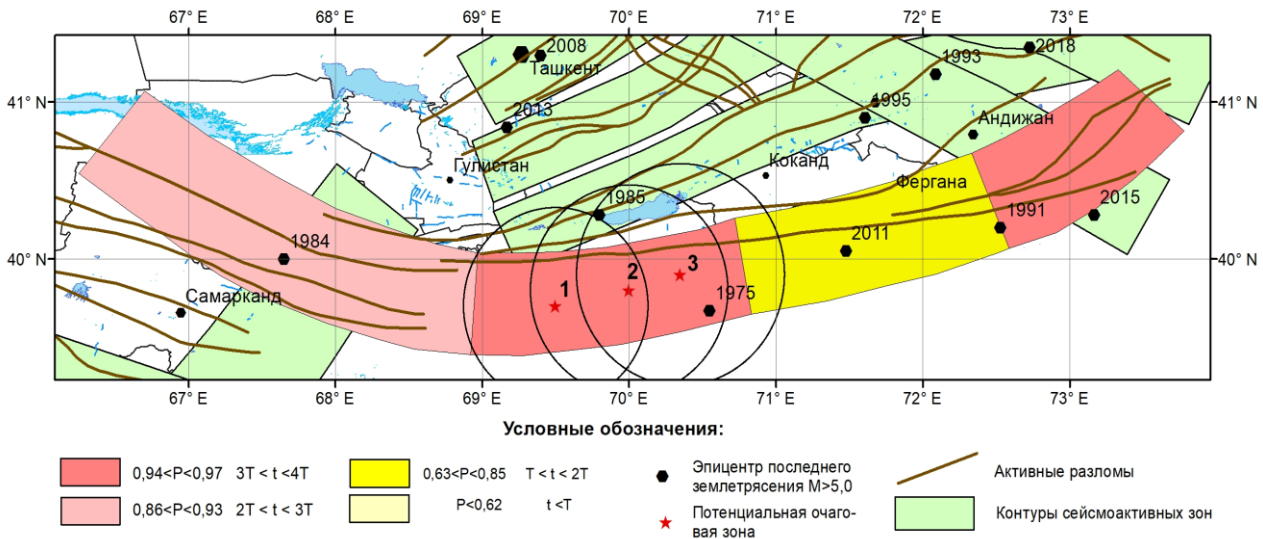


Рис. 4. Области с различной вероятностью возникновения сильного землетрясения по длительности сейсмической паузы в землетрясениях с магнитудой $M \geq 5,0$.

Период повторяемости землетрясений с магнитудой $M \geq 5,0$ в первом (самом западном) сегменте Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны составляет $T_{M \geq 5,0} = 18-19$ лет. Последнее сильное землетрясение в данном сегменте произошло в 1984 г. (Галляларальское землетрясение,

$M = 5,1$). Промежуток времени t , в течение которого не происходило сильных землетрясений (с 1985 по 2021 гг.), более чем в два раза превышает средний период повторяемости землетрясений такого уровня. Поэтому вероятность его возникновения на текущий момент времени составляет $P_{M \geq 5,0} = 0,859$. Последнее сильное землетрясение во втором сегменте Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны произошло в 1975 г. и имело магнитуду $M = 5,0$. С учетом средней частоты повторения землетрясений такой силы (один раз в 14-15 лет), вероятность его на сегодня составляет $P = 0,96$. Третий сегмент Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны характеризуется относительно невысокой вероятностью ($P = 0,67$) возникновения сильного землетрясения в ближайшие годы, поскольку последнее сильное землетрясение в этом сегменте было относительно недавно (Канское землетрясение, $M = 6,2$, 2011 г.). Наконец, в самом восточном, четвертом сегменте зоны длительность сейсмической паузы очень большая. Последнее сильное землетрясение произошло здесь в 1991 г. При среднем периоде повторяемости таких землетрясений $T = 8-9$ лет, вероятность его возникновения на текущий момент времени составляет $P = 0,968$.

На рис. 5 представлен разрез Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны по глубине. Все эпицентры спроецированы на плоскость, проходящую через ось сейсмоактивной зоны, перпендикулярно к дневной поверхности. По оси абсцисс отложено расстояние от эпицентра землетрясения до самой крайней точки оси сейсмоактивной зоны, расположенной на юго-западе. По оси ординат показана глубина этого землетрясения. Кружками различного радиуса показаны землетрясения различных магнитуд. Мощность сейсмоактивного слоя в западной части составляет 20-25 км и увеличивается с продвижением на восток, достигая на отдельных участках восточных сегментов глубины 40 км.

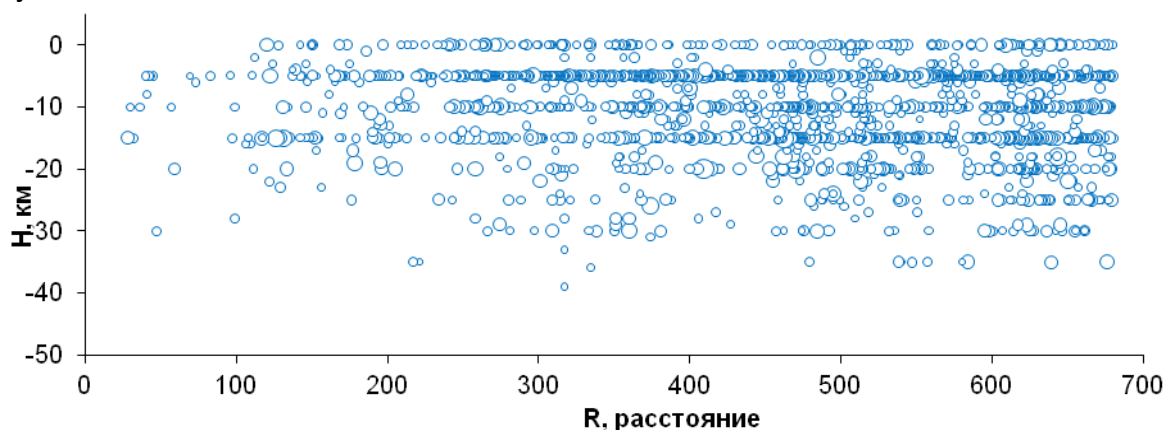


Рис. 5. Разрез Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны по глубине.

Приведенные в табл. 2 периоды повторения землетрясений различных магнитуд, а также соотношения между числом землетрясений различного энергетического уровня являются средними долговременными характеристиками сейсмического режима исследуемой территории. Они получены путем осреднения параметров за весь длительный срок инструментальных наблюдений. Наблюдаемые в отдельные промежутки времени значимые отклонения от этих долговременных характеристик, которые проявляются в виде уменьшения или возрастания скорости потока сейсмических событий (так называемые, «сейсмические затишья» и «сейсмические активизации»), а также в изменении соотношения между количеством слабых и сильных землетрясений, происходящих в сейсмоактивной зоне, называются «аномалиями сейсмического режима» и могут свидетельствовать о подготовке в пределах той области, где они отмечались, сильного (с магнитудой $M \geq 5,0$) землетрясения. Приведем некоторые примеры проявления аномалий в параметрах сейсмического режима в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны. Целому ряду сильных землетрясений, произошедших в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне, предшествовала сейсмическая активизация, состоящая в увеличении суммарного числа представительных слабых и умеренных землетрясений N_{Σ} , происходящих в области, в которой впоследствии реализуется основной толчок.

Примеры проявления сейсмической активизации перед Исфара-Баткентским землетрясением 1977 г. с $M = 6,4$, Чимионским землетрясением 1982 г. с $M = 5,6$ и Галляаральским землетря-

сением 1984 г. с $M = 5,1$ приведены на **рис. 6**. Первые два из перечисленных землетрясений произошли в центральных сегментах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны, а третье – в западном сегменте.

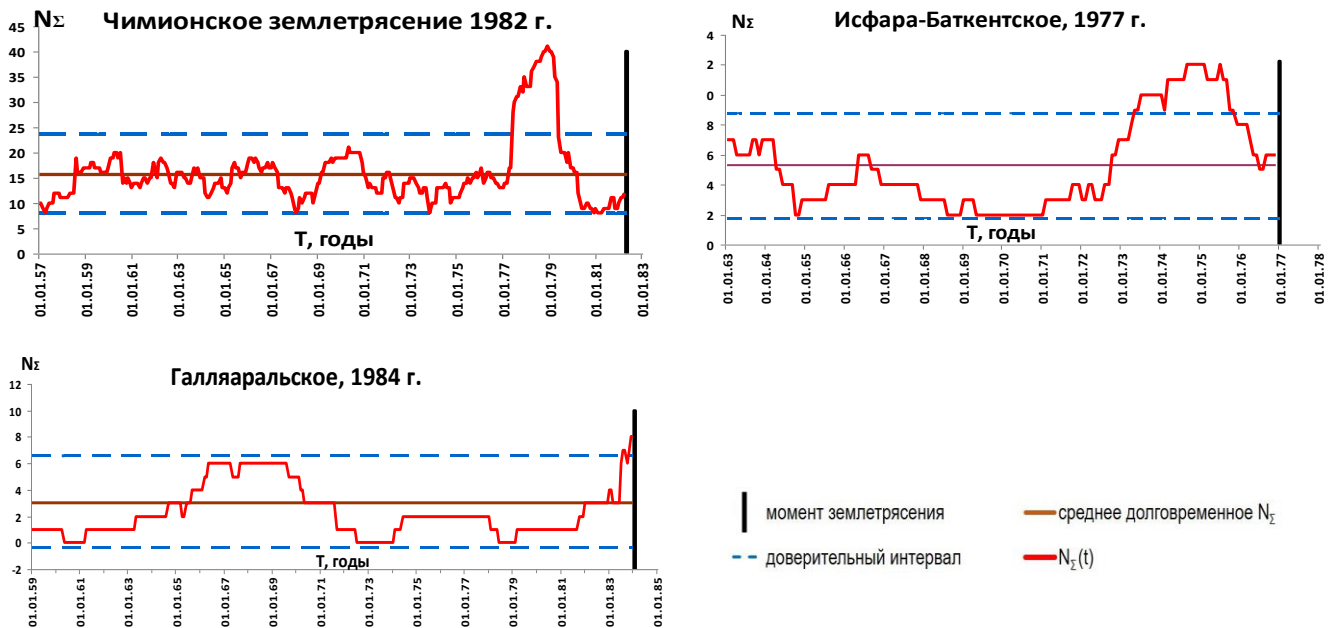
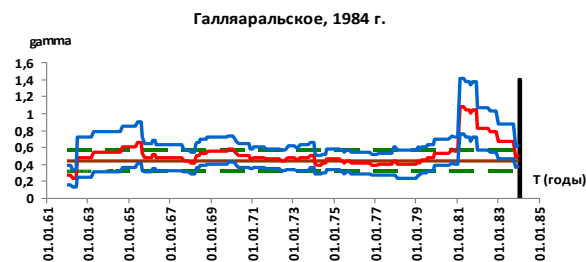


Рис. 6. Примеры проявления предвестника «активизация сейсмичности» по параметру N_Σ перед некоторыми землетрясениями Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны.

Другим, не менее информативным признаком, свидетельствующим о происходящем процессе подготовки сильного землетрясения в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне, являются временные флуктуации угла наклона графика повторяемости землетрясений (параметр ν при магнитудной классификации землетрясений, или же параметр γ при энергетической классификации). Этот параметр отражает соотношение между количеством слабых, умеренных и сильных сейсмических событий, происходящих в исследуемой области.

На **рис. 7** показаны временные флуктуации параметра γ перед Чимионским землетрясением 1982 г. и Галляаральским землетрясением 1984 г. В обоих случаях за несколько лет перед возникновением сильного землетрясения отмечалось значимое отклонение данного параметра от среднего долговременного значения. Возрастание параметра γ обычно интерпретируется как увеличение числа малых трещин, связанных с ростом тектонических напряжений. Наблюдаемое впоследствии снижение данного параметра связывают с процессом укрупнения мелких трещин при формировании магистрального разрыва [8-10].



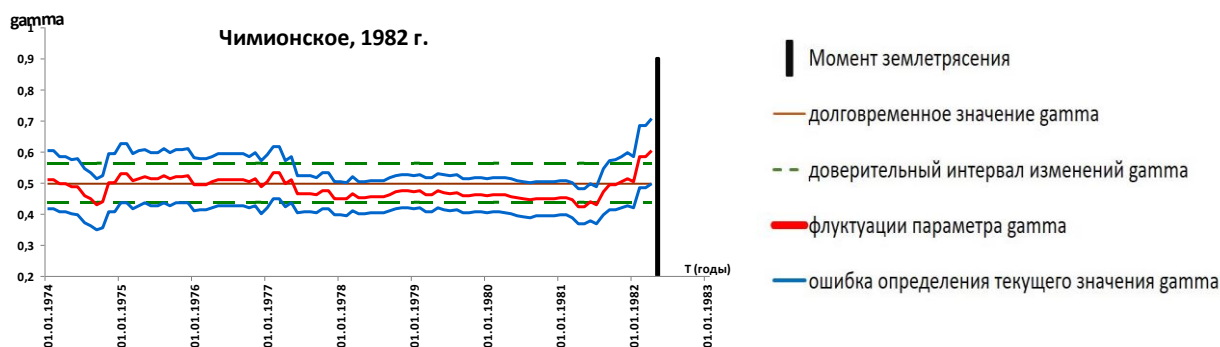


Рис. 7. Примеры проявления предвестника аномалии сейсмической дробности (параметр γ) перед некоторыми землетрясениями Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны.

Анализ текущей сейсмологической обстановки в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны

На рис. 8 показан пространственно-временной график развития сейсмического процесса в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне. По оси абсцисс отложено расстояние от эпицентра землетрясения до самой крайней точки оси сейсмоактивной зоны, расположенной на юго-западе. По оси ординат – время возникновения землетрясения. Красными кружками с заливкой показаны землетрясения с $K \geq 12$ ($M \geq 4,5$).

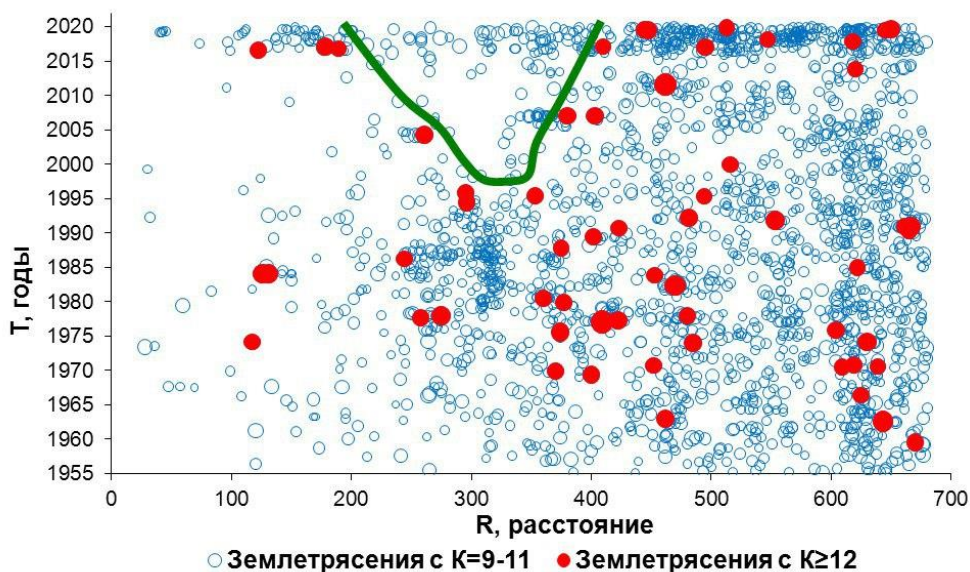


Рис. 8. Пространственно-временные графики развития сейсмического процесса в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне.

Обращает на себя внимание сформировавшаяся к настоящему времени область сейсмического затишья по землетрясениям с $K \geq 12$ ($M \geq 4,5$) в центральной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны (между отметками в 200 и 400 км по оси зоны), которая может свидетельствовать о подготовке на данном участке зоны сильного (с магнитудой $M \geq 5,0$) землетрясения. Эта область отмечена на рис. 8 зеленой линией. В исследованиях [8-10] отмечается высокая информативность данного прогностического признака, когда за несколько лет до момента сильного землетрясения уменьшается количество, или полностью исчезают сейсмические события, отличающиеся от магнитуды ожидаемого основного толчка на 2-2,5 магнитуды (3-4 энергетических класса при энергетической классификации землетрясений по величине).

Для уточнения сейсмологической обстановки в области, где на текущий момент времени наблюдается длительное сейсмическое затишье по землетрясениям с энергетическим классом $K \geq 12$ ($M \geq 4,5$), были проанализированы временные флуктуации суммарного числа представительных землетрясений N_{Σ} и временные флуктуации угла наклона графика повторяемости землетрясений (параметр γ). Расчет этих параметров проводился для нескольких точек, расположенных в выделенной «области запрета» на землетрясения $K \geq 12$ (см. рис. 8). Местоположение точек, для которых рассчитывались временные флуктуации параметров сейсмического режима, показано красными звездочками на рис. 4. Радиус кругов, в пределах которых проводилось осреднение параметров, варьировал от 30 до 70 км. Временное окно при расчете параметра N_{Σ} составляло один год, а для параметра γ – 5 лет. В каждой из трех рассмотренных точек, независимо от выбираемого радиуса осреднения, на текущий момент наблюдается единообразное поведение параметров N_{Σ} и γ . Для примера на рис. 9 и 10 приведены временные флуктуации параметров N_{Σ} и γ в точке № 2.

По параметру N_{Σ} на фоне отсутствия землетрясений с $K \geq 12$ отмечается значимое возрастание более слабых толчков с $K < 12$, которое началось с 2017 г. При этом отмечается дисбаланс между средним долговременным соотношением количества землетрясений различного энергетического уровня, состоящий в уменьшении значения угла наклона графика повторяемости землетрясений (параметр γ). Согласно существующим моделям, описывающим процесс подготовки тектонического землетрясения, уменьшение параметра γ обычно связывают с укрупнением мелких трещин при формировании магистрального разрыва [9, 10].

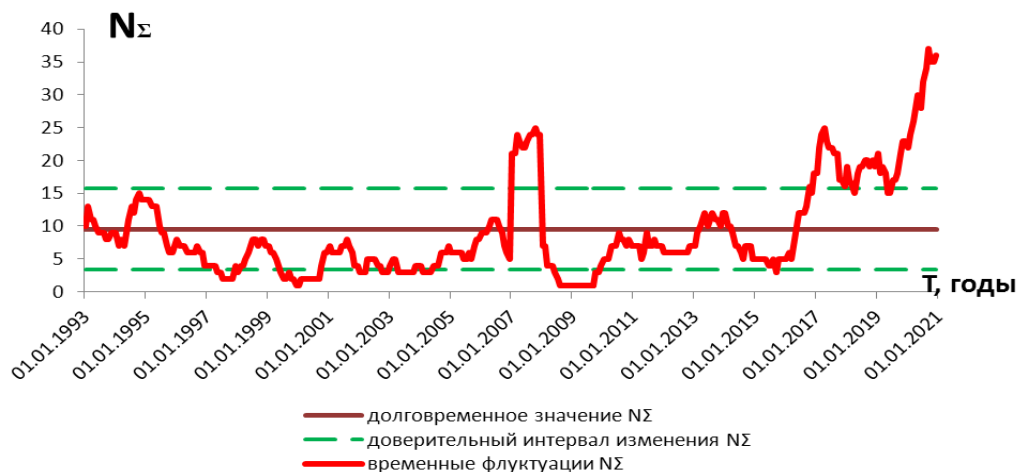


Рис. 9. Временные флуктуации параметра N_{Σ} в точке № 2, расположенной в области сейсмического затишья по землетрясениям с $K \geq 12$ ($M \geq 4,5$).

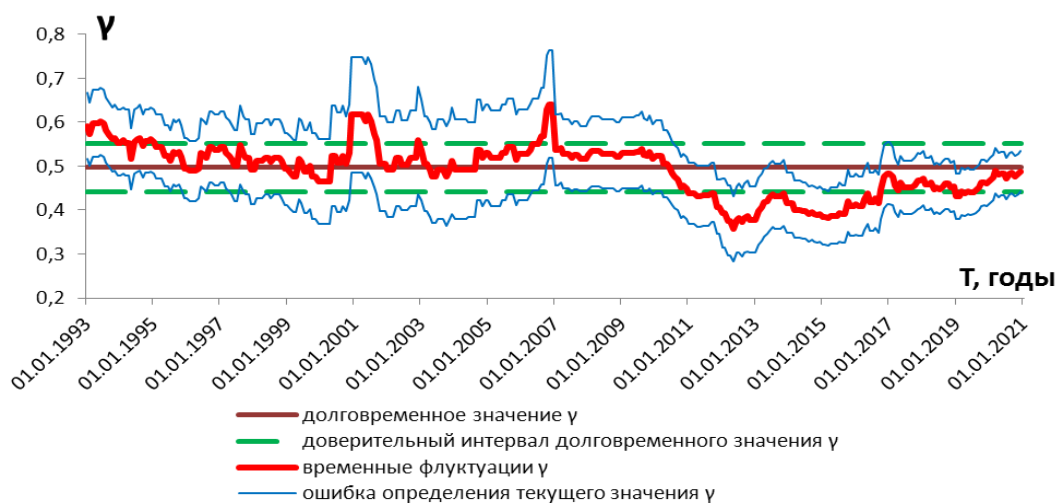


Рис. 10. Временные флуктуации параметра γ в точке № 2, расположенной в области сейсмического затишья по землетрясениям с $K \geq 12$ ($M \geq 4,5$).

Учитывая единообразный характер временных изменений параметров сейсмического режима в каждой из трех рассматриваемых точек, сузить область ожидания сильного землетрясения, основываясь только на этих параметрах, представляется достаточно сложным. Полезную информацию о возможной локализации потенциального очага разрушения несут особенности современного напряженного состояния земной коры исследуемой территории, устанавливаемые на основе анализа механизмов очагов землетрясений. Реконструкция напряженного состояния земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны проводилась алгоритмами метода катакластического анализа разрывных смещений (МКА) [11], с привлечением программного комплекса STRESSseism.

В результате реконструкции МКА в каждой точке определяются параметры тензора поля напряжений или локальное стресс-состояние (local stress state). Эти сведения позволяют установить для каждой элементарной области пространственное положение осей главных напряжений, геодинамический тип напряженного состояния земной коры, а также коэффициент Лоде-Надаи, определяющий вид тензора напряжений. Важным результатом реконструкции природных напряжений алгоритмами МКА является определение относительных величин максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления на плоскости хрупкого разрыва.

В качестве исходных данных для проведения реконструкции напряжений Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны использовалась выборка механизмов землетрясений исследуемой территории из сводного каталога механизмов очагов землетрясений территории Узбекистана [12, 13]. Карта эпицентров землетрясений данной выборки показана на [рис. 11](#). Так, западная, центральная и восточная части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны представлены примерно равным количеством землетрясений, для которых имелись определения механизма очага.

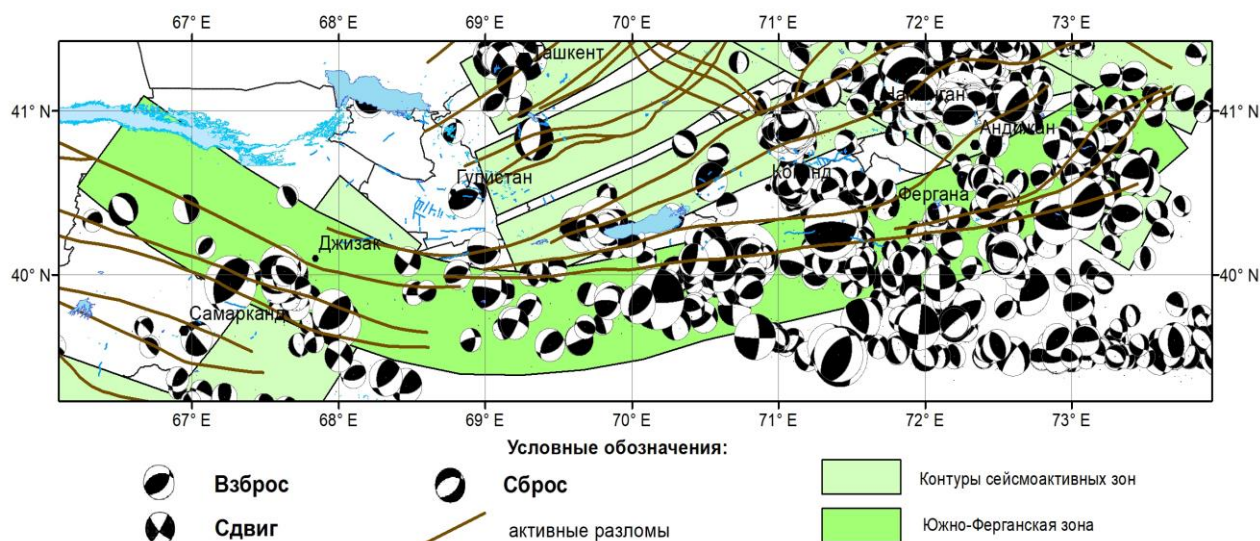


Рис. 11. Карта эпицентров землетрясений Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны, для которых имелись определения механизма очага.

Распределение механизмов очагов землетрясений Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны по кинематическому типу разрыва в очаге отражено на [рис. 12](#). Используется классификация Ю.Л. Ребецкого [11]. Подавляющую часть подвижек в очагах землетрясений составляют взбросы и взбросо-сдвиги. Подвижек сбросового и сбросо-сдвигового типа существенно меньше, и практически отсутствуют землетрясения с чисто сдвиговым типом подвижки.

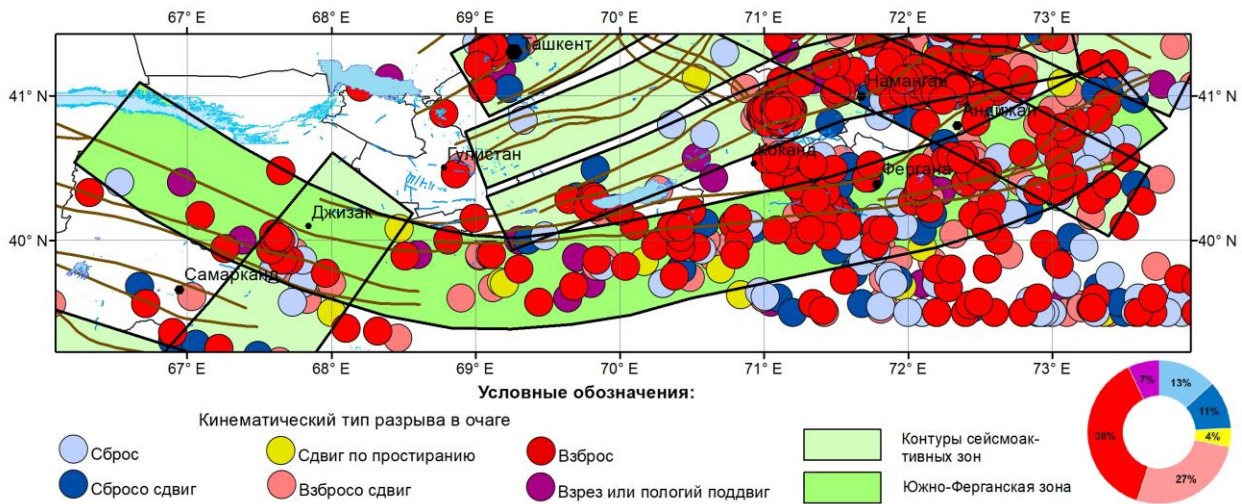


Рис. 12. Кинематические типы подвижек в очагах землетрясений Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны.

Реконструкция напряженного состояния земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны проводилась по сетке $0,2 \times 0,2^\circ$ с минимальным размером однородной выборки, состоящей из пяти определений механизмов очагов землетрясений в каждом домене. При этом радиус круговой области, в пределах которой осуществлялся отбор необходимого числа событий для формирования однородных выборок в каждой расчетной точке, варьировал от 15 до 60 км. С целью детализации получаемых результатов дополнительные реконструкции природных напряжений проводились отдельно для различных глубинных слоев земной коры исследуемой территории.

На рис. 13 показаны проекции на горизонтальную плоскость осей главных напряжений σ_1 и σ_3 в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне. Как следует из рис. 13, азимут оси сжатия σ_3 имеет в основном меридиональное направление в центральной и восточной частях зоны и юго-восточное – в западной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны. В большинстве случаев азимут оси сжатия σ_3 ортогонален азимуту простиранию активных разломов земной коры. Угол погружения от горизонта оси сжатия σ_3 меняется в небольших пределах от 10 до 20° . То есть, ось сжатия близгоризонтальна. Азимут оси растяжения σ_1 имеет преимущественно близширотное направление, а угол погружения от горизонта варьирует для различных участков исследуемой территории от 60 до 90° . Роза-диаграмма распределения в пространстве азимутов и углов погружения осей главных напряжений растяжения σ_1 и сжатия σ_3 приведена в левом верхнем углу рис. 13.

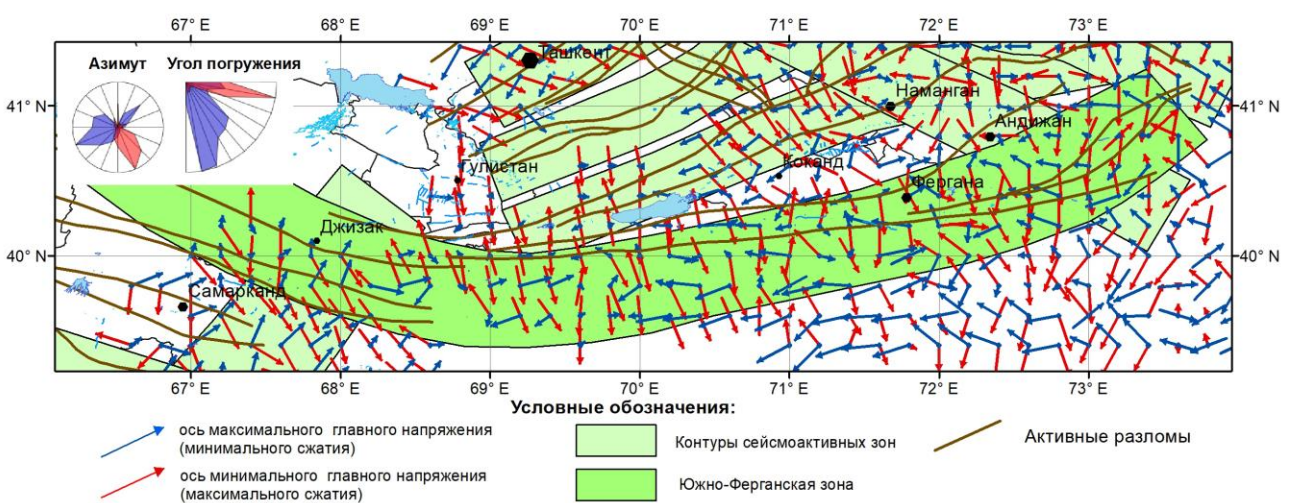


Рис. 13. Проекция на горизонтальную плоскость осей главного напряжения минимального сжатия σ_1 и максимального сжатия σ_3 для Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны.

Соотношения между осями главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 в механике горных пород обычно выражают через коэффициент Лодэ – Надаи μ_σ :

$$\mu_\sigma = 2[(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)] - 1.$$

Коэффициент Лодэ – Надаи μ_σ варьирует в пределах от -1 до 1. При этом принято считать, что значение $\mu_\sigma = 0$ соответствует напряженному состоянию, близкому к чистому сдвигу. Значение $\mu_\sigma = 1$ характеризует напряженное состояние, близкое к одноосному сжатию, а значение $\mu_\sigma = -1$ соответствует напряженному состоянию, близкому к одноосному растяжению.

Площадное распределение доменов с различными значениями коэффициента Лодэ – Надаи в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны показано на рис. 14. Число доменов с напряженным состоянием, близким к чистому сдвигу ($-0,2 < \mu_\sigma < 0,2$), одноосному сжатию ($\mu_\sigma \geq 0,6$) и одноосному растяжению ($\mu_\sigma \leq -0,6$) в пределах зоны приблизительно одинаковое. Большие области с напряженным состоянием, близким к чистому сдвигу, на западе располагаются между городами Джизак и Самарканд, а в центральной части – к юго-западу от г. Коканда. Наибольшее количество доменов с напряженным состоянием, близким к одноосному сжатию, расположены во втором сегменте Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны к востоку от г. Джизака. Домены с напряженным состоянием, близким к одноосному растяжению, расположены в основном в восточной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны между городами Андижан и Фергана.

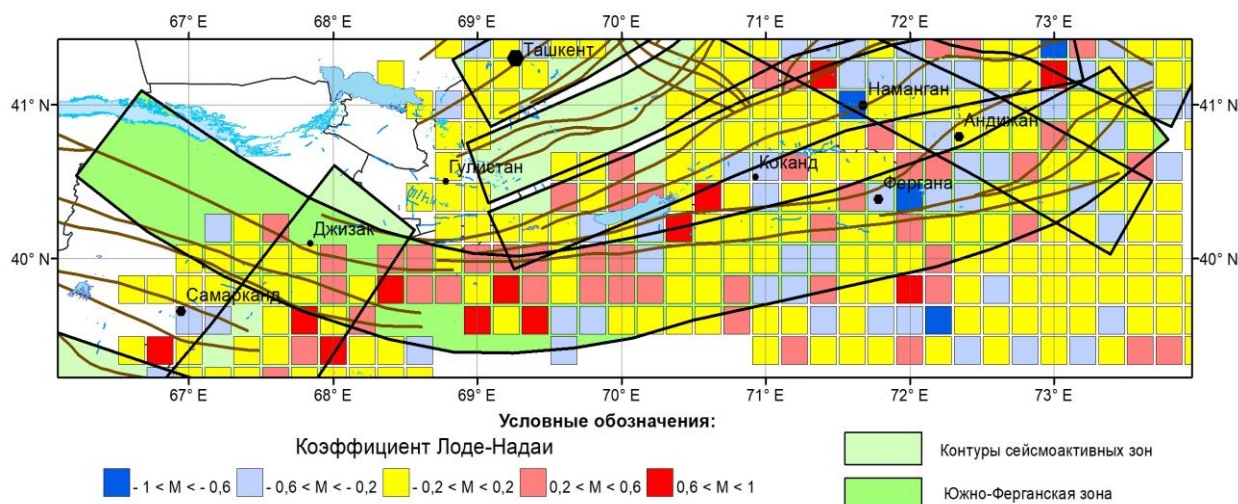


Рис. 14. Площадное распределение коэффициента Лодэ – Надаи в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне.

Деление исследуемой территории по геодинамическим типам напряженного состояния земной коры отражено на рис. 15. Известно, что различные кинематические типы подвижки в очагах землетрясений (взбросы, сбросы, сдвиги) реализуются в различном поле действующих напряжений. Взбросы происходят в областях, в которых ось максимального сжатия σ_3 близгоризонтальна, а ось минимального сжатия σ_1 (ось растяжения) – близвертикальна. Сбросовый тип подвижки в очаге, наоборот, реализуется в условиях, когда ось растяжения σ_1 близгоризонтальна, а ось максимального сжатия σ_3 – близвертикальна. Наконец, сдвиги происходят в областях, где обе оси главных напряжений σ_1 и σ_3 близгоризонтальны. Анализ геодинамического типа напряженного состояния земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны свидетельствует о том, что практически вся исследуемая территория находится в режиме горизонтального сжатия. Области с геодинамического типа напряженного состояния земной коры горизонтального растяжения здесь расположены южнее г. Ферганы в пределах Алайского хребта и одноименной долины. В центральной части Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны расположены несколько доменов с геодинамическим типом напряженного состояния земной коры горизонтального сдвига. Они расположены в центральной части зоны.

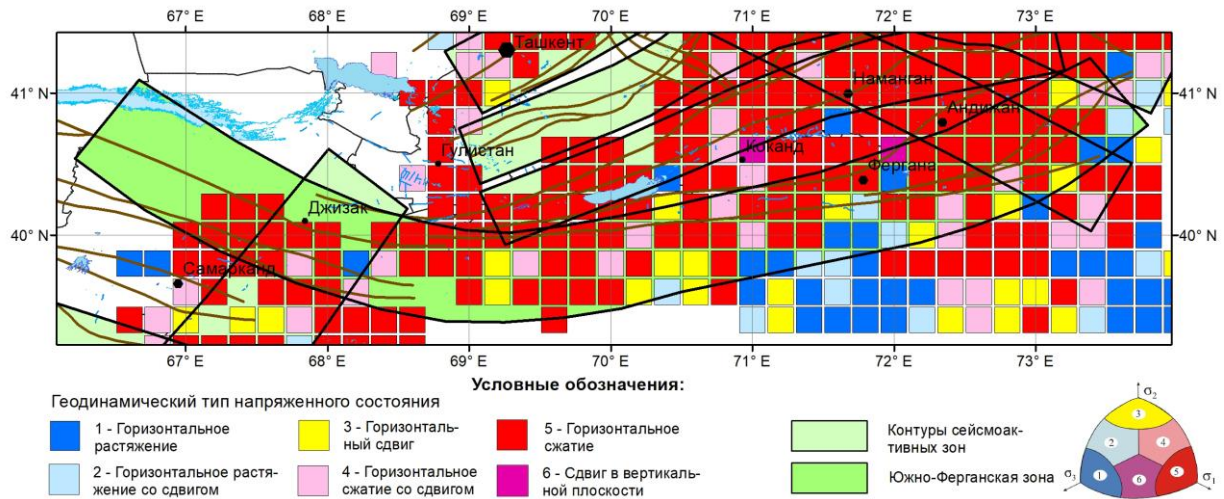
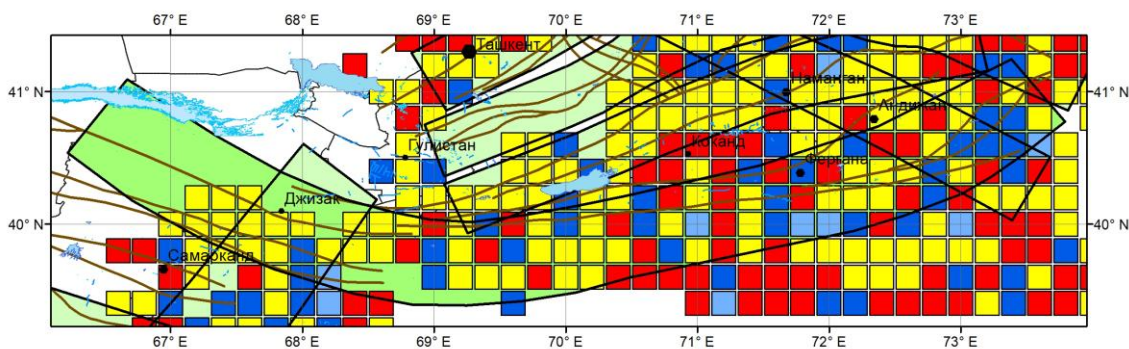
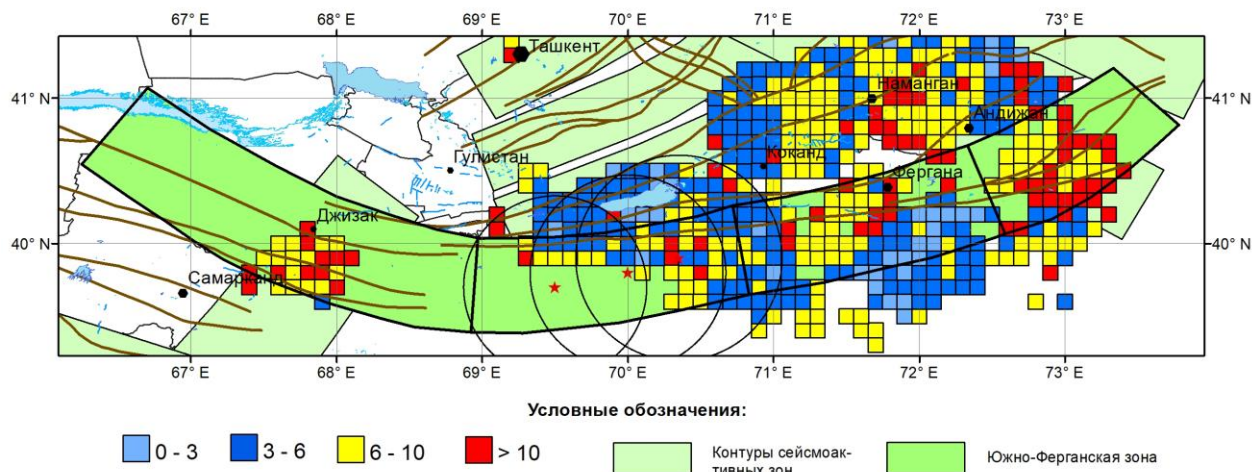


Рис. 15. Площадное распределение геодинамических типов напряженного состояния земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны.

Одним из важных результатов реконструкции природных напряжений, проводимых методом МКА, является расчёт нормированных на прочность сцепления горных пород, величин эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений. На рис. 16 показано площадное распределение нормированной на прочность сцепления горных пород τ_f , величины эффективного всестороннего давления p^* (разность между давлением в горных породах и флюидным давлением трещинно-порового пространства $p^* = p - p_{fl}$, где $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$), при различных вариантах реконструкции напряжений в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне. В рамках МКА предполагается, что в областях, характеризующихся высокой сейсмической активностью, массивы горных пород находятся в напряженном состоянии, близком к предельному. Из соотношений Кулона–Мора это определяет прямо пропорциональную связь между эффективными нормальными σ_1^* и максимальными касательными τ_n напряжениями на плоскости хрупкого разрыва [11], а, как следствие, и между их относительными величинами p^*/τ_f и τ_n/τ_f , полученными нормированием значений p^* и τ_n на прочность сцепления массивов горных пород τ_f . Если по результатам реконструкции, проведенной для всего сейсмоактивного слоя в целом, области больших и малых значений величины p^*/τ_f расположены достаточно мозаично (см. рис. 16, а), то по реконструкции, проведенной отдельно для сейсмоактивного слоя с глубиной $H \geq 11$ км, в котором сосредоточены гипоцентры практически всех сильных землетрясений, области повышенных и пониженных значений величины p^*/τ_f достаточно хорошо структурированы (см. рис. 16, б). Как правило, наиболее сильные (с магнитудой $M \geq 6,0$) землетрясения происходят в областях с невысокими значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений, что связывается с тем, что в таких областях понижены значения сил трения на разрывах, а это создает благоприятные условия для крупномасштабного разрушения [11, 13-17].



а



б

Рис. 16. Площадное распределение нормированной на прочность сцепления горных пород величины эффективного всестороннего давления (p^*/t_f) в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне при различных вариантах проведенной реконструкции: а – для всего сейсмоактивного слоя в целом; б – для глубин $H \geq 11$ км.

Так, в каждую из трех круговых областей, в которых наблюдались аномалии в параметрах сейсмического режима, попадают значительные по площадным размерам участки с пониженными значениями величины p^*/t_f , в которых напряженно-деформированное состояние земной коры является благоприятным для возникновения сильных землетрясений.

Дополнительную информацию о местоположении области, где в ближайшие годы возможна сейсмическая активизация, несет анализ пространственного положения очагов сильных землетрясений в сейсмоактивной зоне. Авторами настоящего исследования показано, что эпицентры сильных землетрясений, произошедших на территории Узбекистана, начиная с исторического периода времени, располагаются не равномерно по сейсмоактивной зоне, а концентрируются в компактных областях с линейными размерами порядка 50-80 км, где реализованы оптимальные условия для крупномасштабного разрушения [11, 13-17]. В связи с малой изменчивостью в течение десятков и сотен лет направленности протекания сеймотектонических процессов, определяющих современное напряженное состояние сейсмоактивных зон, именно эти области с высокой степенью вероятности проявят себя сейсмической активностью и в ближайшие десятилетия. Для исследуемого района области с высокой концентрацией сильных землетрясений показаны на рис. 17.

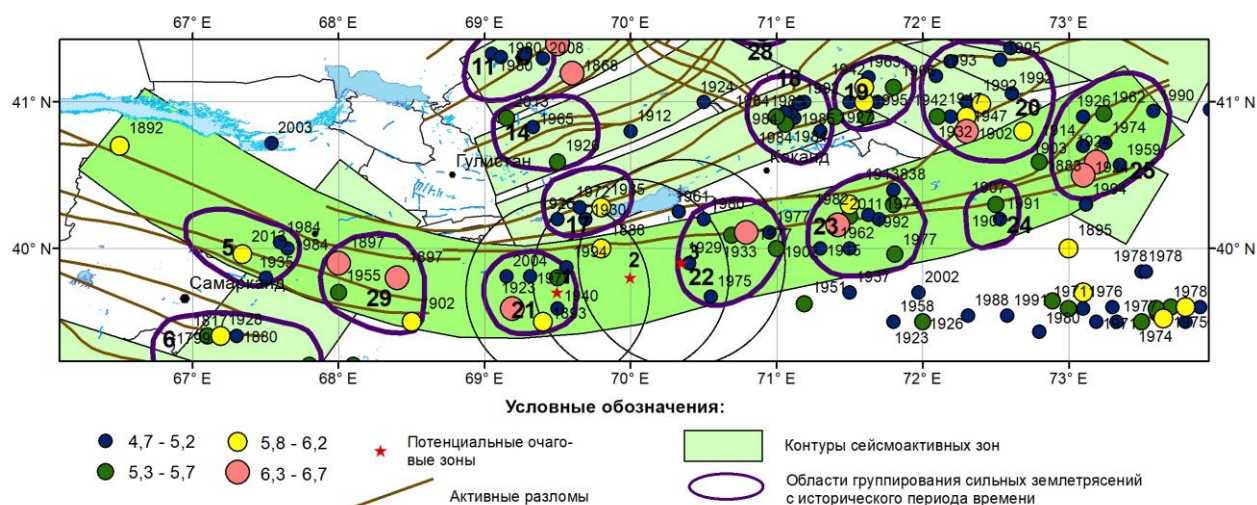


Рис. 17. Области реализации сильных землетрясений начиная с исторического периода времени.

На участок, в котором были выявлены аномалии в параметрах сейсмического режима (длительная сейсмическая пауза в возникновении землетрясений с магнитудой $M \geq 5,0$, запрет на землетрясения с $M \geq 4,5$, активизация по слабым землетрясениям, аномалии угла наклона графика повторяемости), приходится три такие области с номерами: 17, 21 и 22. Учитывая размер территории, охваченной аномальными процессами, интенсивность и длительность проявления аномальных флуктуаций, есть все основания считать, что в пределах одной из названных областей в ближайшие несколько лет произойдет сильное (с $M \geq 6,0$) землетрясение.

Заключение

Основные результаты проведенного исследования следующие.

1. Южно-Ферганская сейсмоактивная зона характеризуется высоким уровнем сейсмической активности. За исторический период времени и за инструментальный промежуток наблюдений в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны неоднократно происходили землетрясения с магнитудой $M \geq 6,5$ и интенсивностью сотрясений в эпицентре $I_0 \geq 8$ баллов по шкале MSK-64. Сейсмическая активность в пределах сейсмоактивной зоны распределена неравномерно. На уровне слабых и умеренных землетрясений восточная часть Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны более активная, чем западная. На уровне наиболее сильных землетрясений (с магнитудой $M = 6,0-6,5$), возможных в ее пределах, активность по всей протяженности зоны примерно одинаковая. Средний период повторяемости землетрясений с магнитудой $M \geq 5,0$ в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне составляет 2,5-3 года. В пределах различных сегментов период повторения землетрясений такой силы здесь варьирует от 8-9 до 18-20 лет.

2. На текущий момент времени в двух сегментах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны отмечается длительная сейсмическая пауза в возникновении землетрясений с магнитудой $M \geq 5,0$. В каждом из этих сегментов время отсутствия землетрясения с магнитудой $M \geq 5,0$ более чем в три раза превосходит период повторяемости таких землетрясений, рассчитанный по зависимости Гуттенберга-Рихтера.

3. Анализ пространственно-временных графиков развития сейсмичности в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны позволил выявить в ее центральной части участок, на котором отмечается длительное сейсмическое затишье по землетрясениям с энергетическим классом $K \geq 12$ ($M \geq 4,5$). Для данного участка проведен детальный анализ временных изменений параметров сейсмического режима. Установлено, что по всей протяженности области сейсмического затишья по землетрясениям с энергетическим классом $K \geq 12$ отмечается сейсмическая активизация по землетрясениям младших энергетических классов, а также аномальные флуктуации угла наклона графика повторяемости землетрясений. Подобные аномальные изменения предшествовали ряду сильных землетрясений, произошедших в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны, что свидетельствует об их прогностической значимости.

4. Для локализации места возможной сейсмической активизации проведена реконструкция современного напряженного состояния земной коры Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны методами катакластического анализа разрывных смещений, с привлечением механизмов очагов землетрясений. В каждой точке исследуемой зоны определено пространственное положение осей главных напряжений, геодинамический тип напряженного состояния земной коры, коэффициент Лоде – Надаи, определяющий вид тензора напряжений, а также относительные величины максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления на плоскости хрупкого разрыва.

5. Учитывая, что сильные (с магнитудой $M \geq 6,0$) землетрясения обычно происходят в областях с низкими значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений (это связано с тем, что в таких областях понижены значения сил трения на разрывах, что создает благоприятные условия для крупномасштабного разрушения), в

пределах выделенной области сейсмического затишья определены участки пониженных значений параметра p^*/τ_f .

б. С учетом установленных ранее особенностей пространственной локализации сильных землетрясений, произошедших с исторического периода времени, в компактных областях, в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны выделены два участка, где в ближайшие годы возможно сильное с магнитудой $M \geq 6,0$ землетрясение.

Литература

- Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Artikov M.T. Revealing of seismic activation interrelationships in various seismoactive zones // *Geodesy and Geodynamics*. - 2015. - 5 (6). - P. 351-360. DOI: 10.1016 / j.geog.2015.03.007.
- Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Identification of expected seismic activity areas by forecasting complex seismic-mode parameters in Uzbekistan // *Geodesy and Geodynamics*. - 2018. - 9 (2). - P. 121-130. DOI: 10.1016 / j.geog.2017.11.005
- Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.О., Ибрагимов О.Р. Сейсмотектонический метод оценки сейсмической опасности и вопросы сейсмического районирования // *Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане*. - Т.: ГИДРОИНГЕО, 2002. - С. 59-74.
- Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // *Методы детального изучения сейсмичности*. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - № 176. - С. 75-114.
- Rautian T.G., Khalurin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales // *Seismological Research Letters*, 2007. - 78 (6). - P. 579-590.
- Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. Решение проблемы неоднородности магнитуд в работах по сейсмическому зондированию территории Республики Казахстан // *Вестник НЯЦ РК*. - 2014. - Вып. 4. - С. 86-92.
- Якубов М.С., Соколов М.В. Анализ эффективности сети сейсмических станций Узбекистана на основных этапах ее развития // *Сейсмичность территории Узбекистана* // Под ред. К.Н. Абдуллабекова. - Т.: Фан, 1990. - С. 19-28.
- Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Зияудинов Ф.Ф. Сейсмическая опасность территории Узбекистана. - Т.: Фан, 2012. - 254 с.
- Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. - М.: Наука, 1993. - 314 с.
- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. - М.: Наука, 2006. - 254 с.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природный горных массивов. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. - 406 с.
- Ребецкий Ю.Л., Ибрагимова Т.Л., Ибрагимов Р.С., Мирзаев М.А. Напряженное состояние сейсмоактивных областей Узбекистана // *Вопросы инженерной сейсмологии*. - 2020. - Т. 47. - № 3. - С. 28-52. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.3-2>
- Rebetsky Y.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S. et al. Stress State of Uzbekistan's Seismically Active Areas. *Seism. Instr.* 56, 679-700 (2020). <https://doi.org/10.3103/S0747923920060079>.
- Rebetsky Yu.L., Tatevossian R.E. Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field // *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 2013. - V. 184. - № 4-5. - P. 335-346.
- Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В. Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети KNET // *Геология и геофизика*. - 2016. - Т. 57. - № 3. - С. 496-520.
- Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A., Rebetsky Yu.L. The current stress of earth's crust in the territory of Uzbekistan according to focal earthquake mechanisms // *Geodynamics & Tectonophysics*. - 2021. - 12 (3). - P. 435-454. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0532>
- Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Rebetsky Yu.L. Methods and results of long-term strong earthquakes forecast in the Uzbekistan territory // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. P. 012028. DOI 10.1088/1755-1315/929/1/012028.

УДК 550.34

А.Р. Ишук¹, К. Линдхольм², З.Г. Ильясова¹, Ш.Я. Муродкулов¹

¹Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана.

²Conrad Lindholm. «SeismoConsult», Норвегия.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ТАДЖИКИСТАНА

Ishchuk A.R., Lindholm K., Ilyasova Z.G., Murodkulov Sh.Ya.

Tojikiston hududining seysmik xavfining ehtimoliy tahlili

Аннотасија. Hozirgi vaqtda Tojikiston hududida seysmik rayonlashtirishning amaldagi normativ xaritasi 1978 yilda deterministik yondashuv asosida tuzilgan bo'lib hozirgi vaqtda ancha eskirgan. So'nggi geologik va seysmologik ma'lumotlar asosida, shuningdek, ushbu tadqiqot mualliflarining Markaziy Osiyo seysmik xavfini baholash bo'yicha xalqaro loyihalar doirasidagi tajribasi asosida Tojikiston hududida probabilistik tahlil (vaso) amalga oshirildi. VASO o'rganilayotgan hududda turli xil seysmik manbalar ishlatilgan: zilzila epitsentrlarini fazoviy taqsimlash shaklida seysmik hodisalarni aks ettiruvchi yer qobig'ining faol yoriqlari va maydon manbalari shaklida. Geometriya, seysmik salohiyat va takroriy zilzilalar manbalarining takrorlanuvchanligi parametrlarini aniqlash uchun Markaziy Osiyodagi faol yoriqlar bo'yicha 6 turli ma'lumotlar bazalari ishlatilgan. Sayt manbalari-dan foydalanishda zilzila epitsentrlari va hududning tektonikasi asosiy elementlarini hisobga olgan holda rayonlashtirish usuli qo'llanildi. Rayonlashtirish qobiq va chuqur fokusli Pomir-Hindukush zilzilalari uchun alohida o'tkazildi. Gruntlar harakatining tenglamalari sifatida, yangi tenglama avlodidan (PEER Report #2018/03) ma'lum bo'lgan global zaiflashuv qonunlari ko'rib chiqildi. Hisob-kitoblar VASO ni amalga oshiruvchi CRISIS 2015 dasturiy ta'minot kompleksi yordamida amalga oshirildi. 50 yil davomida seysmik ta'sir darajasining Nodir bo'lma-gan turli ehtimoli uchun grunt tebranishlarining maksimal tezlashmalari miqdorlarining mahalliy taqsimlanishi olingan. Bir qator aholi punktlari uchun turli toifadagigruntlarning reaksiya spektrlari olingan.

Калит so'zlar: seysmik xavf, seysmik manbalar, faol yoriqlar, susaytiruvchi qonunlar, tezlashuv, xavfli egri, reaksiya spektrlari.

Ишук А.Р., Линдхольм К., Ильясова З.Г., Муродкулов Ш.Я.

Вероятностный анализ сейсмической опасности территории Таджикистана

Аннотация. Действующая в настоящее время нормативная карта сейсмического районирования территории Таджикистана была составлена в 1978 г. на основе детерминистического подхода и к настоящему времени морально устарела. Основываясь на последних геологических и сейсмологических данных, а также опыте работы авторов настоящего исследования в рамках международных проектов по оценке сейсмической опасности Центральной Азии, проведен вероятностный анализ (VASO) территории Таджикистана. При VASO исследуемой территории использовались различные типы сейсмических источников: линейные в виде активных разломов земной коры, и площадные источники, отражающие сейсмические события в виде пространственного распределения эпицентров землетрясений. Для определения геометрии, сейсмического потенциала и параметров повторяемости линейных источников землетрясений использованы 6 различных баз данных по активным разломам Центральной Азии. При определении площадных источников применялся метод зонирования с учетом расположения эпицентров землетрясений и основных элементов тектоники территории. Зонирование проводилось отдельно для коровых и глубокофокусных Памиро-Гиндукушских землетрясений. В качестве уравнений движения грунта рассматривались известные мировые законы затухания из новой генерации уравнений (PEER Report #2018/03). Расчеты проводились с использованием программного комплекса CRISIS2015, реализующего VASO. Для различных вероятностей не превышения уровня сейсмических воздействий в течение 50 лет получено площадное распределение величин максимальных ускорений колебаний грунта. Для ряда населенных пунктов получены спектры реакции грунтов различных категорий и построены кривые опасности.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, сейсмические источники, активные разломы, законы затухания, ускорения, кривые опасности, спектры реакции.

Ishchuk A.R., Lindholm K., Ilyasova Z.G., Murodkulov Sh.Ya.

Probabilistic analysis of seismic hazard of the Tajikistan territory

Abstract. The current normative seismic zoning map of the Tajikistan territory was prepared in 1978 on the basis of deterministic approach and it is now obsolete. Based on recent geological and seismological data, as well as the experience of the authors of this study in international projects on seismic hazard assessment in Central Asia, a probabilistic analysis (PSHA) of the Tajikistan territory was carried out. Different types of seismic sources

were used in PSHA of the territory under study: linear sources in the form of active faults in the Earth's crust, and area sources reflecting seismic events in the form of spatial distribution of earthquake epicenters. Six different databases on active faults in Central Asia were used to determine the geometry, seismic potential, and recurrence parameters of linear earthquake sources. When using area sources, the zoning method was used taking into account the location of earthquake epicenters and the main tectonic elements of the territory. Zoning was conducted separately for crustal and deep-focus Pamir-Hindukush earthquakes. The known world attenuation laws from the new generation of equations (PEER Report #2018/03) were considered as ground motion equations. Calculations were performed using the CRISIS2015 software package implementing PSHA. For different probabilities of not exceeding the level of seismic impacts for 50 years the area distribution of the values of maximum ground acceleration was obtained. For a number of settlements, the response spectra of soils of different categories were obtained and hazard curves were constructed.

Key words: seismic hazard, seismic sources, active faults, attenuation laws, accelerations, hazard curves, response spectra.

Краткая история предыдущих оценок сейсмической опасности территории Таджикистана

Предыдущие оценки сейсмической опасности территории Центральной Азии, включая Таджикистан, проводились, как правило, в единицах макросейсмической интенсивности. Одна из первых карт сейсмической опасности Центральной Азии была составлена Д.И.Мушкетовым в 1933 г. (Мушкетов, 1933) и основывалась на статистических данных о землетрясениях и геологических особенностях территории. Результаты Д.И.Мушкетова были впоследствии обновлены Г.П.Горшковым (1938), С.В.Медведевым (1957, 1968), И.Е.Губиным (1960). Детальная информация об истории оценки сейсмической опасности в Центральной Азии и в Таджикистане, в частности, приведена в (Babaev et al., 2008).

В рамках международного проекта Международного научного и технологического центра (МНТЦ) № KR1176 «Инициатива по оценке сейсмического риска в Центральной Азии» (CASRI) на основе оценки сейсмического потенциала активных разломов с максимально возможной магнитудой, проводилось вычисление сейсмических воздействий для территорий, в основном, Киргизии и Таджикистана. Была составлена карта распространения пиковых ускорений грунта для максимального возможного землетрясения (MCE – Maximum Credible/Considered Earthquake), составленная с использованием детерминистского подхода. Максимальный уровень пиковых ускорений грунта для территорий Киргизии и Таджикистана на скальных грунтах не превышал 0,5g.

Сейсмическая опасность территории Центральной Азии в единицах макросейсмической интенсивности в баллах шкалы MSK-64 была выполнена в 2012 г. Д.Бинди с соавторами (2012). Был выполнен анализ интенсивности сотрясений в более чем 5000 точках территории при 75 землетрясениях, и для большей части территории интенсивность сотрясений оценена в VIII баллов с периодом повторяемости 475 лет. Оценка интенсивности получилась на 1 балл меньше, чем при предыдущих исследованиях по проекту GSHAP (Ulomov, 1999; Zhang et al., 1999).

Как уже отмечено, все эти оценки основаны или на большей частью геологической информации, или с преобладанием сейсмологической информации, в частности, макросейсмических данных. В обоих случаях авторы этих исследований не использовали различные типы сейсмических источников, т. е. оценка сейсмических воздействий оценивалось или на непосредственно сейсмических данных, или, наоборот, исключительно на данных о сейсмогенерирующей способности активных разломов с оценкой максимальных магнитуд возможных землетрясений.

В недавнем исследовании (Ullah et al., 2015) оценивается распространение интенсивности сотрясений в баллах шкалы MSK-64 на территории Центральной Азии с периодом повторяемости расчетных значений 475 лет. Применялся вероятностный анализ с преимущественным использованием так называемой площадной модели сейсмических источников с выделением зон сейсмических событий и расчетами интенсивности сотрясений в единицах шкалы

MSK-64 по уравнению затухания, предложенному Д.Бинди в 2011 г. (Bindi et al., 2011). Однако, в расчетах не использована информация об активных разломах, способных генерировать сильные землетрясения.

Вероятностный анализ сейсмической опасности для некоторой части Центральной Азии, включая территорию Таджикистана, приведен в работе (Ischuk et al., 2018). Впервые применялся классический вероятностный анализ с использованием двух типов сейсмических источников: активных разломов, как линейных источников землетрясений (модель разломов), и площадная модель (или модель зон) сейсмических источников.

Существующие в Таджикистане нормы сейсмостойкого проектирования и строительства до сих пор используют оценку сейсмической опасности в виде карты общего сейсмического районирования в единицах шкалы MSK-64 от VII до IX баллов, составленную в 1978 г. (Бабаев и др., 1978). Данная карта уже не соответствует современным требованиям сейсмостойкого проектирования и строительства, поэтому оценка сейсмической опасности территории Таджикистана с использованием современных методов и подходов весьма актуальна.

Приводимые в настоящей статье результаты получены с использованием такой же методологии, как и описанной в (Ischuk et al., 2018), но с использованием другой модели активных разломов, другим зонированием сейсмических источников, включающим 3 модели, а также так называемую точечную модель сейсмических источников, предложенную Гордоном Вуу (Woo, 1996). Такой подход позволяет более корректно оценить сейсмическую опасность в виде расчетных сейсмических воздействий.

Основные особенности тектоники территории Таджикистана

Тектоника территории Таджикистана довольно сложная и отличается высокой геодинамической активностью. Выделяют, в основном, три крупные геологические структуры: Памир, Южный Тянь-Шань и Таджикская депрессия или впадина (рис. 1). Высокая геодинамическая активность вызывает высокую сейсмическую активность до глубины 300-400 км (зона Памиро-Гиндукушских землетрясений). Значительные деформации геологических структур вызываются наличием так называемой зоны конвергенции Евразийской и Индо-Австралийской плит, начиная с позднемелового периода. Скорости движений достигают ~ 10 мм/год в зоне Читралских Гималаев, ~ 15 мм/год в зоне Транс-Алайского надвига, и <5 мм/год в Тянь-Шане (Zhang et al., 2004). Скорости смещений 29 ± 1 мм/год в зоне конвергенции, по данным GPS измерений, распределяются в виде комбинации взбросо-сдвиговых движений по разломам, и наибольшие деформации наблюдаются в Гиндукуше, на Памире, в Южном Тянь-Шане и в Кохистане (Mohadjer S. et al., 2010; Ischuk et al., 2013). Две группы землетрясений наблюдаются в данном регионе: неглубокие коровые землетрясения с глубиной гипоцентра H от 5 до 50 км, и глубокие Памиро-Гиндукушские землетрясения с глубиной очага $H = 70-300$ км. Наибольшее количество коровых землетрясений – на границах Южного Тянь-Шаня и Памира и между Южным Тянь-Шанем и Таджикской депрессией. Глубокие землетрясения происходят в Памиро-Гиндукушской зоне.

Более детальную характеристику тектонических особенностей рассматриваемой территории можно найти в публикациях (Shurt et al., 2014; Carrapa et al., 2015; Marie-Françoise Brunet et al., 2017; Kufner et al., 2018; Schneider et al., 2019; Abdulhameed et al., 2020). В настоящей статье основное внимание уделено анализу сейсмической опасности на основе тектонических особенностей и сейсмичности рассматриваемой территории, охватывающей как собственно Таджикистан, так и область на расстоянии 150-200 км от его границ для более корректной оценки сейсмических воздействий.

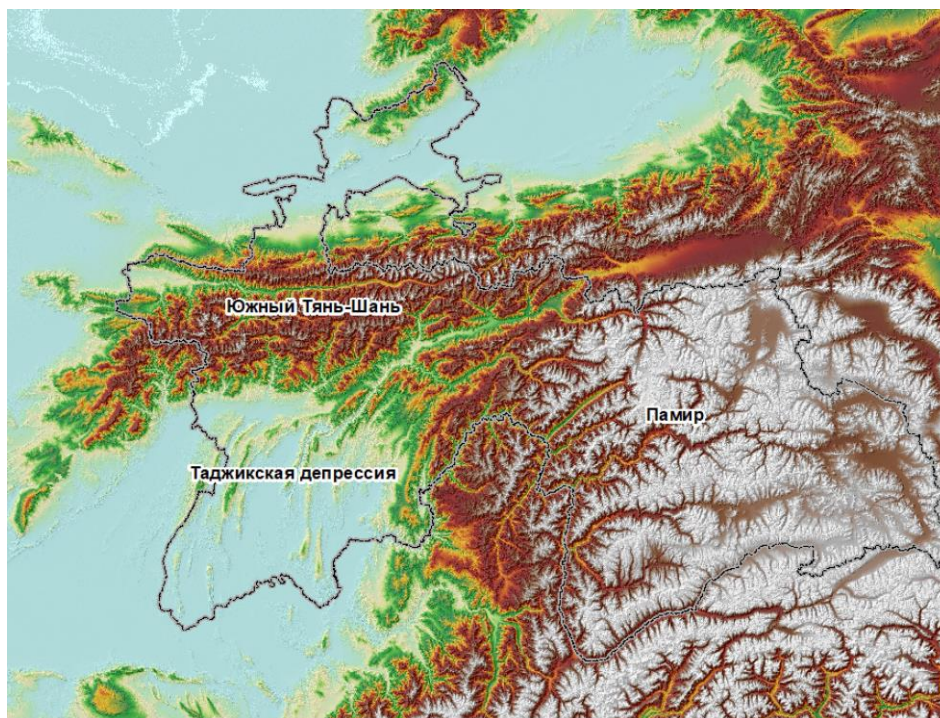


Рис. 1. Основные геологические структуры на территории Таджикистана.

Используемый метод оценки сейсмической опасности

В последние десятилетия в мировой практике широко используется вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО), принятый за мировой стандарт. Классический подход ВАСО, основанный на определении сейсмических источников и принципах его основателей Эстева и Корнелла (Esteva, 1967; Cornell, 1968), состоит, как правило, из 4 шагов:

1. Определение сейсмических источников.
2. Определение характеристик повторяемости сейсмических событий.
3. Оценка затухания сейсмических колебаний.
4. Вычисление величин сейсмических воздействий на земной поверхности.

Обычно, в соответствии с рекомендациями ICOLD (Международная комиссия по большим плотинам) (ICOLD, 2016), при выборе моделей сейсмических источников для ВАСО определяется два типа сейсмических источников:

- сейсмогенерирующие структуры, такие как активные разломы с имеющейся информацией об их параметрах (линейная модель);
- зоны рассеянной сейсмичности, которые не имеют явной корреляции с конкретными структурами (площадная или зональная модель).

Для большей аккуратности анализа также используется так называемая точечная модель сейсмических источников, предложенная Гордоном Вуу (Woo, 1996), которая непосредственно использует расположение эпицентров землетрясений и является наименее субъективной, в отличие от модели активных разломов и зональной модели. Таким образом, использовались три независимых типа моделей сейсмических источников для расчетов сейсмических воздействий на территории Таджикистана.

Данные и их анализ

Линейная модель строилась преимущественно на основе данных об активных разломах как возможных источниках сильных землетрясений. Каталоги землетрясений использовались для построения зональной модели на основе, преимущественно, характера распределения эпицентров, а

также тектонических особенностей территории. Также каталог землетрясений использовался для построения и расчетов по точечной модели сейсмических источников.

Сейсмические данные

Анализировались два каталога землетрясений: каталог CASRI-EMCA и каталог Геологической службы США – USGS каталог (<http://earthquake.usgs.gov>). В каталоге CASRI-EMCA значения различных магнитуд пересчитаны в значения моментной магнитуды M_w (Mikhailova et al., 2015). Каталог USGS использует практически один тип магнитуды – m_b , поэтому он является более однородным с точки зрения типа магнитуд. Значения магнитуды m_b в каталоге USGS пересчитывались в значения моментной магнитуды M_w при помощи уравнений, предложенных Скордилисом (Scordilis, 2006). Каталог CASRI-EMCA охватывает более длительный период наблюдений, начиная с исторических времен, но является менее однородным по типам используемых магнитуд. Поэтому нами использовались оба каталога для получения более объективных параметров повторяемости событий. Объединенный нами каталог землетрясений содержал события с 883 г. по 2016 г. в значениях M_w для рассматриваемой территории.

Данный каталог подвергся *декластеризации* – удалению из каталога форшоков и афтершоков. Для этой процедуры использовался хорошо известный метод Гарднера и Кнопоффа (Gardner et al., 1974). Данная процедура была выполнена доктором Рамоном Секанелем (Ramon Secanel) из компании GEOTER во время совместной работы в проекте по оценке сейсмической опасности района строительства Рогунской ГЭС (персональное сообщение). Декластеризованный объединенный каталог CASRI-EMCA и USGS содержит 7513 коровых землетрясений с $3,9 \leq M_w \leq 7,5$ с 883 по 2016 гг., и 20891 глубокое землетрясение с $4,6 \leq M_w \leq 8,2$ с 1832 по 2016 гг. Распределение эпицентров на исследуемой территории показано на **рис. 2**.

Для корректного определения параметров повторяемости землетрясений необходимо установить период времени, в течение которого параметры события (в частности, его магнитуда) определялись с одинаковой погрешностью, т. е. период полноты каталога. Периоды полноты используемого каталога для коровых и глубокофокусных землетрясений приведены в **табл. 1** и на **рис. 3**. Выбор интервалов глубин для коровых и глубокофокусных землетрясений будет объяснен ниже.

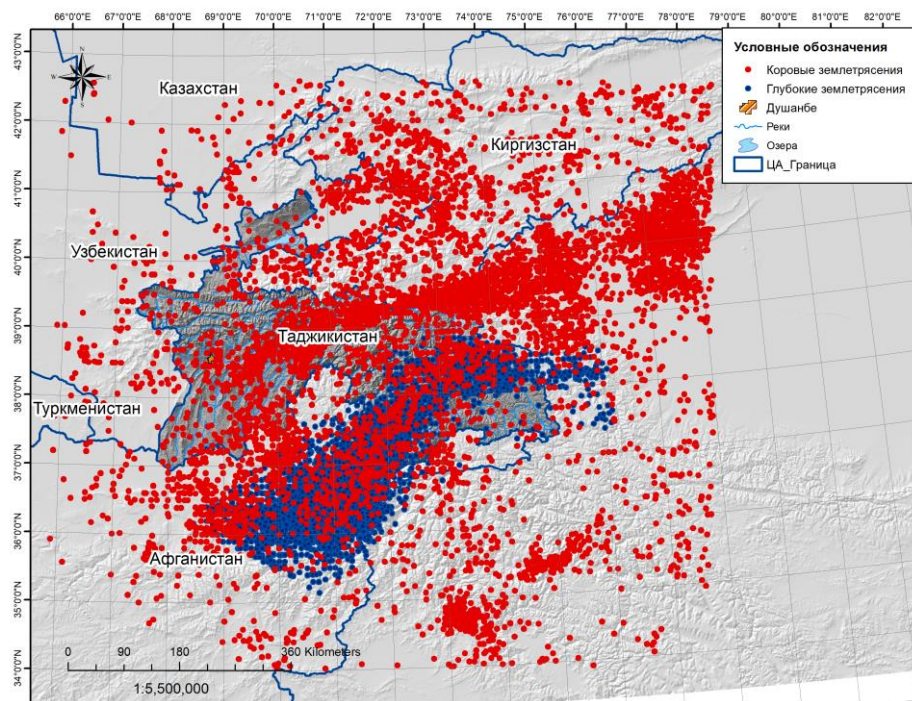


Рис. 2. Распределение эпицентров коровых (точки красного цвета) и глубоких (точки синего цвета) землетрясений на изучаемой территории.

Таблица 1

Полнота каталога для коровых и глубоководных землетрясений

Магнитуда, Mw	Период полноты каталога, года	Начало периода, год
Коровые землетрясения ($H \leq 45$ км)		
3,2-4,4	6	2010
4,5	15	2001
4,6	54	1982
4,7	56	1960
5,0	56	1960
5,5	92	1924
6,0	96	1920
6,5	136	1880
7,0	146	1870
8,2	146	1870
Глубоководные землетрясения ($H \geq 70$ км)		
4,7	56	1960
5,0	58	1955
5,5	75	1938
6,0	110	1906
6,5	114	1902
7	114	1902
7,5	114	1902
8	116	1898

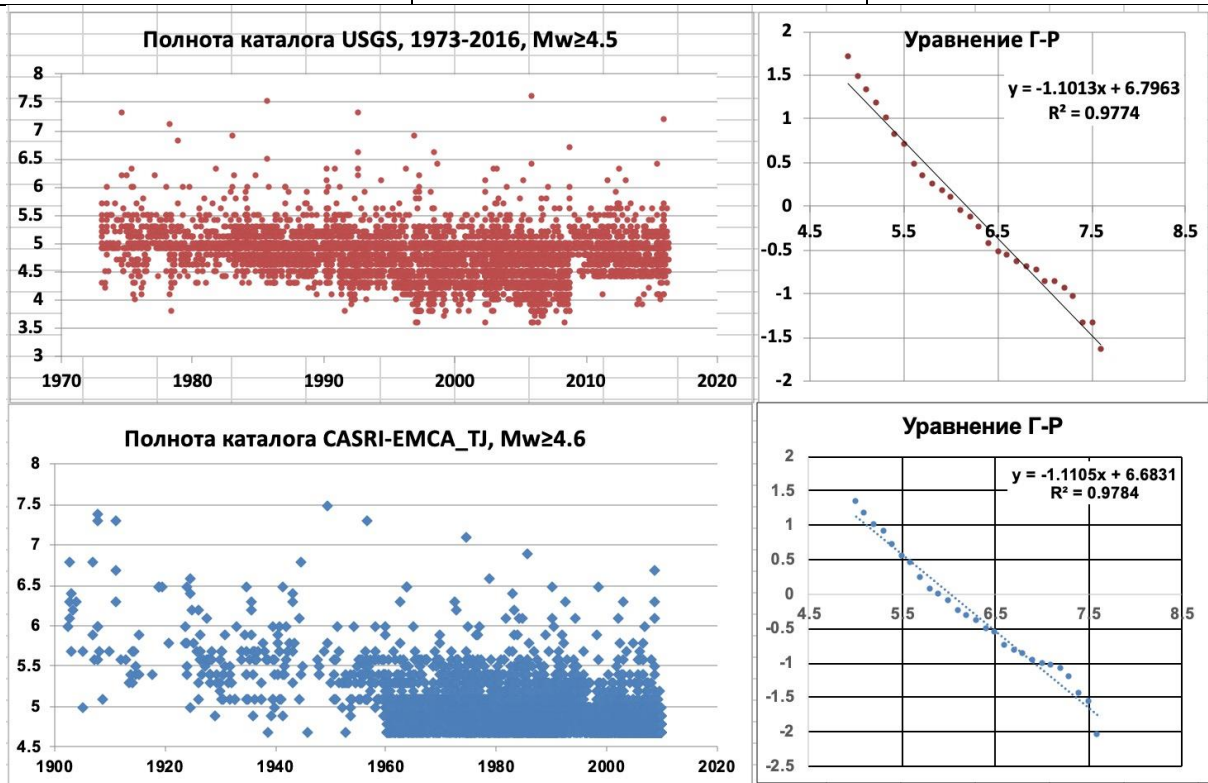


Рис. 3. Полнота каталогов землетрясений и параметры уравнения Гутенберга-Рихтера для каталогов CASRI-EMCA и USGS.

Модели сейсмических источников в виде зон

На территории Таджикистана проявляются два типа землетрясений: коровые неглубокие и глубокофокусные землетрясения Памиро-Гиндукушской зоны. Как отмечается в работе (Scheider et al., 2019), в центральной части Таджикской депрессии мощность земной коры составляет 35-45 км, увеличиваясь в сторону Памира до ~ 55 км, и достигает глубины 65-75 км на Памире и Гиндукуше. Основываясь на этих исследованиях, нами выбраны глубины гипоцентров для коровых землетрясений $H \leq 45$ км, а для глубоких землетрясений $H \geq 70$ км. Количество землетрясений с глубинами гипоцентров от 46 до 69 км в используемом каталоге составляет 1%. Таким образом, а также с учетом точности определения глубин гипоцентров, можно допустить, что выбранные нами интервалы глубин гипоцентров вполне соответствуют характеру распределения этих двух типов землетрясений.

Выделение зон распределения эпицентров землетрясений носит достаточно субъективный характер ввиду отсутствия четких критериев их определения. Поэтому нами использованы несколько моделей зон для снижения влияния субъективности на результат анализа сейсмических воздействий. Две модели зон применялись для коровых землетрясений с глубинами гипоцентров $H \leq 45$ км, и одна модель – для глубоких землетрясений с $H \geq 70$ км, поскольку распределение глубоких землетрясений довольно локализовано.

Первая модель зон названа нами «Зоны-1», вторая – «Зоны-2» и третья, для глубоких, – «Зоны-3». Модель «Зоны-1» состоит из 19 зон и основана на опыте авторов статьи, модель «Зоны-2» взята из работы (Ullah et al., 2015) в пределах рассматриваемой нами территории и состоит из 28 зон. Модель «Зоны-3» состоит из 3 зон распространения глубоких землетрясений. Модель «Зоны-1» представлена на рис. 4 совместно с моделью глубоких зон «Зоны-3», а модель «Зоны-2» – на рис. 5, также совместно с моделью «Зоны-3».

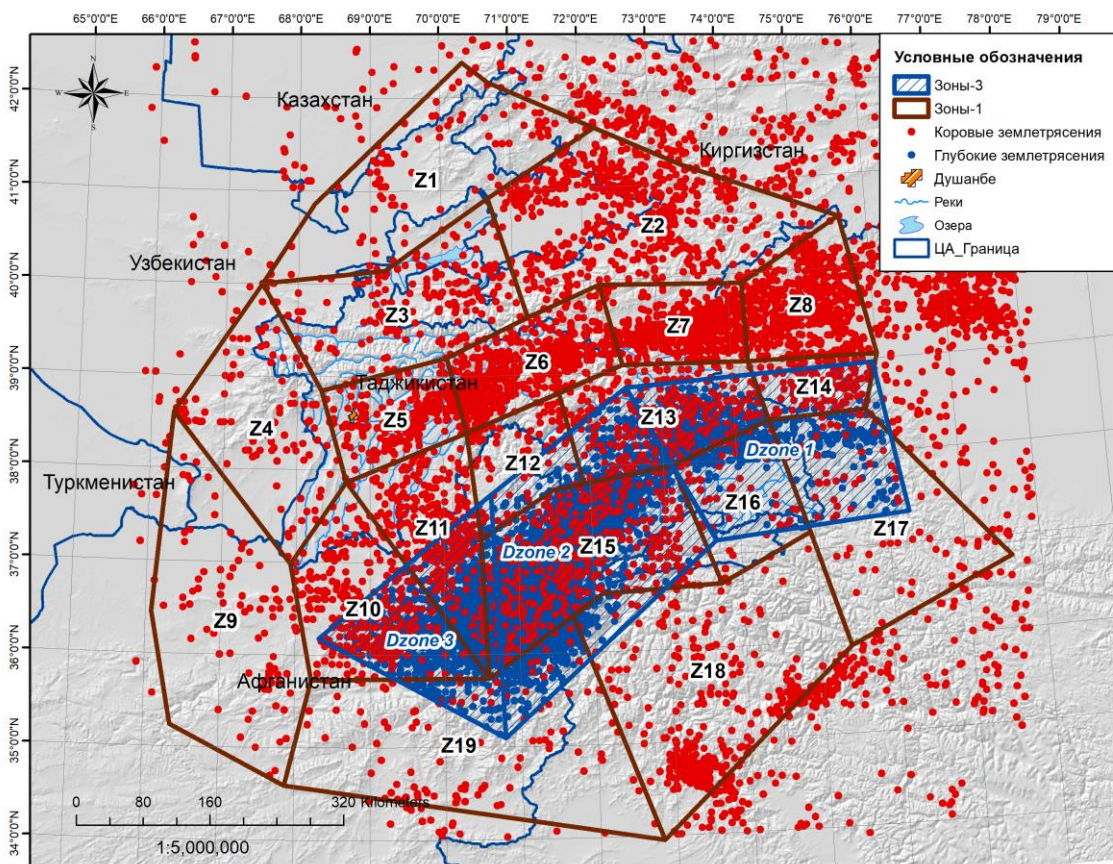


Рис. 4. Модель зон «Зоны-1» совместно с моделью зон «Зоны-3».

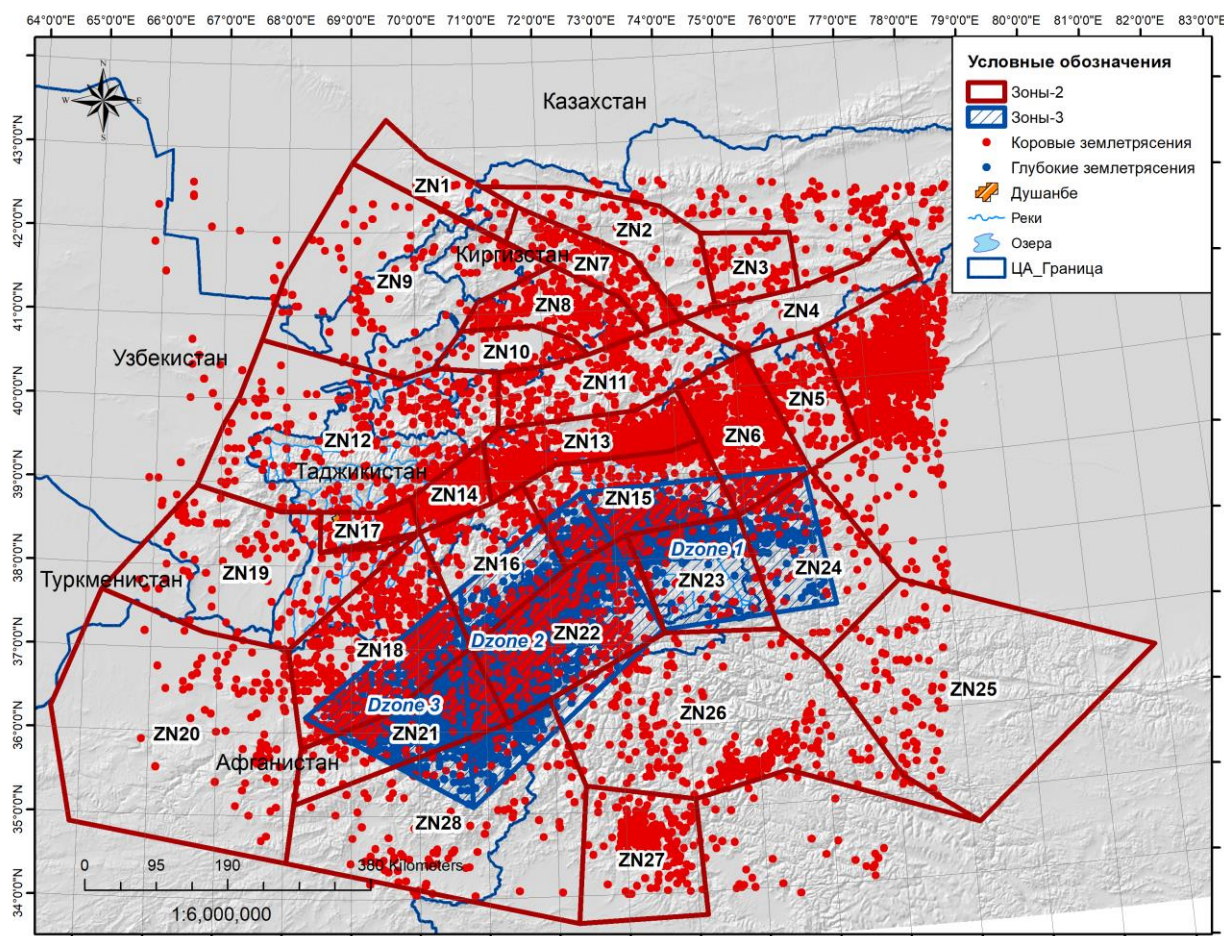


Рис. 5. Модель зон «Зоны-2» совместно с моделью зон «Зоны-3».

Для каждой зоны во всех моделях определялись параметры уравнения Гутенберга-Рихтера (Richter, 1958) с учетом полноты каталога землетрясений:

$$\log N = a - b \cdot M,$$

где M – магнитуда землетрясения, N – количество землетрясений выше заданной магнитуды, a и b – показатель активности и наклон графика повторяемости соответственно.

Также определялось значение максимальной наблюдаемой магнитуды в каждой зоне из каталога землетрясений. Коэффициенты a и b для зон модели «Зоны-2» взяты из публикации (Ullah et al., 2015).

Значение λ (лямбда – количество землетрясений в год для событий больше заданной пороговой магнитуды) вычислялось в каждой зоне для пороговой магнитуды $M_w = 5$.

Помимо максимальной наблюдаемой магнитуды, устанавливалось максимальное значение M_w в каждой зоне, исходя из следующих соображений. При максимальной наблюдаемой магнитуде $M_w \geq 7,5$ к ее значению прибавлялось 0,3 единицы, при $M_w \leq 7,4$ добавлялось 0,5 единиц. Параметры a и b уравнения Гутенберга-Рихтера и значения магнитуд M_w для выделенных зон всех трех моделей приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Параметры a и b уравнения Гутенберга-Рихтера и значения магнитуд M_w -макс.
для выделенных зон**

Зоны-1	a	b	λ ($M_w = 5$)	M_w наблюдаемая	M_w -макс.	Зоны-2	a	b	λ ($M_w = 5$)	M_w наблюдаемая	M_w -макс.
Z 1	5.33	1.196	0.224	5.7	6.2	ZN1	2	0.72	0.025	6.5	7
Z 2	6.138	1.196	1.439	6.3	6.8	ZN2	2.3	0.68	0.079	7.2	7.7
Z 3	6.138	1.196	1.439	6	6.5	ZN3	2.1	1	0.001	5.8	6.3
Z 4	4.83	1.07	0.302	6.4	6.9	ZN4	2.5	0.84	0.020	6	6.5
Z 5	5.13	1.04	0.851	5.9	6.4	ZN5	2.2	0.6	0.158	6.6	7.1
Z 6	4.15	0.83	1.000	6.2	6.7	ZN6	3.6	0.77	0.562	6.9	7.4
Z 7	5.12	1.01	1.175	7.1	7.6	ZN7	3.6	0.95	0.071	7.5	7.8
Z 8	4.56	0.91	1.023	7.5	7.8	ZN8	3	0.73	0.224	6.6	7.1
Z 9	4	0.86	0.501	6.1	6.6	ZN9	2.6	0.7	0.126	6.7	7.2
Z 10	5.08	1.02	0.955	6.9	7.4	ZN10	2	0.72	0.025	5.6	6.1
Z 11	5.18	1.09	0.537	6.6	7.1	ZN11	3.4	0.89	0.089	6.4	6.9
Z 12	3.857	0.922	0.177	5.4	5.9	ZN12	3.1	0.76	0.200	7.3	7.8
Z 13	4.316	0.992	0.227	7.2	7.7	ZN13	3.9	0.8	0.794	7.1	7.6
Z 14	5.64	1.11	1.230	5.7	6.2	ZN14	3	0.77	0.141	7.5	7.8
Z 15	4.463	0.992	0.318	6.5	7	ZN15	3.5	0.84	0.200	7.3	7.8
Z 16	4	0.86	0.501	5.9	6.4	ZN16	3.3	0.85	0.112	5.9	6.4
Z 17	5.676	1.198	0.485	5.6	6.1	ZN17	4.3	1	0.200	5.9	6.4
Z 18	5.91	1.16	1.288	6.4	6.9	ZN18	4.7	0.98	0.631	6.5	7
Z 19	4.63	1.05	0.240	6	6.5	ZN19	2.2	0.61	0.141	6.7	7.2
Зоны-3						ZN20	2.3	0.6	3Н1	7.3	7.8
Dzone 1	9.14	1.72	3.467	6.4	6.9	ZN21	3.2	0.79	0.178	6.1	6.6
Dzone 2	5.6	0.937	8.222	8.2	8.2	ZN22	3.9	0.87	0.355	6.8	7.3
Dzone 3	6.73	1.16	8.551	7.4	7.9	ZN23	3.3	0.9	0.063	7	7.5
						ZN24	3.1	0.81	0.112	7.1	7.6
						ZN25	3.1	0.72	0.316	5.9	6.4
						ZN26	3	0.72	0.251	6.3	6.8
						ZN27	3	0.68	0.398	7.6	7.9
						ZN28	3.1	0.84	0.079	6.1	6.6

Для более точных результатов обе модели для коровых землетрясений вычислялись совместно с моделью для глубоких землетрясений.

Активные разломы и линейная модель сейсмических источников

Линейная модель сейсмических источников основывается на информации об активных разломах, потенциально способных генерировать сильные землетрясения. Выделение таких разломов является довольно сложной задачей. Причина в недостаточной определенности информации о прошлых сильных землетрясениях, связанных с подвижками по конкретным разломам, о скоростях смещений по разломам и накопления деформаций, о максимальных магнитудах возможных землетрясений. В настоящей работе нами за активные разломы были приняты те, которые имеют признаки подвижек за верхний плейстоцен-голоцен и потенциально способны генерировать сильные землетрясения.

Скорость движений по разлому, обычно выражаемая в мм/год, в большинстве случаев определяется по признакам движений на поверхности Земли и характеризует накопление

напряжений на плоскости разрыва. По этим данным можно косвенно определить повторяемость землетрясений. Два основных метода используются для определения скоростей смещений на основе: 1) геологических данных и 2) инструментальных измерений при помощи геодезии или GPS, а также при помощи проходки траншей в зоне разлома. К сожалению, такая информация очень ограничена на территории Таджикистана.

В нашем исследовании мы использовали информацию об активных разломах из 6 баз данных по активным разломам:

1. Карта «Тектоника Таджикистана», масштаба 1:500000 (Чернер и др., 1990).
2. Активные разломы Альпийско-Гималайского пояса (Трифонов и др., 2002).
3. Вероятные четвертичные разломы Афганистана (Chester et al., 2007).
4. База данных активных разломов проекта CASRI (Abdrakhmatov, 2009).
5. Активные разломы Восточного Узбекистана (Ибрагимов, 1978; Артыков и др., 2012).
6. База данных четвертичных разломов Центральной Азии (Mohadjer et al., 2016).

На карте «Тектоника Таджикистана» представлены разломы только на территории Таджикистана. Для более полного учета влияния активных разломов на территорию Таджикистана нами рассматривалась гораздо большая территория, совпадающая с областью, для которой были выбраны модели сейсмических источников в виде зон. Данные брались из указанных выше источников и заносились в ГИС базу данных, составленную при помощи программы ArcGIS Desktop, где и осуществлялся отбор активных разломов, как линейных источников землетрясений. После отбора выполнялась линейаризация разломов и разделение на сегменты тех разломов, длина которых превосходила 220-250 км. Разделение проводилось, в основном, по местам изменения направления распространения разлома.

Максимальная возможная магнитуда событий, связанных с конкретным разломом, обычно оценивается по длине разлома или по площади плоскости разрыва с предположением о соотношении его длины с шириной этой плоскости. Для коровых разломов плоскость разрыва не должна выходить за пределы земной коры.

Поскольку разными авторами принимаются различные значения максимальных возможных значений магнитуд для активных разломов, для всех выделенных разломов и их сегментов рассчитывалась вероятная максимальная магнитуда M_w по эмпирическому уравнению, предложенному в (Leonard, 2010):

$$M_w = a + b * \log RA,$$

где M_w – моментная магнитуда, RA – площадь поверхности разрыва, км^2 , a и b – эмпирические коэффициенты, в данном случае $a = 1$ и $b = 4$. Таким образом, унифицировалось определение M_w_{max} , соответствующее консервативному варианту.

Площадь поверхности разрыва RA определялась, исходя из допущений, что соотношение длины разлома и его ширины равно 1/4. Это допущение сделано из того, что средняя максимальная мощность земной коры в рассматриваемом районе равна 50 км. При длине разлома в 200 км ширина плоскости разрыва при таком допущении составит 50 км, т. е. не превысит величину мощности земной коры.

В конечном итоге, 97 активных разломов и их сегментов выбраны в качестве модели линейных источников землетрясений. Расположение их показано на рис. 6, а параметры приведены в табл. 3. Три типа подвижек по разломам учитывались при расчетах: сдвиг, взброс и сброс.

Для разломов, расположенных в пределах Таджикской депрессии, максимальное значение магнитуды M_w принято равным 6 (разломы 34, 37, 38 и 39 в табл. 3), поскольку они расположены в мезозойско-кайнозойских отложениях и затухают в соленосных отложениях верхней юры на глубине 7-12 км (Burtman & Molnar, 1993; Brookfield & Hashmat, 2001; Carrapa et al., 2015; Klocke et al., 2015). Поэтому весьма маловероятно, что для них максимальная магнитуда будет более 6 единиц.

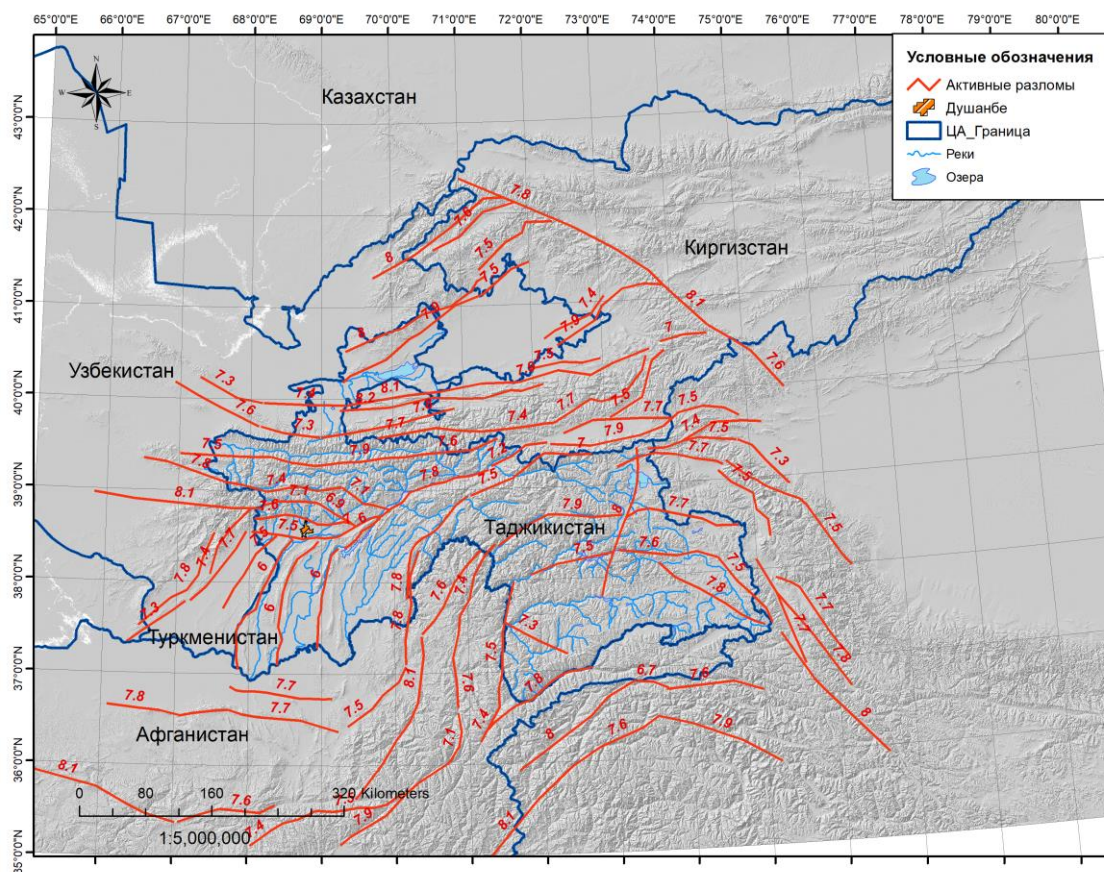


Рис. 6. Активные разломы и их сегменты, принятые в качестве линейных источников землетрясений со значениями вероятной максимальной магнитуды.

Таблица 3

№	Длина, км	Тип подвижки	Скорость смещения, мм/год	Угол падения	Азимут	Наименование	Mw_макс.
1	187	Взброс	1	30	SE	Западный Чаткал	8
2	193	Взброс	1	30	SE	Южный Атойнок	8
3	167	Взброс	1	30	SE	Без названия	7,9
4	202	Сдвиг	5	90	NW	Таласо-Ферганский 1	8,1
5	122	Сдвиг	5	90	NW	Таласо-Ферганский 2	7,6
6	93	Взброс	1	30	SE	Чангырташский	7,4
7	164	Взброс	1	30	SE	Южно-Ферганский	7,9
8	86	Взброс	1	60	S	Южно-Ферганский 1	7,3
9	95	Взброс	1	60	S	Южно-Ферганский 2	7,4
10	105	Взброс	1	60	S	Южный Наукат	7,5
11	117	Взброс	1	60	SW	Аксуйский 1	7,6
12	82	Взброс	1	60	S	Аксуйский 2	7,3
13	159	Взброс	1	60	S	Аксуйский 3	7,8
14	131	Взброс	1	60	S	Туркестано-Алайский	7,7
15	98	Взброс	1	60	S	Туркестано-Алайский 1	7,4
16	137	Взброс	1	60	SE	Туркестано-Алайский 2	7,7
17	111	Взброс	1	60	S	Зеравшанский 1	7,5
18	164	Взброс	1	60	S	Зеравшанский 2	7,9
19	116	Взброс	1	60	S	Зеравшанский 3	7,6
20	134	Взброс	3	60	N	Алайский	7,7

21	101	Взброс	5	30	S	Главный Памирский взброс 2	7,5
22	166	Взброс	5	30	S	Главный Памирский взброс 1	7,9
23	76	Взброс	5	30	SE	Вахшский 2	7,2
24	93	Взброс	1	60	S	Гиссарский 2	7,4
25	65	Взброс	1	60	S	Гиссарский 1	7,1
26	155	Взброс	1	60	S	Гиссарский 3	7,8
27	66	Взброс	1	70	NE	Ходжаобигармский 2	7,1
28	54	Взброс	1	70	N	Ходжаобигармский 1	6,9
29	121	Взброс	1	60	N	Богаинский	7,6
30	129	Взброс	3	60	W	Байсунский 1	7,7
31	80	Взброс	3	60	W	Байсунский 2	7,3
32	106	Сдвиг	3	90	W	Илякский	7,5
33	59	Взброс	3	30	SE	Илякский 1	7
34	59	Взброс	3	30	SE	Гулизинданский	6
35	146	Взброс	5	30	SE	Вахшский 1	7,8
36	112	Взброс	3	60	W	Сангтудинский	7,5
37	181	Взброс	3	30	W	Бабатагский	6
38	169	Взброс	3	30	W	Даганакиикский	6
39	127	Взброс	3	30	W	Сарсарякский	6
40	59	Взброс	5	30	S	Дарваз-Каракульский 5	7
41	104	Взброс	5	30	SE	Дарваз-Каракульский 4	7,5
42	148	Взброс	5	90	NE	Дарваз-Каракульский 3	7,8
43	145	Сдвиг	5	90	N	Дарваз-Каракульский 2	7,8
44	103	Сдвиг	5	90	NE	Дарваз-Каракульский 1	7,5
45	149	Сдвиг	3	90	W	Альбурц Мармул Западный	7,8
46	138	Сдвиг	3	90	W	Альбурц Мармул Восточный	7,7
47	201	Сдвиг	3	90	W	Доси Мирзавалан западный	8,1
48	123	Сдвиг	3	90	W	Доси Мирзавалан восточный	7,6
49	92	Сдвиг	3	90	SW	Андараб западный	7,4
50	111	Сдвиг	3	90	W	Андараб	7,5
51	221	Сдвиг	3	90	N	Генджван 1	8,1
52	126	Сдвиг	3	90	NE	Генджван 2	7,6
53	168	Сдвиг	3	90	SW	Пандшир-Бадахшанский	7,9
54	64	Сдвиг	3	90	N	Бадахшанский 1	7,1
55	113	Сдвиг	3	90	N	Бадахшанский 2	7,6
56	99	Сдвиг	3	90	N	Бадахшанский 3	7,4
57	162	Взброс	3	30	SE	Танымас западный	7,9
58	142	Взброс	3	30	S	Танымас восточный	7,7
59	100	Взброс	3	30	S	Главный Памирский взброс 3	7,4
60	109	Взброс	5	30	S	Главный Памирский взброс 4	7,5
61	84	Взброс	5	30	SW	Памирский взброс	7,3
62	134	Взброс	5	30	S	Муджи	7,7
63	103	Сдвиг	5	90	NW	Кашгар Екенг 1	7,5
64	102	Сдвиг	5	90	NW	Кашгар Екенг 2	7,5
65	110	Сброс	3	60	W	Конгур Шах	7,5
66	187	Сдвиг	5	90	NE	Сарез Каракульский	8
67	105	Взброс	5	30	S	Сарез Мургабский 1	7,5
68	123	Взброс	5	30	S	Сарез Мургабский 2	7,6
69	104	Сдвиг	3	90	NW	Сарез Мургабский 3	7,5
70	197	Сдвиг	5	90	NW	Каракорам	8
71	113	Сброс	3	60	W	Без названия	7,5
72	150	Сдвиг	3	90	NW	Аксу Мургаб	7,8
73	90	Сброс	3	60	W	Без названия	7,4

74	179	Взброс	3	30	SE	Ришун Хунза 1	8
75	41	Взброс	3	30	S	Ришун Хунза 2	6,7
76	120	Взброс	3	30	S	Ришун Хунза 3	7,6
77	141	Сдвиг	5	90	NW	Kongur Shan	7,7
78	145	Сброс	5	60	E	Ташкорган	7,8
79	134	Сдвиг	3	90	NW	Каракаркс	7,7
80	208	Взброс	3	30	SE	Шиок 1	8,1
81	125	Взброс	3	30	SE	Шиок 2	7,6
82	161	Взброс	3	30	SW	Шиок 3	7,9
83	151	Взброс	3	30	S	Южно-Памирский западный	7,8
84	148	Сдвиг	5	90	NW	Таласо-Ферганский 3	7,8
85	169	Взброс	1	70	N	Южно-Ноокатский	7,9
86	215	Взброс	1	70	N	Сулюктинский	8,1
87	249	Взброс	1	70	N	Катрантооский	8,2
88	62	Взброс	1	70	N	Кулунский	7
89	102	Взброс	1	70	SE	Гульчинский	7,5
90	108	Взброс	1	70	NW	Северо-Ферганский	7,5
91	112	Взброс	1	80	NW	Атойнокский	7,5
92	116	Взброс	1	70	NW	Кандалашский	7,6
93	127	Сдвиг	3	90	W	Кондоз	7,7
94	96	Взброс	3	70	NW	Чакчарско-Кугитангский	7,4
95	150	Взброс	3	70	NW	Чакчарско-Кугитангский 1	7,8
96	207	Взброс	3	70	SW	Бухаро-Гиссарский	8,1
97	85	Сдвиг	3	90	NW	Без названия	7,3

Параметры повторяемости для линейной модели определялись на основании длины разлома, скорости смещений и максимальной магнитуды по методу, предложенному (Bungum, 2007) с использованием зависимостей, полученных (R.R.Youngs and K.J.Coppersmith, 1985). Среднее значение параметра b уравнения Гутенберга-Рихтера принималось равным 1,1, исходя из анализа каталога землетрясений, а значение пороговой магнитуды для всех разломов принималось $M_w = 5$, как и для моделей по зонам. Скорости смещений для разломов и сегментов определялись на основании данных из (Трифонов и др., 2002; Mohadjer et al., 2016). Принято три средних значения скоростей: 1 мм/год, 3 мм/год и 5 мм/год.

Выбор уравнений затухания сейсмических колебаний

ВАСО нуждается в уравнениях затухания, приемлемых для геологических и сейсмических условий исследуемой территории. Поскольку для территории Центральной Азии, и Таджикистана в частности, не имеется уравнений затухания сейсмических колебаний, основанных на записях сильных движений от местных землетрясений, был сделан выбор приемлемых уравнений затухания из последней базы данных уравнений затухания – так называемых «уравнений затухания новой генерации» (PEER Report #2018/03), содержащей данные обработки инструментальных записей сильных движений со всего мира. В данных уравнениях затухания можно использовать значения скорости V_{s30} (скорость поперечных волн в верхнем 30-метровом слое поверхности Земли), что позволяет выполнять расчеты для различных типов грунтов.

Уравнения затухания, выбранные для коровых землетрясений:

- Abrahamson, Silva and Kamai, 2014, NGA West-2 модель (Abrahamson et al., 2014);
 - Campbell and Bozorgnia, 2014, NGA West-2 модель (Campbell et al., 2014);
 - Chiou and Youngs 2014, NGA West-2 модель (Chiou et al., 2014).
- В качестве уравнения затухания для глубоких землетрясений выбрано уравнение (Atkinson et al., 2003), широко используемое в мировой практике: $\frac{1}{SEP}$
- Atkinson and Boore, 2003.
- Основные параметры выбранных уравнений затухания приведены в табл. 4.

Основные параметры выбранных уравнений затухания

Название	Единица изменения ускорений	Размерность	Спектральный период, сек	Расстояние от очага, км	Значения магнитуд Mw	Тип расстояния до очага	Характер распределения
Abrahamson, Silva and Kamai, 2014 (ASK2014)	g	Ускорение	0-10	0-300	3-8,5	Rrup	Логнормальное
Campbell and Bozorgnia, 2014 (CB2014)	g	Ускорение	0-10	0-300	3-8,5	Rrup	Логнормальное
Chiou and Youngs, 2014 (ChY2014)	g	Ускорение	0-10	0-300	3,5-8	Rrup	Логнормальное
Atkinson and Boore, 2003 (AB2003)	см/с ²	Ускорение	0-3	10-500	3-8,5	Rrup	Логнормальное

Вычисление сейсмических ускорений

Специальное программное обеспечение CRISIS2015 (Ordaz et al., 2007, 2013) применялось для вычислений сейсмических ускорений. Данная программа также позволяет использовать логическое дерево вычислений, когда вычисления выполняются с разным весовым соотношением как различных моделей, так и различных уравнений затухания.

Вычисления в CRISIS2015 выполнялись по сетке с шагом 0,1° как по долготе, так и по широте, начиная от 66° восточной долготы и от 34° северной широты. Сетка вычислений покрывала область всех выбранных моделей и состояла из 9744 точек (116 × 84) (рис. 7).

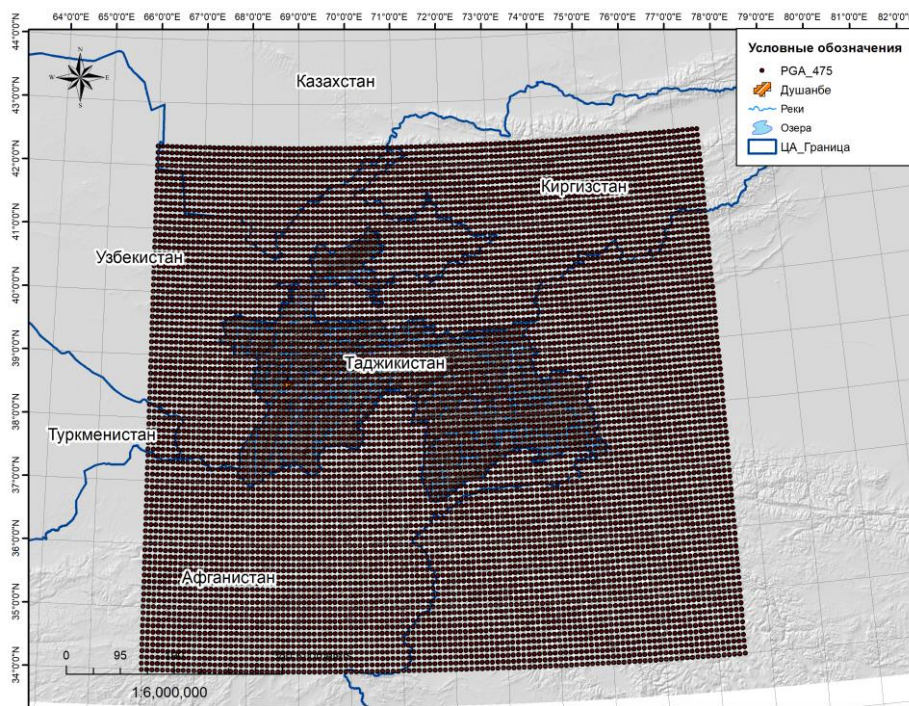


Рис. 7. Сетка вычислений сейсмических воздействий на исследуемой территории.

Для модели активных разломов принято допущение, что минимальная глубина до плоскости разрыва составляет 5 км, т. е. асейсмический слой принят равным 5 км от поверхности Земли. Для моделей зон коровых землетрясений минимальная глубина плоскости разрыва принята в

15 км (одна треть от средней мощности земной коры в изучаемой области, и одна треть от принятой величины сейсмогенерирующего слоя для коровых землетрясений). Для модели точечных сейсмических источников минимальная глубина до плоскости разрыва также принята в 15 км. Для модели глубоких землетрясений глубина до плоскости разрыва – 150 км для зоны «Dzone 1», и в 200 км для «Dzone 2» и «Dzone 3».

Вычисления сейсмических ускорений выполнялось для каждой модели отдельно по каждому уравнению затухания. Вычисление ускорений для моделей коровых землетрясений и для модели глубоких землетрясений выполнялось совместно.

Таким образом, выполнение вычислений выполнялось для 5 моделей сейсмических источников, что, по нашему мнению, существенно снижает присутствующие неопределенности при выполнении ВАСО.

Значения сейсмических ускорений были подсчитаны для каждой точки по выбранной сетке вычислений (9744 точки).

Использование логического дерева вычислений

Логическое дерево вычислений позволяет выполнять вычисления сейсмических воздействий с учетом альтернативных моделей сейсмических источников.

Как указывалось, нами использовались 5 моделей сейсмических источников: две модели зон для коровых землетрясений, одна модель зон для глубоких землетрясений, модель для разломов и точечная модель. Для моделей зон коровых землетрясений, модели разломов и точечной модели использовались три уравнения затухания, а для модели зон глубоких землетрясений – одно уравнение затухания. Две модели зон для коровых землетрясений вычислялись совместно с моделью зон для глубоких землетрясений отдельно по каждому уравнению затухания (при этом для модели зон глубоких использовалось уравнение затухания для глубоких землетрясений). Вычисления для модели разломов и точечной модели также выполняли для каждого уравнения отдельно.

Вес для каждого из уравнений затухания принят равным 0,33. Поскольку выбор моделей зон для коровых землетрясений плюс модель зон для глубоких землетрясений основан на одинаковых принципах, вес этих моделей принят равным 0,5. Далее, поскольку нами использовались три типа моделей по принципу их выделения, вес для каждого из типов – 0,33, т. е. мы исходили из равного вклада каждого типа моделей в конечный результат. Принятое логическое дерево для финальных вычислений показано на рис. 8.

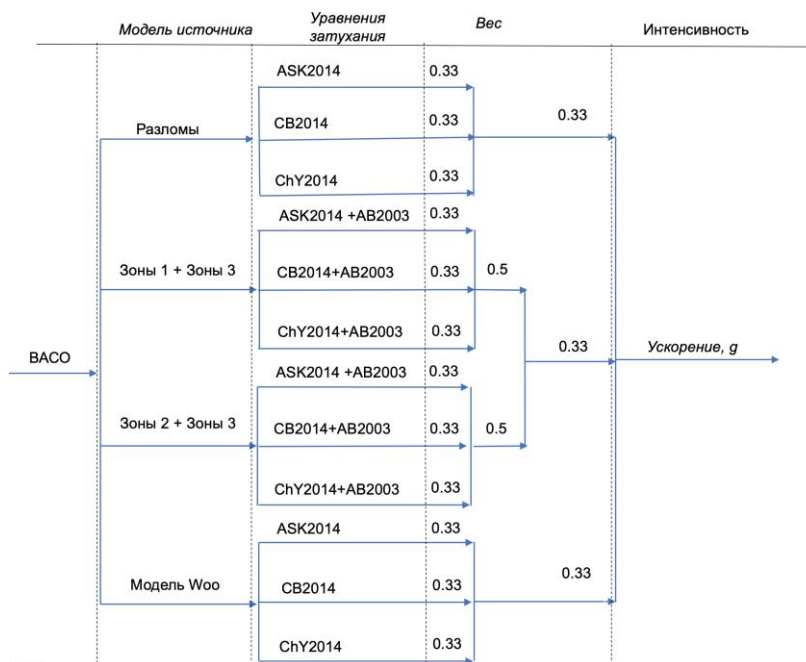


Рис. 8. Логическое дерево событий для финальных расчетов сейсмических ускорений.

Результаты вычислений сейсмических ускорений

Одна из главных задач, поставленных при выполнении данного исследования – составить набор карт сейсмической опасности для территории Таджикистана с использованием вероятностного анализа сейсмической опасности в значениях спектральных ускорений для различных вариантов превышения расчетных сейсмических воздействий (или периодов повторяемости расчетных значений). Вторая главная задача – представить результаты данной оценки в удобном виде для использования в качестве нормативных показателей для сейсмостойкого проектирования и строительства в Таджикистане.

Вычисления проводились для пяти вариантов вероятностей превышения расчетных значений в течение 50 лет (или периодов повторяемости): 40% (период повторяемости 100 лет), 10% (период повторяемости 475 лет), 5% (период повторяемости 975 лет), 2% (период повторяемости 2475 лет), 1% (период повторяемости 4975 лет).

Для построения достаточно полных спектров реакций выбраны 11 периодов колебаний спектральных ускорений: 0,01 (PGA); 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3 секунды.

Учитывая, что в программе CRISIS 2015 вычисления выполнялись по сетке, в результате, в финале получился набор из 55 матриц средних значений сейсмических воздействий в виде сейсмических ускорений. Используя данные матрицы, можно построить как необходимые карты сейсмической опасности территории, так и наборы спектров реакций для заданных точек по сетке с шагом $0,1 \times 0,1^\circ$.

Выбранные уравнения затухания сейсмических колебаний позволяют использовать значения скорости поперечных волн в верхнем 30-метровом слое грунтов V_{s30} , что позволяет учитывать сейсмические свойства грунтов при вычислении сейсмических воздействий. Основываясь на рекомендациях (Shumway et al., 2018), для базовых вычислений нами принято значение $V_{s30} = 760$ м/сек (категория В/С в соответствии с (Building Seismic Safety Council, 2010)), что применительно к твердым плотным грунтам.

Карты распределения средних значений пиковых ускорений грунта (PGA) и спектральных ускорений с периодом 0,2 сек и 1,0 сек для территории Таджикистана представлены на [рис. 9](#), [10](#) и [11](#) соответственно. В качестве примера, на [рис. 12](#) приведен спектр реакции для периода повторяемости 475 лет и кривые опасности для значений PGA, спектральных ускорений в 0,2 сек и 1,0 сек для участка г. Душанбе.

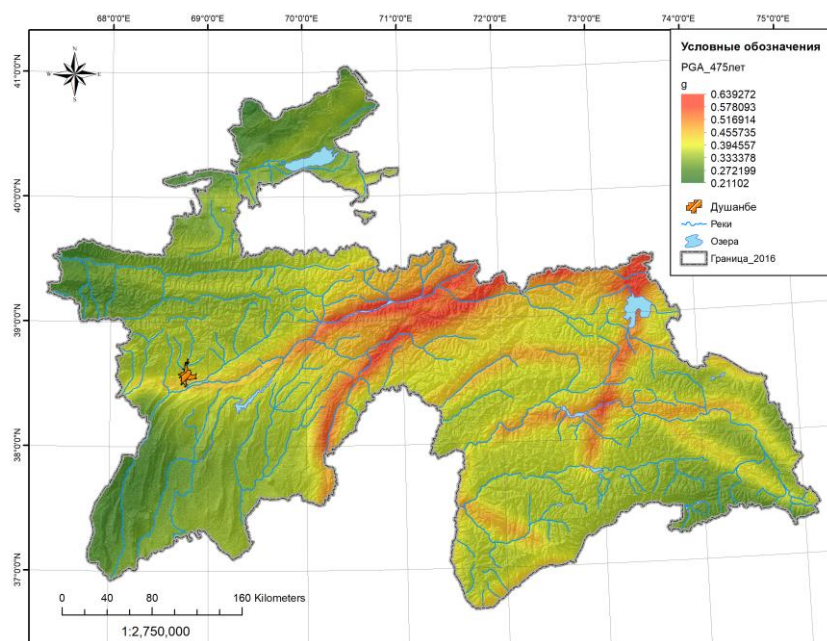


Рис. 9. Карта сейсмической опасности Таджикистана в единицах пиковых ускорений грунта для периода повторяемости 475 лет.

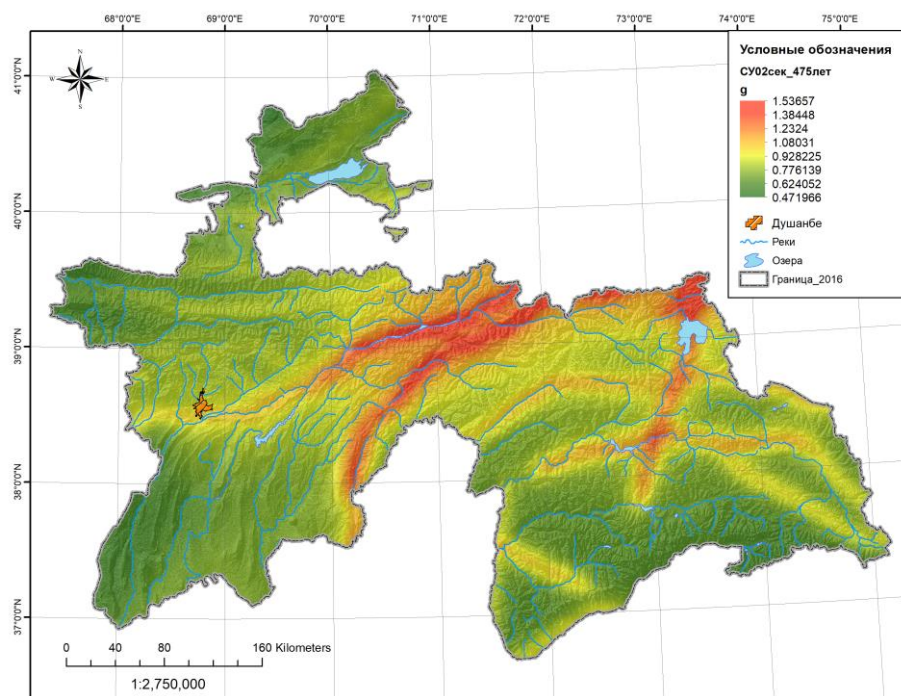


Рис. 10. Карта сейсмической опасности Таджикистана в единицах ускорений с периодом колебаний грунта 0,2 сек для периода повторяемости 475 лет.

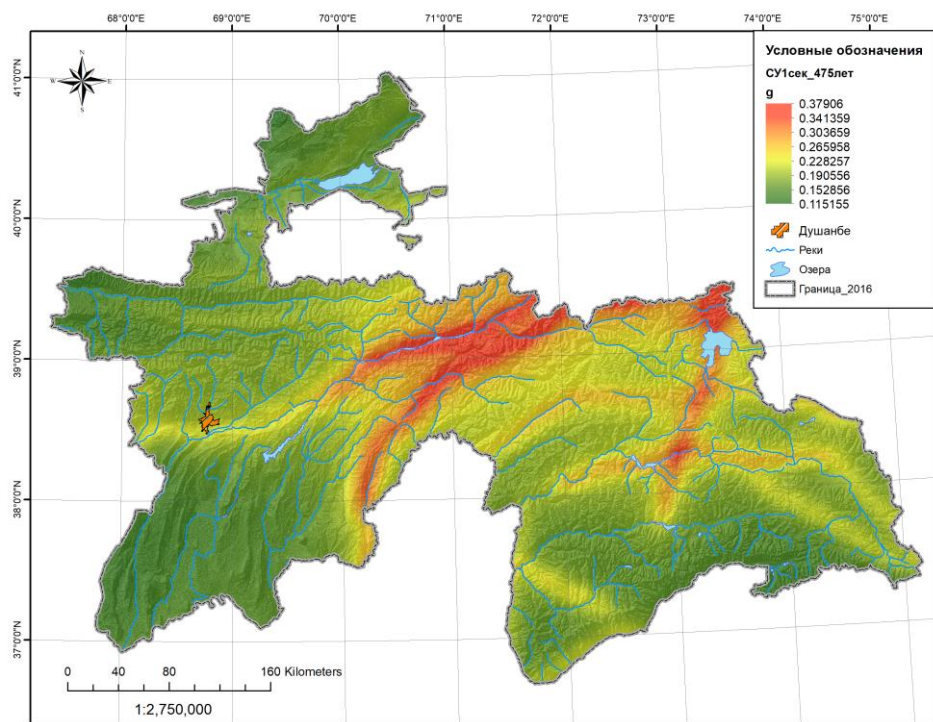


Рис. 11. Карта сейсмической опасности Таджикистана в единицах ускорений с периодом колебаний грунта 1,0 сек для периода повторяемости 475 лет.

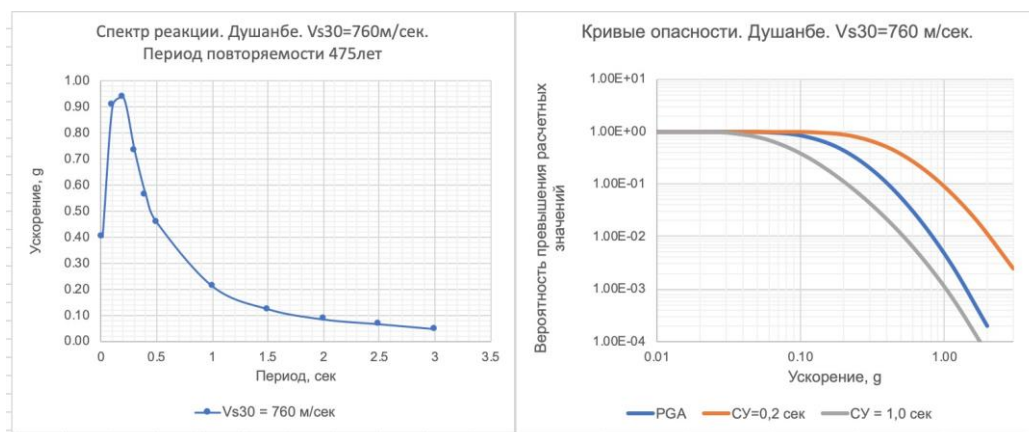


Рис. 12. Спектр реакции и кривые опасности для грунтов с $V_{s30} = 760$ м/сек для участка г. Душанбе.

Использование полученных результатов ВАСО в сейсмостойком проектировании и строительстве

Наиболее важным результатом вероятностного анализа сейсмической опасности является применимость полученных расчетных сейсмических воздействий в сейсмостойком проектировании и строительстве, т. е. в нормативных документах сейсмостойкого строительства. Существующие в Таджикистане строительные нормы и правила сейсмостойкого строительства основаны на карте общего сейсмического районирования (карты сейсмической опасности) территории Таджикистана, составленной в 1978 г. (Бабаев и др., 1978), где показаны зоны интенсивности сейсмических колебаний в VII, VIII и IX баллов по шкале MSK-64.

Новые строительные нормы и правила (СНиП) 2018 г. (ГНиП РТ 22-07, Сейсмостойкое строительство, 2018), так же, как и предыдущие редакции, выделяют три основные категории грунтов по сейсмическим свойствам: I, II, III и IV. В данном СНиПе для этих категорий грунтов приводятся значения скоростей V_{s30} . Основываясь на этом, нами приняты допущения, что $V_{s30} = 760$ м/сек соответствует I категории грунтов, $V_{s30} = 460$ м/сек – II категории, $V_{s30} = 200$ м/сек – III категории грунтов. Категория грунтов IV требует специальных исследований и нами не рассматривалась.

Поэтому, чтобы результаты ВАСО учитывали применимость расчетов в соответствии с действующим СНиПом, нами выполнены все упомянутые выше вычисления для этих трех типов грунтов с $V_{s30} = 760$ м/сек, $V_{s30} = 460$ м/сек и $V_{s30} = 200$ м/сек. В качестве примера на рис. 13 приведен спектр реакции для участка г. Душанбе для этих трех категорий грунтов с периодом повторяемости 475 лет.

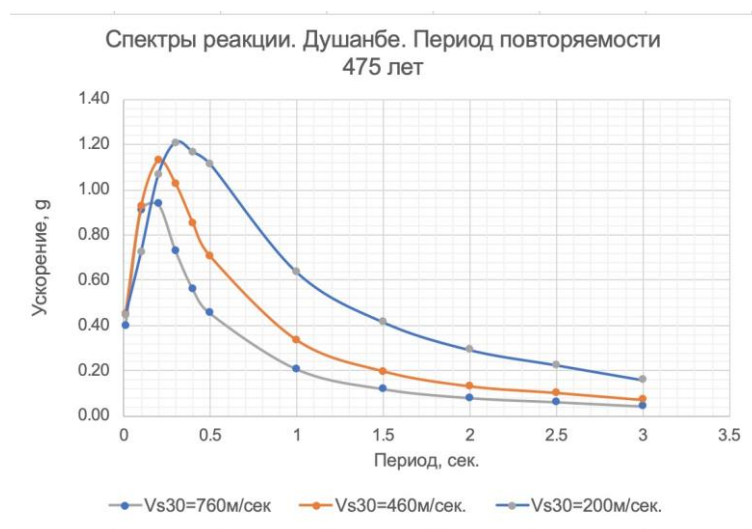


Рис.13. Спектр реакции для трех категорий грунтов для периода повторяемости 475 лет для участка г. Душанбе.

Для облегчения использования полученных результатов ВАСО инженерами и дизайнерами, нами составлены таблицы в программе Excel с результатами всех вычислений (15 таблиц, по 5 на каждую категорию грунтов). Используя данные таблицы, можно очень быстро построить спектр реакции для заданной точки для необходимого периода повторяемости расчетных значений.

Представление расчетных данных не только в виде набора карт сейсмической опасности, но и в виде таблиц для построения спектров реакций, существенно облегчает и делает более удобным использование результатов ВАСО в практике сейсмостойкого проектирования и строительства.

Заключение

Таджикистан расположен в одном из самых сейсмически активных районов Центральной Азии. Существующие нормы сейсмостойкого проектирования и строительства основаны на оценке сейсмической опасности, выполненной в 1978 г. с использованием детерминистского подхода. В связи с активным строительством высотных зданий, применением новых методов расчета устойчивости конструкций к сейсмическим воздействиям, методов строительства, остро встает необходимость новой современной оценки сейсмической опасности территории Таджикистана. В этом плане наиболее приемлемый и широко применяемый в современной мировой практике – вероятностный анализ сейсмической опасности.

Сейсмические события на территории Таджикистана происходят как явно связанные с конкретными активными (так называемыми сейсмогенерирующими) разломами, так и не связанные с ними, и проявляющимися в виде рассеянной или диффузной сейсмичности. Для наиболее корректной оценки сейсмической опасности в таких случаях как раз и используется вероятностный подход, который рассматривает вклад различных моделей сейсмических источников в общую оценку величины сейсмических воздействий.

В настоящем исследовании с применением вероятностного анализа сейсмической опасности нами использовались три типа сейсмических источников:

- а) модель активных разломов как линейных источников землетрясений;
- б) модель зон землетрясений, основанная, в большей степени, на рассеянной сейсмичности;
- в) точечная модель (Woo модель).

Комбинация этих типов сейсмических источников наиболее широко применяется в современной мировой практике.

Поскольку наиболее субъективна модель зон землетрясений, нами использовались две независимые модели зон землетрясений для коровых событий и одна модель зон для глубоких. Для уменьшения субъективности, связанной с оценкой по сейсмическим данным, использована точечная модель источников землетрясений, основанная только на характере распределения эпицентров в каталоге землетрясений.

Для выбора потенциально активных разломов, способных генерировать сильные землетрясения, нами использовались 6 баз данных активных разломов Центральной Азии от различных авторов. Выявление активных разломов как потенциальных источников сильных землетрясений, является наиболее сложной задачей при анализе сейсмической опасности. Связано это с довольно широким толкованием понятия «активный разлом» различными авторами. Нами принято допущение, что активным и, следовательно, потенциально сейсмогенерирующим, можно называть разломы, проявляющими признаки активности в течение позднего плейстоцена-голоцена. Для систематизации и выбора приемлемых в качестве линейных источников землетрясений эти 6 баз данных были переведены в ГИС-программу, где и осуществлялся выбор. Другой необходимый параметр для оценки повторяемости событий в этом типе моделей – показатель скоростей смещений по разлому. Мы использовали значения скоростей, полученные, в основном, на основе геологических данных, ввиду малочисленности инструментальных геодезических или GPS измерений на территории Таджикистана.

Поскольку для Центральной Азии и Таджикистана отсутствуют уравнения затухания для расчетов сейсмических ускорений, нами выбраны недавние уравнения затухания из базы данных PEER NGA-West-2 (PEER Report No. 2018/03), наиболее широко используемые в мировой практике для аналогичных по геологическому строению районов.

Для расчетов сейсмических ускорений и их периодов повторяемости нами использовалось специальное программное обеспечение для оценки сейсмической опасности CRISIS2015, позволяющее также применять логическое дерево вычислений для уменьшения присущих вероятностному анализу неопределенностей.

В результате, расчетные значения 11 псевдоспектральных ускорений с периодом от 0,01 сек (PGA) до 3,0 сек получены для пяти вариантов вероятностей превышения расчетных значений в течение 50 лет (или периодов повторяемости): 40% (период повторяемости 100 лет), 10% (период повторяемости 475 лет), 5% (период повторяемости 975 лет), 2% (период повторяемости 2475 лет), 1% (период повторяемости 4975 лет) по сетке вычислений с шагом $0,1^\circ$ по широте и долготе для рассматриваемой территории.

Для облегчения использования результатов вероятностного анализа сейсмической опасности в практике сейсмостойкого проектирования и строительства на территории Таджикистана выполнены расчеты для трех категорий грунтов, используемых в существующем СНиПе, и отличающихся скоростями поперечных волн в верхнем 30 м слое грунта – Vs30, а именно, для грунтов категории I со средним значением Vs30 = 760 м/сек; для грунтов категории II – Vs30 = 460 м/сек; для грунтов категории III – Vs30 = 200 м/сек.

Все полученные вычисления сведены в таблицы программы Excel (15 таблиц), по которым можно как построить карты сейсмической опасности в необходимых значениях спектральных ускорений с помощью ГИС программ, так и спектры реакции для заданных вероятностей превышения расчетных значений (или их периодов повторяемости). Такой подход существенно облегчает использование полученных результатов вероятностного анализа сейсмической опасности в практике сейсмостойкого проектирования и строительства.

Литература

1. Артыков Т.У., Ибрагимов Р.С., Зияудинов Ф.Ф. Сейсмическая опасность территории Узбекистана. - Т., 2012. - 254 с.
2. Бабаев А.М., Кошлаков Г.В., Мирзоев К.М. Сейсмическое районирование Таджикистана (объяснительная записка). - Душанбе: Дониш, 1978. - 68 с.
3. Горшков Г.П. О сейсмическом районировании Центральной Азии // Тр. сейсмол. Института АН СССР, 1938. - № 79. - С. 67-71.
4. Градостроительные нормы и правила Республики Таджикистан. ГНИП РТ 22-07-2018. Сейсмостойкое строительство. - Душанбе, 2018.
5. Губин И.Е. Закономерности сейсмических проявлений на территории Таджикистана. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 464 с.
6. Ибрагимов Р.Н. Сейсмогенные зоны среднего Тянь-Шаня. - Т.: Фан, 1978.
7. Сейсмическое районирование СССР / Отв. ред. Медведев С.В. - М.: Наука, 1968. - 476 с.
8. Медведев С.В. Карта сейсмического районирования территории СССР, 1957 г. // Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, 1958. - № 1 (158). - С. 3-28.
9. Мушкетов Д.И. Сейсмическое районирование Центральной Азии // Тр. Ин-та сейсмологии АН СССР. № 34. Вып. 2. - С. 1-26.
10. Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Вострикова Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского пояса. - М.: ГЕОС, 2002.
11. Чернер Карта «Тектоника Таджикистана». М 1:500000. - М.: МИНГЕО, 1990.
12. Abdrakhmatov K. ISTC Project No. KR 1176, Establishment of the Central Asia Seismic Risk Initiative (CASRI), Final Project Technical Report on the work performed from: 02.01.2006 to 04.30.2009 // Institute of Seismology, National Academia of Sciences, Kyrgyz Republic. 2009.
13. Abdulhameed S., Ratschbacher L., Jonckheere R., Gagala Ł., Enkelmann E., Käßner A. et al. Tajik basin and southwestern Tian Shan, northwestern India-Asia collision zone: 2. Timing of basin inversion, Tian Shan mountain building, and relation to Pamir-plateau advance and deep India-Asia indentation // *Tectonics*, 2020. - 39, e2019TC005873. <https://doi.org/10.1029/2019TC005873>.
14. Abrahamson N.A., Silva W.J., Kamai R. Summary of the ASK14 ground-motion relation for active crustal regions // *Earth. Spectra*. - 2014. - 30 (3). - P. 1025-1055.
15. Atkinson G.M., Boore D.M. Empirical ground-motion relations for subduction regions and their application to Cascadia and other regions // *Bull. Seism. Soc. Am.* - 2003. - 93. - P. 1703-1729.
16. Babaev A.M., Ischuk A.R., Negmatullaev S.H. Seismic condition of the territory of Tajikistan // Published by TIEES. Dushanbe, 2008. - 93 p.
17. Bindi D., Abdrakhmatov K., Parolai S., Mucciarelli M., Grünthal G., Ischuk A., Mikhailova N., Zschau J. Seismic hazard assessment in Central Asia: Outcomes from a site approach // *Soil Dynam. Earthq. Eng.* 2012. - 37. - P. 84-91.
18. Bindi D., Parolai S., Oth A., Abdrakhmatov K., Muraliev A., Zschau J. Intensity prediction equations for central Asia // *Geophys. J. Int.*, 2011. - 187. - P. 327-337.
19. Building Seismic Safety Council, NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures, 2009 edition: Federal Emergency Management Agency report 2010. - P. 750. [Also available at https://www.fema.gov/media-librarydata/20130726-1730-25045-1580/femap_750.pdf]
20. Bungum H. Numerical modelling of fault activities // *Computers & Geophysics*. - 2007. - 33. - P. 808-820.
21. Burtman V.S., & Molnar P.H. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir // *GSA Special Papers*. - 1993. - 281. - P. 1-76.
22. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA,

- PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra // *Earthq. Spectra*. - 2014. - 30(3). - P. 1087-1115.
23. Carrapa B., DeCelles P.G., Wang X., Clementz M.T., Mancin N., Stocica M. et al. Tectono-climatic implications of Eocene Paratethys regression in the Tajik basin of Central Asia // *Earth and Planetary Science Letters*. - 2015. - 424. - P. 168-178.
24. Chester A. Ruleman, Anthony J. Crone, Michael N. Machette, Kathleen M. Haller, Kenneth S. Rukstales, (2007). U.S. // *Geological Survey Open-File Report*. - 2007. - 1103 p.
25. Chiou B.-S.J., Youngs R.R. Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra // *Earthq. Spectra*. - 2014. - 30 (3). - P. 1117-1153.
26. Cornell C.A. *Engineering Seismic Risk Analysis* // *Bull. Seism. Soc. Am.* - 1968. - 58. - P. 1583-1606.
27. Esteva L. Criteria for the construction of spectra for seismic design // *Third Panamerican Symposium on Structures, Caracas, Venezuela*. - 1967.
28. Gardner J.K., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // *B. Seismol. Soc. Am.* - 1974. - 64. - P. 1363-1367.
29. ICOLD bulletin No148 "Selecting seismic parameters for large dams – Guidelines" ICOLD published. 2016. - 37 p.
30. Ischuk A., Bjerrum W., Kamchybekov M., Abdrakhmatov K., Lindholm C. Probabilistic seismic hazard Assessment for the area of Kyrgyzstan, Tajikistan and Eastern Uzbekistan, Central Asia. BSSA. - 2018. - Vol. 108. - № 1. - P. 130-144, doi:10.1785/0120160330.
31. Ischuk A., Bendick R., Rybin A., Molnar P., Khan S.F., Kuzikov S., Mohadjer S., Saydullaev U., Ilyasova Z., Schelochkov G. et al. Kinematics of the Pamir and Hindu Kush regions from GPS geodesy // *J. Geophys. Res.* - 2013. - 118. doi: 10.1002/jgrb.50185.
32. Klocke M., Voigt T., Kley J., Pfeiffer S., Rocktäschel T., Keil S., & Gaupp R. Cenozoic evolution of the Pamir and Tian Shan mountains reflected in syntectonic deposits of the Tajik Basin // *Geological Society, London, Special Publications*. - 2015. - 427. <https://doi.org/10.1144/SP427.7>.
33. Kufner S.-K., Schurr B., Ratschbacher L., Murodkulov S., Abdulhameed S., Ischuk A. et al. Seismotectonics of the Tajik basin and surrounding mountain ranges // *Tectonics*. - 2018. - 37. - P. 2404-2424. <https://doi.org/10.1029/2017TC004812>.
34. Marie-Françoise Brunet, Edward Sobel, Tom Mc Cann. Geological evolution of Central Asian Basins and the Western Tien Shan Range // *The Geological Society, London, Special Publications, Geological Evolution of Central Asian Basins and the Western Tien Shan Range*. - 2017. - 427. - P. SP427.17. [10.1144/SP427.17](https://doi.org/10.1144/SP427.17). hal-01561458.
35. Mikhailova N., Mukambayev A., Aristova I., Kulakova G., Ullah S., Pilz M., Bindi B. Central Asia earthquake catalogue from ancient time to 2009. *ANNALS OF GEOPHYSICS*, 58, 1, 2015, S0102; doi:10.4401/ag-6681.
36. Mohadjer Solmaz, Todd Alan Ehlers, Rebecca Bendick, Konstanze Stübner, Timo Strube. A Quaternary fault database for Central Asia // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* - 2016. - 16. - P. 529-542.
37. Mohadjer S., Bendick R., Ischuk A., Kuzikov S., Kostuk A., Saydullaev U., Lodi S., Kakar D.M., Wasy A., Khan M.A. et al. Partitioning of India–Eurasia convergence in the Pamir–Hindu Kush from GPS measurements // *Geophys. Res. Lett.* - 2009. - 37. - L04305, doi: 10.1029/2009GL041737.
38. Ordaz M., Aguilar A., Arboleda J. CRISIS2007. Program for Computing Seismic Hazard. Available at www.iingen.unam.mx, Institute of Engineering UNAM, Mexico. - 2007.
39. Ordaz M., Martinelli F., D'Amico V., Meletti C. CRISIS2008: A Flexible Tool to Perform Probabilistic Seismic Hazard Assessment // *Seismological Research Letters*. - 2013. - Vol. 84, Number 3. doi: 10.1785/0220120067McGuire, R.K. (2004). *Seismic Hazard and Risk Analysis*, EERI Publications, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA. - 240 p.
40. PEER Report No. 2018/03: Probabilistic Seismic Hazard Analysis Code Verification. July, 2018. - 139 p.
41. Preliminary Determination of Epicenters (PDEs) Bulletin, U.S. Geological Survey (USGS; <http://earthquake.usgs.gov>, last accessed Dec. 2016).
42. Richter C.F. *Elementary Seismology*, W.H. Freeman & Co, San Francisco, California. - 1958.
43. Schneider F.M., Yuan X., Schurr B., Mechie J., Sippl C., Kufner S.-K. et al. The crust in the Pamir: Insights from receiver functions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. - 2019. - 124. - P. 9313-9331. <https://doi.org/10.1029/2019JB017765>.
44. Schurr B., Ratschbacher L., Sippl C., Gloaguen R., Yuan X., Mechie J. Seismotectonics of the Pamir // *Tectonics* 33. - 2014. - № 8. - P. 1501-1518, doi: 10.1002/2014TC003576.
45. Scordilis E.M. Empirical Global Relations Converting Ms and mb to Moment Magnitude // *J. Seismol.* - 2006. - 10. - P. 225-236.
46. Shumway A.M., Petersen M.D., Powers P.M., Rezaeian S. Additional period and site class maps for the 2014 National Seismic Hazard Model for the conterminous United States // *U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1111*. - 2018. - 46 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20181111>.
47. Ullah S., Bindi D., Pilz M., Danciu L., Weatherill G., Zuccolo E., Ischuk A., Mikhailova N., Abdrakhmatov K., Parolai S. Probabilistic seismic hazard assessment for Central Asia // *Ann. Geophys.* - 2015. - 58. - S0102, doi: 10.4401/ag-6681.
48. Woo G. Kernel estimation methods for seismic hazard area source modeling // *Bull. Seismol. Soc. Am.* - 1996. - 86. - № 2. - P. 353-362.
49. Zhang P., Shen Z., Wang M., Gan W., Bürgmann R., Molnar P., Wang Q., Niu Z., Sun J., Wu J. et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data // *Geology*. - 2004. - 32. - P. 809-812.
50. Zhang P., Yang Z.X., Gupta H.K., Bhatia S.C., Shedlock K.M. Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) in continental Asia // *Ann. Geophys.* - 1999. - 42. - P. 1167-1190.
51. Youngs R.R., Coppersmith K.J. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1985. - 75. - P. 939-964.

УДК 550.34

A.X. To'xtasinov¹, D.D. Xusanbaev², D.X. Atabaev³

¹O'zbekiston Milliy universiteti tayanch doktoranti, axmad326@mail.ru, ²O'zbekiston Milliy universiteti dotsenti, shark_24@mail.ru, ³O'zbekiston Milliy universiteti kafedrasini mudiri doktor, atabaev_d@mail.ru

O'ZBEKISTON XUDUDIDAGI EXTIMOLIY ZILZILA O'CHOQLARINI (M_{max} BO'YICHA) PROGNOZLASH

To'xtasinov A.X., Xusanbaev D.D., Atabaev D.X.

O'zbekiston xududidagi extimoliy zilzila o'choqlarini (M_{max} bo'yicha) prognozlash

Annotatsiya. Maqolada Yer qobig'ining turlarga ajratishda geologik-geofizik ma'lumotlar majmuasidan foydalanilgan. Yer qobig'ini turlarga ajratish uslubiyati klaster taxliliga asoslangan bo'lib, bu katta miqdordagi ma'lumotlar majmuasini bir vaqtning o'zida xamda xar tomonlama tahlil qilish imkonini beradi. Dastlabki ma'lumotlarni taqqoslovchi va statistik tahlillari o'tkazilgan, klaster tahlili asosida tasniflash masalasi yechilgan. Ushbu tadqiqot ishida kuchli zilzilalar potentsialini baholashning avvalgi usulidan butunlay farq qiladigan usullardan foydalanilgan. Hozirgi kunga qadar aniqlangan zilzilalardan etalon sifatida foydalangan holda ajratilgan yer qobig'i turlarining zilzilalari bilan bog'liqligi taxlili asosida o'xshash turdagi yer qobiqlariga prognoz berish imkonini berdi. O'zbekiston xududidagi extimoliy zilzila o'choqlari (M_{max} bo'yicha) prognozli xaritasi tuzilgan.

Kalit so'zlar: prognoz, statistika, klaster taxlili, yer qobig'i, anomaliya, tasniflanish, chastotali gistogrammalar.

Тухтасинов А.Х., Хусанбаев Д.Д., Атабаев Д.Х.

Прогнозирование возможных очагов землетрясений (по M_{max}) на территории Узбекистана

Аннотация. Использовался комплекс геолого-геофизических данных для классификации земной коры. Методология классификации земной коры основана на кластерном анализе, который позволяет проводить одновременный и всесторонний анализ больших наборов данных. Проведены сравнительные и статистические анализы исходных данных, решена задача классификации на основе кластерного анализа. Рассмотрены методы, которые полностью отличались от предыдущего метода оценки потенциала сильных землетрясений. На основе анализа сейсмической корреляции сейсмических видов, выделенных с использованием землетрясений, идентифицированных до сих пор в качестве эталона, можно сделать прогнозы для подобных типов корок. Разработана карта-прогноз возможных землетрясений с M_{max} в Узбекистане.

Ключевые слова: прогноз, статистика, кластерный анализ, земная кора, аномалия, классификация, частотные гистограммы.

Tukhtasinov A.H., Khusanbayev D.D., Atabaev D.H.

Prediction of possible earthquake foci (according to M_{max}) on the territory of Uzbekistan

Annotatsiya. The article uses a set of geological and geophysical data to classify the Earth's crust. The methodology for classifying the crust is based on cluster analysis, which allows simultaneous and comprehensive analysis of large amounts of data. Comparative and statistical analyzes of the initial data were conducted, and the problem of classification based on cluster analysis was solved. This study used methods that were completely different from the previous method of estimating the potential of strong earthquakes. Based on the analysis of the seismicity of seismic species identified so far using earthquakes as a reference, it was possible to make predictions for similar types of crust. A forecast map of M_{max} potential earthquakes in Uzbekistan has been developed.

Key words: forecast, statistics, cluster analysis, crust, anomaly, classification, frequency histograms.

Кириш. Табиатда кучли zilzilalar натижасида инсоният хаётида дахшатли талофатлар, йўқотишлар турли худудларда турли даврларда ўзини намоён қилиб, олимларнинг ушбу соҳага бўлган эътибор ва ўрганишлар олиб бориши зарурлигини кўрсатаб келмоқда. Ўрта Осиёда содир бўлган zilzilalar ҳақидаги илк маълумотларни эрамизнинг IX асрига оид қўлёзмаларда ҳам топиш мумкин. “224 (838-839) йилларда Фарғонада кучли zilzila бўлиб, қўплаб уйлар вайрон бўлди”, деб ёзади ўша давр тарихчиси Абу-Гардизий.

В.В.Белоусов таъбирича (1954): Сеймик районлаштириш хариталарини тузиш принципи илгари содир бўлган кучли zilzilalar бирон бир жойда такрорланиши мумкин деган тахминга асосланади. Шу билан бирга, zilzilalarнинг пайдо бўлиш шароитлари, уларнинг ер қобиғининг тузилиши ва тектоник ҳаракатлар билан боғлиқлиги ҳақида таъкидлаган.

Маълумки, худуднинг тектоник фаоллиги геологик ва геофизик кўрсаткичлар мажмуи билан белгиланади ва уларнинг ўзига хос комбинацияси унинг сеймотектоник салоҳиятини

белгилайди. Шу асосда Г.И.Рейснер 1980 йилда сейсмотектоник салоҳият харитасини тузиш усулини таклиф қилди [4]. Бунда ўрганилаётган майдон маълум ўлчамдаги тенг ўлчамдаги катакчаларга бўлинади ва ҳар бир катакка кузатувлар асосида тузилган хариталардаги маълумотлар киритилади. Қўйилган муаммони ҳал қилишда танлаб олинган геологик-геофизик кўрсаткичлар сейсмотектоникага алоқадорлиги билан тавсифланади. Муаммонинг ҳар бир катакчадаги сейсмотектоник салоҳиятнинг турли даражаларига мос келадиган анъанавий бирликларнинг маълум бир йиғиндисини билан тавсифланди. Кейинчалик, олинган харита кучли зилзилалар эпицентрлари харитасини билан таққосланди.

Ер қобиғининг турларга бўлиниши эндоген жараёнларни ўрганишда, хусусан, сейсмик районлаштириш ва геодинамикага кенг имкониятлар очади. Ер қобиклари турлари ўртасидаги алоқаларни ўрнатиш ва уларнинг умумий тизимдаги ўрнини аниқлашда керак бўлади. Шу муносабат билан В.В.Белоусов “Биринчи навбатда, албатта, ер қобиғи турларини тузилишига кўра фарқлаш масаласини кўтариш керак. Аммо ер қобиғининг ажралиб турадиган турлари танланса, улар ер қобиғининг турли хил ривожланиш босқичларини акс эттиради, яъни турли хил эндоген режимлар, унда қандай жараёнлар кечаётганини, нафақат қобикнинг замонавий тузилишини, балки унинг ривожланиш қонуниятларини ҳам баҳолашга имкон беради” [2]. Бундан ташқари, “ер қобиғидаги жараёнлар ўртасидаги муносабатларини аниқлаш учун ер қобиғининг чуқурлик тузилишининг хусусиятларини турларга ажратишда фойдаланиш жуда муҳим бўлар эди” дея таъкидлаган [2].

Ер қобиғини (Г.И.Рейснер, М.Г.Рейснер, 1986) бир жинсли ҳудудларга турларга ажратиш усули юқоридагиларнинг барчасидан фарқли ўларок, аниқ тузилган ва асосланган физик модел – В.В.Белоусовнинг (1966, 1978, 1986) геодинамик концепциясига асосланади. Бу концепцияга кўра, тектоник ҳаракатларнинг асосий манбаи мантия моддасининг дифференциацияси бўлиб, бунинг натижасида унинг эрувчан таркиби катта миқдордаги чуқур иссиқлик билан бирга ер қобиғига кириб, унда турли жадалликдаги физик-кимёвий ўзгаришларни келтириб чиқаради. Бу, ўз навбатида, сирт тузилмаларида ўзини намоён қилади ва тектоник фаолликнинг у ёки бу жадаллигига таъсир қилади.

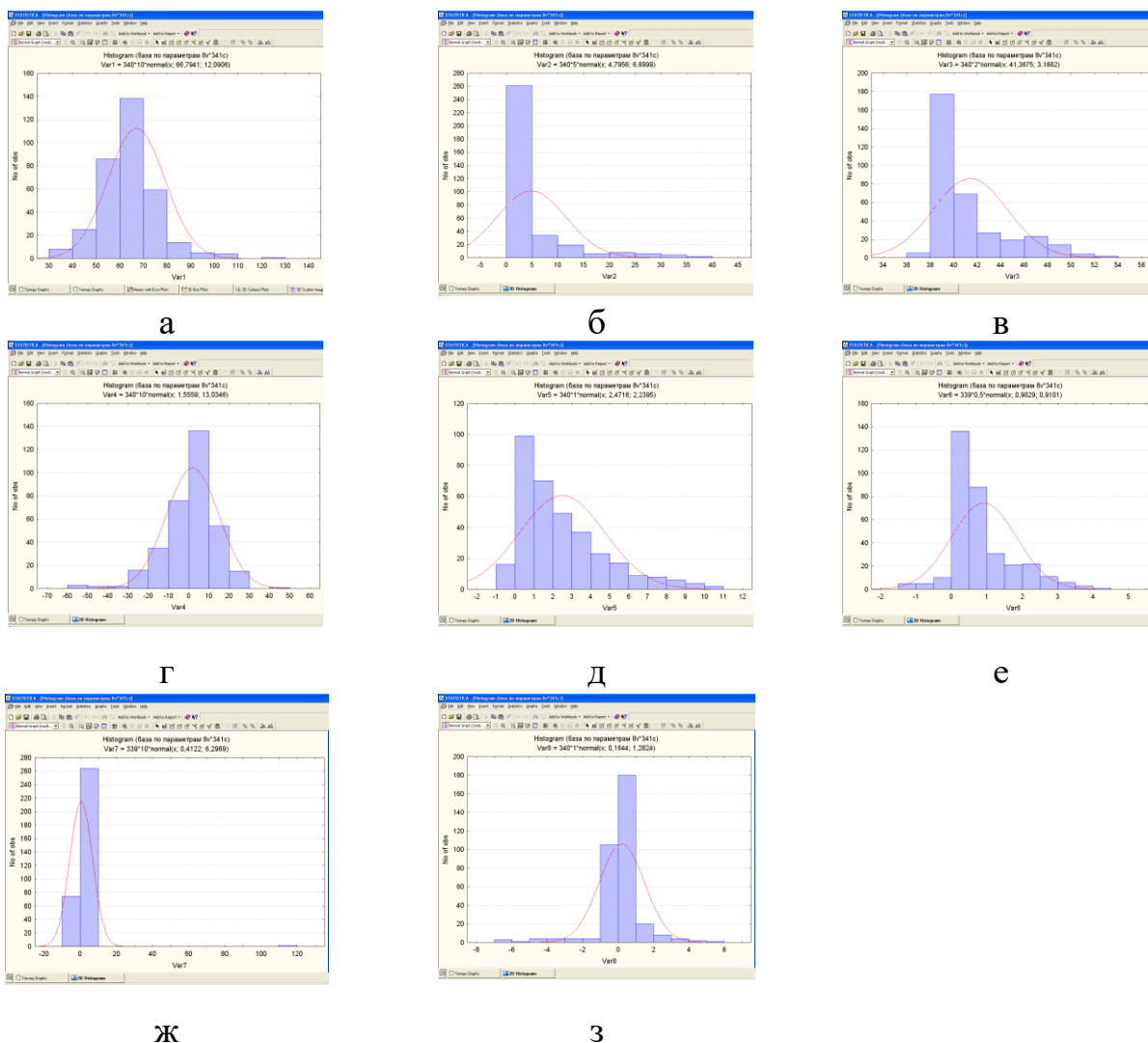
Замонавий эндоген режимларни ўрганиш ер қобиғини ҳозирги замон ҳолатини ва тузилишини белгиловчи геологик-геофизик маълумотлар ёрдамида турларга ажратишга асосланган. Бунда бошланғич геологик-геофизик маълумотлар бутун ўрганилаётган ҳудуд бўйича бир текис тақсимланган бўлиши керак. Энг асосийси бошланғич маълумотларни танлаш кўйилган мақсадга мувофиқ бўлиши керак [5].

Геологик-геофизик маълумотлар мажмуаси асосида кучли зилзила ўчоқларини сейсмотектоникаси ўрганилиб, унинг замонавий эндоген режимлар билан боғлиқлиги аниқланди. Бунда, Ер қобиғини турларга ажратиш усулидан фойдаланилган. Ишлари натижаси сифатида M_{max} бўйича эҳтимолий кучли зилзилалар содир бўлиши мумкин бўлган ҳудудлар ажратилган [9].

Юқоридагиларни инобатга олган ҳолда ер қобиғини турларга ажратишда қуйидаги геологик-геофизик маълумотлар комплексини қўллаш мақсадга мувофиқ:

1. Иссиқлик оқимининг зичлиги.
2. Ер қобиғининг қалинлиги.
3. Замонавий рельефнинг баландликлари.
4. Оғирлик кучининг изостатик аномалиялари.
5. Консолидациялашган Палеозой пойдевори ётиши чуқурлиги.
6. ΔT магнит аномалиялари.
7. Ер ёриқларининг зичлиги.
8. Неотектоник ҳаракатлар амплитудаси.

Маълум даражада эндоген режимлар, хусусан замонавий эндоген режимлар, ер қобиғини сейсмиклиги ва бошқалар шу каби жараёнлар ва ходисалар билан боғлиқдир. Шунинг учун ер қобиғини турларга ажратишда, ер қобиғининг замонавий тузилиши ва ҳолатини тавсифловчи дастлабки маълумотлардан фойдаланишга асосланиши керак (1-расм).



1-расм. Гистограмма маълум бир геологик-геофизик параметрнинг кўрсаткичларини учраш сонини аниқ кўрсатиб беради. а (var1) – иссиқлик оқими Q, б (var2) – рельеф баландлиги R, в (var3) – Мохорович юзаси ётиш чуқурлиги H, г (var4) – изостатик аномалиялар I, д (var5) – палеозой юзасининг ётиш чуқурлиги F, е (var6) – магнит аномалияси ΔT , ж (var7) – актив ер ёриқларининг зичлиги L, з (var8) – неотектоник ҳаракатлар амплитудаси N қийматларининг учраш гистограммалари.

Қуйида маълумотларни математик статистика усуллари билан таҳлили келтирилган. Умуман олганда, дастлабки маълумотлар кенг қийматлар оралигида ўзгаради. 1-жадвалда фойдаланилган маълумотларнинг ўзаро боғлиқлик матрицаси кўрсатилган. Шундан кўришиб турибдики, улар ўртасидаги ўзаро боғлиқлик жуда паст кўрсаткичларга эга.

1-жадвал

Дастлабки маълумотларнинг корреляцион матрицаси

Корреляция (Spreadsheet1.sta)								
Белгиланган корреляциялар $p < 0.0000$ да сезиларли								
339 та объект қийматлари бўйича								
Қийматлар	Q	R	H	I	F	T	L	N
Q, мВт/м ²	1.00							
R, км	0.21	1.00						
H, км	0.12	0.81	1.00					
I, мГал	0.10	-0.15	-0.43	1.00				

F, км	0.06	-0.15	0.10	-0.42	1.00			
T, эрстед	-0.04	-0.04	-0.01	0.04	-0.24	1.00		
L, км/км ²	0.23	0.39	0.39	-0.07	-0.07	-0.08	1.00	
N, км	0.09	0.50	0.15	0.39	-0.47	0.02	0.14	1.00

8 та параметр бўйича ҳар бири учун корреляцион матрицаси ҳисобланди: иссиқлик оқими Q (мВт/м²), замонвий рельеф баландлиги R (км), ер қобиғининг қалинлиги H (км), изостатик аномалиялари I (мГал), консолидацияланган пойдевор чуқурлиги F (км.), магнит майдон ташкил этувчиси ΔT (эрстед), актив ер ёриқларининг зичлиги L (км/км²), неотектоник ҳаракатлар амплитудаси N (км).

Методика

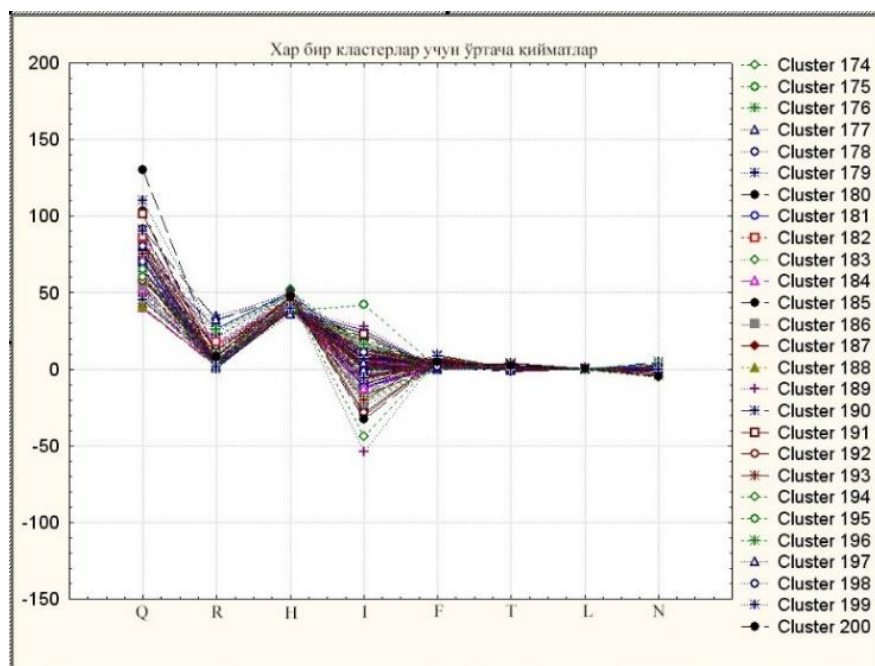
Ер қобиғини турларга ажратиш муаммоларини ҳал қилишда, турли хил маълумотларнинг катта массивларига, дастлабки маълумотларнинг мураккаб комбинацияси билан дуч келганда, ҳал этишнинг энг яхши усули унинг кенг қамровли ва бир вақтнинг ўзида таҳлил қилишидир. Бундай таҳлил кластер таҳлил қилиш йўли билан амалга оширилиши мумкин [3]. Ушбу таҳлилдаги бирлаштириш мезонлари кўп ўлчамли фазодаги барча белгилар мажмуасига яқинлик ўлчови сифатида хизмат қилиши мумкин. Яқинлик ўлчови сифатида Евклид ёки Декарт масофасини, Пирсоннинг логарифмик ёки иркий мезонларини ёки бошқа ўлчовларни олишимиз мумкин. Кластер таҳлил қилиш муаммосини ҳал қилиш, бошланғич маълумотлар комплекси билан тавсифланган, юқори даражадаги объектларга эга бўлган бир хил даражали объектларни ажратишдир, уларнинг ҳар бири фақат бир хил манба маълумотларининг ўзига хос қийматлари тўплами билан тавсифланиши мумкин [6].

Ушбу тадқиқот ишида кластер таҳлиллардан k -ўртача Мак-Куин – усулидан фойдаланилди. Классификация принципи айрим оптимал бўлинишлар амалга ошмагунча муайян миқдордаги кластерлар (синфлар, гуруҳлар, популяциялар) бўйича кўплаб объектларнинг тасодифий, дастлабки бўлинишига, кейинчалик бошқа объектларни энг яқин кластерларга қайта тақсимлашга, кластерларнинг янги "оғирлик марказларини" қайта ҳисоблашга ва таърифланган процедурани давом эттиришга хизмат қилади. Усулнинг ўзига хос хусусияти шундаки, ҳисоб-китоблар натижасида ажратилган кластерлар устма уст тушмайди, ҳар бир ажратилган объект фақат битта кластерга тегишли бўлиши кафолатланади.

Замонавий эндоген режимлар билан ер қобиғидаги сейсмиклик, магматизм, рудогенерация, нефт ва газ тўпланиши каби жараёнлар боғлиқ. Шунинг учун, кучли зилзила жараёнларини таққослаш учун ер қобиғининг замонвий тузилиши ва ҳолати ҳақидаги маълумотлардан фойдаланилади. Бунда кластер анализнинг биринчи қадами, яъни “яқинлашиш меъёри” жуда кичик бўлган қадами танланади.

Ер қобиғининг ҳозирги тузилиши ва ҳолатини белгиловчи параметрлар асосида ажратилган ер қобиғининг турлари, турларга ажратиш харитасини эталон кучли зилзилалари эпицентрлари билан “ўқитилганда” ер қобиғининг сейсмотектоник потенциалини прогнозлаш мумкин. Тадқиқот ишида кластер синфларга ажратиш методидан ва эталон сифатида кучли зилзилалари эпицентрлари мавжуд бўлган ҳудудлардан фойдаланилди.

Дастлабки геологик-геофизик материалларни қайта ишлаш K -ўрта усул билан кластер таҳлил ёрдамида амалга оширилди. Ушбу тадқиқот ишида “STATISTICA v 6.0” дастуридан фойдаланилган. Ҳудуд бўйича 339 та ячейкалар 200 та кластерга (синфларга) яқинлик меъёри бўйича ажратиб чиқилди (2-расм).



2-расм. Ячейкалар қийматларининг яқинлик меёри бўйича кластерларга ажратиш графиги.

Ушбу маълумотлар асосида “program KA” компьютер дастури орқали Ўзбекистон худудининг 200 турли формаллашган (рақамли) харитаси тузилди.

1-босқичда сейсмология институти ходимлари томонидан ва бошқа турли манбалар бўйича, Ўзбекистон худудиднинг тарихий ва ҳозирги кунга қадар 4,0-7,5 магнитудагача содир бўлган кучли зилзилалари каталоги тузилди (2-жадвал). Кластер таҳлил натижалари ва содир бўлган кучли зилзилалар эпицентрлари тўғрисидаги маълумотларни биргаликда кўриб чиқилди. Республика миқёсида ҳозирги кунгача 53 та ячейкада турли кластерларда зилзилалари эпицентрлари жойлашган. Кучли зилзилалар эҳтимоли мавжуд бўлган худудларни аниқлаш билан боғлиқ прогноз масаласини ечишда ушбу кластерлар эталон қилиб олинган (3-расм).

Натижалар

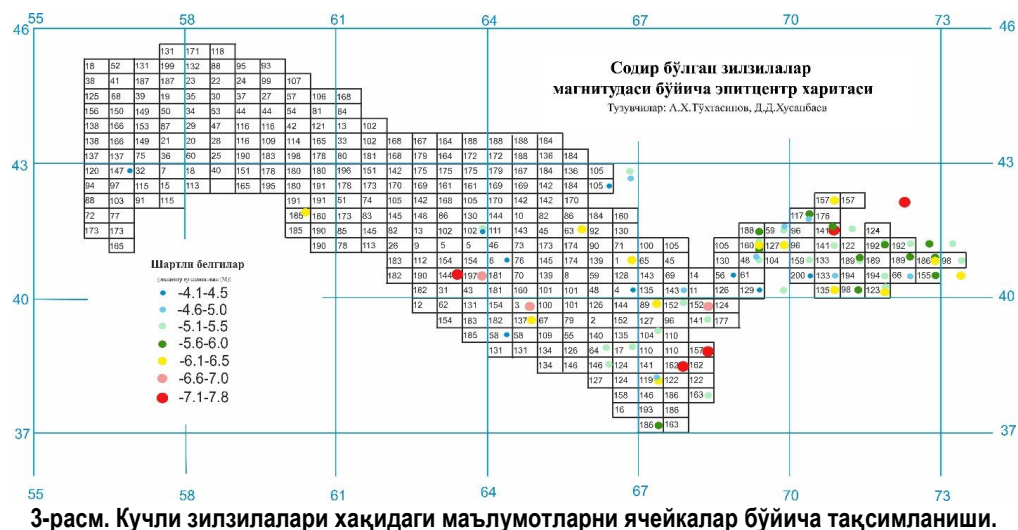
Ушбу каталогда номенклатура варағи, кластер тури маълумотларидан фойдаланиб, зилзилалари мавжуд бўлган эталон ячейкалар маълумотлари Ўзбекистон худуди бўйича ажратилган 339 та ячейкага тарқатилади. “Образларни таниш” усуллари орқали битта кластерга мансуб бўлган эталон ячейкалар маълумоти, худди шу кластердаги зилзилалар содир бўлиши мумкин бўлган ячейкага тарқатилади. Натижада, M_{\max} бўйича табақалаштирилган худуднинг сеймотектоник потенциалини кўрсатувчи рақамли прогноз харитаси тузилди.

2-жадвал

Ўзбекистон худудининг кучли зилзилалари каталоги (магнитудаси 5 ва ундан юқори)

№	Йил	N	E	Магнитуда	Глубина, км	Номи	Кластер Тури
1.	838	40-40	71-30	5,30	10,00	Фарғона	194
2.	942	40-00	64-30	6,70	15,00	Бухоро	3
3.	1208	42-20	60-00	6.1	8,00	Куния-Урганч	185
4.	1494, 1927	41-00	71-30	5,10/6.0		Наманган, Наманган	192
5.	1620	41-00	71-00	5,80	7,00	Асинское	189
6.	1822	39-40	64-30	6,40	20,00	Бухоро	137
7.	1868	41-20	69-00	6,40	20,00	Тошкент	160
8.	1868	41-20	69-60	6,50	18,00	Тошкент	127
9.	1883	40-40	72-30	5,50	20,00	Ўш	155
10.	1886	41-40	69-00	6,00	14,00	Тошкент	188
11.	1888	40-00	69-80	6,30	10,00	Костакоское	
12.	189, 1920	41-40	70-30	7,20/5,60	25,00/10,00	Сандалаш, Шимолий	141

						Ангрен	
13.	1892	41-00	66-30	6,10	25,00	Қизилқум	1
14.	1897	40-00	68-00	6,60	25,00	Ўратюбин-1, Ўратюбин-2	152
15.	1902, 1947	41-00	72-00	6,40/5,90	10,00/9,00	Андижан/Найман	189
16.	1903	41-00	72-30	6,10	14,00	Аимис	189
17.	1907	38-40	67-30	7,50	30,00	Қоротоғ-1	162
18.	1907	39-00	68-00	7,30/7,00	24,00/20,00	Қоротоғ-2, Қоротоғ-3	157
19.	1907	40,30	72,30	5,80	10,00	Кирккол	186
20.	1908, 1941, 1984	41-00	71-00	5,40/5,40/5,60	26,00/24,00/14,00	Наманган/Наманган/Поп	189
21.	1912	41-20	71-30	5,20	12,00	Наманган	192
22.	1924, 1924	40-40	73-00	5,00/6,50		Куршабек-1/Куршабек-2	
23.	1926	41-00	73-00	5,40	9,00	Жалол-Обод	98
24.	1928	42,00	72,30	5,20	20,00	Чотқол	
25.	1928, 2016	39-20	67-00	5,30/5,10	15,00/15	Шарисабз/Китоб	104
26.	1929	41-40	63-30	5.2		Қизилқук	
27.	1930, 1984	40-20	69-30	5,20/5,00	12,00/15,00	Замбурун, Қайрақум	
28.	1932	41-40	65-30	6,10	25,00	Тамдубулоқ	63
29.	1935	40-00	67-30	5,40	20,00	Ғаллаорол	152
30.	1935, 1968	38-20	67-00	6,20/5,00	16,00/15,00	Бойсун/Бойсун	119
31.	1937	42-20	70-30	6,40	17,00	Пскем	157
32.	1942	41-20	71-30	5,90	18,00	Яртемин	192
33.	1946, 1971	42-00	72-00	7,50/5,60	25,00/17,00	Чотқол/Чотқол	
34.	1955	39-40	68-00	5,20	21,00	Бахмал	141
35.	1959, 1987	42-00	70-00	5,70/5,00	13,00/5,00	Бурчмулла/Олтинтапа	117
36.	1965, 1970, 2013	41-00	69-00	5,50/5,00/5,20	11,00/20,00/10	Қоштапа/Пскент/Туябуғиз	48
37.	1968	43-00	66-30	5,30	30,00	Қизилқум-1	
38.	1968	43-20	67-00	5,00	30,00	Қизилқум-2	
39.	1976	40-40	63-30	7,00	25,00	Газли-1	197
40.	1976	40-40	63-00	7,30/7,20	20,00/15,00	Газли-2, Газли-3	144
41.	1977	40-20	70-30	6,30	15,00	Исфара-баткен	135
42.	1977	40-20	71-00	5,70	14,00	Хайдаркан	98
43.	1977, 2008	41-40	69-30	5,10/5,00	25,00	Товоксой/Тошкент	59
44.	1980, 1966	41-20	69-00	5,50/5,20	12,00/8,00	Назарбек/Тошкент	160
45.	1982, 2011	40-20	71-30	5,50/6,30	12,00/15	Чимён/Канс	123
46.	1988	41-20	72-00	5,50	15,00	Шамалдисой	192
47.	1999	39-00	66-30	5,00	10,00	Қамаши-1, Қамаши-2	17
48.	1999	39-00	66-00	5,10	12,00	Қамаши	64
49.	2007	41-40	71-00	5,10	12	Сумсар	
50.	2008	40-40	72-30	6,00	20	Гулчин	
	2008	41-20	73-00	5,10	9	Жалол-Обод	
51.	2013	40-00	67-00	6,30	15	Маржонбулоқ	89
52.	2017	40-00	67-30	5,10	10	Бахмал	152



Эталон сифатида олинган M_{\max} қийматига эга кластерлар, рақамли харитадаги бошқа шу рақамли ячейкалар учун “ўқитувчи” вазифасини ўтайди. Натижада Ўзбекистон худудининг M_{\max} бўйича табақалаштирилган ЭЗЎ рақамли харитаси тузилди.

157-кластер туридаги ер қобиғи Хисор-Кокшаал ва Боботоғ-Кейкитау сейсмоген зоналари кесишиш қисмида Қоратоғ $M = 7,0-7,3$ зилзилалари кузатилган (1907 й.), ушбу ячейка эталон сифатида Ўзбекистон худудининг Тошкент сейсмоген зонасининг шу кластер турига кирувчи ер қобикларига прогноз қилиш имконини беради. Бу майдонда илгари Пскем (1937 й.) $M = 6,4$ зилзиласи бўлиб ўтган.

141-кластер туридаги ер қобиғи Сандалаш сейсмоген зонасида Сандалаш $M = 7,2$ магнитудали зилзиласи кузатилган (1891 й.), бу ячейка эталон сифатида шу кластер турига кирувчи ер қобикларига прогноз қилиш имконини беради. Бу кластерда аввал Шимолий Ангрен (1920 й., $M = 5,6$) ва Қамаши (1999-2000 йй., $M = 5,5$) магнитудали зилзилалар содир бўлган.

152-кластер туридаги ер қобиғи Шимолий Нурота сейсмоген зонасида Ўратепа $M = 6,6-6,7$ магнитудали зилзилалар (1897 й.) содир бўлган ва бу ячейка эталон сифатида олинган. Ундан ғарбда шу кластерга кирувчи қўшни бўлган ячейкаларни прогноз қилиш имконини беради. Бу худудларда Ғаллаорол (1935 й., $M = 5,4$), Бахмал (2017 й., $M = 5,1$) зилзилалар содир бўлганлиги билан аҳамиятли.

186-кластер туридаги ер қобиғи Талдысуй сейсмоген зонасида Аим $M = 6,1$ магнитудали зилзила (1903 й.) эталон сифатида олинган ва шу кластерга кирувчи Сурхандарё ботиклиги марказий қисмидаги ячейкаларга прогноз қилиш имконини беради.

127-кластер туридаги ер қобиғида Тошкент $M = 6,5$ зилзиласи (1868 й.) содир бўлган ячейка эталон сифатида, шу кластерга кирувчи ячейкаларга прогноз қилиш имконини берди.

160-кластер туридаги ер қобиғида Тошкент $M = 6,4$ зилзиласи (1868 й.) содир бўлган ячейка эталон сифатида, Жанубий Тянь-Шань ва Бухоро сейсмоген зонасининг марказий қисми, Букантау сейсмоген зонасидаги шу кластерга кирувчи ячейкаларга прогноз қилиш имконини берди.

137-кластер туридаги ер қобиғида Бухоро $M = 6,4$ зилзиласи (1822 й.) содир бўлган ячейка эталон сифатида, Қорақалпоғистон худуди марказий қисмидаги шу кластерга кирувчи ячейкаларга прогноз қилиш имконини берди.

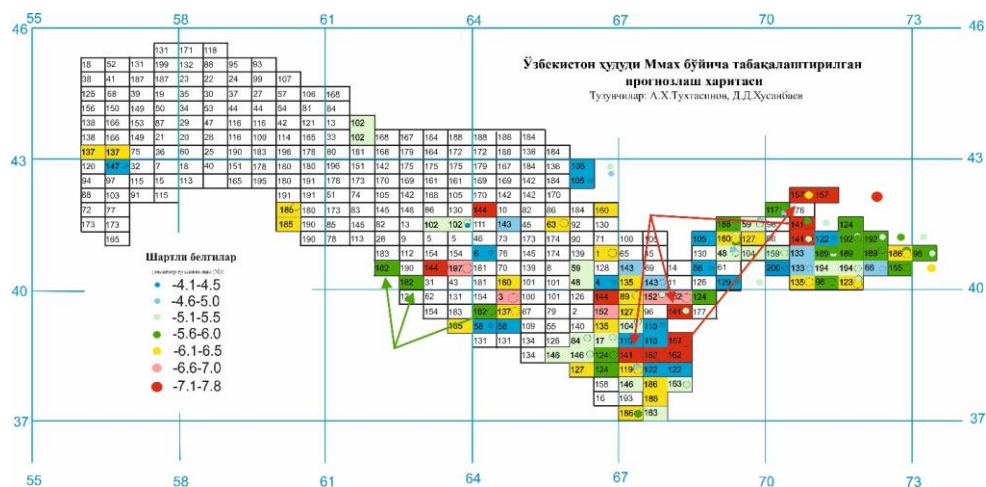
185-кластер туридаги ер қобиғида Куня-Урганч $M = 6,1$ зилзиласи (1208 й.) содир бўлган ячейка эталон сифатида, ушбу кластер турига кирувчи, ўзидан шимолда жойлашган Чоржуй поғонаси марказий қисмидаги ячейкалар учун прогноз қилиш имконини яратади.

192-кластер туридаги ер қобиғи Шамалдисой $M = 5,5$ зилзиласи (1988 й.) содир бўлган ячейка эталон сифатида, ўзидан шарқда жойлашган ячейкаларга прогноз қилиш имкониятини яратди.

189-кластер туридаги ер қобиғи Андижан $M = 6,0$ зилзиласи (1902 й.) содир бўлган ячейка эталон сифатида, ўзидан шарқда жойлашган ячейкаларга прогноз қилиш имкониятини яратди. Бу

ячейкаларда Наманган (1908 й., $M = 5,4$), Наманган (1941 й., $M = 5,4$), Поп (1984 й., $M = 5,6$), Найман (1947 й., $M = 5,9$), Ахси (1620 й., $M = 5,8$) зилзилалари рўй берган.

124-кластер туридаги ер қобиғида Камаши $M = 5,0$ зилзиласи (1999 й.) эталон сифатида, шу кластерга кирувчи ячейкаларга прогноз қилиш имконини берди (4-расм).

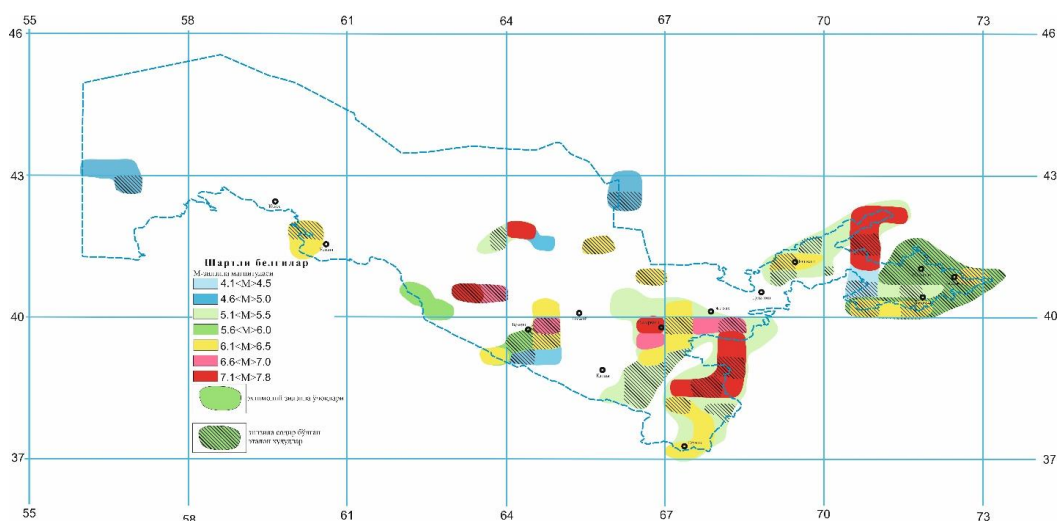


4-расм. Ўзбекистон ҳудуди M_{max} бўйича табақалаштирилган прогнозлаш харитаси.

Ўзбекистон ҳудуди сейсмикликни M_{max} бўйича табақалаштирилган харитада жами бўлиб 1, 3, 4, 63, 66, 123, 147, 155, 159, 147-кластер турлари ноёб (такрорланмас) турдаги ер қобиқларига мослиги аниқланди, юқоридаги ячейкаларда кучли магнитудали зилзилалари содир бўлган, аммо бу турдаги ер қобиқлари ўрганилган ҳудудларда бошқа учрамайди.

M_{max} бўйича табақалаштирилган харитада эталон ва уларнинг прогноз ячейкалари шартли равишда танланган магнитуда кўрсатувчи ранглар билан ажратилган (5-расм).

Худудиднинг платформа қисмида Газли туридаги ер қобиғига мос келувчи ячейка Зарафшон шаҳрининг ғарбий қисмида Тамдубулоқ ва Зарафшон флексурали ер ёриқларининг тутатиш қисмида ажратилади. Бу ячейка иссиқлик оқимининг юқори қийматлари 80 мВт/м^2 , ер ёриқларининг фаоллиги юқорилиги, неотектоник ҳаракатлар амплитудасининг Тамдубулоқ флексура ер ёриғи икки томони бўйича, бирида кўтарилиш иккинчисида чўкиш ҳаракатлари мавжудлиги билан кузатилади.



5-расм. Ўзбекистон ҳудуди M_{max} бўйича сейсмик районлаштириш харитаси.

Газли туридаги яна бир ячейка Зарафшон ботиклигининг Оқтош- Самарқанд ер ёриги зонаси бўлиб, иссиқ платформа худудига мос келади. Иссиқлик оқими зичлиги 70 мВт/м^2 ни ташкил қилади, неотектоник ҳаракатлар бўйича ер қобиғида чўкиш амплитудаси мавжуд.

Ороген худудлардан Хисор тизмасининг Боботоғ худудида жойлашган Қоратоғ зилзилалари зонаси фаол ер ёриқлари дизъюнктив боғлама ҳосил қилган соҳа билан боғлиқ, бу ерда неотектоник ҳаракатлар амплитудаси юқори бўлиб 6,0 км ни ташкил этади. Ушбу зилзилалар эталон сифатида Чотқол-Қурама тизмасидаги иккита ячейкага прогноз беради. Чотқол-Қурама тизмасидаги прогноз ячейкаларнинг иссиқлик оқимлари юқори қийматга 75 мВт/м^2 эга, ер ёриқлари Талас-Фарғона ер ёриги ва Каржантов ер ёриқлари туташган дизъюнктив боғлама худудида бўлиб, неотектоник ҳаракатлар амплитудаси ўсувчи ва 4,0 км ни ташкил этади. Ороген худудидаги яна бир 141-кластер тури Чотқол тизмасида Ангрэн ер ёриги билан мураккабланишган, неотектоник ҳаракатлар амплитудаси ўсувчи 4,0 км гача, ушбу худуддаги Сандалаш зилзиласи эталон сифатида шу кластерга кирувчи ер қобиклари Чотқол, Хисор, Нурота тоғ тизмалари худудларида мавжуд бўлган бир турдаги кластерларга прогноз қилиш имконини берди.

Хулоса. Ер қобиғи кластер таҳлили усули билан Ўзбекистон худуди эхтимолий зилзила ўчоқларини прогноз қилиш учун 200 та кластерларга тақсимланди. Ажратилган ер қобикларида содир бўлган зилзилалар эталон сифатида ўхшаш қобик турларига тадбиқ этилди ва эхтимолий зилзила содир бўлиши мумкин бўлган худудлар аниқланди.

Сеймотектоник ишлар натижасида ер қобиғи турларга ажратилди ва уларнинг Ммах бўйича табақалаштирилган харитаси тузилди. Унга кўра прогноз, эталон ва ноёб (такрорланмас) турдаги ячейкалар аниқланди. Ммах прогноз сифатида аниқланган худудлар сейсмология институти ходимлари томонидан яратилган умумий сейсмик районлаштириш (балларда келтирилган бўлса ҳам) ва сейсмоген зоналар хариталарига умуман мутаносиб келган, лекин баъзи сейсмоген зоналарнинг Ммах қийматларини аниқлаштириб, уларни табақалаштиришга хизмат қилган.

Адабиётлар

1. Белоусов В.В. Эндогенные режимы. - М.: Недра, 1978. - 232 с.
2. Белоусов В.В., Павленкова Н.И. Типы земной коры // Геотектоника. - 1985. - № 1. - С. 3-14.
3. Дюран К., Одел Ф. Кластерный анализ. - М.: Статистика, 1977. - 239 с.
4. Рейснер Г.И. Пространственное распределение сейсмических опасности. - М.: Недра, 1980. - 173 с.
5. Рейснер Г.И., Иогансон Л.И., Рейснер М.Г., Баранов Ю.Е. Типизация земной коры и современные геологические процессы. - М., 1993.
6. Рейснер Г.И., Рейснер М.Г. Современные эндогенные режимы. - М.: ИФЗ АН СССР, 1987. - С. 274-301
7. Тўхтасинов А.Х., Хусанбаев Д.Д., Атабаев Д.Х. Типирация земной коры по комплексу геолого-геофизических данных в Узбекистане // Илм-фан ва инновацион ривожланиш, 2021. - № 5.
8. Tukhtasinov A., Khusanbayev D. Atabayev D. Mukhammedrakhimov Ch. Modern endogenous regimes and evolution of the earth's crust of Uzbekistan // An International Multidisciplinary Research Journal. - 2021.
9. Хусанбаев Д.Д. Современные эндогенные режимы и сеймотектонические особенности очаговых зон сильных землетрясений (на примере Узбекистана): Автореф. дисс... канд. геол.-мин. наук. - М., 1991.

ZILZILALARNI PROGNOZLASH

УДК 550.38 550.343(375.1)

М.Ю. Муминов

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан
muminov.mirzoid@mail.ru

О ФОРМАХ И ВРЕМЕННЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СРЕДНЕПЕРИОДНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Muminov M.Yu.

Geomagnit maydonning o'рта muddatli zilzila darakchilarini shakli va vaqt birligida namoyon bo'lish xususiyatlari

Annotatsiya. Zilzila darakchisini shakli yoki uning vaqt birligidagi o'zgarish dinamikasi tektonik zilzilalar rivojiga mos kelishi va ularni mantiqan tushunishga yordam bera olishi kerak Bunda anomal o'zgarishlarni har bir lavxasi biz avvaldan qabul qilgan ishchi modelni har bir jabxacini tasdiqlab berishi kerak.

Darakchi anomalialarni regiondagi malum bir tektonik birliklarga bog'liqliginizilzila o'chog'I va uning darakchilarini xosilbo'lish mexanizmi o'rganishda, xamda ularni pragnoz qilishda qo'llash mumkun. O'рта muddatli geomagnit zilzila darakchilari tabiati darakchi maydon o'lchanayotgan muxitdagi tektonik kuchlanishlar o'zgarishi bilan bog'lanad.

Kalit so'zlar: anomalija, variatsiya, geomagnit maydon, darakchi, pragnoz qilish, zilzilafaol uzulish, sezgirlik, dtformatsiya, kuchlanish.

Муминов М.Ю.

О формах и временных особенностях среднепериодных геомагнитных предвестников землетрясений

Аннотация. Конфигурация предвестниковой аномалии временного хода или её динамика должны соответствовать и сопровождать логическое развитие процесса подготовки тектонического землетрясения. Каждые черты аномального изменения должны быть удовлетворительно объяснены этапами ранее принятой рабочей модели подготовки землнтрясения

Фактор приуроченности определенных видов и форм предвестниковых аномалий к определенным геолого-тектоническим регионам может быть использован в познании механизмов очага и предвестников землетрясений, а также в прогнозировании землетрясений. Природа среднепериодных геомагнитных предвестниковых аномалий связывается с изменением поля тектонических напряжений среды, где установлен регистратор предвестника.

Ключевые слова: аномалия, вариация, геомагнитное поле, предвестник, прогнозирование, землетрясение, активизированный разлом, чувствительность, деформация, напряжение.

Muminov M.Yu.

On forms and time features of medium-period geomagnetic earthquakes

Annotation. The configuration of the precursor anomaly of the temporal course or its dynamics must correspond to and accompany the logical development of the process of preparing a tectonic earthquake. At the same time, each feature of the anomalous change must be satisfactorily explained by the stages of the previously adopted working model of earthquake preparation.

The factor of confinement of certain types and forms of precursor anomalies to certain geological-tectonic regions can be used in the knowledge of the mechanisms of the source and precursors of earthquakes, and in earthquake prediction. The nature of mid-period geomagnetic precursor anomalies is associated with a change in the field of tectonic stresses in the medium where the precursor recorder is installed.

Key words: anomaly, variation, geomagnetic field, precursor, forecasting, earthquake, activated fault, sensitivity, strain, stress,

Предвестники землетрясений геофизических полей вызываются локальными процессами подготовки землетрясений. Они сопровождают и отражают именно этот процесс [1]. По Т. Рикитаке, «Вариации механических величин возбуждают изменения вторичных признаков немеханической природы... Последние порой на несколько порядков превосходят вариации вызвавших их деформаций, особенно при очень малых величинах» [2, с. 253]. Если учесть мнения ведущих уче-

ных по сейсмологии и прогнозированию землетрясений, геомагнитные предвестники действительно являются одним из наиболее чувствительным к геодинамическим процессам. При землетрясениях блоки земной коры (особенно межблочная среда) испытывают деформации, которые в свою очередь приводят к изменению физических свойств горных пород, находящихся в них. Изменение физических свойств горных пород вызывают вариации геомагнитного поля ΔT . Для объяснения образования вариаций ΔT использованы три теоретические модели: электрокинетическая, пьезомагнитная и изменения удельного электрического сопротивления горных пород вблизи области подготовки тектонического землетрясения [1-5]. Отдавая предпочтение третьей модели, рассмотрим конфигурации и временные особенности среднепериодных геомагнитных предвестников землетрясений. Из-за малой статистики обнаруженных оперативных, короткопериодных и долгопериодных геомагнитных предвестников землетрясений в данной работе особенности их проявления не рассматриваются.

В практическом прогнозировании любое аномальное изменение геомагнитного поля или любое изменение его конфигурации нельзя считать предвестником землетрясения. Конфигурация аномалии временного хода или её динамика должны соответствовать и сопровождать логическое развитие процесса подготовки тектонического землетрясения. Каждые черты аномального изменения должны быть удовлетворительно объяснены этапами ранее принятой рабочей модели.

Конфигурация геомагнитных предвестниковых аномалий землетрясений

Конфигурацию геомагнитных предвестниковых аномалий можно разделить на две группы: а) конфигурация предвестников, выявленных методами повторных профильных и площадных съемок; б) конфигурация предвестниковых аномалий, полученных на основе исследования непрерывных (или с определенной дискретностью) временных рядов геомагнитного поля на стационарной станции. Конфигурация предвестниковой аномалии или её видоизменение во времени воплощают в себе ценнейшую информацию, позволяющую в той или иной степени оценивать параметры ожидаемого землетрясения. При оценке времени возникновения землетрясений используются конфигурационные критерии: формирование, расформирование, завершение, формы, специфические формы и др. При определении места предстоящего землетрясения используются критерии: концентрация изолинии, их дифференциация по площади, направление градиентности площадных аномалий и другие динамические показатели. И наконец, при оценке силы землетрясения используются критерии: приуроченность определенных форм предвестниковых аномалий к землетрясениям с определенной силой и выше; формы, размеры проявления предвестниковой аномалии в пространстве и во времени и др.

Использование критерия «конфигурация» на практике способствует повышению вероятности и точности оценки прогнозируемых параметров землетрясения. В зависимости от применяемой методики оно позволяет определить время возникновения землетрясения от 5-7 суток до одного года, место – от первых сотен км² до размеров тектонических блоков различного ранга, силу $\pm 0,2 \div 1,0 M$ [6, 7]. Остановимся на характерных примерах критерия «конфигурация» предвестников, выявленных на геодинамических полигонах Узбекистана в 1973-2020 гг.

Конфигурация предвестников, выявленных методами повторных профильных и площадных съемок

Пример 1.

В нижеприведенном случае предвестники от сильного ($M = 6,8$) землетрясения проявились в виде 3-3,5-летнего бухтообразного понижения магнитного поля на пунктах № 47-50, расположенных в пределах Андижанской сейсмогенной зоны [6]. Последняя является северной границей крупного тектонического блока, ограниченной с юга Южно-Тянь-Шаньским глубинным разломом (рис. 1). Использовались магнитометры Т-МП, точность единичного измерения $\pm 0,1$ нТл. Частота повторных циклов наблюдений 1-3 раз в год.

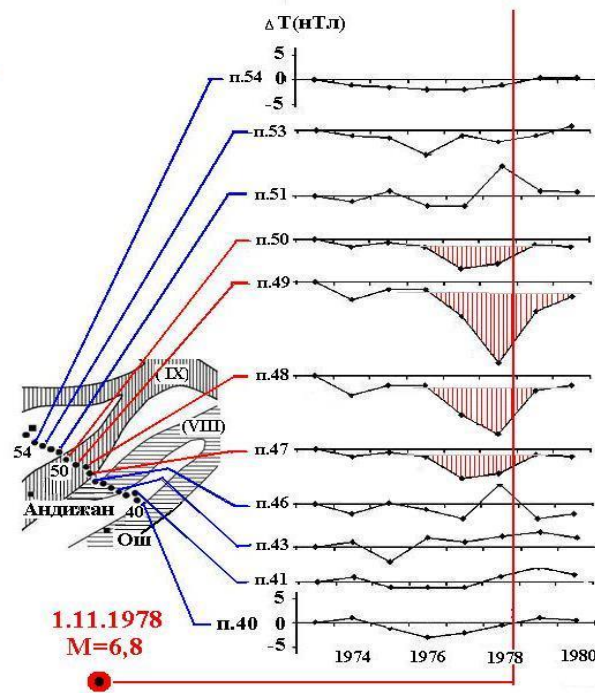


Рис. 1. Дифференциация предвестниковых аномалий магнитного поля (ΔT) по маршруту, пересекающую Южно-Ферганскую флексурно-разрывную зону и одноимённую 9-балльную сейсмогенную зону в 1973-1980 гг., связанная с Алайским землетрясением 1.11.1978 г. с $M = 6,8$.

Пример 2.

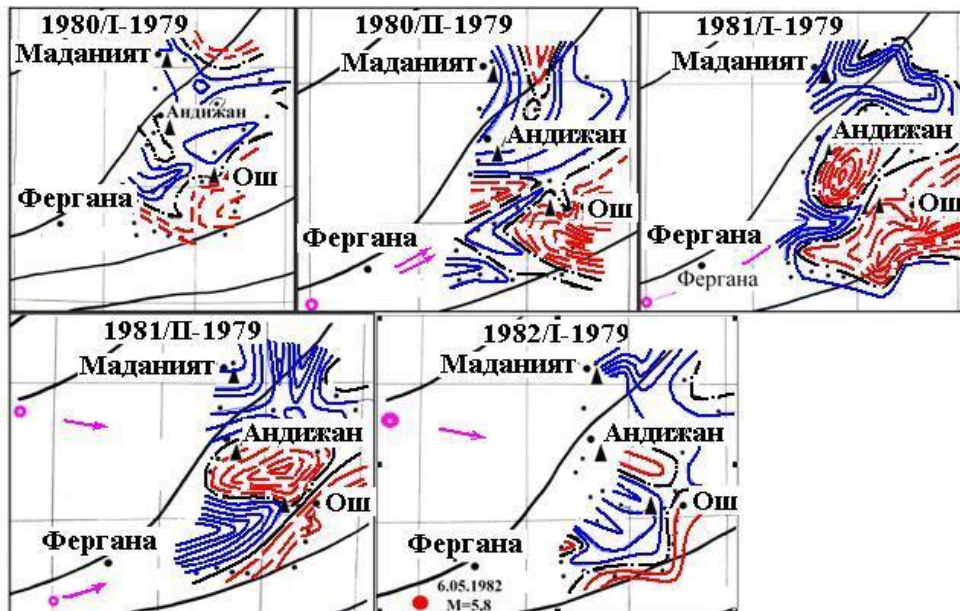


Рис. 2. Динамика предвестниковых аномалий магнитного поля на площади Ходжаабдского полигона в период подготовки и свершения Чимионского землетрясения 06.05.1982 г. [7-9]. Изолинии построены по средне-полугодовым значениям относительно уровня 1979 г.

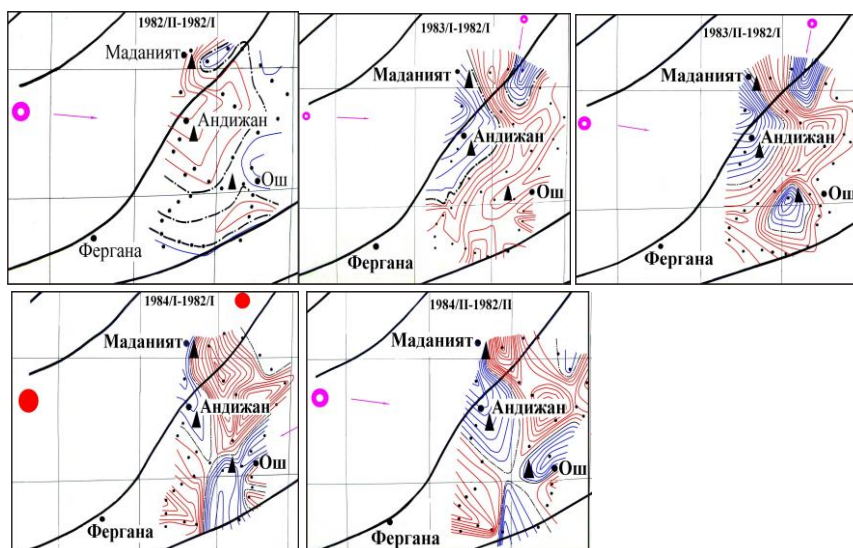


Рис. 3. Динамика предвестниковых аномалий магнитного поля на площади Ходжабадского полигона в период подготовки и свершения Папского землетрясения 7.02.1984 г. [7-9]. Изолинии построены по среднеполугодовым значениям относительно уровня 1981/ I полугодия.

Площадь исследования 50×70 км, 40 пунктов наблюдений, частота опроса 2 раза в месяц, использовались магнитометры Т-МП и МПП-1. Фрагменты изменения магнитного поля построены по полугодовым осреднённым значениям, изолинии ΔT проведены через 1,0 нТл относительно уровня 1979 г. и 1981 г. / I полугодия.

Анализ полученных карт показывает, что поле ($\delta \Delta T$) резко неоднородно, для него характерно наличие меняющихся в пространстве и времени положительных и отрицательных аномалий с поперечником в десятки километров и интенсивностью колебаний в области эпицентров от 1,0-2,0 до 6-8 нТл за 6 месяцев. Динамика аномального поля сопоставлена с сейсмической активностью района.

Формирование контрастных аномалий, зафиксированное на картах магнитного поля 1980, 1981 и 1982 гг. (рис. 2), совпало по времени с подготовкой очага Чимионского землетрясения 6.05.1982 г. $M = 5,5$, а разрядка, наступившая вслед за этим толчком, привела к полному распаду появившейся аномалии и восстановлению картины поля, близкой к исходной (1979 г.). Примерно аналогичная ситуация зафиксирована также в 1982, 1983 и 1984 гг. в период подготовки и свершения Папского землетрясения 17.02.1984 г. (рис. 3). Папское землетрясение в отличие от Чимионского произошло с запада относительно площади исследования. Формирование аномалии в период подготовки землетрясения и исчезновения ее во время толчка в обоих случаях позволяет следить за развитием очага и использовать этот момент распада аномалии для установления времени события. Пространственная динамика позволяет определить положение готовящегося очага, а размер территории, охваченной аномальными изменениями, и особенности проявления аномалии во времени – силу будущего землетрясения. Направление, противоположное направлению движения фронта аномалии, указывает на очаг землетрясения. Можно предположить, что пересечение нескольких векторов, построенных по материалам динамики аномальных фронтов для случаев, когда аномалия прослежена полностью, произойдет в районе готовящегося очага. Зная положения очага и расстояние, на которое переместился фронт при максимальном развитии аномалии, по экспериментальным зависимостям можем оценить силу надвигающегося землетрясения [8, 9] (рис. 2-4).

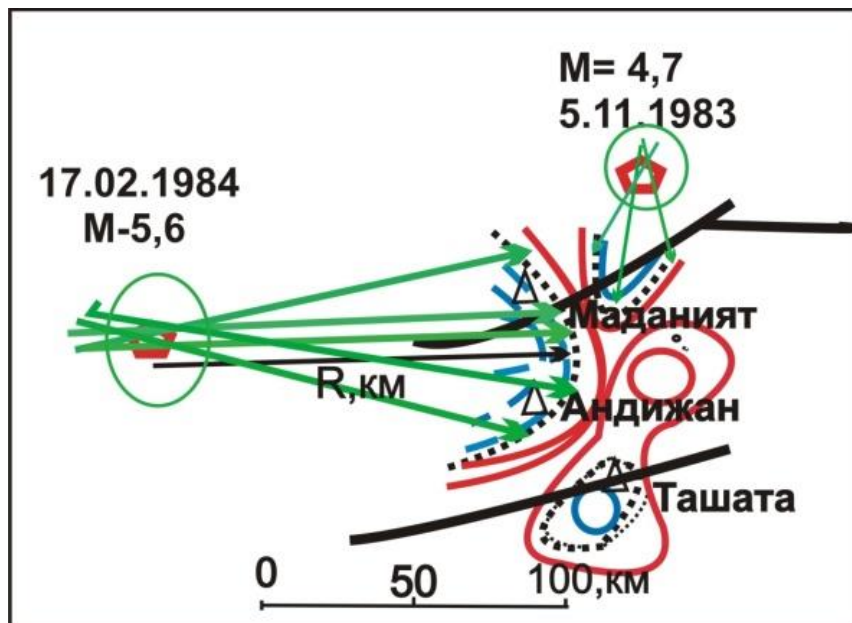


Рис. 4. Способ определения параметров землетрясения [27, 28] на примере Папского землетрясения 17.02.1984 г. Изолинии разностного поля ΔT (1983/II-1982/I) на Ходжабадском микрополигоне проведены через 2,0 нТл.

Временная зависимость длительности аномальных проявлений повторных наблюдений от силы землетрясения из-за малой статистики пока не установлена. Из-за редкости повторения циклов наблюдений фактор «длительности во времени» в них искусственно завышается относительно определений, полученных при аналогичной зависимости непрерывных наблюдений.

Конфигурации предвестников во временном ряду, выявленных методом непрерывных наблюдений на стационарных пунктах

Предметами изучения временного ряда геомагнитного поля являются среднесуточные разностные значения ΔT между рядовыми станциями и опорной (обсерватория Янгибазар). Для определения среднесуточных ΔT привлекались почасовые (24 значений) или замеры с дискретностью через 10 минут (144 значений в сутках).

Использовались протонные магнитометры МПП-1, МВ-01 и GSM-19Т. Точность единичного измерения всех типов магнитометров $\pm 0,1$ нТл. Среднеквадратическое отклонение среднесуточного значения ΔT от среднемесячного для разных станций колеблется в пределах $\sigma_{\text{ср}}^2 = \pm 0,3 \div 1,0$ нТл.

Многолетними исследованиями установлено, что стационарные непрерывные наблюдения имеют преимущество перед повторными наблюдениями в исследовании детального временного ряда и обнаружения различных конфигураций предвестниковых геомагнитных аномалий. Но по площади исследования они относительно ограничены из-за редкости сети наблюдений. В период 40-летних исследований временных рядов вариации геомагнитного поля на стационарных станциях обнаружены в основном три формы среднепериодных предвестниковых аномалий: бухтообразные, специфические ступени и изменение направленности трендового составляющего временного разностного ряда (ΔT) магнитного поля. На рис. 5 приведены характерные примеры проявления бухтообразных геомагнитных предвестниковых аномалий.

1. Бухтообразные предвестники. Самыми часто выявляемые (обнаруживаемые) среди среднепериодных предвестников землетрясений геомагнитного поля – бухтообразные. Доля их от общего числа предвестников составляет примерно 80% случаев. Поэтому достаточность зарегистрированных случаев позволила значимо установить некоторые зависимости и особенности их прояв-

ления. Конфигурация, интенсивность, длительность и площади распространения их во времени и в пространстве различны, далее остановимся на них.

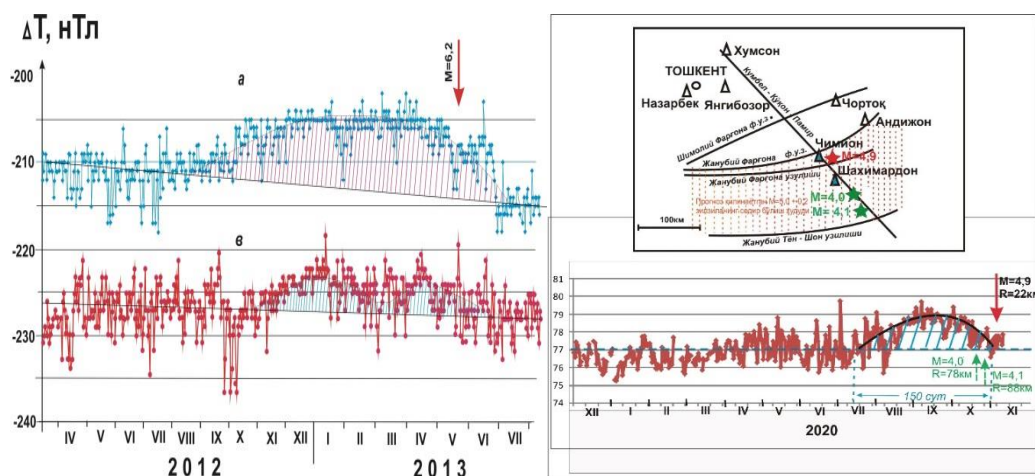


Рис. 5. Примеры проявления геомагнитных бухтообразных предвестниковых аномалий землетрясений на станциях: слева – Бухара (а), ст. Шурчи (в) и ст.Чимион(справа), связанные соответственно с Маржанбулакским 2013 г. с $M = 6,2$ и Вуадильскими 2020 г. $M = 4,9$ землетрясениями.

Бухтообразные геомагнитные предвестники по форме очень схожи с модельными формами процесса подготовки тектонического землетрясения, особенно с консолидационной моделью подготовки тектонического землетрясения И.П.Добровольского [1]. Отличительным моментом формы наблюдаемых геомагнитных предвестников от формы приращений упругой потенциальной энергии (ΔW) зоны подготовки в модели И.П.Добровольского является отсутствия резкого понижения геомагнитного поля во время акта землетрясения (рис. 6).

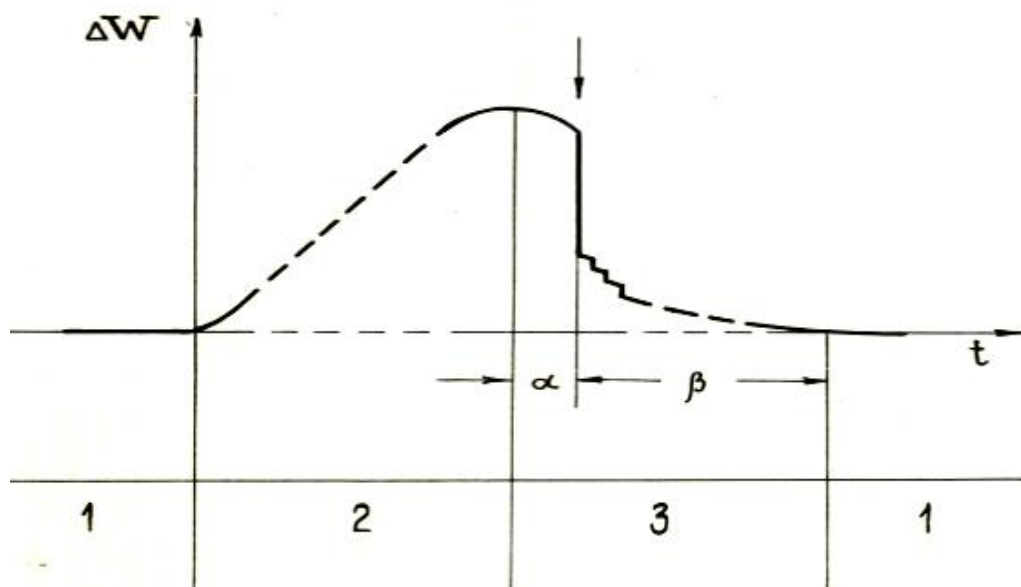


Рис. 6. Схема процесса подготовки и протекания землетрясения по консолидационной модели [1]. ΔW – приращение упругой потенциальной энергии зоны подготовки, t – время, 1 – фаза регулярного состояния, 2 – фаза консолидации, 3 – фаза разрушения, α – стадия начала фазы разрушения до магистрального разрыва, β – стадия афтершоковой деятельности.

Вероятную причину этого расхождения можно объяснить мыслями того же И.П.Добровольского. Он отмечает: «К началу α -стадии (или фазы разрушения) среда накапливает огромную, по сравнению с сейсмической энергией будущего землетрясения, упругую потенциальную энергию. Поскольку сейсмический потенциал КПД оценивается величиной в несколько процентов, то приходим к выводу, что приращение упругой потенциальной энергии примерно на 1,5-2 порядка превосходит сейсмическую энергию будущего землетрясения» [1, с. 43]. Возможно, поэтому в нашей практике исследования ни разу не были отмечены такие резкие понижение геомагнитного поле, т. е. снятая сейсмическая энергия (из-за незначительности относительно накопленной фоновой плюс фазы консолидации) не смогла вызвать какие-либо изменения в наблюдаемом магнитном поле. Еще одним ярким примером к вышесказанному можно привести результаты наблюдений над очагом сильнейшего Газлийского землетрясения (M-7,3) 1976 г., где не был отмечен переход от α -стадии к β -стадии или же эффекты, связанные с перемещением больших масс (рис. 6а).

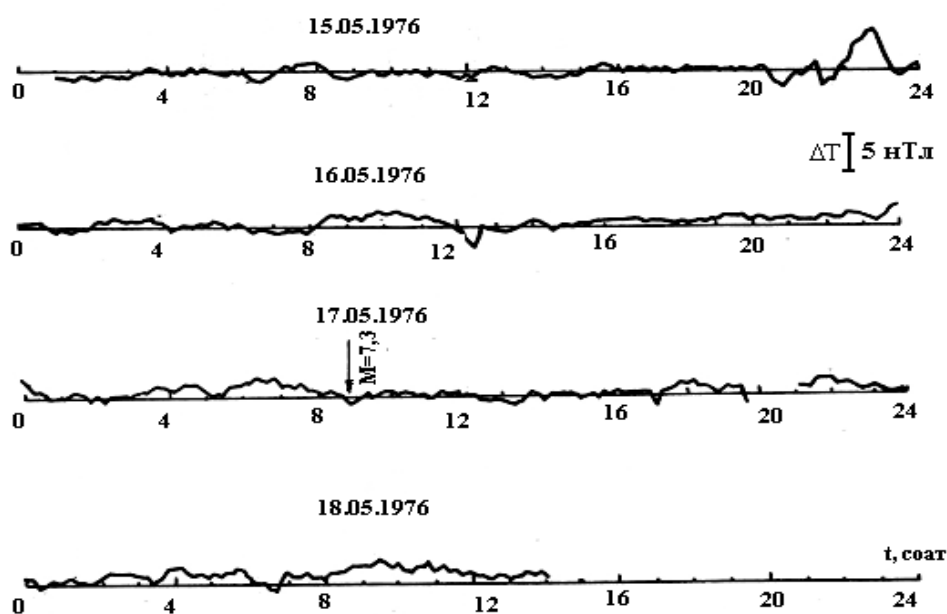


Рис. 6а. Изменения геомагнитного поля, наблюдаемые над эпицентром сильного Газлийского землетрясения 17.05.1976 г. с $M = 7,3$ до, в момент и после него.

На вопрос, в какой же момент должно произойти землетрясение, Добровольский [1] отвечает: “Эмпирические данные показывают, что этот момент неопределен: землетрясения возникают иногда почти без спада амплитуды предвестника, т. е. в самом начале α -стадии (или в конце фазы консолидации), после некоторого спада амплитуды и даже после возвращения предвестника к фоновому уровню. Когда землетрясение происходит на спаде, то ему предшествует растрата какой-то части накопленной энергии, или вспомнить, что накопленная энергия в 30-100 раз превосходит сейсмическую энергию, то потеря даже половины накопленной не фатальна” [1, с. 46]. На счет неопределенности момента возникновения землетрясений имеется некоторое иное мнение. Дело в том, что нами по результатам 36 случаев фактически выявленных геомагнитных предвестниковых аномалий землетрясений, исследовались вероятные моменты их возникновения. Оказалось, что основные толчки землетрясения возникают, как отмечают многие исследователи, в основном от начала фазы разрушения до полного его возвращения к фоновому уровню и даже, редко после него.

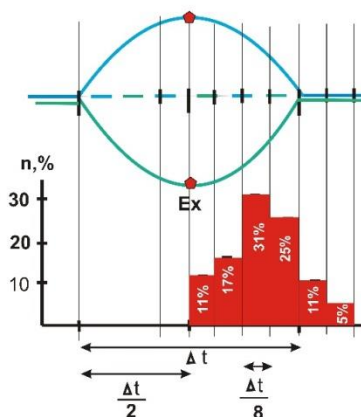


Рис. 7. Вероятностное время возникновения землетрясения в зависимости от стадии развития средне-периодной бухтообразной геомагнитной предвестниковой аномалии (из 36 случаев в процентах). Пятиугольник – экстремум (Ex) положительной или отрицательной предвестниковой аномалии; Δt – длительность проявления предвестниковой аномалии.

По нашим данным, наиболее вероятными ($31\%+25\% = 56\%$ случаев) временем возникновения землетрясения являются заключительные периоды фаз разрушения (рис. 7). Относительно меньшая доля землетрясений происходит в первой половине фазы разрушения, и малая часть землетрясений – в периоды восстановления фонового уровня, после фазы разрушения [10]. Схожесть форм наблюдаемых бухтообразных предвестниковых аномалий магнитного поля и приращения упругой потенциальной энергии в моделях подготовки тектонического землетрясения [1], лишний раз указывает на то, что источниками среднепериодных предвестниковых аномалий магнитного поля являются именно изменения упругой потенциальной энергии в процессе подготовки тектонического землетрясения. В пользу последнего можно привести следующие особенности проявления различных предвестниковых полей. Сравнение зависимости длительности проявления от силы землетрясения различных предвестниковых полей с геомагнитными (рис. 8) указывает на близость выявленных зависимостей деформационного поля (наклоны земной поверхности) $\lg \Delta t_a = 0,26M + 0,63$ [11] с геомагнитными $\lg \Delta t_a = 0,27M + 0,84$ [6]. Близкая синхронность проявления этих двух независимо регистрируемых параметров на геодинамических полигонах Узбекистана указывает на общность их источников, т. е. примерно одинакового отклика их к приращениям упругой потенциальной энергии (ΔW) в зоне подготовки землетрясения.

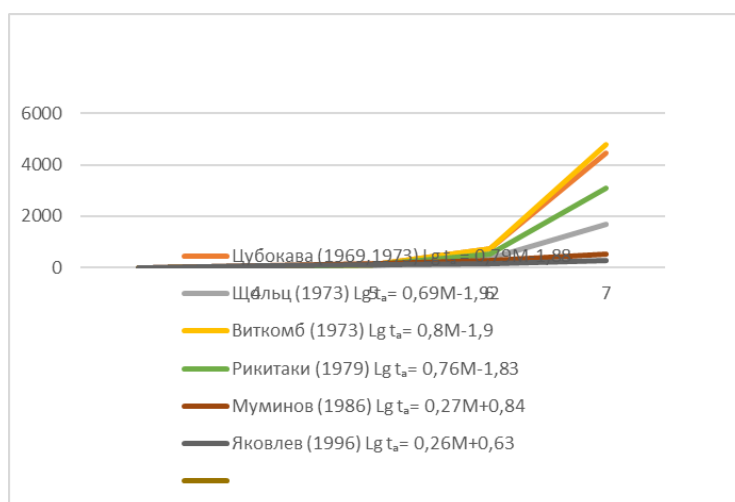


Рис. 8. Сравнение зависимостей длительности проявления различных предвестниковых полей (сутки) от силы землетрясения. 2. Предвестники формы «специфической ступени».

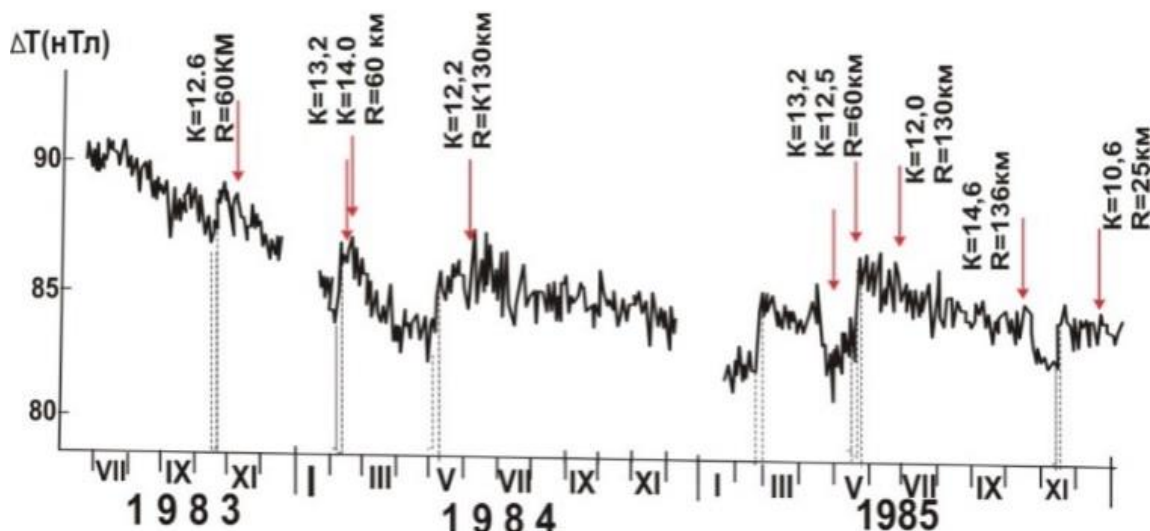
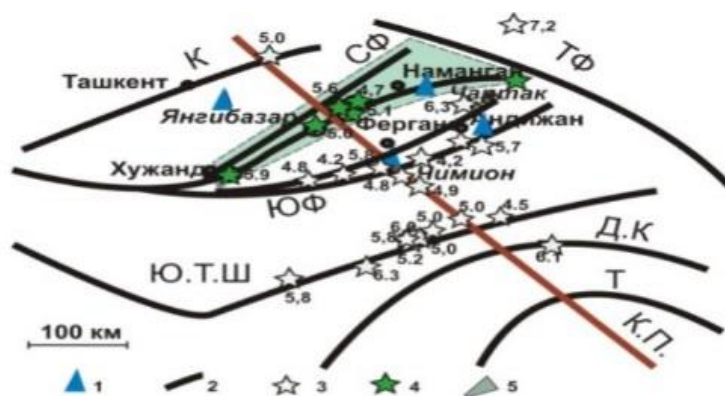


Рис. 9. Ступенчатые специфические предвестниковые аномалии землетрясений с $M \geq 4,5$, наблюдаемые на ст. Чартак, и зона чувствительности станции на них. 1 – магнитометрические станции; 2 – разломы; эпицентры землетрясений: 3 – от которых не зарегистрированы предвестники, 4 – от которых зарегистрированы предвестники; 5 – зона чувствительности станции, землетрясений с $K \geq 12$ ($M \geq 4,5$).

2. Ступенчатые специфические предвестниковые аномалии геомагнитного поля по форме соответствуют своему названию – ступени. Специфичность их заключается в том, что на фоне трендового изменения (или без трендовых изменений) в течение 3-7 суток отмечается резкое повышение (или понижение) магнитного поля на рядовой прогностической станции. Этот повышенный уровень может продолжаться от нескольких суток до первых месяцев. В период этого повышенного уровня обычно возникают землетрясения с $K \geq 12,0$, $M \geq 4,5$ в зоне чувствительности прогностической станции. Обычно предвестники формы специфической ступени наблюдаются перед землетрясениями, происходящими в определенной области и с определенной силой ($M \geq 4,5$). Ступенчатые предвестники часто обнаруживаются на ст. Чартак (рис. 9), реже, на станциях Коканд, Чаркесар и Хумсан [6]. Большинство этих станций расположены по краям Чаткальского блока, над массивами коренных пород. Станция Коканд расположена в эпицентре Кокандской региональной магнитной аномалии, обусловленной габбро-диоритовым массивом повышенной намагниченности, размерами 40×50 км, глубиной 5-6 км.

О существовании предвестников ступенчатой формы приводится достаточно примеров в книге Т.Рикитаке «Прогнозирование землетрясений» (1979) [2]. В частности, он пишет «...в продолжении периода наблюдений, длившегося несколько лет, было зафиксировано приблизительно

30 примеров ступенек сопротивления. Такая ступенька была связана даже землетрясением, имевшим магнитуду $M=7,9$ и произошедшем у восточного побережья о. Хоккайдо на расстоянии свыше 1000 км. Теперь становится ясно, что эти скачки сопротивления представляют собой не что иное как скачки деформации, которые улавливаются приборами высокой чувствительности» [2. стр. 240 и 241]. Здесь речь идет о довольно быстротечных ступеньках электросопротивления и деформации относительно медленно образуемых геомагнитных ступенек. Такое расхождение времени образования ступенек в настоящем трудно объяснить каким-либо механизмом.

3. Предвестники в виде изменения угла трендовой составляющей временного разностного ряда (ΔT) магнитного поля.

Предвестники формы «изменении угла трендовой составляющей временного хода» отмечены в основном на станциях Восточной Ферганы. Характерным примером для этой группы предвестниковых аномалий являются полученные Т.Хаджиевым и др. [12] результаты стационарных исследований на Андижанском полигоне (рис. 10).

Отмеченные изменения угловых коэффициентов в какой-то мере схожи со стадией предвестникового хода ступенчатых специфических аномалий, обнаруженных на станциях Чартак, Хумсан и Коканд. Но, как видно из рис. 10, в отличие от 3-10-суточных ступенчатых аномалий, изменение углового коэффициента трендовой составляющей прослеживается в течение нескольких месяцев.

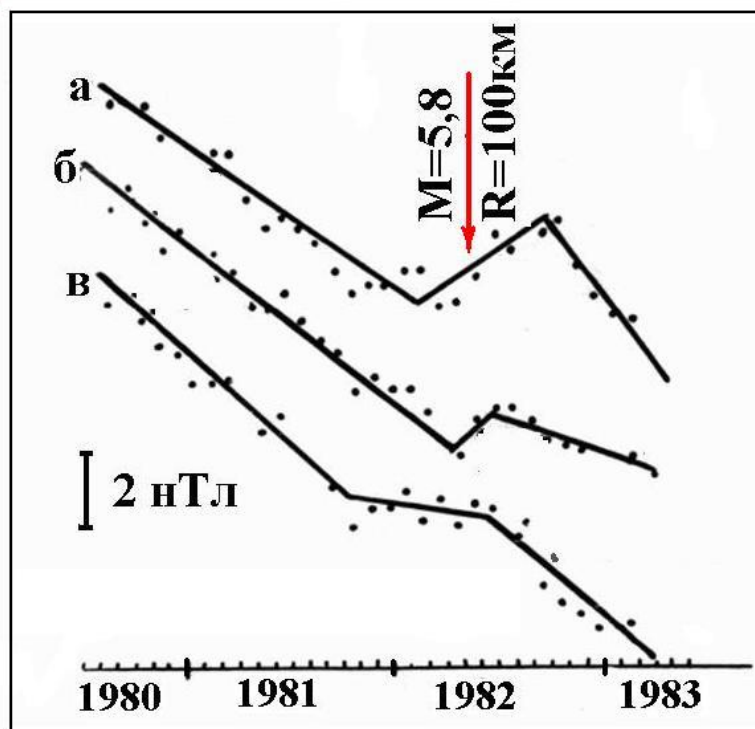


Рис. 10. Ход среднемесячных значений ΔT на станциях Маданият (а), Андижан (б) и Тошата (в) относительно обсерватории Янгибазар [12]. Стрелкой указан момент Чимионского землетрясения 06.05.1982 г. с $M = 5,8$.

Схема расположения стационарных геомагнитных прогностических станций Института Сейсмологии АН РУз и дифференциация наиболее часто регистрируемых форм среднепериодных предвестниковых аномалий на них приведена на рис. 11. Так, предвестниковые аномалии бухтообразной формы обнаруживаются на всех магнитометрических станциях Узбекистана, кроме ст. Чартак, Чаркесар и Коканд. Последние, находясь в Центральной и Северной части Ферганской долины, расположены в геолого-тектоническом отношении на окраине Чаткало-Кураминского блока, над массивами коренных пород. Отметим что на станции Хумсан, расположенной в северо-восточной части Чаткало-Кураминского блока, наблюдаются предвестниковые аномалии землетрясений как бухтообразной, так и специфической ступенчатой формы. На

магнитометрических станциях Восточной Ферганы (Андижан, Маданият и Ташота) также выявлены двойные предвестниковые ходы в виде различных бухт и изменения угла трендовой составляющей разностного поля ΔT [12].

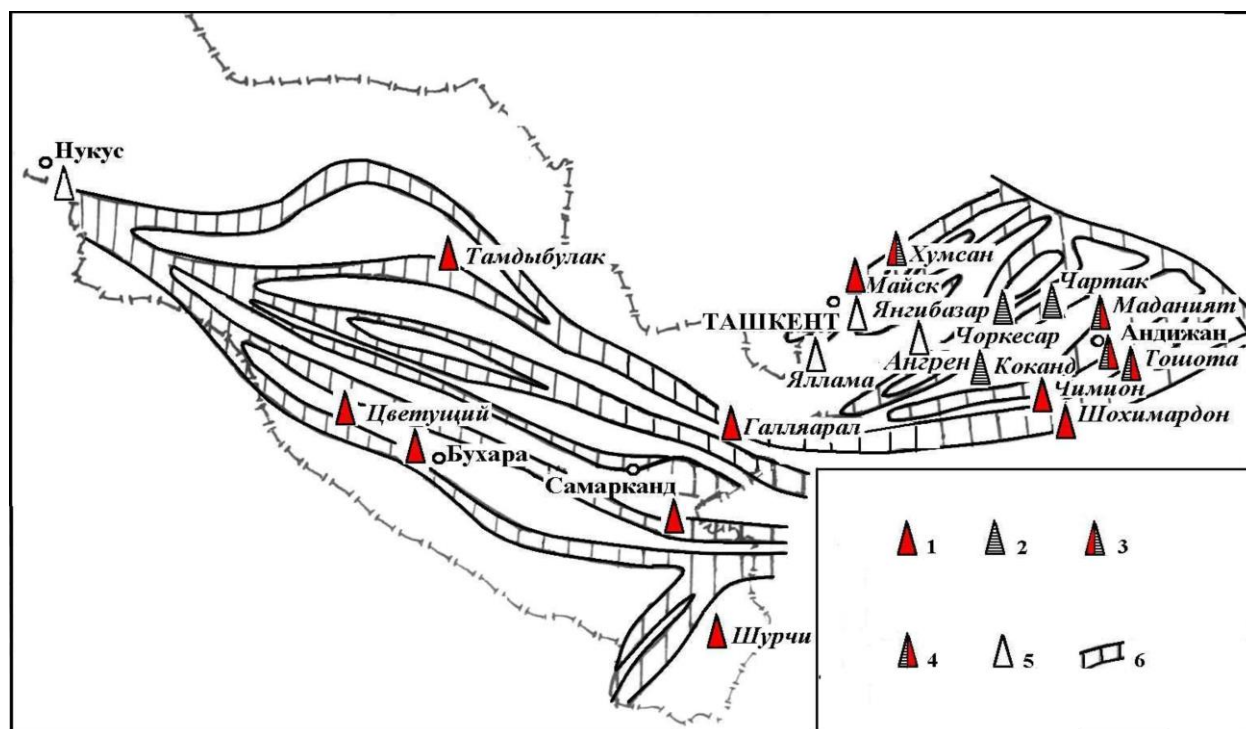


Рис. 11. Существующая сеть стационарных геомагнитных наблюдений Узбекистана в начале 2000 г с дифференциацией наиболее часто встречаемых форм предвестниковых аномалий землетрясений. Характерные формы аномальных проявлений: 1 – бухтообразные; 2 – специфические ступени; 3 – бухтообразные и специфические ступени; 4 – изменение трендового составляющего; 5 – в период функционирования предвестники не обнаружены; 6 – сейсмогенные зоны, по Р.Н.Ибрагимову и др.

На рис. 11 также приведено месторасположение магнитометрических станций, в период функционирования которых ни разу не были выявлены предвестниковые аномалии. Это obs. Янгибазар, функционирующая более 50 лет, и ст. Ангрэн и Яллама, функционировавшие сравнительно недолго, соответственно 1-1,5 года.

Среднепериодные бухтообразные предвестниковые аномалии, в зависимости от геолого-геофизических особенностей расположения прогностических станций их обнаружения, распределены таким образом: ст. Чимион – 10 случаев; ст. Бухара – 6 раз; ст. Цветущий – 5 раз; ст. Хумсан и Шурчи – по 3 раз; ст. Майск, Бахмал (Галляарал), Андижан, Маданият, Тамдыбулак – по 2 раза; ст. Самарканд (Каратепо), Ташота – по 1 разу.

Предвестники специфически ступенчатой формы обнаружены на ст. Чартак 6 раз, Хумсан и Коканд – по 1 разу [6].

Предвестники в виде изменения угла трендовой составляющей разностного поля ΔT были обнаружены станциями Андижан, Ташота и Маданият, возможно связанные с Чимионским землетрясением $M = 5,8$ 1982 г. [12].

Повышенную чувствительность ст. Чимион можно объяснить удачным месторасположением её, в районе пересечения активных Южно-Ферганской флексурно-разрывной зоны и Южно-Ферганского разлома с зоной не менее активного Кумбель-Коканд-Памирским линейментом и нахождением этой станции в зоне повышенной электропроводности Южно-Тянь-Шаньской региональной зоны аномальной электропроводности [13]. А повышенная чувствительность магнито-

метрических станций Цветущий и Бухара связывается расположением их в зоне динамического Влияния Южно-Тянь-Шаньского разлома. Чувствительность ст. Чартак, Хумсан и др. – с относительно менее активными тектоническими единицами.

Теперь остановимся на возможных механизмах образования различных форм геомагнитных предвестников и приуроченности их к определенным геологическим регионам.

В работах К.Моги [3], К.Аки [14], Х.Канамори [15] и др. говорится о том, что **неоднородность земной коры – важный фактор, определяющий характер возникновения землетрясений, в т. ч. их предвестников**. Согласно проведенным лабораторным экспериментам К.Моги [3] и предложенным моделям Добровольского [2], К.Аки [14], Х. Канамори [15], различия в типе сейсмической активности, прежде всего – следствие неоднородности земной коры в том месте, где возникает землетрясение, или следствие неоднородного распределения напряжений в этом месте. Вышесказанные мнения справедливы в отношении к различиям форм и особенностям проявления предвестников землетрясений.

Для объяснения природы среднепериодных геомагнитных предвестников различных конфигураций попробуем использовать фактор дифференциации их по площади (см. рис. 11). Как уже отмечали выше, **бухтообразные** предвестники в основном фиксируются преимущественно на станциях, расположенных в зонах динамического влияния сейсмоактивных разломов и флексурно-разрывных зон, в зонах с аномальной электропроводностью, т. е. в тех местах, где среда относительно раздроблена, разуплотнена и более склонна к изменению своих физических параметров от сеймотектонического воздействия [6]. Если в среде присутствует поровая жидкость, изменение поля напряжений приводит к изменению электропроводности или другим механоэлектрическим преобразованиям (пьезоэлектрические, электрокинетические и др.) [2, 4], что в свою очередь приведет в итоге к изменению напряженности геомагнитного поля. Форма предвестников синхронно приобретает приблизительно традиционную форму бухты поля напряжения, как у модели подготовки тектонического землетрясения Добровольского [1]. Значит форма изменения магнитного поля приблизительно копирует форму изменения поля напряжения процесса подготовки землетрясения.

Форма и природа предвестниковых аномалий в виде «**специфической ступени**» необычная и она приближенно может быть объяснена барьерной моделью К.Аки [14] или модели шероховатости Х.Канамори [15]. Согласно Моги [3], район наиболее частого проявления предвестника в виде специфической ступени – Чаткальский мегаблок (ст. Хумсан, Чаркесар, Чартак) и ст. Коканд, расположенная над габбро-диоритовым массивом, относится ко второму – умеренному типу структурной неоднородности среды или степени неоднородности напряжений, тогда как бухтообразные предвестники приурочены к третьему типу – крайне неоднородным случаям. Скачкообразное повышение напряжения и соответственно магнитного поля можно объяснить резким прерывистым проскальзыванием по существующему разлому [16]. Поведение поля после резкого скачка, на повышенном уровне до возникновения землетрясения и после, трудно объясняется каким-либо механизмом. На этот счет пока не имеем определенного мнения.

В отношении природы подобных предвестниковых аномалий (ходов) в виде **изменения угла трендовой составляющей** пока также нет однозначного мнения. Изменение угла трендовой составляющей, по-видимому, является наложением аномального эффекта от определенного землетрясения на региональную составляющую градиента векового хода магнитного поля. Поэтому выделение подобных форм как отдельного типа проявления предвестника может на сегодняшний день не иметь резкого основания!

Таким образом, выше мы попытались сгруппировать предвестниковые аномалии землетрясений по методике их регистрации и по форме проявления. При этом уделяли основное внимание наиболее часто встречающимся бухтообразным и скачкообразным (специфическим ступеням) формам предвестников. Хотя имевшие место эпизодически обнаруживаемые другие формы будут предоставлять не меньший интерес в познании природы сеймотектонического процесса и его предвестников.

В заключение отметим следующее:

- конфигурация предвестниковой аномалии временного хода или её динамика должны соответствовать и сопровождать логическое развитие процесса подготовки тектонического землетря-

сения. Каждые черты аномального изменения должны быть удовлетворительно объяснены этапами ранее принятой рабочей модели подготовки землетрясения;

- проведенная классификация геомагнитных предвестников предварительная и нуждается в доработке по мере выявления новых значимых предвестниковых аномалий;

- фактор приуроченности определенных видов и форм предвестниковых аномалий к определенным геолого-тектоническим регионам может быть использован в познании механизмов очага и предвестников землетрясений, а также в прогнозировании землетрясений.

Литература

1. Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. - М.: Наука, 1984. - 188 с.
2. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. - М.: Мир, 1979. - 338 с.
3. Мого К. Предсказание землетрясений. - М.: Мир, 1988. - 382 с.
4. Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. - М.: Наука, 1978. - 232 с.
5. Абдуллабеков К.Н. Электромагнитные явления в земной коре. - Т.: Фан, 1989. - 232 с.
6. Муминов М.Ю. Типизация геомагнитных предвестников землетрясений // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. - Т.: ИС АН РУз, 2012. - № 9. - С. 26-35.
7. Абдуллабеков К.Н., Муминов М.Ю. Прогностические критерии и возможности использования их в прогнозировании параметров землетрясений // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. - Т.: ИС АН РУз, 2013. - № 10. - С. 22-28.
8. Трапезников Ю.А. Пространственно-временные изменения магнитного поля в Восточной Фергане – отражение динамики сеймотектонического процесса региона // ДАН СССР, 1991. - Т. 316. - № 4. - С. 879-883.
9. Муминов М.Ю., Абдуллабеков К.Н., Шапиро В.А., Хаджиев Т. Зилзилани олдиндан айтиш усули (Способ прогнозирования землетрясений) Авторлик гувоҳнома N 1845 Уз РФТДК Давлат патент идораси, Расмий ахборотнома. - Т., 1994. - № 2. - 86 бет.
10. Муминов М.Ю., Сагдуллаева К.А., Нархаджаева Н.М., Мирзоидов М.З. Аномальные вариации геомагнитного поля в сейсмоактивных районах Узбекистана // Проблемы сейсмологии. - Т.: ИС АН РУз, 2021. - № 1. - Т. 3. - С. 24-37.
11. Яковлев В.Н., Яковлева И.В., Барабохина Г.П. Статистический анализ деформаций предвестников землетрясений // Информационное сообщение АН УзССР № 253. - Т.: Фан, 1981. - 12 с.
12. Хаджиев Т.Х., Трапезников Ю.А., Абдуллабеков К.Н., Сквородкин Ю.П. Магнитные эффекты удаленных сильных землетрясений на Андижанском полигоне // Узб. геол. журн. - 1984. - № 4. - С. 26-28
13. Муминов М.Ю., Абдуллабеков К.Н., Сагдуллаева К.А. Особенности проявления геомагнитных предвестников на прогностической станции Чимион // Геология и минеральные ресурсы. - 2012. - № 3. - С. 43-50.
14. Aki K. Characterization of barriers on an earthquake fault // J. Geophys. Res. - 1977. - № 84. - P. 1640-1648.
15. Kanamori H. The nature of seismicity patterns before major earthquakes. In "Earthquake Prediction". Maurice Ewing Series IV (D.W.Simpson and P.G.Richards, eds.). - Am. Washington, D. C., 1981.
16. Byerlee J.D., Bract W.F. Stick – slip, stable sliding and earthquakes – effect of rock type, pressure, strain rate and stiffness // J. Geophys. Res. - 1968. - № 73. - P. 6031-6037.

SEYSMOTЕКТОНІКА VA GEODINAMIKA

УДК 550.34

Ю.М. Садыков, У.А. Нурматов, З.Ф. Шукуров, У.А. Юсупжанова,
Н.Ш. Равшанов, И. Камбаров

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

К СЕЙСМОТЕКТОНІКЕ СЕВЕРО-НУРАТИНСКОГО РАЗЛОМА (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ УЗБЕКИСТАН)

Sadikov Yu.M., Nurmatov U.A., Shukurov Z.F., Yusupjanova U.A., Ravshanov N.Sh., Kambarov I.
Shimoliy Nurota yer yorig'i seysmotektonikasiga doir (markaziy O'zbekiston)

Annotatsiya. Maqolada Shimoliy Nurota yer yorig'iga taaluqli fond ma'lumotlari va amlga oshirilgan zamonaviy geologik va geofizik tadqiqotlar natijalari umumlashtirib kompleks taxlil qilish natijalari keltirilgan. Olingan natijalar yer yorig'ining bugungi kunda tektonik faolligini va seysmik jixatdan xavfli ekanligini tasdiqladi.

Kalit so'zlar: seysmik, zilzila, er qobig'ining uoriglari, tektonika, uangi davr harakatlari, zamonaviy harakatlar.

Садыков Ю.М., Нурматов У.А., Шукуров З.Ф., Юсупжанова У.А., Равшанов Н.Ш., Камбаров И.
К сейсмостектонике Северо-Нуратинского разлома (Центральный Узбекистан)

Аннотация. Обобщены и проанализированы данные по Северо-Нуратинскому разлому, основанные на результатах предыдущих и современных геолого-геофизических исследований, включая результаты полевых наблюдений. Проведенные исследования показали современную тектоническую активность и долгосрочную сейсмическую опасность данного разлома.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясение, разломы земной коры, тектоника, новейшие движения, современные движения.

Sadykov Yu.M., Nurmatov U.A., Shukurov Z.F., Yusupjanova U.A., Ravshanov N.Sh., Kambarov I.
To seismotektonik of the north Nurata fault (Central Uzbekistan)

Annotation. Summarized and analyzed data on the North Nuratinsky fault, based on the results of previous and modern geological and geophysical studies, including the results of field observations. The studies have shown modern tectonic activity and long-term seismic danger of this fault.

Key words: seismicity, earthquake, faults of the earth's crust, tectonics, the latest movements, modern movements.

Введение. Одним из сейсмостектонически значимых разломов Центрального Узбекистана является Северо-Нуратинский разлом северо-западного простирания, осложняющий северо-восточную прибортовую часть Нуратинского поднятия, являясь тектонической границей поднятия и краевой части Сырдарьинской впадины.

Краткая характеристика объекта исследования. Нуратинское поднятие сложено докембрийскими отложениями с породами девона, карбона, силура. Краевая часть Сырдарьинской впадины относится к категории закрытых территорий и покрыта верхнечетвертичными отложениями, состоящими из галечников, конгломератов, брекчий, щебня, супесей, песков, перекрывающих лесовые породы.

Обсуждение результатов сейсмостектонического анализа. На палеозойских породах Нуратинского поднятия и в пределах краевой части Сырдарьинской впадины выделяются разломы нескольких направлений: северо-восточные, субмеридиональные и северо-западные. Северо-восточные разломы выделяются в основном по геофизическим данным. Субмеридиональные разрывные нарушения на площади развиты в меньшей мере, чем северо-восточные разломы. Северо-западные разрывные структуры трассируются уверенно всеми способами геологического и геоморфологического анализа. Четко выделяются на материалах аэрокосмической съемки.

На рис. 1 приведена схема геологического строения Кызылкумско-Нуратинского глубинного разлома [1]. Согласно легенде вышеприведенной схемы, на ней изображены породы

палеозойского стратиграфического комплекса и их контакты: разрывные нарушения; «шовная зона» разлома; разломы по геофизическим зонам; скрытые разломы фундамента; границы контрастных аномалий гравитационных и магнитных полей; контакты выходов домезозойских пород. Отметим, что все линейные элементы, выделенные на данной схеме, согласны простиранию Северо-Нуратинской шовной зоны и характеризуют домезозойское напряженное состояние исследуемого района.

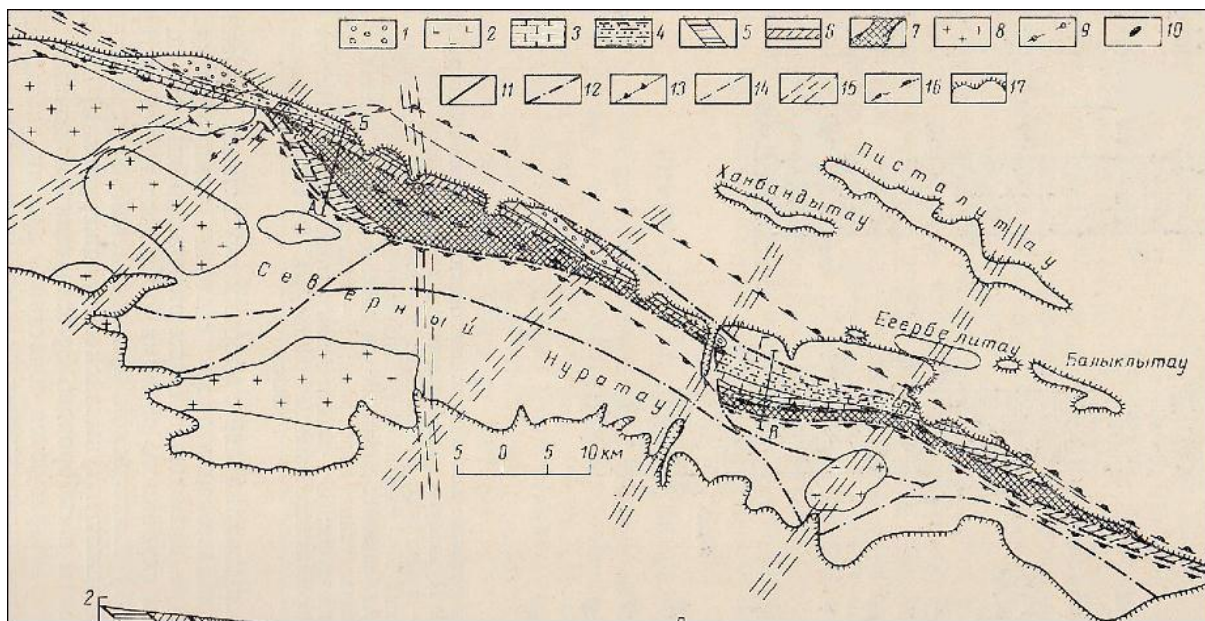


Рис. 1. Схема геологического строения Кызылкумско-Нуратинского глубокого разлома [1]. 1 – красноцветные молассы (форишская свита, S_3-P_1); 2 – базальтовые и диабазовые порфириды (чимкурганская свита, S_1n); 3 – известняки (S_2-D_1); 4 – песчаники, сланцы (S_2); 5 – сланцы, песчаники, глыбы известняков (S_2); 6 – глинистые сланцы, песчаники, туфы андезит-дацитового и альбитового состава (S_1); 7 – туфы, туффиты, граувакки, известняки и кварциты (иттунсайская свита, $Rj(u)$); 8 – гранитоиды; 9 – дайковый пояс; 10 – офиолиты; 11 – стратиграфические контакты; 12 – разрывные нарушения; 13 – «шовная зона»; 14 – разломы по геофизическим зонам; 15 – скрытые разломы фундамента; 16 – границы контрастных аномалий гравитационных и магнитных полей; 17 – контакты выходов домезозойских пород.

По материалам геофизики [1] и данным анализа речной сети [2], выделяются разломы северо-восточного, меридионального и северо-западного простираний ниже рангом, чем Северо-Нуратинский. Разломы, выделенные по геофизическим данным, носят скрытый характер и не проявляются на осадочных отложениях, залегающих выше фундамента. Анализ речной сети района Северо-Нуратинского разлома позволил выделить разломы, имеющие корреляцию с речной сетью; разломы, имеющие предположительную или нечеткую корреляцию с речной сетью; главные разломы района (цифры на рис. 2: 1 – Тузканский; 2 – Писталитауский) [2]. Так, выделяются северо-западной, северо-восточной, субширотной и субмеридиональной ориентации. Проведенный нами анализ показал необходимость критического восприятия этой схемы, так как не все разломы соответствуют современным данным по разломной тектонике. Например, разломы Тузканский и Писталитауский не носят ранг главных. К северо-востоку от Писталитау расположено озеро Айдаркул и Тузканский разлом не может быть выделен использованным способом. На северо-восточном борту Нуратинского поднятия практически отсутствует речная сеть субмеридионального простирания.

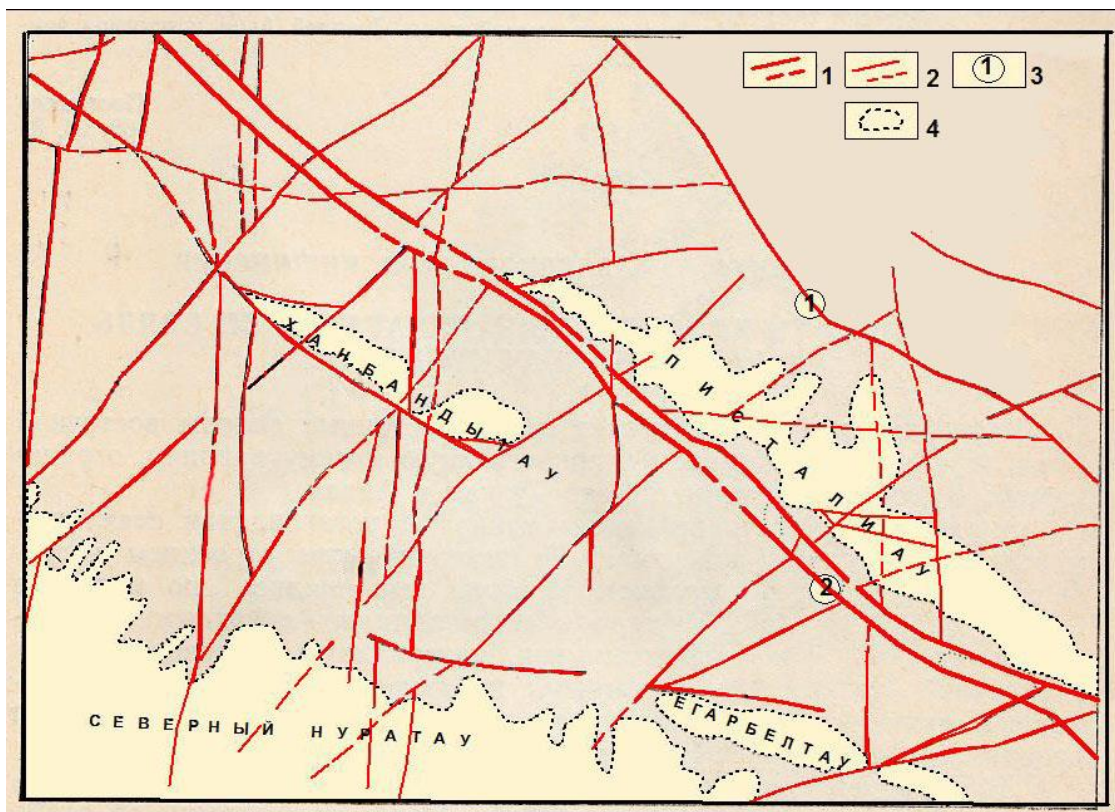


Рис. 2. Схема расположения разломов северных предгорий хр. Нуратау, по данным анализа речной сети [2]. 1 – разломы, имеющие четкую корреляцию с речной сетью; 2 – разломы, имеющие предположительную или нечеткую корреляцию с речной сетью; 3 – главные разломы района (цифры на рисунке: 1 – Тузканский; 2 – Писталитуский); 4 – контуры выходов пород складчатого комплекса на дневную поверхность.

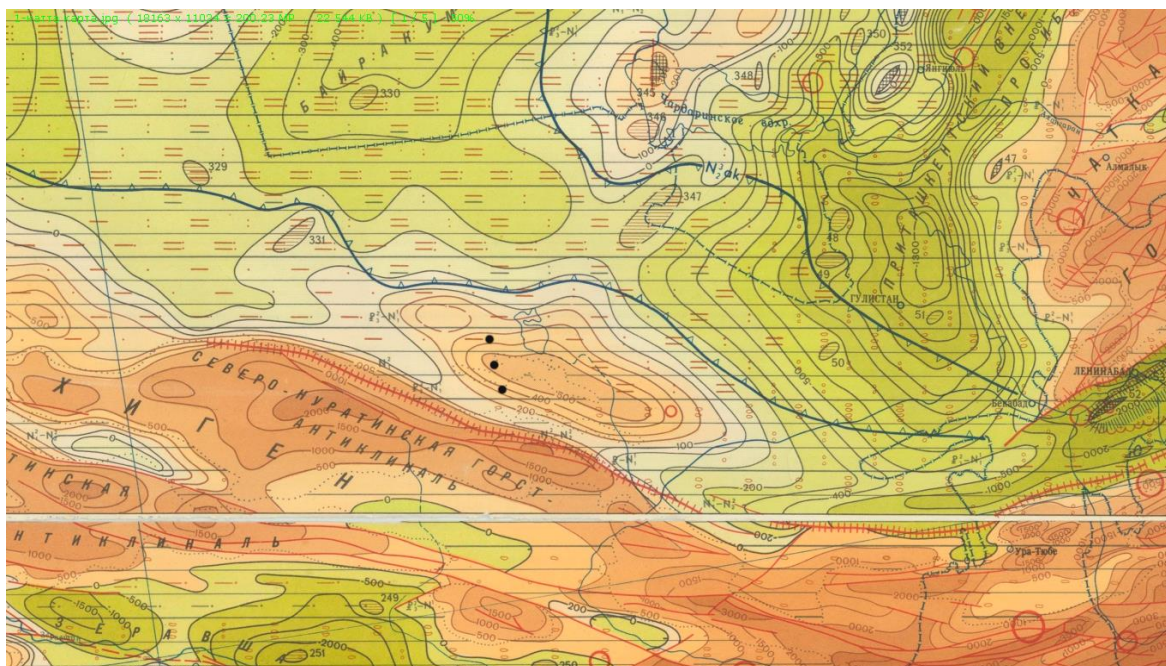


Рис. 3. Фрагмент карты неотектонических движений Средней Азии [3].

Общую характеристику амплитуд неотектонических движений района исследований даёт фрагмент карты неотектонических движений Средней Азии, в масштабе 1:500 000 [3].

Отметим, что авторами в качестве критерия при выделении разломов использована современная сеть саев и водотоков. Такой подход к выделению разломов без проведения полевых исследований и подтверждения другими способами идентификации считаем не корректным.

Более детальный анализ осуществлен на основе карты (рис. 3). Построенная на ее основе схема (рис. 4) составлена методом изолиний, отражающая величину (м) и морфологию деформаций, по которой можно судить об интенсивности и направленности новейших движений. На схеме четко выделяются сравнительно подвижные и устойчивые участки, а в их пределах отдельные элементы неотектоники, различающиеся интенсивностью неотектонических движений. Отображая суммарную величину поднятий и опусканий принятой исходной уровенной поверхности, изолинии очерчивают на схеме и форму новейшей структуры. За начало отсчета неотектонических движений принята стратиграфическая кровля зеленых глин верхнего эоцена. Она фиксирует повсеместно палеогеографическую смену условий осадконакопления с морского (монотонная толща зеленых глин) на континентальный (песчано-глинистые и пестроцветные осадки). Таким образом, неотектоническое районирование осуществлено на основе различий в интенсивности и направленности вертикальных тектонических движений (амплитудные характеристики).

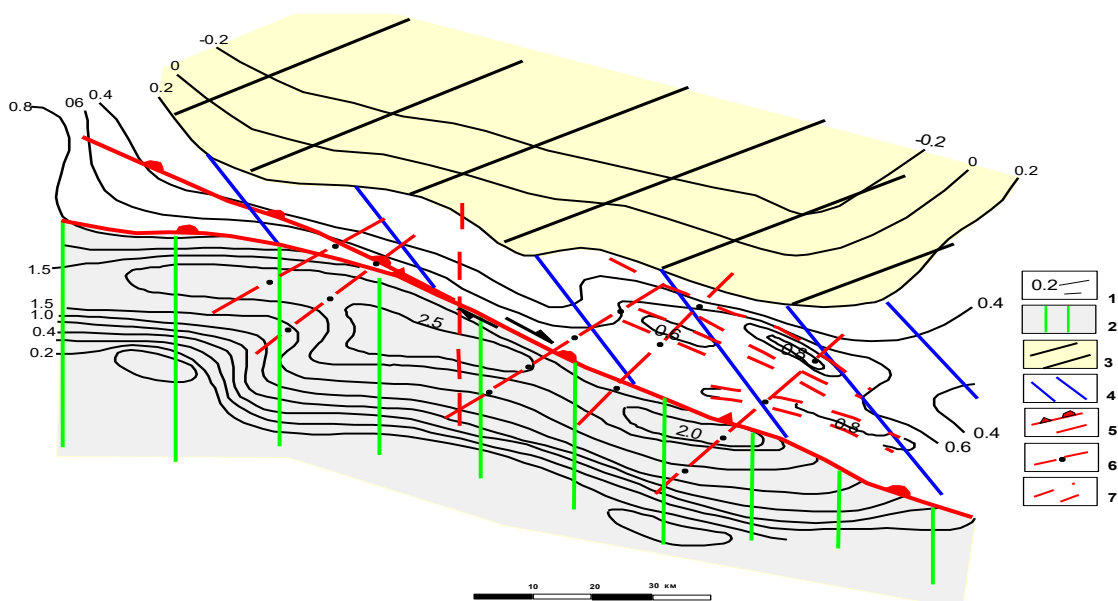


Рис. 4. Схема неотектоники зоны Северо-Нуратинского разлома. 1 – суммарные амплитуды неотектонических движений; 2 – складчато-блоковое поднятие Северного Нуратау; 3 – фрагмент краевой части сырдарьинской впадины; 4 – промежуточная зона, вовлеченная в активизацию в конце плейстоцена, морфологически выраженная передовыми грядами (Егарбелитау, Ханбандытау, Писталитау); 5 – Северо-Нуратинский взбросо-надвиг со следами горизонтальных подвижек, выделяемых по КФС; 6 – скрытые разломы фундамента, выделяемые по геофизическим данным, по отдельным отрезкам которых на поверхности наблюдаются (КФС) следы активизации; 7 – разрывы, вероятно, участвующие в формировании передовых гряд Северного Нуратау.

Так, на схеме выделяются Северо-Нуратинский односторонняя горст-антиклиналь, краевая часть Сырдарьинской синклинали, где отмечается положительная скорость современных вертикальных движений (1,6-1,8 мм/год) и собственно Сырдарьинская впадина. В сеймотектоническом плане наибольший интерес представляет краевая часть Сырдарьинской впадины, вовлеченная в процесс воздымания в поздний плейстоцен – голоценовый период тектонических движений. Для нее характерны положительные амплитуды неотектонических движений (600-800 м). Пространственно она располагается между Северо-Нуратинской горст-антиклиналью и озером Айдаркуль. Изолинии амплитуд ориентированы в северо-западном направлении. Примечательно также формирование системы узких и коротких гряд северо-западной ориентации. Анализ топографических карт масштабов 1: 1 000 000, 1: 500 000 и 1: 50 000 показал, что четкие и прямолинейные очертания бортов гряд не оставляют сомнения в определенном влиянии разломов. Характерно также, что при

слабом уклоне рельефа исследуемой территории на северо-западном борте гряды имеют разную степень эрозионной расчлененности. У гряды Хонбанды северо-западный борт уступает по крутизне и расчлененности северо-восточному борту. Это и понятно. При общем уклоне на северо-восток эрозионные процессы на юго-западном борту несколько замедляются. Но в тоже время, в аналогичных условиях юго-западный борт Писталитау по характеру расчлененности и крутизне рельефа превалирует над северо-восточным бортом. Нет ясности, что передовые гряды – это палеозойские останцы или же сооружения, возникшие в неотектонический этап развития. Здесь также выделяются скрытые разломы северо-восточной ориентировки, выделяемые по геофизическим данным. В рельефе морфологически не выражены, но на КФС отдельные отрезки разломов дешифрируются в виде линеаментов.

Как известно, результаты сеймотектонических исследований в различных сейсмоактивных регионах Мира показали, что в земной коре на различных глубинных уровнях могут действовать разломы, находящие слабое или косвенное отражение в рельефе земной коры, и обычными геолого-геоморфологическими методами сложно их выявить. Например, установлено, что при Газлийских землетрясениях 1976 и 1984 гг., проявившихся в сходных геоморфологических условиях, сеть газопроводов месторождения «Газли» не была нарушена. В эпицентральной области землетрясений заметных тектонических деформаций не обнаружено, отсюда и был сделан вывод, что разрыв в очаговой зоне не достиг земной поверхности. Анализ данных дистанционного зондирования, за счет эффекта «просвечивания», позволяет выделить глубинные, скрытые структуры, которые при соответствующих условиях могут проявиться на поверхности земли.

Дешифрированы космоснимки территории между хребтом Северный Нуратау и озером Айдаркуль [SAS Планета 160707]. По характеру фотоизображения, имеющиеся в исследуемой территории линеаменты можно разделить на крупные и линеаментную трещиноватость (рис. 5). Здесь термин «крупные» отражает протяженность линеаментов. Результаты дешифрирования не позволяют судить о степени разверзания, глубине проникновения и других особенностях, которые позволили бы провести более детальный анализ линеаментов. По особенностям их распределения и взаимного расположения выделяются две динамопары – северо-западная и северо-восточная, а также субмеридиональная и субширотная. Явную связь этих крупных линеаментов с конкретными геологическими структурами, выраженными на дневной поверхности, не удалось проследить. Скорее всего, эти линеаменты отражают регматическую сеть планетарной трещиноватости, и отдельные отрезки линеаментов, например, северо-восточного простирания, совпадают со скрытыми разломами, отображаемыми на геофизических материалах.

Фиксируемая на КФС линеаментная трещиноватость, в целом, создает хаотичный рисунок. Протяженность трещин в пределах нескольких километров, иногда достигает 10-15 км. По характеру густоты линеаментной трещиноватости горная – Нуратинская часть – резко отличается от равнинной. Это и понятно. Линеаменты, более выражены в горной части, где породы палеозоя выходят на дневную поверхность и более устойчивы к эрозии, тогда как слабонаклонная на северо-восток равнинная часть, где постоянно действует активная ветровая эрозия, менее выражена и сложно дешифрируется.

По схеме линеаментной трещиноватости можно проследить серию субпараллельных трещин, согласующихся с Северо-Нуратинским разломом, и систему коротких разрывных нарушений, контролирующих передовые гряды Северного Нуратау (Егарбелитау, Хонбандытау, Писталитау). Фиксируемое на схеме неравномерное распределение линеаментной трещиноватости скорее всего отражает различие внутренних напряжений, сказывающихся на внешних особенностях их проявления. Относительно пространственной ориентировки, северо-западное направление явно доминирует для горной части, тогда как для равнинной части этого отметить нельзя. Здесь выделяются северо-западное и северо-восточное направления. Линеаментная трещиноватость северо-западного простирания характерна для передовых гряд Писталитау, Хонбандытау и Егарбелитау и отдельным останцам, сложенным породами палеозоя. Линеаментная трещиноватость северо-восточного простирания иногда образует протяженные (несколько десятков километров) прерывистые линии, согласуясь с сетью водотоков и элементами рельефа.

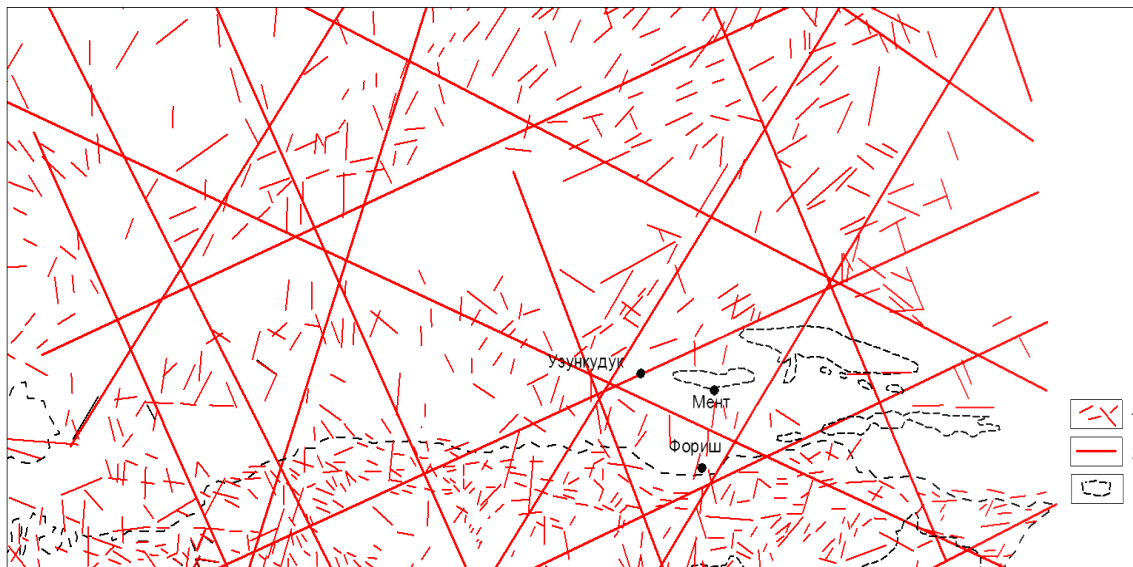


Рис. 5. Схема линеаментов и линеаментной трещиноватости. 1 – линеаментная трещиноватость; 2 – линеаменты; 3 – выходы палеозойских отложений.

Территория исследований не отличается высокими скоростями современных вертикальных движений земной коры. Об этом свидетельствуют результаты повторного нивелирования скорости вертикальных движений земной коры, проведенные в 1940-1980 гг. Результаты этих исследований опубликованы в 1982 г. (рис. 6) [4]. Масштаб карты 1:25000000. Карта составлена на основе повторного нивелирования по заложенной сети нивелирования подразделением Геодезического управления геодезии и картографии при СМ СССР. Интервал между первым и вторым циклом измерений составляет от 7 до 42 лет. Скорости современных вертикальных движений земной коры вычислены по формуле $V = \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1}$ мм/год. На рис. 6. приведен фрагмент карты современных вертикальных движений. Как видно из рисунка, территория в целом подвержена положительным движениям земной коры.

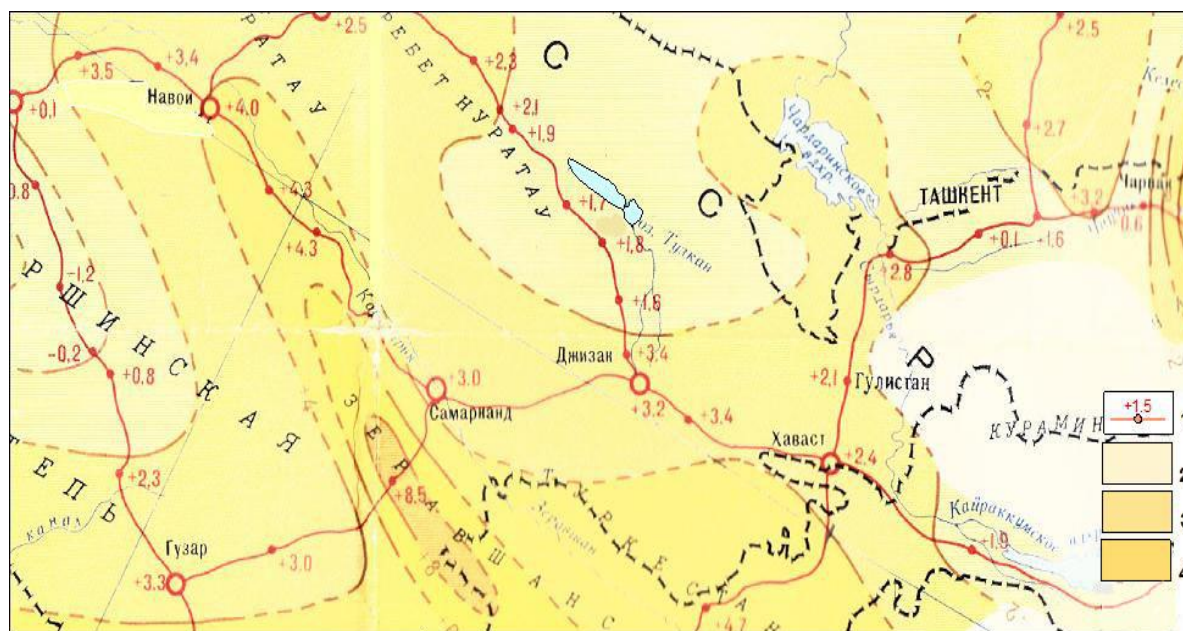


Рис. 6. Фрагмент из карты современных вертикальных движений земной коры района исследований [4]. 1 – линии сети повторного нивелирования и значения скорости движения; области со значением скорости, мм/год: 2 – до 2,0; 3 – до 4; 4 – более 44.

Однако интенсивность этих движений невысокая. Более высокими значениями вертикальных движений земной коры отличаются территории складчато-блоковых поднятий Северного Нуратау. Интенсивность движений в пределах этой территории доходит до 3 мм/год и более. Следует отметить, что граница территорий с разными скоростями современных вертикальных движений земной коры в центральной части Нуратинских гор проведена условно. Зоны интенсивных поднятий сопредельных территорий совпадают с направлением основных тектонических структур региона. Признаки увеличения современных вертикальных движений в северо-восточном направлении отсутствуют. Территория окраинной части Сырдарьинской впадины была относительно спокойной в течение новейшего этапа тектонического развития. Суммарная амплитуда новейших тектонических движений варьировала в пределах 600-800 м. Начиная с голоцена тектонические движения оживились. Скорость современных положительных вертикальных движений составляют 1,6-1,7 мм/год. Сохраняется унаследованность современных движений к новейшим. Положительные движения соответствуют Нуратинскому поднятию и цепи Писталитау-Хонбандытауских передовых гряд. Современное опускание соответствует Сырдарьинской впадине. Разница, хотя и небольшая, в скоростях современных движений создает вдоль Северо-Нуратинского разлома тектоническую напряженность, подтверждаемую многочисленными эпицентрами землетрясений на анализируемой территории.

Отметим, что на разных картах, отличающихся составом авторов и годом публикации, разломы трассируются по-разному и редко они совпадают. В качестве примера можно упомянуть вышеописанные графические приложения и приводимый ниже фрагмент карты сеймотектоники Узбекистана масштаба 1:500000, составленной Госцентром «Природа» ГУГК СМ СССР в 1989 г. (рис. 7). Данный фрагмент требует существенной доработки, так как разломы, выделяемые авторами, не имеют надежных доказательств (кроме Северо-Нуратинского). Вероятно, они просто скопированы с разломов фундамента и бесосновательно выдаются за активные.

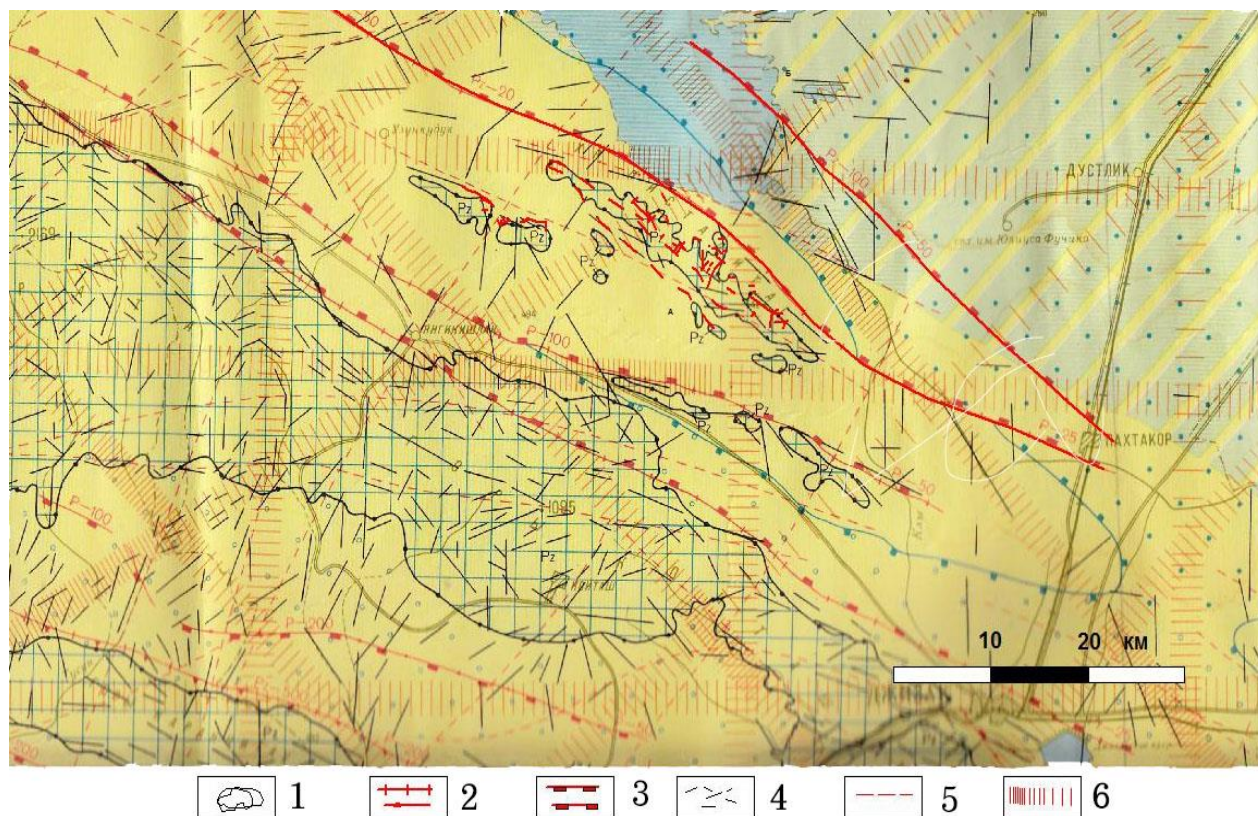


Рис. 7. Фрагмент карты сеймотектоники Узбекистана [5]. 1 – выходы палеозойского фундамента; главные разрывные нарушения, активизированные с новейшего времени: 2 – региональные и локальные; 3 – морфология разрывных нарушений (сбросы – достоверные и предполагаемые); структурные элементы, выявленные по космическим снимкам: 4 – линеamentная трещиноватость; 5 – разломы; 6 – региональные линеamentы.

Заключение

1. Северо-Нуратинский разлом допалеозойского заложения и активно развивался в течение палеозоя, являясь границей двух структурно-фациальных зон, резко отличающихся по режиму тектонических движений, строению и составу слагающих осадочно-метаморфических и магматических пород. В палеозойских отложениях разлом сопровождается расланцеванием, дроблением, катакластитами и милонитизацией.

2. По геофизическим данным разлому соответствует смена положительных и отрицательных аномалий и полоса гравитационных максимумов. Выделяются также палеозойские скрытые разломы северо-восточного простирания, картируемые по геофизическим данным. У рудника Учкулач разломы фундамента северо-западного простирания пересекаются разломом СВ ориентации, фиксируемый на КФС и по геофизическим данным [1].

3. Анализ рельефа земной поверхности и результаты дешифрирования аэрокосмофото- снимков показали, что позднеплейстоцен-голоценовая активизация, в первую очередь, проявилась в зонах разломов северо-западного простирания и особенно четко наблюдается на тех участках разломов, где контактируют отложения палеозоя и осадочного чехла.

4. Однозначно можно утверждать о новейшей и современной тектонической активности и долговременной сейсмической опасности Северо-Нуратинского разлома. Амплитуда неотектонических перемещений по разлому превышает 2500 м. В этот период разлом выполнял важную морфоконтролирующую роль, являясь граничной зоной между структурами собственно Туранской плиты, вовлеченных в орогенические движения и Нуратинской частью постплатформенного орогена. Современная активность разлома характеризуется множеством слабых землетрясений и деформациями рельефа сходных с палеосейсмодислокациями (ПСД).

Литература

1. Ахбер Д.Я. О строении Северо-Нуратинского глубинного разлома // Узб. геол. журн. - 1976. - № 3. - С. 74-77.

2. Ващенко В.П., Аксенова Т.А., Кищинский А.П. Речная сеть хребта Северный Нуратау и ее связь с разрывной тектоникой // Узб. геол. журн. - 1986. - № 3. - С. 19-22.

3. Карта новейших тектонических движений Юга СССР, в масштабе 1: 500 000 / Под ред. Л.П.Полкановой. - М., 1971.

4. Схематическая карта современных вертикальных движений земной коры Средней Азии // Геология и полезные ископаемые Республики Узбекистан / Под ред. А.Р.Ярмухамедова. - Т.: Университет, 1998. - С. 448-452.

5. Карта сейсмотектоники Узбекистана в масштабе 1:500000 / Под ред. Р.Н.Ибрагимова. - М.: Госцентр «Природа» ГУГК СМ СССР, 1989.

УДК 550.34

И.У. Атабеков, Ю.М. Садыков, Ж.К. Мамарахимов

*Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан
atabekovi@mail.ru*

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧНОСТИ В ЗОНЕ ЮЖНО-ФЕРГАНСКОГО РАЗЛОМА С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ

Атабеков И.У., Садыков Ю.М., Мамарахимов Ж.К.

Zamonaviy harakatlarni hisobga olgan holda Janubiy-Fargona siniqligi zonasi seysmiklik tahlili

Аннотация. Farg'ona depressiyasining tektonik holati va yer qobig'i kuchlanishining o'zgarishiga zilzilaning ta'siri tahlil qilinadi. Shu maqsadda faol va faol bo'lmagan yoriqlarni hisobga holda seysmotektonik model yaratildi. Farg'ona chuqurligining zamonaviy harakatlarining matematik modeli tuzildi. Modelning sonli yechimida ikkita faol yoriqlar, ya'ni Janubiy Farg'ona va Shimoliy Farg'ona yoriqlari hisobga olindi. Modelni echish natijasida olingan harakat yo'nalishi belgilariga ko'ra, hudud alohida bloklarga bo'lindi. Har bir blok mavjud seysmologik ma'lumotlar asosida tahlil qilindi, zilzila faolligi parametrlari, Guttenberg-Rixter qonuni koeffitsientlari va zilzila energiyalari hisoblab chiqiladi. Zilzila giposentrlari er qobig'ining zichliklari bilan taqqoslandi, buning natijasida zilzila ochoqlari heterojenlik chegaralardajoylashganligi aniqlandi. Janubiy Farg'ona siniqi bo'ylab zilzila manbalarining vaqtinchalik-fazoviy joylashuvi tahlili o'tkazildi. Tahlildan ko'rinib turibdiki, manbalarning ushbu siniq bo'ylab joylashishi zilzila migratsiyasi haqidagi taxminga to'g'ri kelmaydi. Raqamli model zilzila oqibatida butun mintaqada kuchlanishni o'zgarishiga ta'sirini ko'rsatdi. Bunday o'zgarishlar yer qobig'ining holatiga qarab yer silkinishiga sabab bo'lishi mumkin.

Тayanch so'zlar: Farg'ona depressiyasi, tektonik model, raqamli model, seysmik faollik, zilzila migratsiyasi.

Атабеков И.У., Садыков Ю.М., Мамарахимов Ж.К.

Анализ сейсмичности в зоне Южно-Ферганского разлома с учетом современных движений

Аннотация. Проанализировано тектоническое состояние Ферганской впадины и влияние землетрясений на изменение фонового напряжения земной коры. С этой целью создана сейсотектоническая модель с добавлением активных и неактивных разломов. Составлена математическая модель современных движений Ферганской впадины. Численное решение модели учитывает два активных разлома – Южно-Ферганский и Северо-Ферганский. По признакам направления движения территория разделена на отдельные блоки. Каждый блок анализируется на основе имеющихся сейсмологических данных, рассчитаны параметры активности землетрясений, коэффициенты закона Гуттенберга-Рихтера и энергии землетрясений. Гипоцентры землетрясений сопоставлены с плотностями земной коры, вследствие чего выяснено, что очаги приурочены к границам неоднородностей. Проведен анализ временно-пространственного расположения очагов землетрясений вдоль Южно-Ферганского разлома. Расположение очагов вдоль этого разлома не укладывается в предположение о миграции землетрясений. Численная модель показывает влияния сброса напряжения в очаге на изменения напряженного состояния всего региона. В зависимости от фонового напряжения, такое влияние может послужить в качестве спускового механизма там, где имеется предельное состояние.

Ключевые слова: Ферганская впадина, тектоническая модель, численная модель, сейсмическая активность, миграция землетрясений.

Atabekov I.U., Sadikov Yu.M., Mamarakhimov J.K.

Analysis of seismicity in the zone of the South Fergana fault, taking into account modern movements

Annotation. The tectonic state of the Ferghana depression and the influence of earthquakes on the change in the background stress of the earth's crust are analyzed. For this purpose, a seismotectonic model was created with the addition of active and inactive faults. A mathematical model of modern movements of the Fergana depression has been compiled. The numerical solution of the model takes into account two active faults, namely the South Fergana and North Fergana faults. According to the signs of the direction of movement, obtained as a result of solving the model, the territory is divided into separate blocks. Each block is analyzed on the basis of available seismological data, earthquake activity parameters, coefficients of the Guttenberg-Richter law and earthquake energies are calculated. Earthquake hypocenters are compared with the densities of the earth's crust, as a result of which it is found that the sources are confined to the boundaries of heterogeneities. An analysis of the temporal-spatial location of earthquake sources along the South Fergana fault has been carried out. It follows from the analysis that the location of sources along this fault does not fit into the assumption of earthquake migration. The numerical model shows the

effects of stress relief in the source on changes in the stress state of the entire region. Depending on the background stress, this influence can serve as a trigger where there is a limit state.

Key words: Ferghana depression, tectonic model, numerical model, seismic activity, earthquake migration.

Введение

Для прогноза землетрясений на конкретной территории необходимо установить общую направленность тектонических движений, что предполагает выявление различных зон с устойчивым режимом движения и по возможности историю новейших движений. Это дает возможность проведения количественной оценки землетрясений, опираясь на некоторые установленные эмпирические закономерности. Например, на такую, согласно которой средняя величина градиента скорости повышается в 3 раза, то верхний предел энергии землетрясений увеличивается на один порядок, и при этом длина разрыва увеличивается в 2 раза. Землетрясения в таких случаях обычно активизируются вдоль полос, секущих поперек общую тектоническую зональность [1].

Целью данной работы является оценка сейсмического состояния в зоне Южно-Ферганского разлома в комбинации тектонического анализа и численной модели напряжения земной коры Ферганской впадины.

Тектонический анализ

Ферганская впадина делится на Южный борт, Центральный грабен и Северный борт. Граница между мезо-кайнозойскими отложениями Южного борта и палеозойскими породами Гиссаро-Алая (Южно-Тянь-Шаньский ороген) проходит по Южно-Ферганскому разлому (ЮФР). Для анализа особенностей глубинного строения ЮФР и сопоставления очагов землетрясений с тектоническим строением, мы составили глубинно-геологический разрез, используя сеть профилей [2] (рис. 1).

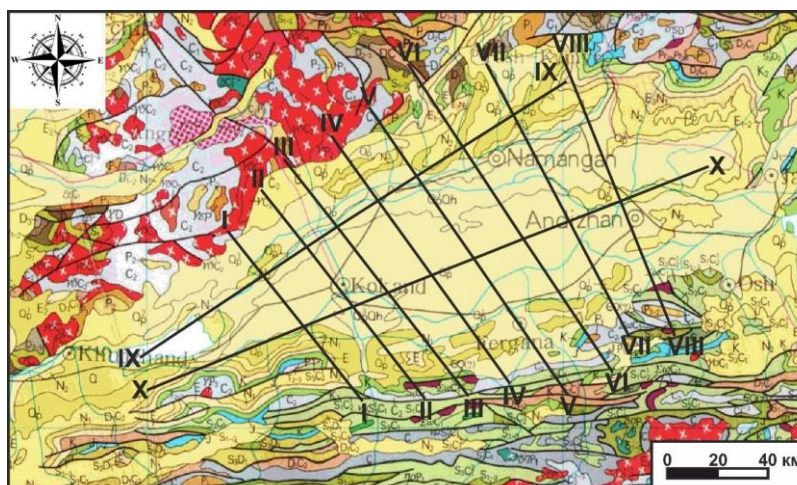


Рис. 1. Сеть профилей [2], которые использованы для построения геолого-геофизической модели ЮФР.

Во всех профилях картируются три стратиграфических комплекса пород (сверху вниз): мезо-кайнозойский, палеозойский и допалеозойский. Первые два из них стратифицированы, а в допалеозойском комплексе выделяются блоки, различающиеся по плотностным характеристикам. По оценке различных специалистов, по поверхностям домезозойского и допалеозойского (кристаллического) фундаментов Южный борт имеет вид моноклинали, южную границу которой обрывает ЮФР. Зону образует система субпаралельных эшелонированных разломов, имеющих преимущественно северо-восточное простирание. Сложную картину представляет поверхность домезозойских пород. Более дробное расчленение имеет Южный борт, для уточнения которого использованы данные скважин. На всем протяжении Южная ступень имеет дислоцированный характер и разбита большим количеством разрывных нарушений. Для Южной ступени по поверхности домезозойских отложений отсутствует группируемость разломов в одном направлении, как это имеет место для поверхности кристаллического фундамента. Тем не менее, наиболее значимые структуро-контролирующие разломы имеют северо-восточную ориентацию. Как показывает тектониче-

ское районирование Ферганской впадины [3], ЮФР играл существенную роль при формировании мезо-кайнозойских отложений. В отличие от поверхностей домезозойского и кристаллического фундаментов, в данную схему введен новый элемент, а именно Южный переходный пояс, свидетельствующий о более сложном геологическом строении Южной ступени. Полоса, включающая Южный переходный пояс и Южную ступень, наиболее дифференцированная зона исследуемой территории. Новейшие тектонические движения определили современный геоморфологический облик Ферганской впадины и его горного обрамления. По карте новейших тектонических движений [4], в южной ступени развита Южно-Ферганская зона складок, располагающаяся в предгорно-адырной полосе Туркестано-Алайской горной системы. Южной границей зоны складок служат контуры палеозойского обрамления, протягивающиеся вдоль северных склонов Туркестанского хребта. ЮФР является северной границей Туркестано-Алайской зоны поднятий. ЮФР прослеживается в субширотном направлении в виде серии параллельных нарушений. Он установлен в районе Сулюкты, урочище Мадыген, селения Баткен, рудника Кан, селений Вуадиль и Учкурган, вдоль северного борта Наукатской котловины. Далее, на востоке представлен зоной Алдыярских разломов [5]. Интенсивность вертикальных движений в неотектонический этап была велика. В верхнеплиоцен-четвертичное время отдельные участки Катрантауской антиклинали приподняты по разлому на высоту 2,0-2,2 км. В четвертичный период в районе Абшира сохские конгломераты опущены на глубину до 0,6-0,8 км. Сейчас они закартированы на вершине хребта Катрантау на высоте 3,0 км, т. е. размах движений после нижнечетвертичного периода в зоне разлома не менее 2,5 км. Известно также надвигание палеозойских пород на четвертичные отложения в районах Хайдаркана и Соха с амплитудой до нескольких сотен метров. В Шурабе зафиксированы надвиги юрских пород на неоген-четвертичные образования. Отдельные участки разлома закрыты кайнозойскими отложениями. По этой причине, восточная часть не подлежит визуальной обследованию. Морфологически разлом представляет крутой взброс, плоскость которого падает на юг под углом 60-75°, местами падение смесителя практически вертикальное. Подвижками в очагах Ура-Тюбинского (1897 г.), Кыркольского (1907 г.), Ура-Тюбинского (1923 г.), Кадамжайского (1974 г.), а также землетрясениями 31.01.1977 и 05.07.1977 г., с магнитудами $M = 5,1-6,4$ выражена активность данного разлома [4].

Скорость горизонтального перемещения г. Ош (в 10-12 км к северо-востоку от ЮФР), составила $4,0 \pm 1,3$ мм/год, а направление скорости ориентировано субмеридионально [6]. На основе комплекса данных составлена сейсмотектоническая модель юго-восточной части Ферганской впадины (рис. 2) [7].

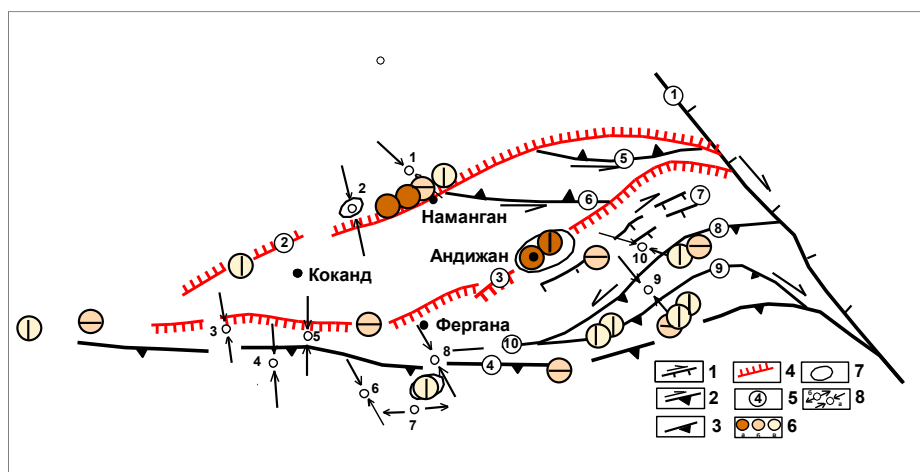


Рис. 2. Сейсмотектоническая модель юго-восточной части Ферганской впадины. Активные разломы: 1 – сбросо-сдвиги (бергштрихи в сторону опущенного крыла); 2 – взбросо-сдвиги; 3 – взбросо-надвиги; 4 – флексурно-разрывные зоны; 5 – региональные разломы (1 – Таласо-Ферганский; 2 – Северо-Ферганская ФРЗ; 3 – Южно-Ферганская ФРЗ; 4 – Южно-Ферганский разлом; 5 – Баубашатинский; 6 – Кочкаратинский; 7 – Кугартская система; 8 – Талдысуйский; 9 – Куршабский, 10 – Карачатырский); 6 – макро-сейсмические эпицентры землетрясений (с балльностью: а – 9, б – 8, в – 7); 7 – контур плейстоценовой области землетрясений 1902 и 1984 гг.; 8 – горизонтальные проекции осей главных напряжений сжатия (а) и растяжения (б) очагов землетрясений (1 – 12.10.1963; 2 – 17.02.1984; 3 – 11.07.1980; 4 – 31.01.1977; 5 – 6.05.1982; 6 – 18.12.1962; 7 – 3.06.1977; 8 – 22.02.1974; 9 – 20.02.1974; 10 – 3.08.1963).

Согласно нашей модели, на фоне меридионального сжатия формируются субширотные взбросо-сдвиговые зоны южного горного обрамления Ферганской впадины. Южный борт Ферганской межгорной впадины частично перекрыт надвинутыми на нее палеозойскими породами. Развитие региональных разломов (в т. ч. Южно-Ферганского) предопределили современный структурный план Ферганской впадины и ее горного обрамления, характеризующегося сочетанием транспрессии (сдвиг-сжатие) и транстенсии (сдвиг-растяжение). Разломы, в частности ЮФР, предопределили ступенчатое погружение ее палеозойского основания. Анализ данных о вертикальных современных движениях, сейсмичности, неотектонике показал, что участки, подверженные положительным и отрицательным значениям современных движений, очерчивают сегменты Ферганской впадины, для которых характерны высокие тектонические напряжения. Разломы, разделяющие эти блоки, отличаются высоким напряженным состоянием и являются потенциально сейсмоопасными. Современные перемещения Западного Тянь-Шаня подтверждают субмеридиональную ориентацию сжимающих напряжений, действующих в пределах Ферганской впадины и связанных с давлением Памирского выступа на Тянь-Шань. Важным элементом сеймотектонической модели являются макросейсмические эпицентры землетрясений 7-9 баллов. Приуроченность их к активным разломам не вызывает сомнений. Они же позволяют оценить вероятный сейсмический потенциал этих разломов. Другие элементы модели – горизонтальные проекции осей главных напряжений сжатия и растяжения в очагах землетрясений на земную поверхность. Данные наземных инструментальных измерений и спутниковой геодезии, материалы по современному трещинообразованию, показывают субмеридиональную ориентацию поля тектонических напряжений сжатия, в которой развиваются современные структуры Ферганской впадины.

Математическая модель

Для численного анализа напряженного состояния земной коры Ферганской впадины выделена территория с географическими координатами (39:43 с.ш.; 69:74 в.д.), ограниченная с северо-востока Таласо-Ферганским, с юга Гиссаро-Коокшальским глубинными разломами и северо-запада Аксу-Майдантальскими системами разломов. Для упрощения модели учитывается наличие всего двух активных разломов, а именно Южно-Ферганского и Северо-Ферганского. Рассмотрим математическую задачу ползущего движения весомой призмы, состоящей из трех зонально-однородных блоков, покоящуюся на пластическом основании. Верхняя поверхность призмы соответствует рельефу, нижняя поверхность аппроксимирует поверхности Мохо. На боковые границы составной призмы действуют латеральные силы. Задача о сеймотектоническом течении с учетом механизма землетрясений для Центральной Азии рассмотрена в [9]. Напряженное состояние такой среды, с учетом механизма землетрясений в виде диполей, определяется уравнениями равновесия сил и моментов:

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0, \quad (1)$$

$$\mu_{ij,j} + \varepsilon_{ijk} \sigma_{ij} + M_k = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

где σ_{ij} , μ_{ij} – компоненты силового и моментного тензора напряжений, индекс j после запятой означает дифференцирование по декартовым координатам x_j , F (0,0, ρg) – массовая сила, ε_{ijk} – тензор Леви-Чивита, M_k – удельный момент, связанный со сброшенным напряжением при землетрясении, имеющий размерность момента, деленного на объем. Для задачи моделирования механизма землетрясения двойной диполью без момента система (2) отпадает, а соответствующие F_i в системе (1) модифицируются.

В случае n точечных очагов, с координатами (x_{i0}^k $i = 1, 2, 3$; $k = 1, 2, \dots, n$) моменты выражаются в виде суммы дельта функций:

$$M_i(x_1, x_2, x_3) = \sum_{k=1}^n M_{i0}^k \delta(x_1 - x_{10}^k) \delta(x_2 - x_{20}^k) \delta(x_3 - x_{30}^k) \quad (3)$$

Эти уравнения усреднены по вертикали с помощью следующей формулы:

$$\bar{w}(x_1, x_2) = \frac{1}{(h-H)} \int_H^h w(x_1, x_2, x_3) dx_3 \quad (4)$$

В (2) усредненные переменные обозначаются с чертой. Декартовы координаты в (1) расположены на земной поверхности: x_1, x_2 направлены по параллели и по меридиану, x_3 – вверх, формула $x_3 = H(x_1, x_2)$ соответствует рельефу земной поверхности, $x_3 = h(x_1, x_2)$ – границе Мохо. В работе [9] в нижняя граница литосферы h принята постоянной, поэтому при усреднении системы (1) по формуле (2) члены, содержащие производные h по x_1, x_2 , автоматически выпадают. В данном случае граница Мохо не плоская и $h(x_1, x_2)$ не постоянна. В таком случае, замена усредненных производных напряжений при преобразовании (1) производится по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{1}{h-H} \int_H^h \sigma_{ij} dx_3 \right) = \frac{1}{(h-H)^2} \int_H^h \sigma_{ij} dx_3 + \frac{1}{h-H} \int_H^h \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_k} dx_3 + \frac{1}{(h-H)} \sigma_{ij} \Big|_{x_3=h} \frac{\partial h}{\partial x_k} \\ &- \frac{1}{(h-H)} \sigma_{ij} \Big|_{x_3=H} \frac{\partial H}{\partial x_k} = \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_k} + \frac{\sigma_{ij}(x_1, x_2, h)}{(h-H)} \frac{\partial h}{\partial x_k} + \frac{(\bar{\sigma}_{ij} - \sigma_{ij}(x_1, x_2, H))}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (5)$$

В (3) присутствуют значения напряжения на свободной поверхности $\sigma_{ij}(x_1, x_2, H)$ и на границе Мохо $\sigma_{ij}(x_1, x_2, h)$. Относительно $\sigma_{ij}(x_1, x_2, H)$ используем известные эмпирические оценки напряжений для различных глубин земной коры. Для горизонтальных напряжений в складчатом и кристаллическом фундаменте земной коры выведены формулы, составленные на основе многочисленных литературных данных [10] в виде $(\sigma(h) = 0,06 + 0,31 \cdot 10^{-3} h, h$ – глубина в километрах) кг/см². Наша модель [9] ориентируется на известные оценки касательных напряжений на территории СССР, установленные эмпирически приблизительно для глубин 15 км. Поэтому отношение горизонтальных напряжений на поверхности по отношению к средним напряжениям возьмем в виде отношений напряжений на 2 км (приблизительная средняя граница начала кристаллического фундамента) и 15 км по указанной формуле:

$$\frac{\sigma_{11}(x_1, x_2, H)}{\sigma_{11}(x_1, x_2)} = \frac{\sigma(2км)}{\sigma(15км)} \approx 0.15 \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_{11}(x_1, x_2) - \sigma_{11}(x_1, x_2, H) = 0.85 \bar{\sigma}_{11}(x_1, x_2) = p \bar{\sigma}_{11}(x_1, x_2) \quad (7)$$

Относительно $\sigma_{11}(x_1, x_2, h)$ поступим следующим образом. Известно, что, начиная с некоторых глубин, разница главных горизонтальных напряжений и вертикальной составляющей напряжений нивелируются, и тензор напряжений становится шаровым. Косвенное свидетельство этого факта демонстрирует базальтовый слой земной коры, где почти отсутствуют землетрясения. Принимая на уровне Мохо $\sigma_{11}(x_1, x_2, h)$ и $\sigma_{22}(x_1, x_2, h)$ за главные горизонтальные напряжения, приравняем их вертикальному напряжению при $x_3 = h(x_1, x_2)$: $\sigma_{33}(x_1, x_2, h) = \rho g [h(x_1, x_2) - H(x_1, x_2)]$, $\sigma_{31}(x_1, x_2, h) = k_a \sigma_{33}(x_1, x_2, h)$, $\sigma_{32}(x_1, x_2, h) = k_a \sigma_{33}(x_1, x_2, h)$ (k_a – коэффициент трения).

Тогда

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_k} = \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_k} - \rho g \frac{\partial (h-H)}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{(\bar{\sigma}_{ij} - \sigma_{ij}(x_1, x_2, H))}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_k} \quad (8)$$

Отнесем линейные переменные к средней мощности земной коры L , усредненные скорости перемещений к L/t_0 (t_0 – масштаб времени), напряжения к μ_0/t_0 (μ_0 – средняя вязкость составных блоков). Остальные преобразования уравнения (1) проводятся так же, как в [9]. Сохраняя обозначения относительных переменных прежними, в результате получим следующее уравнение Стокса:

$$-grad \bar{p} + \frac{\mu}{\mu_0} \Delta \bar{v} = \bar{F}, \quad (9)$$

$$F_1 = \frac{\partial \bar{M}_2}{\partial x_3} - \frac{p}{(h-H)} \frac{\partial(h-H)}{\partial x_1} \sigma_{11} - \frac{p}{(h-H)} \frac{\partial(h-H)}{\partial x_2} \sigma_{12} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{p}{(h-H)} \frac{\partial(h-H)}{\partial x_1} v_1 \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{2p}{(h-H)} \frac{\mu}{\mu_0} \left(\frac{\partial(h-H)}{\partial x_2} v_1 + \frac{\partial(h-H)}{\partial x_1} v_2 \right) \right] + \frac{1}{(h-H)} \left[v_3(x_1, x_2, H) \frac{\partial(h-H)}{\partial x_1} + \frac{\partial v_3(x_1, x_2, H)}{\partial x_1} \right], \quad (10)$$

$$F_2 = -\frac{\partial \bar{M}_3}{\partial x_1} - \frac{\partial \bar{M}_1}{\partial x_3} - \frac{1}{2(h-H)} \frac{\partial(h-H)}{\partial x_1} \sigma_{21} - \frac{1}{2(h-H)} \frac{\partial(h-H)}{\partial x_2} \sigma_{22} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{2p}{(h-H)} \frac{\mu}{\mu_0} \left(\frac{\partial(h-H)}{\partial x_2} v_1 - \frac{\partial(h-H)}{\partial x_1} v_2 \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{p}{(h-H)} \frac{\partial(h-H)}{\partial x_2} v_2 \right) - \frac{1}{(h-H)} \left[v_3(x_1, x_2, H) \frac{\partial(h-H)}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3(x_1, x_2, H)}{\partial x_2} \right] \quad (11)$$

Здесь принято $v_3(x_1, x_2, h) = 0$, $k_a = 0$. Усредненное уравнение несжимаемости принимает следующий вид:

$$\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} = \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} - \frac{p}{(h-H)} \left(\frac{\partial(h-H)}{\partial x_1} v_1 + \frac{\partial(h-H)}{\partial x_2} v_2 \right) + \frac{1}{(h-H)} v_3(x_1, x_2, H) = 0 \quad (12)$$

В формулах (7-10) усредненные напряжения (σ_{ij} с чертой) являются решениями реконструированной упругой задачи из [11].

Таким образом, трехмерная задача свелась к двумерной относительно горизонтальных средних. Уравнения для горизонтальных средних скоростей перемещений решаются в плоской области, ограниченной внешними границами рассматриваемого региона, приведенной на **рис. 3**. Два активных разлома разделяют рассматриваемую область на три блока с различными коэффициентами вязкостями μ . На контакте границ блоков ставились условия непрерывности напряжений и скоростей перемещений. Поверхность рельефа строилась по физическим картам (**рис. 4**). Изолинии границы Мохо заимствованы из [8] (**рис. 5**).

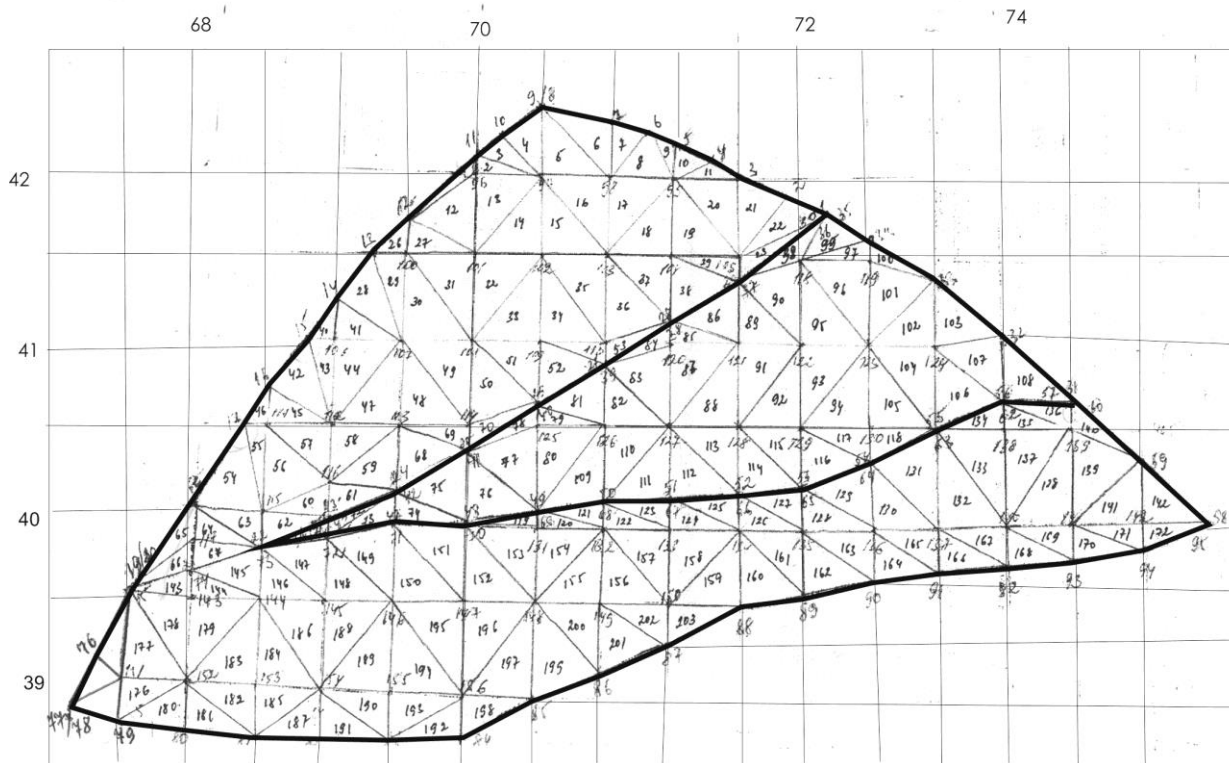


Рис. 3. Расчетная область для численного моделирования.

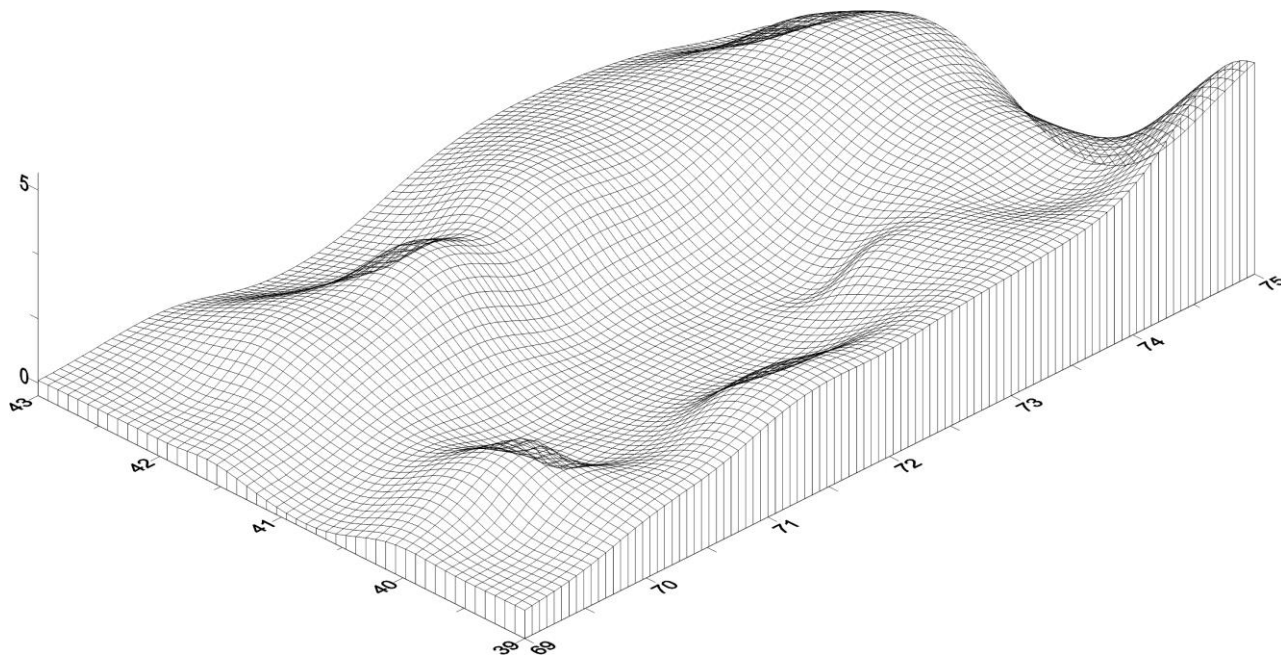


Рис. 4. Рельеф рассматриваемого региона (высота, км).

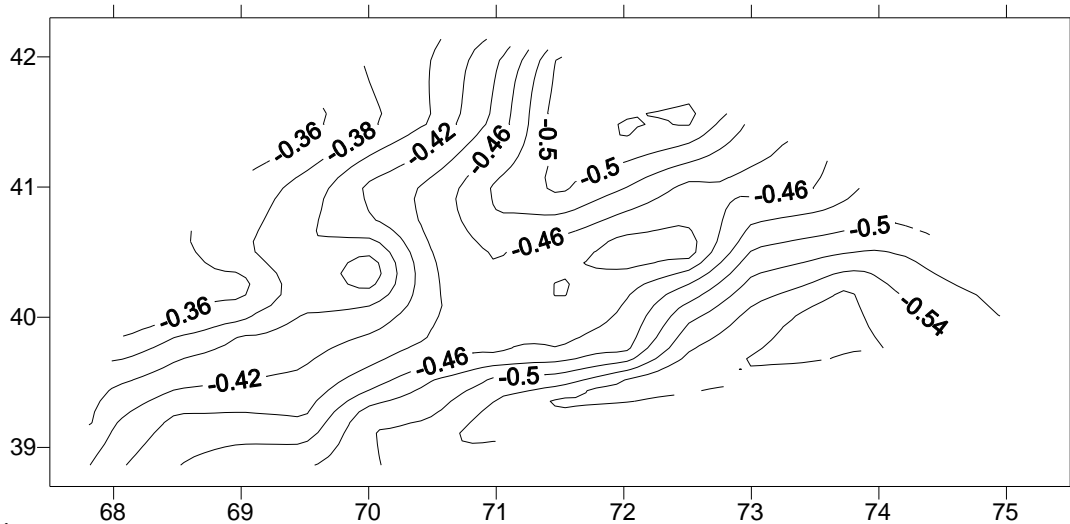


Рис. 5. Изолинии глубин подошвы земной коры Ферганской впадины (граница Мохо), отнесенная к 100 км в принятой системе координат [4].

Граничные условия для (7-9) выбирались следующим образом. Евразийская плита считалась относительно неподвижной. Скорости перемещений левого борта Таласо-Ферганского глубинного разлома приняты по современным данным GPS. На остальных внешних границах выбирались напряжения, которые рассчитаны по модели [11] в качестве внутренних.

Уравнения (7-10) при описанных граничных условиях решались методом граничных интегральных уравнений. Методика решения и дальнейшая процедура получения численных решений, которая реализовалась в среде программирования Дельфи, описана в [9]. Значения вязкостей корректировались сравнением модельных значений скорости, угловой скорости с аналогичными значениями, построенные по данным GPS, имеющихся для Ферганской впадины в [12-14].

Анализ полученных результатов

На рис. 6, 7 приведены скорости перемещений и тангенциальные напряжения, полученные в результате численной реализации.

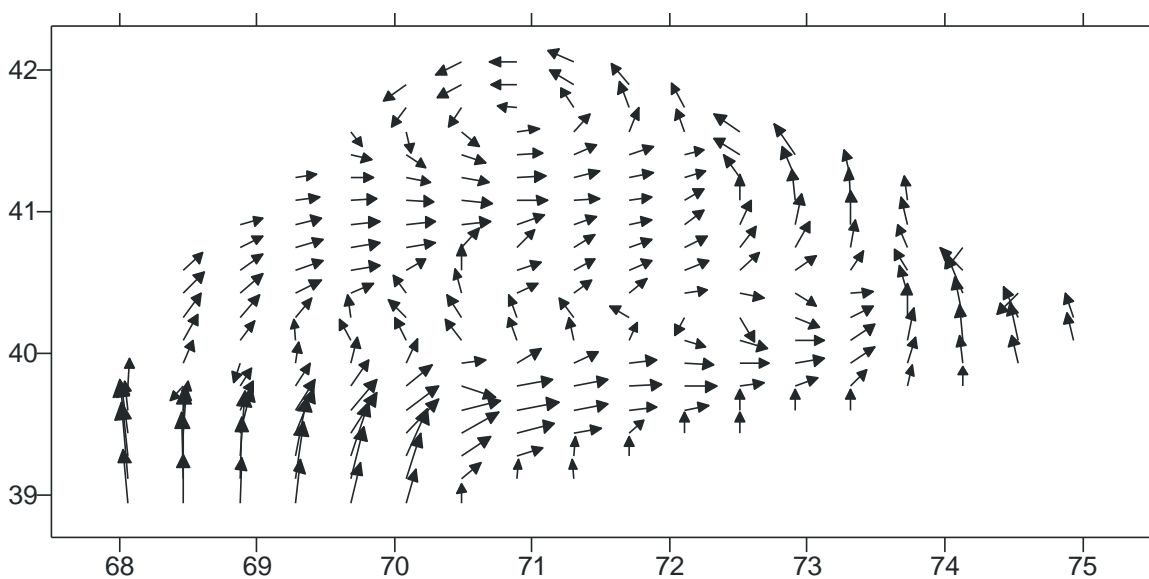


Рис. 6. Поле скоростей, по результатам численной модели.

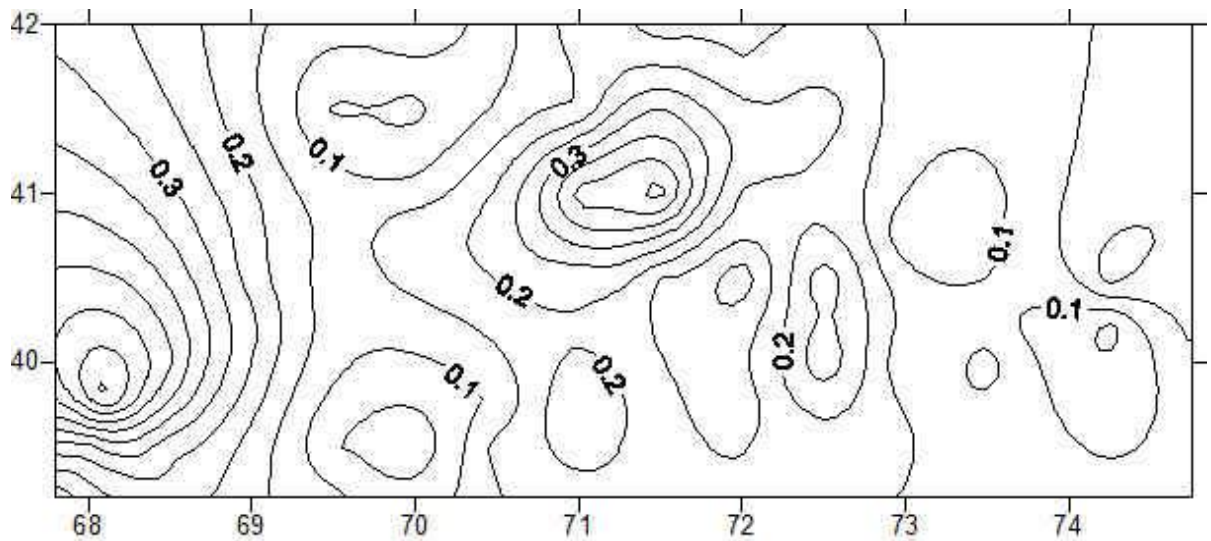


Рис. 7. Тангенциальные напряжения $\sigma_t / 2 \cdot 10^8$ Па на глубине 15 км, по результатам численной модели.

Поля скоростей перемещения, полученные в результате решения модельной задачи, сгруппированы на отдельные участки, по типу направления движения (рис. 8). В результате исследуемая территория разделилась на несколько блоков. Границы блоков приблизительно совпадают с разрывными нарушениями более высокого ранга, отраженными на рис. 2.

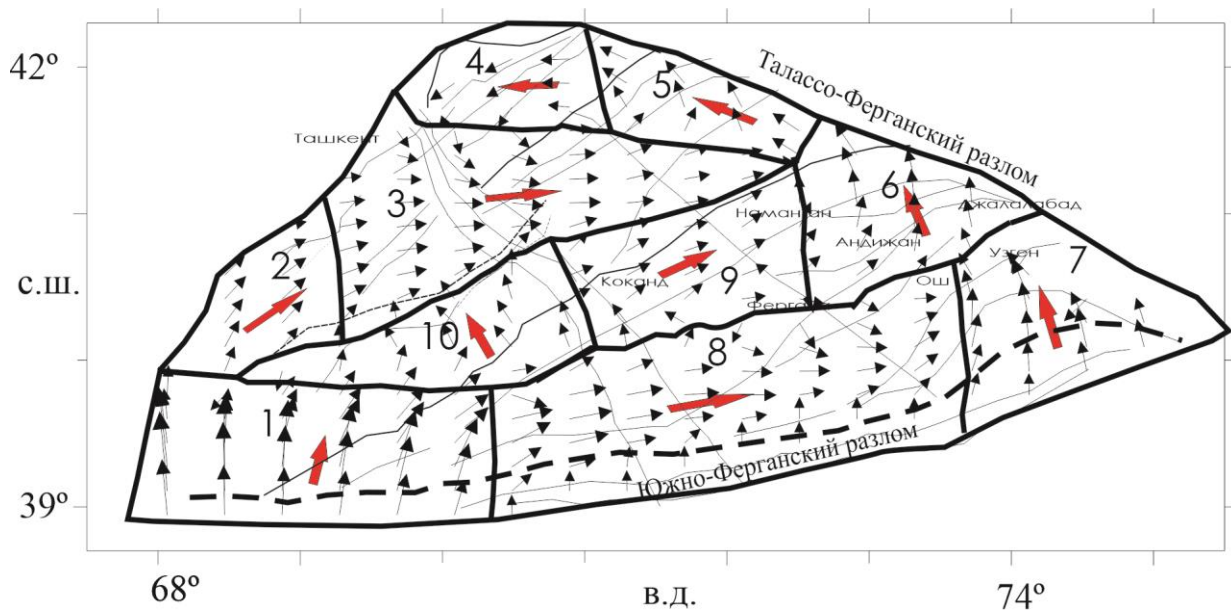


Рис. 8. Сгруппированные по направлениям скорости перемещений из решения модельной задачи. Тонкие линии – разломы высших рангов, установленные по тектоническим данным.

Напряженное состояние сплошной среды в общем случае определяется тремя главными векторами напряжения (условно $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). Их значения и направления определяются из уравнения:

$$\det \|\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}\| = 0 \quad i, j=1, 2, 3. \quad (13)$$

Для симметричного тензора σ_{ij} уравнение (10) всегда имеет три действительных корня следующего уравнения:

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma - I_3 = 0 \quad (11)$$

$$I_1 = \sigma_{kk}, I_2 = \sigma_{ij}\sigma_{ij}, I_3 = \sigma_{ij}\sigma_{jk}\sigma_{ki}$$

В нашем случае, из решения (1) мы получаем горизонтальные средние напряжения σ_{11} , σ_{12} , σ_{22} . На их основе из (11) рассчитываем горизонтальное наибольшее σ_1 , и наименьшее σ_2 напряжения и направление σ_1 (рис. 9). Для геодинамического анализа к ним добавим вертикальное напряжение σ_{ver} , принятое как вес покрывающей породы. Анализ напряженного состояния земной коры по результатам модели проведем по методу Андерсона. Согласно этому методу, сравниваются отношение вертикального напряжения σ_{ver} к горизонтальным наибольшим σ_1 и наименьшим σ_2 напряжениям. При этом выделяются три различных случая: 1) преобладает вертикальное напряжение $\sigma_1 = \sigma_{ver}$, когда гравитация вызывает нормальные разломы, создавая горизонтальную деформацию растяжения; 2) случай $\sigma_2 = \sigma_{ver}$, при котором разница между двумя горизонтальными напряжениями создает сдвиговую деформацию; 3) оба горизонтальных напряжения превышают вертикального напряжения $\sigma_3 = \sigma_{ver}$, при котором деформация сжатия компенсируется за счет надвига или взброса. Отметим, что мы используем правило знаков напряжений, принятое в классической механике, т. е. считается, что сжимающие напряжения отрицательны, а растягивающие – положительны. Сравнение типов напряжений и их направления, приведенные на рис. 9, почти совпадает с ориентацией горизонтальных проекций осей наибольшего напряжения, построенных по механизмам землетрясений в работе [15, 16].

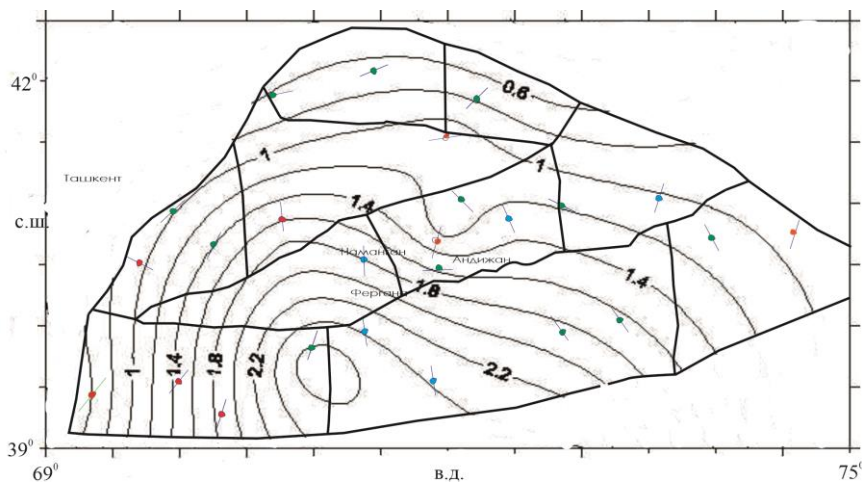


Рис. 9. Изолинии наибольших напряжений (кбар) и их направления (короткие линии). По классификации Андерсона указаны возможности осуществления взброса (красные), сброса (голубые) и сдвига (зеленые).

Активизация сейсмичности после сильных землетрясений, по мнению некоторых специалистов, связана с распространением медленных диффузионных волн разупрочнения. Для вскрытия возможной взаимной связи между землетрясениями, особенно в ослабленных зонах, каковыми являются разломы земной коры, изучен сейсмический режим. В основе – база данных, полученная из Нового каталога сильных землетрясений на территории СССР до 1975 г. [18] и дополненная по данным КОМЭ ИС АН РУз и РЦСМ МЧС РУз.

Для каждого выделенного блока, показанные на рис. 8, рассчитаны графики повторяемости $\ln N = a - bM$ (табл. 1). Известно, что значение коэффициента на графике повторяемости землетрясений b меняется от 0,3 для щитов, до 1,2 до земной коры океанов, и в некотором смысле можно связать с историей деформирования земной коры. Анализируя значения b для разломных зон Центральной Азии в [19] сделано заключение, что график повторяемости не всегда адекватно отражает сильные события и частоту их возникновения по отношению к более слабым. На основании ха-

рактера загибов, проявляющихся для больших магнитуд, авторы утверждают, что чем меньше параметр b при учете в хвостовой части графика, тем выше доля сильных землетрясений по отношению к слабым. В табл. 1 приведены значения b , полученные нами для слабых землетрясений, а также с добавлением сильных землетрясений для выделенных блоков 1-10. Как видно из табл. 1, фактически для всех блоков значения b меньше. Однако, сравнение доли сильных землетрясений по выделенным энергиям по этим показателям не подтверждает выводы работы [19].

Таблица 1

Номер блока	Коэффициент b для $M = 2,5-4$	Коэффициент b для $M = 2,5-6$	Суммарная энергия, 10^6 Дж.	Кол-во землетрясений на 1000 $км^2$	Суммарная энергия, 10^6 Дж. на 1000 $км^2$
1	0,86	0,52	7,70	15	0,27
2	0,98	0,38	10,40	15	0,89
3	1,20	0,61	38,10	30	1,62
4	1,02	0,37	11,92	19	1,61
5	0,92	0,46	1,16	28	0,15
6	0,97	0,78	39,27	155	2,75
7	0,98	0,81	8,00	113	0,42
8	1,02	0,77	259,71	114	7,06
9	0,88	0,69	26,27	94	1,74
10	1,08	0,55	33,20	47	2,56

Пространственно-временной статистический анализ землетрясений для Южно-Ферганской зоне шириной 100 км проведен в ранней работе [17]. Однако, ширина 100 км включает не только ЮФР, но и также ЮФРЗ. Мы взяли зону влияния ЮФР, равную 20 км, и по долготе разделили слева направо на 12 прямоугольников. На рис. 10 приведены значения выделенной энергии землетрясений в зоне влияния ЮФР для различных глубин земной коры с исторических времен до 2021 г. Так, наибольшее количество энергии выделено в интервале глубин [11-12], [15-18], [20, 22] и эпицентры двух сильных землетрясений находятся около 71,5 в.д.

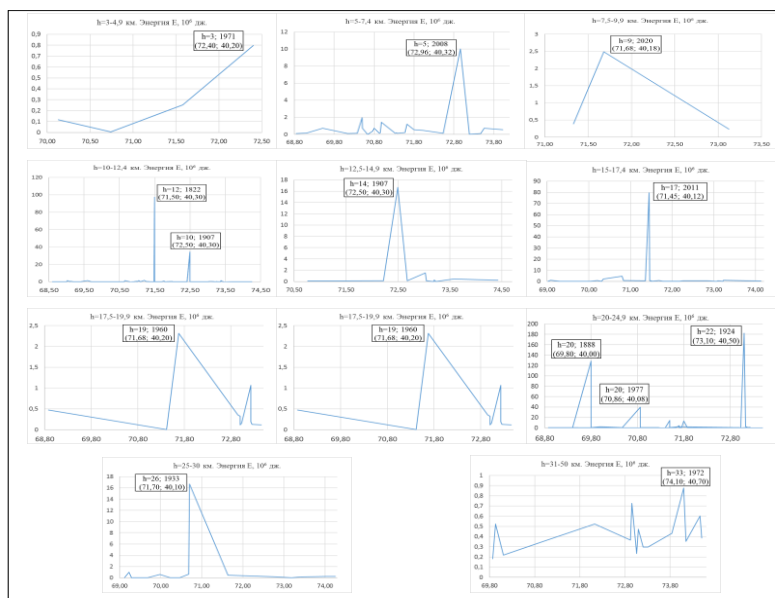


Рис. 10. Суммарная выделенная сейсмическая энергия в зоне влияния ЮФР по глубине с исторических времен до 2021 г.

На рис. 11 приведен плотностной разрез зоны влияния ЮФР по глубине в полосе пересечения сейсмопрофилей I-VII, указанных на рис. 1, и гипоцентров землетрясений ($M \geq 5,6$).

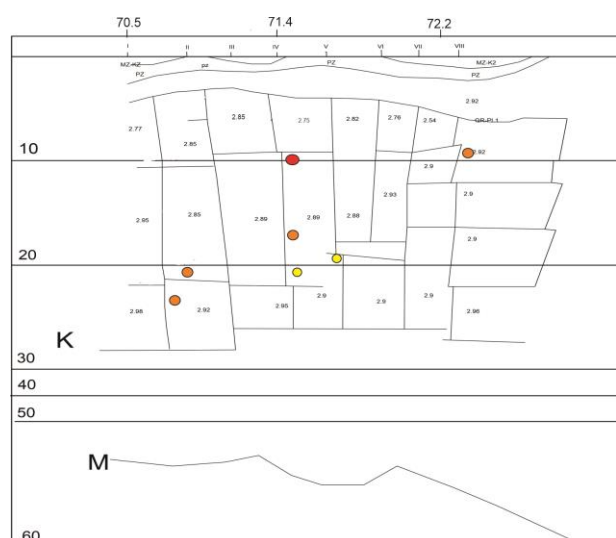


Рис. 11. Плотностная модель земной коры [2] и гипоцентры сильных ($M \geq 5,6$) землетрясений в полосе пересечения зоны ЮФР, ограниченные сейсмопрофилями I и VIII, указанные на рис. 1. Кругочки указывают на интервалы магнитуд: желтые – 5,6-5,9; коричневые – 6,0-6,2; красные – больше 6,2.

Характерно, что гипоцентры сильных землетрясений вдоль ЮФР коррелируют с границами земной коры, имеющими различные плотности по глубине или по латерали, а также превалирующие их число с $M \geq 5,6$ находятся на пересечении зоны влияния разнонаправленных разломов около $71 \pm 0,5^\circ$ в.д. Вдоль ЮФР, около этих координат, также концентрируется наибольшее напряжение, полученное из модельной задачи (см. рис. 9), несмотря на то, что эта модель слабо учитывает реальную тектоническую особенность региона. В табл. 2 приводится временная хронология гипоцентров землетрясений (номера ячеек) в пределах рассматриваемой зоны разлома. По ним трудно сделать предположение о какой-либо закономерности миграции очагов в преимущественном направлении, хотя очевидно взаимовлияние этих событий.

Таблица 2

Ячейка	Годы	С. ш	В. д	Глубина	M
7	1823	40,3	71,5	12	6,3
3	1888	40	69,8	20	6,3
8	1907	40,3	72,5	10	6,0
7	1914	40,3	71,8	20	5,7
10	1924	40,5	73,1	22	6,4
5	1933	40,1	70,7	26	5,7
5	1977	40,08	70,86	20	6,0
6	1982	40,22	71,5	20	5,7
9	2008	40,32	72,96	5	5,6
6	2011	40,12	71,45	17	6,2

Чтобы продемонстрировать подобное влияние, сделан расчет изменения фонового напряжения земной коры после землетрясения, соответствующее сильному землетрясению с магнитудой $M = 6$ с гипоцентром (40,1 с. ш.; 71,48 в. д.; $r = 19$ км) в зоне ЮФР.

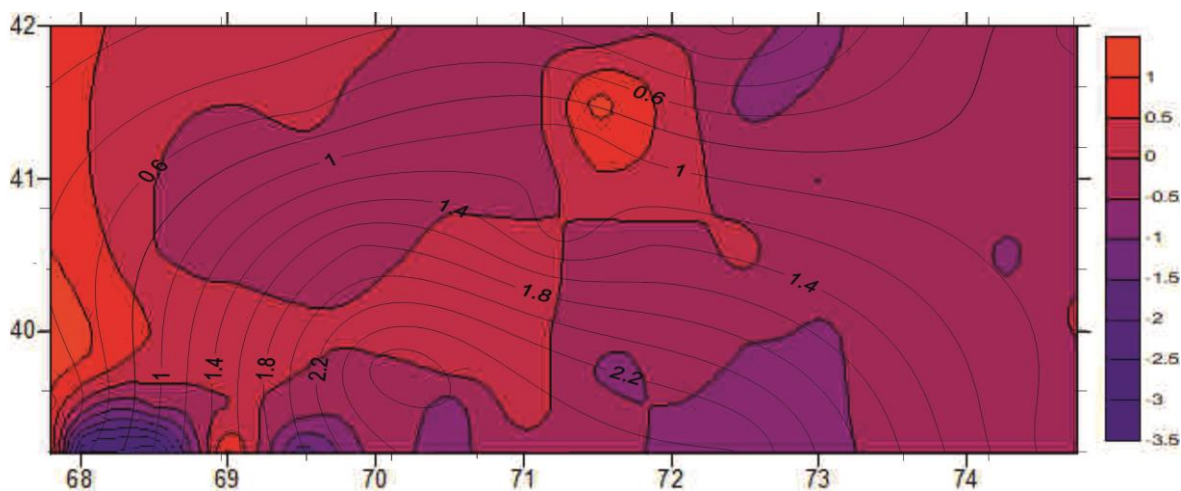


Рис. 12. Относительная разность напряжений Мизеса (%) после землетрясения в (71,48 в. д.; 40,05 с. ш., $h = 19$ км), с изолиниями наибольших напряжений в килобарах.

В результате решения уравнений (8-9) получены средние горизонтальные напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} . Обычно, вместо шести компонент тензора напряжения состояние тела можно выразить через одну скалярную величину σ_{VM} (напряжение Мизеса), которая определяется следующей формулой:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (12)$$

Здесь σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные напряжения, описанные выше, при решении уравнений (10-11). На рис. 12 изображены относительные изменения напряжений Мизеса в процентах. Наибольшее σ_1 и наименьшее σ_2 горизонтальные напряжения получены из средних горизонтальных σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} , и за σ_3 принят вес вышележащей толщи. Расчеты показывают, что территории, где фоновое напряжение имеет меньшие значения, в результате землетрясения дополнительно загрузились (красный цвет), а наиболее напряженные участки разгрузились (синий цвет). Наибольшие изменения градиентов напряжения происходят в профилях, пересекающих изолинии по нормали, где скорее всего надо ожидать последующих землетрясений.

Заключение

Создана тектоническая модель Ферганской впадины с добавлением активных и неактивных разломов.

На основе тектонической модели создана математическая модель современных движений.

По результатам решения задачи территория разделена на отдельные блоки.

Для каждого блока проведен анализ сейсмологических данных, рассчитаны параметры активности землетрясений.

Временно-пространственное расположение очагов землетрясений с магнитудой $M \geq 5,6$ вдоль Южно-Ферганского разлома не укладывается в картину направленной миграции землетрясений.

На основе численного решения модели сделан вывод о том, что не миграция землетрясений, а любое сильное землетрясение может послужить в качестве спускового механизма там, где имеется предельное состояние.

Литература

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. - М.: Наука, 1964. - 536 с.
2. Мордвинцев Д.О. Геологическое строение докембрийских комплексов Ферганской впадины по геофизическим данным: Автореф. дисс... докт. г.-м. наук. - Т., 2020.
3. Абидов А.А., Каломазов Р.У., Педдер Ю.Г. и др. Новая схема тектонического районирования Ферганской впадины // Геология нефти и газа. - 1992. - № 11. - С. 11-15.
4. Троицкий В.И., Садыков Ю.М., Денисов Р.И. К карте новейших тектонических движений Узбекистана // Проблемы сейсмологии в Узбекистане, № 7 // Мат-лы Междунар. конф. «Современные проблемы сейсмологии, гидрогеологии и инженерной геологии (к 100-летию академика Г.И. Мавлянова)». - Т.: ИС АН РУз, 2010. - С. 241-244.
5. Ибрагимов Р.Н. Сейсмогенные зоны Среднего Тянь-Шаня. - Т.: Фан, 1978. - 148 с.
6. Mohadjer S., Bendick R., Ischuk A. et al. Partitioning of India – Eurasia convergence in the Pamir-Hindu Kush from GPS measurements // Geophys. Res. Lett. - 2010. - Vol. 37. - № L04305. - P. 1-6.
7. Садыков Ю.М., Нурматов У.А., Юсупджанова У.А. Сейсмотектоническая модель восточной части Ферганской впадины // Мат-лы междунар. конф., посвящ. 110-летию акад. Г.А. Мавлянова (20-21 октября 2020 г.) «Инновационные технологии в решении актуальных проблем сейсмологии, гидрогеологии и инженерной геологии». - Т., 2020. - С. 179-187.
8. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). - М.: Научный мир, 2005. - С. 176-177.
9. Атабеков И.У. Опыт моделирования сейсмотектонического течения земной коры Центральной Азии // Физика Земли. - 2021. - № 1. - С. 122-132 DOI: 10.31857/S0002333721010014 (I.U. Atabekov Experience of Modeling the Seismotectonic Flow of the Earth's Crust in Central Asia // Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2021. - Vol. 57. - № 1. - P. 110-119 DOI: 10.1134/S1069351321010018)
10. Булин Н.К. Современное поле напряжений в верхних горизонтах земной коры // Геотектоника. - 1971. - № 3. - С. 3-15.
11. Atabekov I. Earth Crust's stresses variation in Central Asian earthquake's region. // Geodesy and Geodynamics. - 2020. - Vol. - 11. - Issue 4. - P. 293-299. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.12.005>
12. Зубович А.В., Макаров В.И., Кузиков С.И., Моисенко О.И., Щелочков Г.Г. Внутриконтинентальное горообразование в Центральной Азии по данным спутниковой геодезии // Геотектоника. - 2007. - № 41 (1). - С. 13-25.
13. Зубович А.В., Мухамедиев Ш.А. Метод наложенных триангуляций для вычисления градиента скорости горизонтальных движений: приложение к Центрально-Азиатской GPS сети // Геодинамика и Тектонофизика. - 2010. - Т. 1. - № 2. - С. 169-185.
14. Кузиков С.И., Мухамедиев Ш.А. Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети // Физика Земли. - 2010. - № 7. - С. 33-51.
15. Безродный Е.М., Туйчиев Х.А. Механизмы очагов сильных землетрясений Узбекистана. - Т.: Фан, 1987. - 143 с.
16. Якубов Д.Х. Геотектонические условия возникновения сильных землетрясений Среднего и Южного Тянь-Шаня / Под ред. О.М. Борисова. - Т.: Фан, 1991. - 104 с.
17. Яковлева И.Б., Яковлев В.Н., Абдиева А. Пространственно-временные особенности сейсмического режима Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны // Методы определения сейсмической опасности. - Кишинев: Штиинца, 1984. - С. 11-23.
18. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. (ред.) Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. - М.: Наука, 1977. - 536 с.
19. Горбунова Е.А., Шерман С.И. Вероятность сильных ($M > 7,5$) землетрясений в зонах разломов Центральной Азии (тектонофизический анализ) // Геодинамика и тектонофизика. - 2016. - Т. 7. - № 2. - С. 303-314. doi:10.5800/GT-2016-7-2-0208.

MUHANDISLIK SEYSMOLOGIYASI

А.Х. Ибрагимов

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

ОСОБЕННОСТИ ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВАХ

Ibragimov A.H.

Sanoat portlashlar davrida tebranishlarning so'nishi hususiyatlari

Annotasiya. Yirik sanoat portlashlari paytida O'zbekistondagi tog'-kon korxonolari seysmik ta'sirini, ularning ob'ektlar va insho-otlarga ta'sirini o'rganish natijalari keltirilgan.

Kalit so'zlar: portlash, seysmik to'lqinlar, spektr, kinematik, dinamika, pasayish.

Ибрагимов А.Х.

Особенности затухания колебаний при промышленных взрывах

Аннотация. Приводятся результаты исследований сейсмического эффекта при массовых промышленных взрывах на карьерах горно-добывающих предприятий Узбекистана, их влияние на объекты и сооружения.

Ключевые слова: взрыв, сейсмические волны, спектр, кинематика, динамика, затухание.

Ibragimov A.Kh.

Features of damping of vibrations at industrial explosions

Annotation. The results of studies of seismic effect in case of mass industrial explosions on quarries of mining enterprises of Uzbekistan, their influence on objects and structures are given.

Key words: explosion, seismic waves, spectrum, kinematics, dynamics, attenuation.

В последнее время в процессе интенсификации освоения новых крупных месторождений полиметаллических руд и т. д. возрастает мощность промышленных взрывов. Соответственно, возникает проблема сейсмической безопасности объектов инфраструктуры и жилых зданий в окрестностях карьеров. Сотрудниками лаборатории экспериментальной сейсмологии проведена регистрация массовых промышленных взрывов на ряде карьеров как для цементных заводов, так и для металлургических предприятий. В большинстве случаев возникает проблема оценки сейсмических воздействий на жилые здания в поселках, размещенных вблизи осваиваемых месторождений.

Для регистрации взрывов использовались цифровые велосиметры CMG-6TD и цифровые акселерометры CMG-5TDE производства компании Geopar, Великобритания. Характеристики цифрового велосиметра CMG-6TD:

- Диапазон частот 0,03-100 Гц;
- Коэффициент преобразования 1200 V/см/с;
- Динамический диапазон >95 дБ;
- Разрядность встроенного АЦП, бит 24.

Характеристики цифрового акселерометра CMG-5TDE:

- Диапазон частот 0-100 Гц;
- Шкала +-2G;
- Динамический диапазон >165 дБ;
- Разрядность встроенного АЦП, бит 24.

Далее приводятся некоторые результаты регистрации крупных промышленных взрывов.

Подрыв массива горных пород с общей массой взрывчатого вещества (ВВ) 68 т

Расстояние до блока подрыва, м	Ускорение, см/с ²			Скорость смещения, см/с		
	EW	NS	Z	EW	NS	Z
178,4	79,3	7,58	9,26	7,58	9,26	12,72
291,3	5,55	0,331	0,343	0,331	0,343	0,358
539,9	3,97	0,223	0,286	0,223	0,286	0,278
744,7	0,29	0,29	0,25	0,29	0,25	0,38
1223,8	1,44	0,068	0,076	0,068	0,076	0,066

* EW – восток-запад, NS – север-юг, Z – вертикальная компонента.

Подрыв блока 141 т взрывчатого вещества
Показания приборов с расстояниями их установки от блока подрыва

Расстояние до блока подрыва, метры	Ускорение, см/с ²			Скорость смещения, см/с		
	EW	NS	Z	EW	NS	Z
2090	0,86	0,98	0,84	0,037	0,043	0,036
1666,9	2,52	2,26	1,53	0,131	0,115	0,073
1404,6	1,81	3,06	3,19	0,088	0,164	0,172
393,8	5,75	6,07	5,95	0,345	0,368	0,359
145,0	203,8	373,3	699,4	23,03	46,92	98,36

*EW – восток-запад, NS – север-юг, Z – вертикальная компонента.

Здесь величина ускорений на расстоянии 248 м снижается в 116 раз: от 699,4 до 5,95 см/с². По скорости смещения грунта – в 273 раза: от 98,36 до 0,359 см/с. В обоих случаях, уровень сейсмических воздействий в пересчете по шкале MSK-64 снижается с 9 до 4 баллов. На расстоянии от пункта взрыва 2090 м интенсивность воздействий снижается до 2 баллов.

Кривые затухания ускорений и скорости смещения грунта отражены на рис. 1.

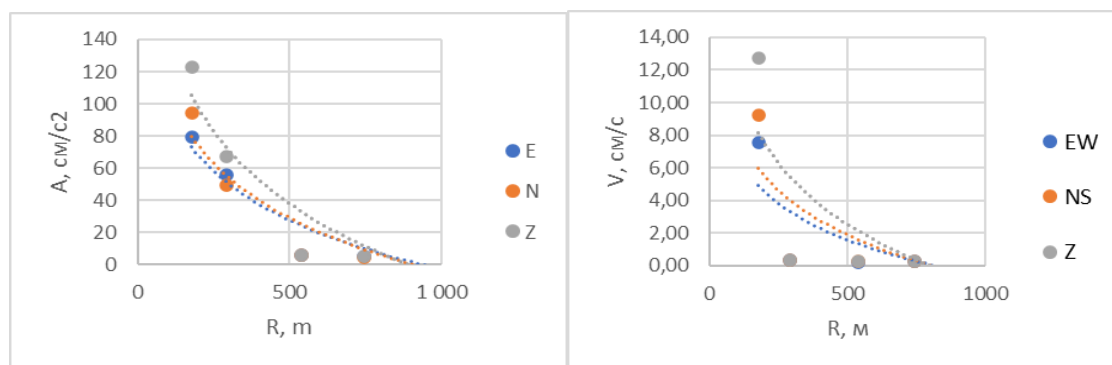


Рис. 1. Кривые затухания ускорений (слева) и скорости (справа) с расстоянием по трем компонентам.

Уравнение затухания ускорений: $A(\text{см/с}^2) = -65,41 \ln(R) + 444,3$.

Уравнение затухания скорости смещения: $V(\text{см/с}) = -31,76 \ln(R) + 231,08$,

где R – расстояние, м.

На рис. 2 приведена кривая затухания интенсивности сейсмических воздействий при взрыве.

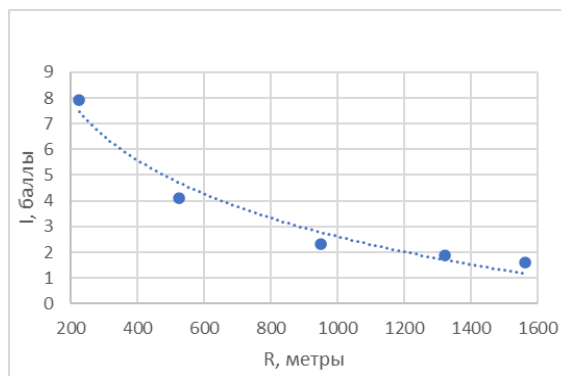


Рис. 2. Затухание интенсивности с расстоянием.

Для затухания интенсивности сейсмических воздействий:

$$I (\text{баллы}) = -3,243 \ln (R) + 25,008.$$

Для сравнения на рис. 3 приведены кривые затухания ускорений и скорости смещения грунта при землетрясении с $V_{pw} = 3,5$.

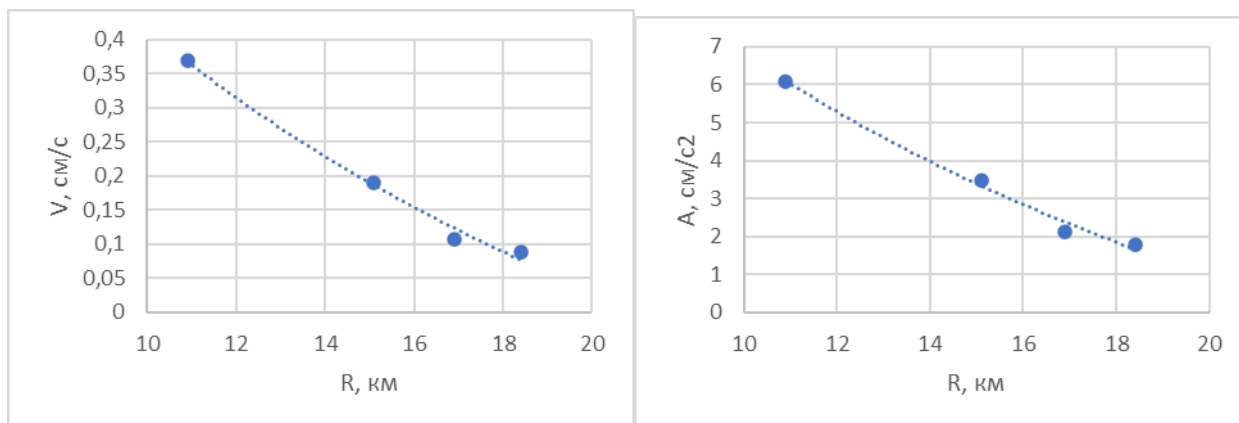


Рис. 3. Кривые затухания скорости смещения и ускорений при землетрясении.

Здесь для затухания скорости с расстоянием получено уравнение:

$$V (\text{cm/s}) = -0,558 \ln (R) + 1,7027.$$

Для ускорений:

$$A (\text{cm/s}^2) = -8,483 \ln (R) + 26,369,$$

где R – расстояние, км.

Заключение

Результаты сейсмометрических исследований вибраций при взрывных работах показали резкое уменьшение с расстоянием величины ускорений и смещения грунтов. Это означает, что на расстоянии 2 км от пункта взрыва для конструкций и зданий уровень сейсмических воздействий не превышает 2 баллов по шкале MSK-64 (в зависимости от массы ВВ), что считается безопасным значением. Также уточненные кривые затухания сейсмических воздействий при взрывах позволяют прогнозировать уровень вибрационного воздействия на объекты инфраструктуры.

Литература

1. Anandakrishnan S., Taylor S.R., Stump B.W. Quantification and characterization of regional seismic signals from cast blasting in mines: A linear elastic model // *Geophysical Journal International*. - 1997. - 131. - P. 45-60.
2. Anderson J.G. Seismic analysis of the 7 January 1998 chemical plant explosion at Kean Canyon, Nevada // *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1999. - Vol. 89. - P. 938-945.
3. Johnston A.C. Air blast recognition and location using regional seismographic networks // *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1987. - vol. 77. - P. 1446-1456.
4. Aldas G.G. Explosive charge mass and peak particle velocity (PPV) - frequency relation in mining blast // *J. Geophys. Eng.* - 2010. - 7. - P. 223-231.
5. Mesec J., Kovač I., Soldo B. Estimation of particle velocity based on blast event measurements at different rock units // *Soil Dynamics Earthq. Eng.* 2010. - 30 (10). - P. 1004-1009.
6. Zhou J., Li C.h., Koopialipoor M., Armaghani D.J., Pham B.T. Development of a new methodology for estimating the amount of PPV in surface mines based on prediction and probabilistic models (GEP-MC) // *Int. J. Min. Reclam. Environ.* - 2021. - 35. - P. 48-68.

УДК 550.34.06.013.3

Т.С. Курбанов, Б.Г. Алимов

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН РУз, г.Ташкент, Республика Узбекистан

МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ФОНЕ ТЕХНОГЕННЫХ ПОМЕХ

Kurbanov T.S., Alimov B.G.

Mikroseismik hodisalarni tehnogen shovqinlar fonida aniqlash usullari

Аннотация. Hozirgi vaqtda kuchsiz zilzilalarni o'rganish muammosi alohida ahamiyatga ega. Instrumental kuzatishlar shuni ko'rsatadiki, aniqlangan hodisalarni seysmik rayonlashtirishni keyingi tahlil qilish uchun ishlatilishi mumkin. Mikroseysmik hodisalarni ro'yxatga olish alohida hududlar uchun seysmik xavflilik darajasini aniqlash, shuningdek, turli inshootlarni qurishda hisobga olish uchun xulosalar chiqarish imkonini beradi. Kuchsiz zilzilalarni o'rganishning o'ziga xos xususiyati portlashlarni aniqlash usullarini ishlab chiqishda ham dolzarbdir. Tadqiqot uchun keng polosali datchiklari ishlatilgan, ular 0,017 dan 100 Gts chastota diapazonida to'liq seysmik ma'lumotlarni beradi. Ma'lumotlar turli xil dasturiy ta'minot yordamida tahlil qilindi va qayta ishlandi, shuningdek, to'lqinlarning spektral tarkibini va raqamli yozuvlarni birlamchi qayta ishlash bosqichida seysmik to'lqinlarni to'g'ri aniqlashga yordam beradigan boshqa xususiyatlarni hisobga olgan holda statistik xulosalar chiqarildi.

Калит so'zlar: mikroseysmik hodisalar, seysmik stansiya, seysmik shovqin, portlash, zilzila.

Курбанов Т.С., Алимов Б.Г.

Методы выявления микросейсмических событий на фоне техногенных помех

Аннотация. В настоящее время проблематика изучения слабых землетрясений приобретает особое значение. Инструментальные наблюдения показывают, что выявление слабо прописанных событий можно использовать для дальнейшего анализа проведения детального сейсмического районирования. Регистрация микросейсмических событий позволяет сделать выводы для установления степени сейсмической опасности для отдельных территорий, а также учитывать при строительстве различных сооружений. Особенность изучения слабых землетрясений актуальна и при разработке методов обнаружения взрывов. Для исследования были использованы широкополосные датчики, которые обеспечивают полную сейсмическую информацию в частотном диапазоне 0,017 до 100 Гц. Проанализированы и обработаны данные с использованием различных программных обеспечений. Сделаны статистические выводы с учетом особенностей поляризации спектрального состава волн и других характеристик, способствующих правильной идентификации сейсмических волн на этапе первичной обработки цифровых записей.

Ключевые слова: микросейсм, сейсмическая станция, сейсмический шум, взрыв, землетрясение.

Kurbanov T.S., Alimov B.G.

Methods for detection of microseismic events from technogenic noise

Annotation. At present, the problem of studying weak earthquakes is of particular importance. Instrumental observations show that the detection of poorly defined events can be used for further analysis of detailed seismic zoning. The registration of microseismic events makes it possible to draw conclusions to establish the degree of seismic hazard for individual territories, as well as to take into account during the construction of various structures. The peculiarity of the study of weak earthquakes is also relevant in the development of methods for detecting explosions. For the study, broadband sensors from the were used, which provide complete seismic information in the frequency range of 0,017 to 100 Hz. The data were analyzed and processed using various software, there were also statistical conclusions, taking into account the polarization features, the spectral composition of the waves and other characteristics that contribute to the correct identification of seismic waves at the stage of primary processing of digital records.

Key words: microseisms, seismic station, seismic noise, explosion, earthquake.

Введение. Большинство сейсмических станций расположены вблизи промышленных центров и других природных и техногенных источников микросейсмических колебаний. Обнаружение слабых сейсмических событий сопровождается определёнными трудностями в условиях сложной шумовой обстановки. При обработке записи слабых событий могут быть приняты за помехи, или же из-за неполного отображения на записи всей волновой картины землетрясения видимые сейсмические фазы могут быть неправильно интерпретированы. Интерпретаторы сталкиваются с большими трудностями при выделении первых вступлений продольных волн. В связи с этим возможны ошибки в идентификации. Первостепенная важность при обработке данных – это

понимание происхождения микросейсм-колебания земной поверхности малой амплитуды, вызываемые различными факторами (рис. 1).



Рис. 1. Различие сейсмических источников.

Микросейсмы несут в себе большую информацию. Источником могут быть природные и антропогенные шумы. К первым относятся, например, океанические микросейсмы, ко вторым – колебания, вызванные, в частности, работой машин и механизмов. Микросейсмы, особенно искусственного происхождения, иногда называют сейсмическим шумом, имея в виду, что такого рода колебания затрудняют определение фаз и времени прихода волн от землетрясений и иных сигналов, считающихся полезными. Амплитуды микросейсм при естественной их природе имеют ярко выраженную зависимость от частоты, хотя и не имеют узких спектральных пиков. Существуют модели, описывающие такое поведение, например, модель Д. Петерсона (рис. 2) [1]. Кроме того, амплитуды этих микросейсм зависят от места наблюдения, поэтому модель предусматривает два уровня – нижний и верхний – с соответствующими параметрами. Оценить уровень микросейсм для относительно шумных мест можно первыми десятками нанометров на частотах 1-10 Гц.

Амплитуды техногенных микросейсм часто сравнимы с амплитудами микросейсм естественного происхождения, превосходя последние при приближении к источнику искусственного сигнала. Микросейсмы техногенного происхождения имеют, в общем, более узкие спектральные полосы, что связано с монохромностью большей части источников.

Д. Петерсон в 1993 г. [1] представил новую глобальную модель, которая представляет ограниченные сверху и снизу огибающие семейства характерных энергетических спектральных плотностей ускорения, определенных на 75 цифровых станциях мира для шумного и спокойного периодов. Обычно их называют: новая модель высокого уровня сейсмического шума (New High noise model) и новая модель низкого уровня сейсмического шума (New Low noise model) соответственно. Они представляют в настоящее время принятые стандарты для ожидаемых ограничений по сейсмическому шуму (рис. 2, 3).

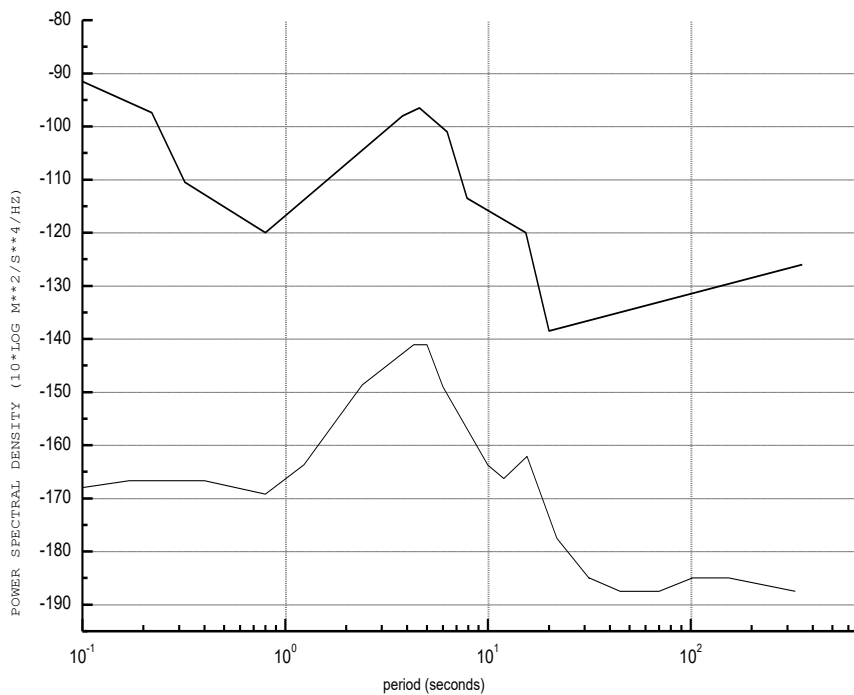


Рис. 2. Модель Д. Петерсона [1].

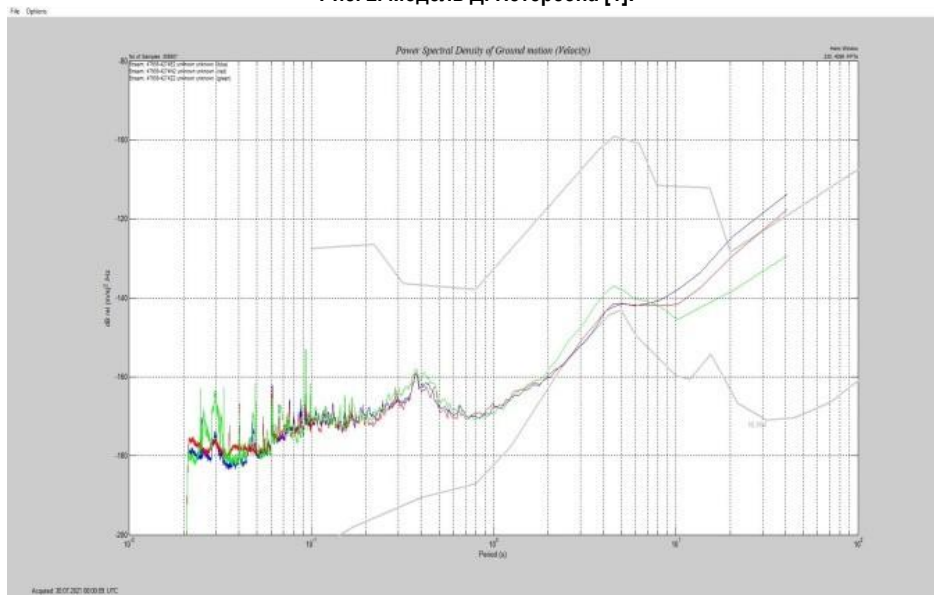


Рис. 3. Пример кривых спектра микросейсмического сигнала (Power of spectral density, PSD), станция «Лолазор».

Обсуждение современного состояния исследований. Сейсмические станции целесообразно располагать в местах, максимально удаленных от любой человеческой деятельности. Естественно, такие места будут с относительно трудным доступом к станции. Должен использоваться компромиссный подход к отдаленности и простоте доступа. Станции в слишком труднодоступных местах будут дорогими при их строительстве и в последующем обслуживании. Крупномасштабные топографические карты позволяют дать приблизительную оценку трудности и затрат времени на доступ к любым потенциальным местам для будущей станции. Места для станций, доступ к которым невозможен с применением наземных транспортных средств и требует использования вертолетов или ходьбы по пересеченной местности, могут выбираться только для автоматических

станций с редкими посещениями для обслуживания. Выбор мест для сейсмических станций на существующих метеорологических станциях, у ретрансляторов и высоких радиомачт нежелателен. Критерии выбора мест для сейсмологических и метеорологических станций очень сильно различаются, тем более для ретрансляторов и радиомачт, а самое главное – сейсмические станции должны вести наблюдения в данном месте длительное время, что необязательно для других целей.

Оценка искусственных и естественных источников сейсмических шумов в области на основе карт – только первый шаг надлежащего изучения сейсмического шума. Она должна всегда предшествовать полевым работам по измерению шума. Однако на основе карт и запросов в органы местной власти могут быть качественно оценены дорожное и железнодорожное движение, тяжелая промышленность, действия добывающих карьеров, экстенсивно эксплуатируемые сельскохозяйственные угодья и многие другие источники искусственных сейсмических шумов в окрестностях потенциальных мест, наряду с естественными источниками, подобными океанскому побережью, берегам озер, рекам или водопадам. Сегодня можно найти много достаточно разноречивых сведений о минимальных расстояниях от станции до тех или иных источников шума. Самую полную и надежную информацию дал Вилмор (Willmore, 1979 г.) [2] о минимальных рекомендуемых расстояниях между местом станции и разными типами источников шума (табл. 1). Расстояния даются для трех различных уровней чувствительности сейсмической станции, двух различных геологических условий, высокой и низкой сейсмической связью между источником шума и местом для станции.

Таблица 1

Рекомендуемые расстояния для расположения станций от источника шума [2]

Координаты	Скальные основания (граниты)			Глиноземы		
	Рекомендуемое минимальное расстояние, км					
	A	B	C	A	B	C
Океан, прибрежные горные системы	300	50	1	300	50	1
Большие озера	150	25	1	150	25	1
Большие плотины, водопады	40	10	1	40	10	1
Мощные трубопроводы	20	10	5	50	15	10
Небольшие озера	20	10	1	30	15	5
Тяжелые машины, возвратно-поступательные машины	15	3	1	20	5	2
Невысокие водопады, быстрые большие реки, прерывистые потоки через высокие плотины	5	2	0,1	15	5	1
Железная дорога с интенсивным движением	6	3	1	1	10	5
Аэропорт и воздушные гавани	6	3	1	1	6	3
Невозвратно-поступательные механизмы, балансируемые промышленные механизмы	2	0,5	0,1	0,1	10	4
Скоростные автодороги с интенсивным движением	1	0,3	0,1	0,1	6	1
Дороги, высотные здания	0,3	0,2	0,05	2	1	0,5
Низкие здания, высокие деревья и мачты	0,1	0,03	0,01	0,3	0,1	0,05
Высокие заборы, низкие деревья, высокие кусты	0,05	0,02	0,005	0,06	0,03	0,01

Для техногенного шума характерны частоты в диапазоне, близком к 1 Гц. Техногенный шум записывается обычно стандартными приборами на расстояниях, не превышающих десятки км. К сожалению, аналитики в своей повседневной работе вынуждены исследовать записи с высоким уровнем фонового шума и выделять вступления различных волн, маскируемых под неопознанным шумом. Особенно это характерно для слабых или удаленных землетрясений (эпицентральное расстояние меньше 1000 км) (табл. 2). Итак, микросейсмы могут затруднять выделение и обработку сигналов от далеких землетрясений, культурный техногенный шум мешает интерпретации сигналов от близких и удаленных событий. Зная характеристики разных типов шумов, можно повысить эффективность обнаружения полезных сигналов с помощью фильтрации цифровых записей, а также с помощью группирования станций наблюдения. Антропогенная деятельность че-

ловека отражена в записываемых на сейсмограммах шумах. Сейсмические сигналы, возникающие из-за такой деятельности человека как вращение или удары механизмов, транспортные помехи, строительные работы и т.д., называются культурным сейсмическим шумом или шумом цивилизации.

Таблица 2

Таблица выбора диапазонов частот [3]

Применение	Частотный диапазон, Гц
Сейсмические события, связанные с деятельностью шахт	5-2000
Локальные и малые землетрясения; сейсмичность, наведенная плотинами	1-100
Локальная сейсмология	0,2-80
Мониторинг сильных землетрясений	0,0-100
Общая региональная сейсмология	0,05-20
Частотная зависимость поглощения сейсмических волн	0,02-30
Энергетические вычисления расстояний землетрясений	0,01-10
Рассеяние и дифракция сейсмических волн на границах ядра	0,02-2
Исследования динамических процессов в очагах землетрясений	0,005-100
Изучения свойств земной коры	0,02-1
Дисперсия поверхностных волн	0,003-0,2
Свободные колебания Земли, бесшумные землетрясения	0,0005-0,01

Методы исследований. Частоты колебаний, присущие различным по происхождению микросейсам, могут совпадать, хотя в целом частоты естественных микросейсм ниже частот микросейсм техногенного характера. Поведение микросейсм во времени для рассматриваемых двух типов несколько различается. Так, для продолжительных времен наблюдений отчётливо проявляются сезонные, недельные, суточные изменения уровня микросейсм для тех или иных частотных диапазонов, а также изменения таких уровней с характерными временами от нескольких часов до нескольких минут и секунд. Последние можно отнести и к сигналам на том основании, что землетрясения также имеют характерные времена изменений на сейсмической записи от нескольких секунд до нескольких часов, однако, каждое землетрясение уникально, а микросейсм, большей частью, – явление повторяющееся.

Применение частотной фильтрации – обязательная процедура при интерактивной обработке цифровых записей. Тип необходимого фильтра зависит от конкретных условий регистрации на станции и степени различия между спектрами шумов и сигналов. Чаще всего применяют полосовую фильтрацию, пропуская те частоты, которые преобладают в спектрах событий различного типа: локальных, региональных и телесеизмических. В отдельных случаях удобнее применять фильтры, пропускающие только высокие или, наоборот, низкие частоты. С помощью частотной фильтрации определенными полосами в ряде случаев имитируют записи аналоговых каналов, для которых были построены калибровочные функции распространённых типов магнитуд, для соблюдения преемственности энергетических оценок. Для выделения вступлений сейсмических фаз при частотной фильтрации трехкомпонентных записей применяются фильтры с нулевым фазовым сдвигом, тогда как для замеров амплитуд такие фильтры применять неверно [5, 6].

Сегодня широкополосные датчики – очень популярный выбор. Они обеспечивают полную сейсмическую информацию в частотном диапазоне приблизительно от 0,003 до 50 Гц, позволяют

проводить более широкий диапазон исследований, чем при короткопериодных записях. Широкополосная сейсмическая станция может получить информации намного больше, чем несколько короткопериодных станций. Однако широкополосные сейсмометры более дорогие и требуют иных условий для установки и работы, чем короткопериодные сейсмометры. Их применение требует и более высокого уровня квалификации специалистов как для обслуживания аппаратных средств, так и для методов анализа. Сейсмометры – обычно более чувствительны, но не могут производить запись столь же больших амплитуд, как акселерометр. Они производят запись очень слабых и очень отдаленных событий, которые вызывают движение основания, сопоставимое с амплитудами сейсмического шума. Некоторые типы современных сейсмометров могут измерять движение основания с амплитудами меньшими, чем амплитуды самого низкого естественного сейсмического шума, обнаруженного где-нибудь в мире. Но для реализации их чувствительности нужно находить и обустривать соответствующим образом места для их установки. Если места соответствующим образом не выбраны и имеют высокий сейсмический шум, современный очень чувствительный сейсмометр мало полезен, а в местах с умеренным шумом акселерометр с полной шкалой 0,1 g обеспечил бы достаточную чувствительность для регистрации сигналов в широкой полосе частот и с большим динамическим диапазоном.

Результаты исследований. Обнаружение слабых событий сопровождается определенными трудностями в условиях сложной шумовой обстановки. При стандартной рутинной обработке записи слабых событий могут быть приняты за помехи или же из-за неполного отображения на записи всей волновой картины землетрясения видимые сейсмические фазы могут быть неправильно интерпретированы. Интерпретаторы сталкиваются с большими трудностями при выделении первых вступлений продольных волн. В связи с этим возможны ошибки в идентификации последующих вторичных фаз.

Серьезнейшей проблемой является диапазон сейсмоприемников выбора места установки и создание оптимальной рабочей среды. Так как широкополосные каналы не уменьшают естественный сейсмический шумовой пик в диапазоне 0,12-0,3 Гц, их выходные сигналы содержат намного больше сейсмического шума, чем сигналы короткопериодных сейсмометров. Соответственно, полезные сейсмические сигналы часто скрыты в сейсмическом шуме и могут быть выделены и проанализированы только после фильтрации и удаления фонового шума. Так, для всех, кроме самых сильных, землетрясений фильтрация требуется даже для простого чтения фаз. Частотный состав локальных событий обычно высокий ($f \approx 0,2-100$ Гц). Следовательно, они лучше записываются на приборах с частотой дискретизации $f \geq 80$ Гц. Общая длительность короткопериодных локальных и региональных сейсмограмм занимает от нескольких секунд до нескольких минут (рис. 4-6).

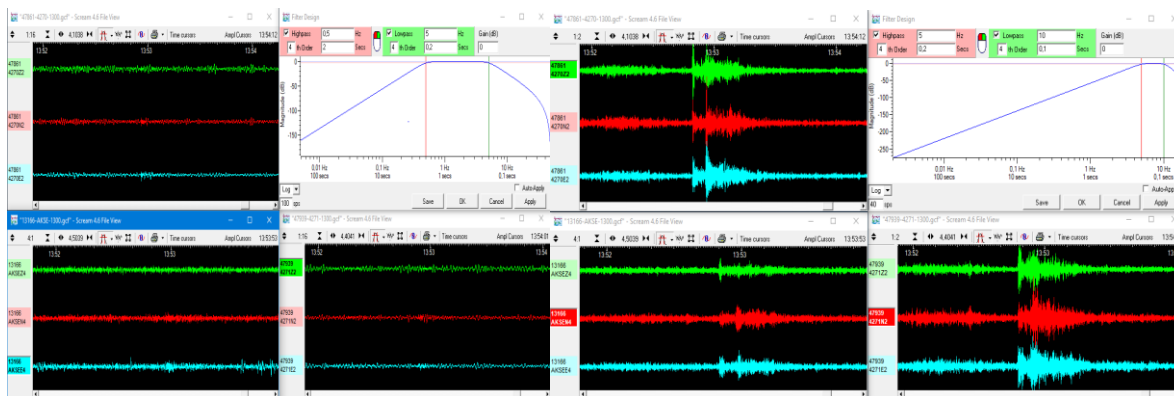


Рис. 4. Станции Учкулоч, Осмонсой, Деристон. Применение частотной фильтрации от 0,5-5 Гц; 5-10 Гц (пример выявления слабовыраженного события).

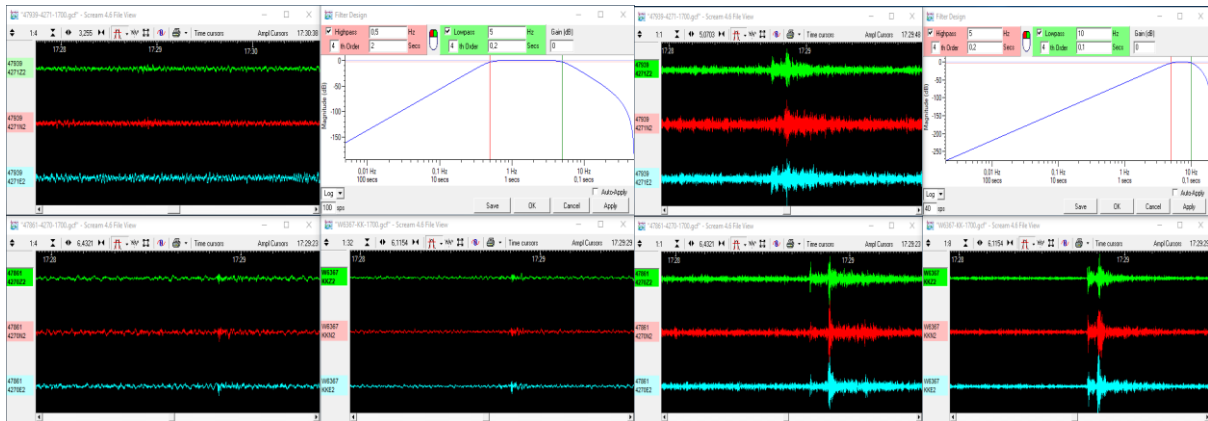


Рис. 5. Станции Учкулоч, Осмонсой, Деристон. Применение частотной фильтрации от 0,5-5 Гц; 5-10 Гц. (пример выявления слабовыраженного события).

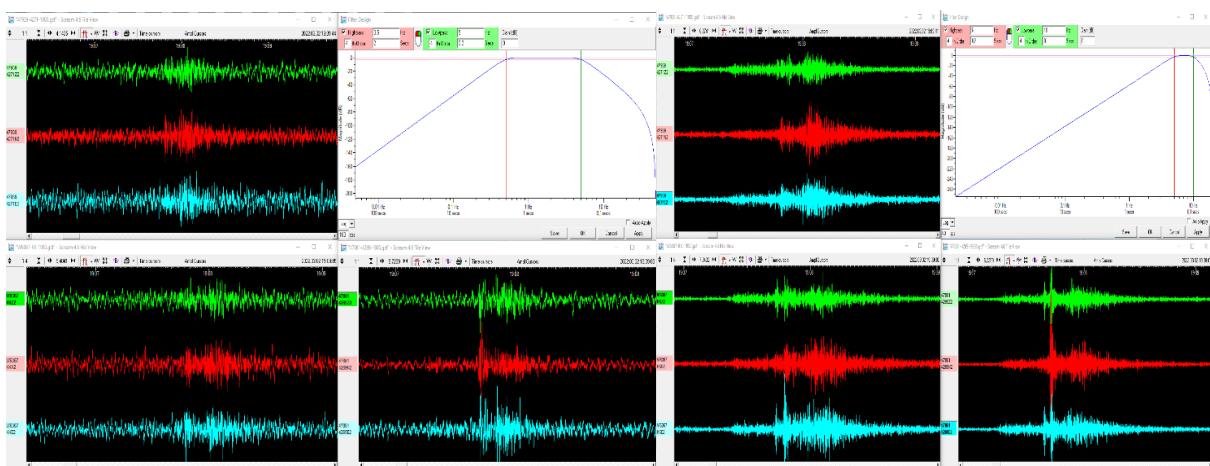


Рис. 6. Станции Сафарота, Осмонсой, Деристон. Применение частотной фильтрации от 0,5-5 Гц; 5-10 Гц (наложение 2-х событий).

При выявлении микросейсмических событий важно распознавание и отличие взрывов от землетрясений, основываясь на отношении энергии продольных и поперечных волн и количестве энергии короткопериодных и длиннопериодных колебаний. Сейсмограммы взрывов имеют относительно более короткопериодную энергию, чем сейсмограммы землетрясений. Относительный вклад разных частот в общую сейсмограмму зависит от природы источника. Простой и эффективный способ для сравнения количества энергии в низкочастотной области от энергии высокочастотной области – это сравнение двух разных магнитуд для события:

- 1) магнитуды по объемным волнам (m_b);
- 2) магнитуды по поверхностным волнам (M_s).

Так как поверхностные волны имеют более низкую частоту по сравнению с объемными волнами, их амплитуда зависит от количества энергии низкой частоты, генерированной источником. Объемные волны имеют более высокую частоту по сравнению с поверхностными волнами, их амплитуда зависит от количества энергии высокой частоты, генерированной источником (рис. 7) [6].

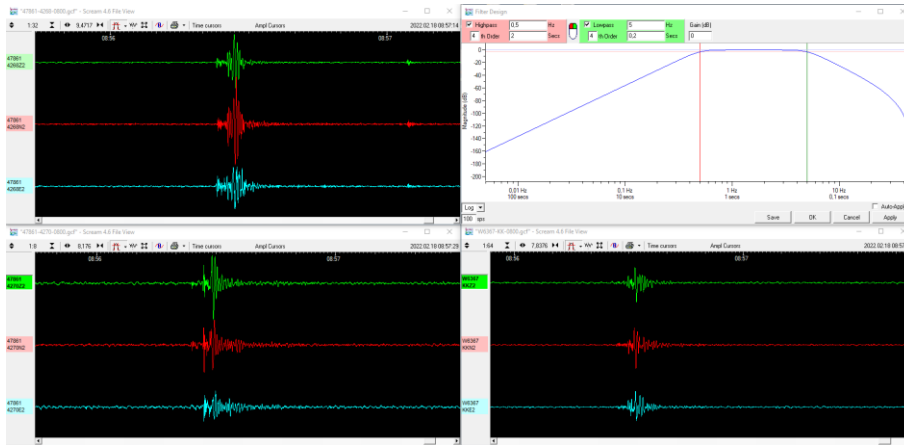


Рис. 7. Запись карьерного взрыва с 3-х станций. Применение частотной фильтрации от 0,5-5 Гц.

Одним из распространенных методов анализа цифровых записей на обнаружение события и исследования его специфической спектрально-временной картины является метод спектрограмм (рис. 8). Частотный состав записей сейсмических событий, особенно естественного происхождения, сильно изменчив во времени. Поэтому спектры событий сами по себе не очень информативны в смысле, например, дискриминации взрывов от землетрясений. Значительно более информативны спектральные диаграммы (сонограммы или спектрограммы), иллюстрирующие картину изменения спектра событий во времени, которые могут быть изображены как в виде плоских графиков, так и в виде объемных поверхностей. Принцип построения спектрограмм (сонограмм) следующий: по записи события скользят временным окном, для каждого положения которого рассчитывается спектр мощности. Амплитуда спектра нормируется на максимум и откладывается по вертикали, большие амплитуды отображаются более яркими цветами. Замечено, что некоторые типы взрывов можно легко распознать по «полосам» на спектрограммах (сонограммах). Наличие этих «полос» означает, что для данных взрывов спектральная плотность меняется во времени медленнее, чем для землетрясений (или взрывов другой природы) [10].

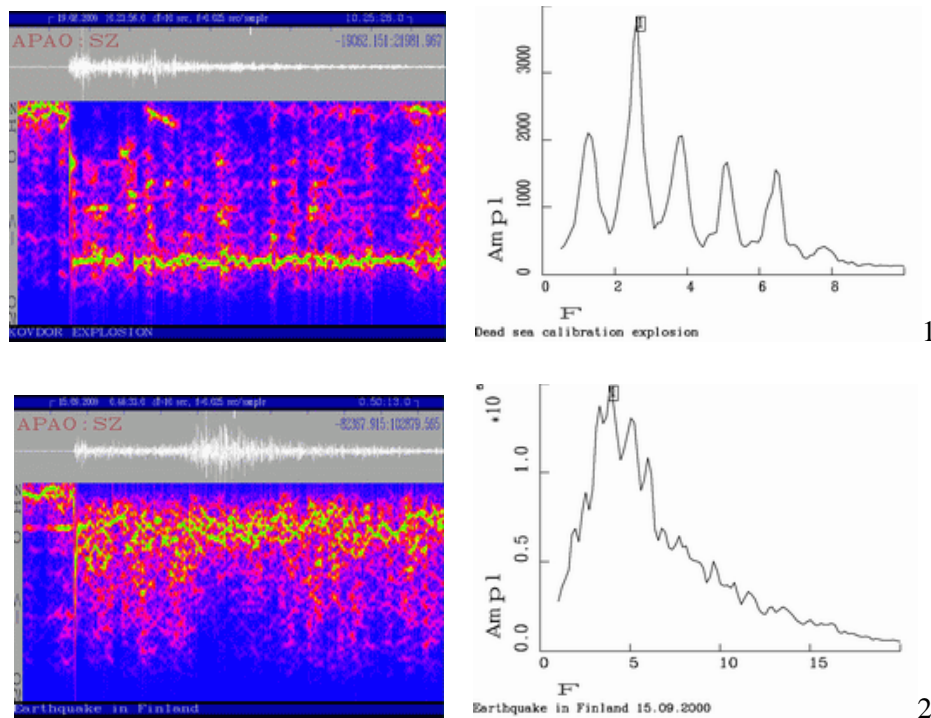


Рис. 8. Примеры спектров (справа) и сонограмм (слева) сейсмических событий. Различия: 1) записи взрыва; 2) землетрясение [10].

Выводы. Обнаружение сейсмических событий на фоне техногенных помех обязательно для интерпретации и алгоритма действий.

Первичная обработка данных с использованием частотной фильтрации также является обязательной процедурой с выделением вступлений и идентификацией сейсмических фаз, замеров их времен прихода на станцию, амплитуд и периодов колебаний.

Исследования по обработке сейсмологических данных с целью получения параметров гипоцентров и вычисления энергетических оценок сейсмических событий позволят усилить природоохранные и ресурсосберегающие мотивации при принятии социально-экономических, промышленных и градостроительных решений.

Качество сигналов, зафиксированных сейсмическими станциями мониторинга, зависит от соотношения сигнала и земного сейсмического фона. Сейсмический фон на станциях и инструментальные помехи вносят общий вклад в шумы системы сбора данных. Мониторинг характеристик сейсмического шума в связи с непрерывным контролем состояния регистрирующих каналов – мощный инструмент для тестирования состояния приборов, а систематическая оценка параметров шума – для выявления любых существенных изменений в параметрах аппаратуры. Необходимо предварительно тщательно изучить параметры сейсмического шума по каждой станции, получить реальную модель шума и его естественных вариаций. Затем, постоянно рассчитывая кривые шума и сравнивая их с модельными, можно выявить изменения, связанные с проблемами в аппаратуре. Это способствует оперативному устранению неполадок. Изучение вариаций параметров шума может использоваться для мониторинга природных явлений, таких как океанические шторма, а также в исследованиях напряженно-деформированного состояния среды и прогноза землетрясений, который основывается на присутствии в составе шума информативных эндогенных компонент.

Литература

1. OBSERVATIONS AND MODELING OF SEISMIC BACKGROUND NOISE Jon Peterson Albuquerque, New Mexico 1993 Report 93-322.
2. Willmore P.L. Manual of Seismological Observatory Practice. World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Report SE-20, Boulder, Colorado, September 1979. - 165 p.
3. Utheim T., Havskov J., Natvik Y. Seislog data acquisition systems // Seismological Research Letters. 2001. - 72. - P. 77-79.
4. Габсатарова И.П. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. - Обнинск: ГС РАН, 2006. - С. 49-53.
5. Мирзоев К.М., Михайлова Р.С., Чепкунас Л.С. Землетрясения Северной Евразии в 1994 году. - Обнинск: ГС РАН. - 2000. - С. 57-61.
6. Ибрагимов А.Х. К вопросу о дискриминации слабых землетрясений и взрывов // Узбекистон Республикаси аҳолиси ва ҳудудининг сеймик хавфсизлигини таъминлаш муаммолари (TASECO-2021). - С. 38-40.
7. Аристова И.Л., Соколова И.Н. Карьерные и строительные взрывы в районе города Алматы как эталонные события в задачах сейсмического мониторинга // Вестник НЯЦ РК. - 2020. - Вып. 2. - С. 113.
8. Соколов А.Н., Мусрепов А.В. Влияние типа аппаратуры на сейсмические шумы (на примере сейсмической станции «Подгорное») // Вестник НЯЦ РК. - 2019. - Вып. 3. - С. 88.
9. Даташит прибора по ссылке: <https://www.guralp.com/documnts/MAN-040-0004.pdf>
10. Кременецкая Е.О., Асминг В.Э., Баранов С.В. Спектральные признаки отличия взрывов от землетрясений. <http://www.krsc.ru/?q=ru/Spectra>

УДК 550.34.06

М.З. Шаякубова, А.Р. Рахматов, Б.Г. Алимов

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан

ИНДИКАТОР ИНТЕНСИВНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Shayakubova M.Z., Raxmatov A.R., Alimov B.G.
Seysmik ta'sirlarni intensivlik baholash ko'rsatgichi

Аннотация. Мақолада сеysмик та'sирлар интенсивлигининг ишлаб чиқилган ко'рсаткичи ҳақида ма'лумот берилган ва индикаторнинг хусусиятлари, сеysмик та'sирларнинг интенсивлигини баҳолаш алгоритми, янги қурилманing афзалликлари ко'рсатилган.

Калит со'злар: zilzila, akselerometr, tebranish, oghlantirishlar, seysmik to'lqinlar, tektonika, foresshoklar, energiya, zarbalar.

Шаякубова М.З., Рахматов А.Р., Алимов Б.Г.
Индикатор интенсивности сейсмических воздействий

Аннотация. Приводятся сведения о разработанном индикаторе интенсивности сейсмических воздействий. Рассмотрены особенности работы индикатора, алгоритм оценки интенсивности сейсмических воздействий, преимущества нового прибора.

Ключевые слова: землетрясение, акселерометр, вибрация, оповещения, сейсмические волны, тектоника, форшоки, энергия, толчки.

Shayakubova M.Z., Raxmatov A.R., Alimov B.G.
Detector of the intensity of seismic impacts

Annotation. The article provides information about the developed indicator of the intensity of seismic effects and shows the features of the indicator, the algorithm for estimating the intensity of seismic effects, the advantages of the new device.

Key words: earthquake, accelerometer, vibration, alerts, seismic waves, tectonics, foreshocks, energy, shocks.

Введение. Основная часть населения Земли проживают в сейсмически активных зонах, где происходили, происходят и будут происходить сильные землетрясения. Например, в Средиземно-морско-Азиатском поясе проживает более 4 млрд. человек. Поэтому, проблемы обеспечения сейсмической безопасности населения, достоверная информация о произошедших землетрясениях, а также раннее оповещение о предстоящих землетрясениях весьма актуальны. К настоящему времени в Японии разработана и функционирует система раннего оповещения землетрясений, которая автоматически включает систему остановки высокоскоростных поездов, систем электро- и газоснабжения. Это система также отправляет экстренные сообщения о произошедших землетрясениях на мобильные телефоны населения.

Кроме этого, в области сейсмологии важнейшей проблемой является оперативная оценка интенсивности сейсмических воздействий. Эта оценка необходима для организаций и ведомств, занимающихся предотвращением и ликвидацией последствий чрезвычайных ситуаций. С целью оперативной оценки интенсивности сейсмических воздействий разработаны различные индикаторы. В Институте изготовлен «Индикатор интенсивности сейсмических воздействий» на базе микроконтроллера ARDUINO UNO.

Основная идея заключается в том, что система фокусирует на мониторинге вибрацию земли с помощью датчиков и генерирует предупреждающий сигнал, когда уровень вибрации земли пересекает пороговое значение. Обнаружение S-волн (сейсмических волн) или высокочастотных вибраций фиксируется на входе Arduino Uno через акселерометр, который дает нам указание на землетрясение.

Алгоритм работы. Алгоритм работы индикатора интенсивности сейсмических воздействий землетрясений прост. Для обнаружения вибраций землетрясения используется МЭМС-акселерометр по любой из трех осей, чтобы всякий раз, когда возникают вибрации, акселерометр

обнаруживал вибрации и преобразовывал их значение АЦП. Эти значения АЦП считываются Arduino и отображаются на ЖК-дисплее 16×2 [1-3].

Затем нам нужно вычесть эти выборочные значения из фактических показаний, чтобы получить реальные показания. Эта калибровка необходима для того, чтобы Arduino UNO не отображало оповещения относительно обычных окружающих вибраций. Arduino UNO сравнивает эти значения с максимальным и минимальным значениями, если пороговое число изменений больше или меньше predetermined значений любой оси в обоих направлениях (отрицательное и положительное), тогда запускается сирена и отображается состояние предупреждения на ЖК-дисплее 16×2, а также включается светодиод. Мы можем настроить чувствительность детектора землетрясений, изменив предварительно определенные значения в коде Arduino.

Работа этого детектора землетрясений на базе Arduino UNO довольно проста. Как мы упоминали ранее, мы использовали акселерометр для обнаружения вибраций землетрясения по любой из трех осей, чтобы всякий раз, когда возникают вибрации, акселерометр обнаруживал эти вибрации и преобразовывал их в эквивалентное значение АЦП. Затем эти значения АЦП считываются Arduino и отображаются на ЖК-дисплее 16×2 (рис. 1).

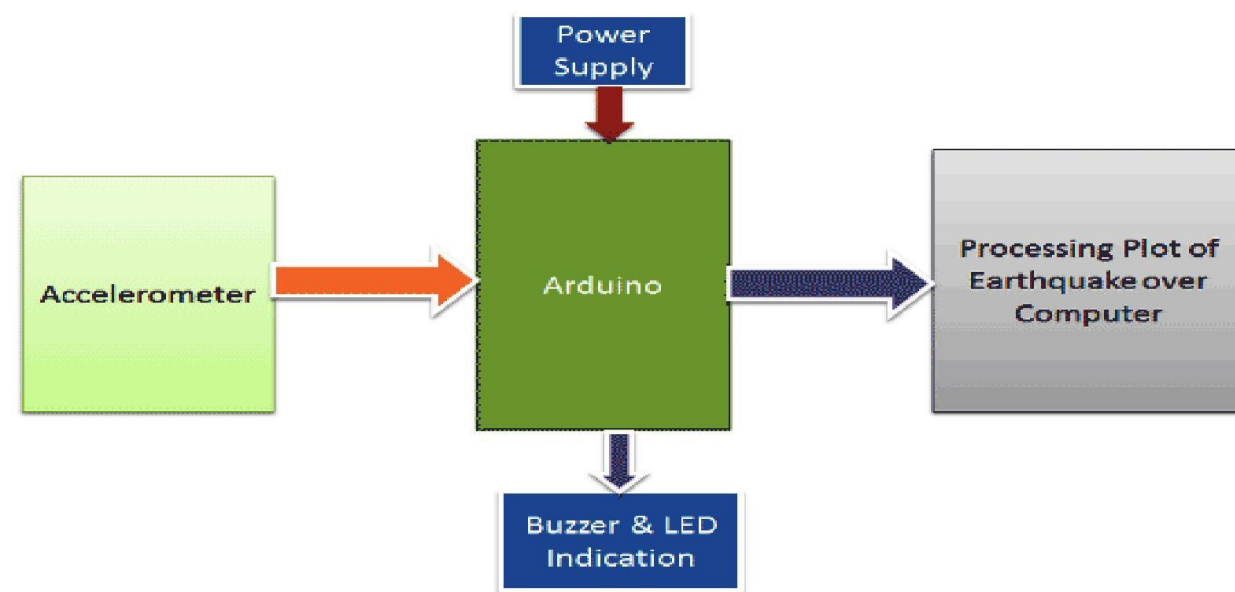


Рис. 1. Алгоритм обработки данных.

Необходимо вычесть эти выборочные значения из фактических показаний, чтобы получить реальные показания. Эта калибровка необходима для того, чтобы он не отображал оповещения относительно обычных окружающих вибраций. Найдя реальные показания, Arduino сравнивает эти значения с predetermined максимальным и минимальным значениями. Если Arduino обнаружит, что какие-либо значения изменений больше или меньше predetermined значений любой оси в обоих направлениях (отрицательное и положительное), тогда Arduino запускает зуммер и отображает состояние предупреждения на ЖК-дисплее 16×2, а также включается светодиод. Мы можем настроить чувствительность детектора землетрясений, изменив предварительно определенные значения в коде Arduino [4, 5].

Принцип работы сейсмического датчика оповещения землетрясений Arduino UNO также прост. Arduino UNO позволяет считывать аналоговое напряжение акселерометра и преобразует его в цифровые значения. Arduino UNO также управляет сиреной, светодиодом, ЖК-дисплеем 16×2, вычисляет и сравнивает значения и предпринимает соответствующие действия. МЭМС акселерометр – это акселерометр, который обнаруживает вибрацию земли и генерирует аналоговые напряжения по трем осям (X, Y и Z). ЖК-дисплей используется для отображения изменения значений по осям X, Y и Z, а также для отображения предупреждающего сообщения. Этот ЖК-дисплей подключен к Arduino в 4-битном режиме. Контакты RS, GND и EN напрямую подключены к 9,

GND и 8 контактам Arduino, а остальные 4 контакта данных ЖК-дисплея, а именно D4, D5, D6 и D7, напрямую подключены к цифровым контактам 7, 6, 5 и 4 Arduino. Зуммер подключен к контакту 12 Arduino через транзистор NPN BC547. Резистор в 10k также используется для управления яркостью ЖК-дисплея (рис. 2).

Всякий раз, когда в земле нет вибрации, значения находятся на нулевых осях. Если во время землетрясения движение достаточно сильное и превышает определенный порог, т. е. максимальный предел достигает (20) по оси x (синий цвет), загорается светодиод, звучит зуммер, а также отображается предупреждающее сообщение на ЖК-дисплее.

Детектор землетрясений на основе Arduino с использованием акселерометра был протестирован и работает удовлетворительно. Установлено, что все компоненты системы работают должным образом. Обнаружение землетрясения с помощью акселерометра и подачи предупредительного сообщения в заранее определенное время будет достигнуто успешно. Акселерометр ADXL345 определяет вибрации перед землетрясением и выдает аналоговое напряжение, эквивалентное приложенному ускорению по осям X, Y и Z [6].

Три аналоговых выхода применяются к выводам АЦП Arduino Uno. Любое ускорение, вызванное движением по любой из осей, обнаруживается акселерометром и, следовательно, АЦП Arduino. Если во время землетрясения движение достаточно сильное и превышает определенный порог, загорается светодиод, звучит зуммер, а также отображается предупреждающее сообщение на ЖК-дисплее, а график можно построить с помощью программного обеспечения IDE (см. рис. 2).

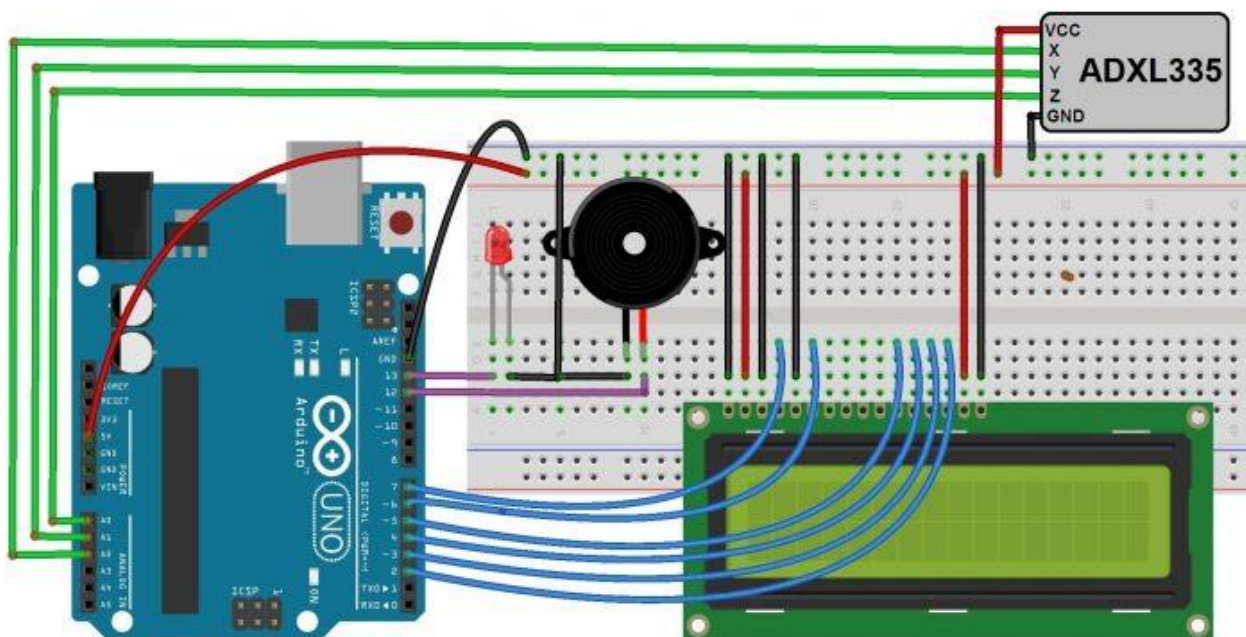


Рис. 2. Схема реализации датчика оповещения на базе Arduino Uno с выводом на ЖК-экран.

Программный код:

```
#include < LiquidCrystal.h > // lcd Header
LiquidCrystal lcd (7, 6, 5, 4, 3, 2); // pins for LCD Connection

#define buzzer 12 // buzzer pin
#define led 13 //led pin

#define x A0 // x_out pin of Accelerometer
#define y A1 // y_out pin of Accelerometer
#define z A2 // z_out pin of Accelerometer
```

```

/*variables*/
int xsample = 0;
int ysample = 0;
int zsample = 0;
long start;
int buz = 0;

/*Macros*/
#define samples 50
#define maxVal 20 // max change limit
#define minVal -20 // min change limit
#define buzTime 5000 // buzzer on time

void setup ()
{
  lcd.begin (16,2); // initializing lcd
  Serial.begin (9600); // initializing serial
  Delay (1000);
  lcd.print ("EarthQuake");
  lcd.setCursor (0,1);
  lcd.print ("Detector");
  delay (2000);
  lcd.clear ();
  lcd.print ("Calibrating...");
  lcd.setCursor (0,1);
  lcd.print ("Please wait...");
  pinMode (buzzer, OUTPUT);
  pinMode (led, OUTPUT);
  buz = 0;
  digitalWrite (buzzer, buz);
  digitalWrite (led, buz);
  for (int i = 0; i < samples; i++) // taking samples for calibration
  {
    xsample += analogRead(x);
    ysample += analogRead(y);
    zsample += analogRead(z);
  }

  xsample /= samples; // taking avg for x
  ysample /= samples; // taking avg for y
  zsample /= samples; // taking avg for z
  delay (3000);
  lcd.clear ();
  lcd.print ("Calibrated");
  delay (1000);
  lcd.clear ();
  lcd.print ("Device Ready");
  delay (1000);
  lcd.clear ();
  lcd.print (" X Y Z ");
}
void loop ()

```

```
{
int value1 = analogRead(x); // reading x out
int value2 = analogRead(y); //reading y out
int value3 = analogRead(z); //reading z out

int xValue = xsample-value1; // finding change in x
int yValue = ysample-value2; // finding change in y
int zValue = zsample-value3; // finding change in z

/*displaying change in x, y and z axis values over lcd*/
lcd.setCursor (0,1);
lcd.print (xValue);
lcd.setCursor (6,1);
lcd.print (yValue);
lcd.setCursor (12,1);
lcd.print (zValue);
delay (100);

/* comparing change with predefined limits*/
if (xValue < minVal || xValue > maxVal || yValue < minVal || yValue > maxVal || zValue < minVal ||
zValue > maxVal)
{
if (buz == 0)
start = millis (); // timer start
buz = 1; // buzzer / led flag activated
}

else if (buz == 1) // buzzer flag activated then alerting earthquake
{
lcd.setCursor (0,0);
lcd.print ("Earthquake Alert");
if (millis () >= start+buzTime)
buz = 0;
}
else
{
lcd.clear ();
lcd.print (" X Y Z ");
}

digitalWrite (buzzer, buz); // buzzer on and off command
digitalWrite (led, buz); // led on and off command

/*sending values to processing for plot over the graph*/
Serial.print ("x=");
Serial.println (xValue);
Serial.print ("y=");
Serial.println (yValue);
Serial.print ("z=");
Serial.println (zValue);
Serial.println (" $");
}
```

Результаты и обсуждение. Индикатор интенсивности сейсмических воздействий землетрясений может быть полезным устройством домашней безопасности, поскольку он предупреждает людей о землетрясении до того, как оно произойдет; простой интерфейс и прочная конструкция. Данная система удобна и портативна, поэтому ее можно переносить с одного места на другое. Схема не настолько сложна. Подлежит ремонту. Данная система включает в себя сирену (зуммер), и она эффективнее других систем сигнализации, доступных на рынке, акселерометр можно использовать для определения наклона, а также динамического ускорения в результате движения, удара или вибрации.

Выводы

Прибор дает возможность получения количественных методов обнаружения различных природных катаклизмов, это технология, позволяющая повышать безопасность и спасать жизни людей. Многочисленные исследования в области раннего оповещения сильных землетрясений включают разработку алгоритмов, оценку их применимости, экономической эффективности и целесообразности, в зависимости от плотности акселерометрических сетей, скорости передачи данных и т. д. «Индикатор интенсивности сейсмических воздействий» на базе микроконтроллера ARDUINO UNO является объектом исследования возможности создания системы раннего оповещения для предупреждения о сильном землетрясении. В качестве датчика используется цифровой MEMS-акселерометр ADXL-345, частотный диапазон которого составляет 0,1-3500 Гц. Последний подключается к микрокомпьютеру посредством порта I2C. На микроконтроллер установлено требуемое программное обеспечение из библиотек и инструментов администрирования, которые нужны для работы алгоритмов основного программного обеспечения. В качестве основного языка программирования используется Python, а для работы с математическими вычислениями и отображением результатов применяют различные библиотеки администрирования для автоматизации действий.

В нашей системе предлагаются реальные практические преимущества в случае землетрясения для защиты жизни и ресурсов.

Литература

1. Jadha A.R., Gaurav S. Gaikwad, Amol. B. Chavan, Kavaljeet. K. Tivale, Aniket. D. Patil. ARM Controller Based Earthquake & Flood Detection and Alert System // International Journal of Advanced Research in Engineering & Management (IJAREM). - 2017. - Vol. 3. - №. 04.
2. Mr. Rinesh S. IOT based earthquake detection by thingspeak // International Journal of Pure and Applied Mathematics. - 2018. - Vol. 119. - №.16.
3. Allu Suresh Babu, Naidu G.T., Meenakshi U. Earth Quake Detection and Alerting Using IOT // IJESI. - 2018. - Vol. 7. - № 5.
4. Wargantiwar N.K., Barbade A.S., Shingade A.P., Shire A.N. Wireless Earthquake Alarm Design based on MEMS Accelerometer // International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. - 2017. - Vol. 4. - № 3.
5. Nirmalap N., Rekhap K. A Study on Earthquake Detection Using Machine Learning // International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS). - 2016. - Vol. 2. - № 6.
6. Prabin K.B., Rashmi RekhaSahoo, Chirag Nanda. Earthquake Detection and Warning System for Automatic Cut-Off of Electricity and Gas Supply Lines for Safety Measures // International journal of innovative technology and exploring engineering.

С.Х. Максудов

К ВОПРОСУ О ДАЛЬНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМАХ ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ

М.Ю. Муминов соавторами в 2021 г. опубликовали две статьи [1, 2]. Они посвящены обзору результатов геомагнитных исследований на территориях геодинамических полигонов Узбекистана по выявлению предвестников землетрясений в геомагнитном поле.

В начальный период исследований по проблеме прогнозирования землетрясений каждое выявленное аномальное изменение в геолого-геофизических параметрах принималось за «предвестниковое». Со временем, с приобретением опыта и накоплением данных по локальным аномальным вариациям в комплексе геолого-геофизических параметров выявлено большое количество аномальных вариаций, которые не сопровождались отдельными сильными землетрясениями или активизацией сейсмического фона исследуемого региона. Этот факт обусловил проявление особого, серьезного подхода при определении механизма той или иной аномальной вариации. С этой точки зрения ниже будут анализированы некоторые высказывания и заключения, которые составляют основу публикаций М.Ю. Муминова с соавторами [1, 2].

К Алайскому землетрясению 2.XI.1978 г. ($M = 6,8$) приурочены аномальные изменения геомагнитного поля на отрезке профиля, пересекающего Южно-Ферганскую сейсмогенную зону (рис. 5, стр. 40 [2]). Аномалия характеризуется как среднесрочный предвестник землетрясения. Она проявляется на четырех из одиннадцати рассмотренных пунктов. Четыре пункта (№ 47-50) аномальных изменений приурочены к сейсмогенной зоне с IX-балльной интенсивностью. Здесь, если детально анализировать проявление аномалии, то максимум аномалии на пунктах 47 и 50 приходится на 1977 г., а на пунктах 48, 49 – на 1978 г. По интенсивности она больше на пунктах 48 и 49. Это говорит о том, что фокус аномалии, видимо, находится на пунктах 48 и 49. На пунктах 40-46, которые находятся ближе к эпицентру, изменения в пределах ошибки измерений. То же самое наблюдается на пунктах 51-54. То, что аномальные пункты 47-50 находятся в пределах IX-балльной зоны сейсмической интенсивности, не объясняет её связь с данным землетрясением. Тем более, что эта «предвестниковая» аномалия не подтверждена аномалиями в других геолого-геофизических параметрах. Следует отметить, что результаты многолетних геомагнитных исследований на территориях Ташкентского и Восточно-Ферганского геодинамических полигонов показали возможность проявления таких аномальных вариаций, которые по параметрам сопоставимы с предвестниковыми [3, 4]. Они не связаны ни с конкретными сильными землетрясениями, ни с активизацией общей сейсмичности исследуемых территорий. Вполне возможно, что эта аномалия может являться частью одной из этих.

Рассмотрим второй пример (рис. 6, стр. 41 [2]). Здесь приведены аномальные вариации геомагнитного поля на станции Чимион за период 1981-1992 гг. За этот период были зарегистрированы одна отрицательная и четыре положительные аномалии бухтообразной формы. Нанесены времена произошедших 17 землетрясений с магнитудой $M = 4,2-7,2$. Из них, как указывают авторы, для 10 землетрясений зарегистрированы «предвестники». Отмеченные 10 землетрясений происходят до, во время формирования и после спада аномальной вариации. Это относится и к периодам 1985 г. (рис. 3), 2014-2019 гг. (рис. 7) [2]. По каким критериям эти аномалии приурочены к произошедшим землетрясениями, не понятно? Ясно одно, что если смотреть весь период функционирования станции Чимион, то таких аномальных вариаций по этой станции очень много. Это объясняется тем, что станция расположена на территории месторождения углеводородов. К таким можно отнести и станции Маданият, Шурчи и др. На этих станциях выявлены многочисленные аномалии, которые связываются с процессами, происходящими в пределах месторождения углеводородов [5].

И опять, ни одно из приводимых аномальных изменений не подтверждается аномальными изменениями в других геолого-геофизических параметрах или на близрасположенных магнитных станциях. На стр. 43 [2] отмечается: «...предвестниковый сигнал не приходит откуда-нибудь, а образуется непосредственно в глубинной среде места регистрации предвестника в результате изменения поля напряжения».

На стр. 39 [2] сказано: «...при наличии электропроводящей среды короткопериодные геомагнитные предвестники могут распространяться на относительно большие расстояния, нежели предвестники деформационной природы. Проводниками короткопериодных предвестниковых аномалий землетрясений могут быть флюидонасыщенные активизированные разломы, зоны аномальной электропроводности земной коры и другие геолого-геофизические условия». Эти два высказывания противоречат друг другу.

Геомагнитные предвестники – не сейсмические волны, которые могут распространяться на большие расстояния. Вероятно, флюидонасыщенные разломы не могут быть сейсмоактивными из-за снятия избыточных напряжений за счет флюидонасыщенности, которая способствует разрядке напряжения медленными «криповыми» движениями.

Видимо, сейсмомагнитный эффект появляется за счет известного эффекта – пьезомагнетизма [6]. При этом породы очаговой области готовящегося землетрясения должны обладать достаточно большими значениями намагниченности. Очаговая область принимается как место максимального накопления избыточных упругих напряжений. В результате землетрясения в очаговой области снимается часть накопленного избыточного напряжения, что является необратимым процессом. Это должно отражаться и в ходе аномального изменения геомагнитного поля в виде резкого скачка значения поля.

Таких резких изменений геомагнитного поля ни в одном случае аномальных изменений на станции Чимион не наблюдается.

Многочисленные эксперименты на образцах горных пород по исследованию влияния механического напряжения на их магнитные свойства показали синхронное изменение остаточной намагниченности, магнитной восприимчивости пород с изменением величины давления [7-9]. Причем, эксперименты были проведены при воздействии различного вида давления (одноосное, всестороннее, сдвиговое) и величинах температуры [8, 9]. Это явление, названное пьезомагнетизмом, общепризнано. Этим, видимо, можно объяснить проявление предвестников землетрясений в геомагнитном поле. В данном случае, основным условием является обладание оптимальной намагниченностью пород очаговой зоны готовящегося землетрясения. Во время возникновения землетрясения происходит частичное снятие упругого напряжения, т. е. снятое напряжение преобразуется в упругую волну. Это процесс – необратимый и он должен отражаться в магнитном поле также в виде резкого скачка значения поля. Классический пример – аномальные изменения геомагнитного поля, выявленные при Абай-Базарском землетрясении 9.II.1971 г. ($M = 4,2$). Здесь на девяти пунктах магнитных наблюдений происходит резкое изменение поля после землетрясения [9].

На стр. 39 [2] говорится: «...природа геомагнитных предвестниковых аномалий связана с большой вероятностью с изменением удельного электрического сопротивления горных пород и временным перераспределением токов в месте регистрации вариаций геомагнитного поля». Данное предположение не подтверждено экспериментальными работами и теоретически оно, полагается, очень далеко от истины.

Во введении статьи [2] (стр. 35) отмечается об инертности магнитной станции Коканд к геодинамическим процессам. На стр. 49 говорится о выявлении на этой станции предвестниковой аномалии «ступенчатой» формы. Если допустить, что эта действительно предвестниковая аномалия, то как это соотносится с утверждением авторов: «...напряжения, вызывающие предвестниковую аномалию, должны иметь величину в районе регистрации предвестника минимум $E = 10^{12}$ джоуль», т. е. в теле огромного массива изверженной породы? Впрочем, как утверждают сами авторы, механизм формирования «специфической ступени» не ясен.

В статье [1] авторы приводят результаты повторных площадных исследований геомагнитного поля на территории Ходжаабадского полигона на территории Андижанской области. Динамику аномального магнитного поля на площади за 1979-1982 гг. связывают с периодом подготов-

ки и свершения Чимионского землетрясения 6.V.1982 г. Так, отмеченная динамика геомагнитного поля на этой площади продолжалась до 1989 г., до завершения детальных исследований на этой территории. Морфология и динамика геомагнитного поля на территории Ходжаабадского полигона очень детально анализированы и результаты приведены в наших работах [3, 4]. Рассмотрены высказанные предположения о природе этих аномальных вариаций.

В заключение отметим, что один из авторов – М.Ю. Муминов – долгие годы занимается исследованием аномальных вариаций геомагнитного поля по проблеме прогнозирования землетрясений. Проводил исследования по выявлению региональной зоны аномальной электропроводности на территории Узбекистана и получил интересные, важные результаты. Но, при интерпретации локальных аномальных вариаций геомагнитного поля, все зарегистрированные аномалии принимает за «предвестники» землетрясений, продолжая подход начального периода исследований, высказывая необоснованные мнения.

Достигнутый уровень знаний, накопленные данные по локальным вариациям геомагнитного поля разной природы требуют более ответственного, научно обоснованного подхода к решению проблемы прогноза землетрясений.

Литература

1. Муминов М.Ю., Сагдуллаева К.А., Нархаджаева Н.М., Мирзоидов М.З. Аномальные вариации геомагнитного поля в сейсмоактивных районах Узбекистана // Проблемы сейсмологии. - Т., 2021. - № 1. - Т. 3. - С. 24-37.
2. Муминов М.Ю., Кучкаров К.И., Каримов Ж., Мирзоидов М.З. О формах и временных особенностях среднепериодных геомагнитных предвестников землетрясений // Проблемы сейсмологии. - Т., 2021. - № 2. - Т. 3. - С. 35-51.
3. Максудов С.Х. Аномальные вариации геомагнитного поля Земли, обусловленные глубинными геодинамическими процессами // Узб. геол. журн. - 1995. - № 5. - С. 9-14.
4. Maksudov S.Kh., Abdullabekov K.N., Tuichiev A.I., Yusupov V.R. Geomagnetic Field Variations Caused by the Processes Occurring at Different Depths in the Earth's Crust and Upper Mantle // IZVESTIYA, PHYSICS OF THE SOLID EARTH. - Vol. 57. - 2021. - № 3. - P. 295-308.
5. Абдуллабеков К.Н., Бердалиев Е.Б., Максудов С.Х., Туйчиев А.И. и др. Первые результаты геомагнитных исследований в районе газового месторождения Шуртан // Узб. геол. журн. - 1994. - № 2. - С. 16-18.
6. Nagata T., Kinoshita H. Studies on Piezo-Magnetization (1) // J. Geomagn. And Geoelectr. 17. - 1965. - № 2.
7. Капица С.П. Магнитные свойства изверженных горных пород при механических напряжениях // Изв. АН СССР, сер. Геофиз. - М., 1955. - № 6.
8. Авчян Г.М. Влияние всестороннего давления до 8000 кг/см² на различные виды остаточной намагниченности горных пород // Физика Земли. - 1967. - № 7.
9. Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х. Вариации геомагнитного поля сейсмоактивных районов. - Т.: Фан, 1975. - 128 с.

Mundarija	sah.
V.A.Ismailov, U.A.Nurmatov, A.X.Ibragimov, Sh.I.Egorov, E.M.Yadgarov, B.U.Akmatov, B.Sh.Bozorov 2022 yil 12 maydagi Boysun-3 (Chilonzor) zilzilasi qibatlari haqida	3
Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Janubiy-Farg'ona seismafaol zonasida yaqin yillar ichida kuchli ($M \geq 6,0$ magnitudali) zilzila bo'lish haqida	13
Ishchuk A.R., Lindholm K., Ilyasova Z.G., Murodkulov Sh.Ya. Tojikiston hududining seysmik xavfining ehtimoliy tahlili	29
To'xtasinov A.X., Xusanbaev D.D., Atabaev D.X. O'zbekiston xududidagi extimoliy zilzila o'choqlarini (M_{MAX} bo'yicha) prognozlash	51
Muminov M.Yu. Geomagnit maydonning o'rta muddatli zilzila darakchilarini shakli va vaqt birligida namoyon bo'lish xususiyatlari	60
Sadikov Yu.M., Nurmatov U.A., Shukurov Z.F., Yusupjanova U.A., Ravshanov N.Sh., Kambarov I. Shimoliy nurota yer yorig'i seysmotektonikasiga doir (Markaziy O'zbekiston)	74
Атабеков И.У., Садиков Ю.М., Мамарахимов Ж.К. Zamonaviy harakatlarni hisobga olgan holda Janubiy-Fargona siniqligi zonasi seysmiklik tahlili	81
Ibragimov A.H. Sanoat portlashlar davrida tebranishlarning so'nishi xususiyatlari	96
Kurbanov T.S., Alimov B.G. Mikroseismik hodisalarni tehnogen shovqinlar fonida aniqlash usullari	99
Shayakubova M.Z., Raxmatov A.R., Alimov B.G. Seysmik ta'sirlarni intensivlik baholash ko'rsatgichi	108
Maksudov S.X. Zilzila darakchilarining geomagnit maydonda tarqalishi, ularning namoyon bo'lishi mumkin bo'lgan mexanizmlari masalasiga bag'ishlangan.	114

Содержание	стр.
В.А.Исмаилов, У.А.Нурматов, А.Х.Ибрагимов, Ш.И.Ёдгоров, Э.М.Ядигаров, Б.У.Актамов, Б.Ш.Бозоров О последствиях Байсунского-3 (Чиланзарского) землетрясения 12 мая 2022 года	3
Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. О возможности возникновения сильного (с магнитудой $M \geq 6,0$) землетрясения в ближайшие несколько лет в пределах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны	13
Ишук А.Р., Линдхольм К., Ильясова З.Г., Муродкулов Ш.Я. Вероятностный анализ сейсмической опасности территории Таджикистана	29
Тухтасинов А.Х., Хусанбаев Д.Д., Атабаев Д.Х. Прогнозирование возможных очагов землетрясений (по M_{MAX}) на территории Узбекистана	51
Муминов М.Ю. О формах и временных особенностях среднепериодных геомагнитных предвестников землетрясений	60

Садыков Ю.М., Нурматов У.А., Шукуров З.Ф., Юсупжанова У.А., Равшанов Н.Ш., Камбаров И. К сейсмоструктурной Северо-Нуратинского разлома (Центральный Узбекистан)	74
Атабеков И.У. Садыков Ю.М., Мамаракхимов Ж. К. Анализ сейсмичности в зоне Южно-Ферганского разлома впадины с учетом современных движений	81
Ибрагимов А.Х. Особенности затухания колебаний при промышленных взрывах	96
Курбанов Т.С., Алимов Б.Г. Методы выявления микросейсмических событий на фоне техногенных помех	99
Шаякубова М.З., Рахматов А.Р., Алимов Б.Г. Индикатор интенсивности сейсмических воздействий	108
Максудов С.Х. К вопросу о дальности распространения геомагнитных предвестников землетрясений, возможных механизмах их проявления	114

Content	page
V.A.Ismailov, U.A.Nurmatov, A.X.Ibragimov, Sh.I.Yodgorov, E.M.Yadigarov, B.U.Aktamov, B.Sh.Bozorov About the consequences of the Baysun-3 (Chilanzar) earthquake on may 12, 2022	3
Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. About the possibility of a strong (with a magnitude of $M \geq 6,0$) earthquakes in the next few years within the South Ferghana seismic zone	13
Ishchuk A.R., Lindholm K., Piyasova Z.G., Murodkulov Sh.Ya. Probabilistic analysis of seismic hazard of the Tajikistan territory	29
Tukhtasinov A.H., Khusanbayev D.D., Atabaev D.H. Prediction of possible earthquake foci (according to M_{MAX}) on the territory of Uzbekistan	51
Muminov M.Yu. On forms and time features of medium-period geomagnetic earthquakes	60
Sadykov Yu.M., Nurmatov U.A., Shukurov Z.F., Yusupzhanova U.A., Ravshanov N.Sh., Kambarov I. To seismotektonik of the north nurata fault (Central Uzbekistan)	74
Atabekov I.U. Sadikov Yu.M., Mamarakhimov J.K. Analysis of seismicity in the zone of the South Fergana fault, taking into account modern movements	81
Ibragimov A.Kh. Features of damping of vibrations at industrial explosions	96
Kurbanov T.S., Alimov B.G. Methods for detection of microseismic events from technogenic noise	99
Shayakubova M.Z., Raxmatov A.R., Alimov B.G. Detector of the intensity of seismic impacts	108
Maksudov S.Kh. On the question of the propagation range of geomagnetic precursors of earthquakes, possible mechanisms of their manifestation.	114

Коллектив авторов

SEISMOLOGIYA MUAMMOLARI

ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОЛОГИИ

SEISMOLOGY PROBLEMS

2022, № 1, том 4

*Утверждено к печати Ученым советом
Института сейсмологии им. Г.А.Мавлянова.*

Мусаххих *Т.Г.Кочергина* (рус).

Компьютерная верстка *В.Р.Юсупов*

Формат 80-64 1/8. Усл. печ. л. 15. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Бизнес Полиграф
Ташкент, Чиланзар, ул. Козиробот, 65.

Обуна индекси (подписной индекс) 1351.