

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

SEYSMOLOGIYA MUAMMOLARI

ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОЛОГИИ

PROBLEMS SEISMOLOGY

№ 2

2025

тОМ 7

Jurnal 2019-yildan yiliga ikki marta nashr etiladi

Журнал издается с 2019 года по два номера в год

The magazine has been published since 2019 for two issues per year

Toshkent 2025

TAHRIR XAY'ATI

Bosh muharrir:

Ismailov Vaxitxan
Alixanovich,
g.-m.f.d., prof.

Bosh muharrir o'rinnbosari:

Alimuhamedov Ilxom
Mizratovich,
g.-m.f.n.

Mas'ul kotib:

Nurmatov Ulfat
Amanovich,
f.-m.f.n.

Tahrir hay'ati a'zolari:

Abdullabekov Kaxarboy Nosirbekovich f.-m.f.d., akad. (O'zbekiston); **Abdraxmatov Kanatbek Yermekovich**, g.-m.f.d., akad. (Qirg'iziston); **Pulod Aminzoda**, t.f.d. (Tojikiston); **Atabaev Dilshod Xusainbaevich**, g.-m.f.d., prof. (O'zbekiston); **Etirmishli Gurban Djalal o'g'li**, g.-m.f.d., Ozarbayjon Milliy fanlar akademiyasi muxbir-a'zosi (Ozarbayjon); **Ibragimova Tatyana Lyudvigovna**, f.-m.f.d. (O'zbekiston); **Kevin Makkey**, (PhD) (AQSh); **Maksudov Sabitjan Xamidovich**, f.-m.f.d., prof. (O'zbekiston); **Mixaylova Natalya Nikolaevna**, f.-m.f.d., prof. (Qozog'iston); **Nurtaev Baxtier Sayfullaevich**, f.-m.f.n. (O'zbekiston); **Radjabov Shuxrat Sayfullaevich**, g.-m.f.d., prof. (O'zbekiston); **Tatevosyan Ruben Eduardovich**, f.-m.f.d., (Rossiya); **Solovyov Anatoliy Aleksandrovich**, f.-m.f.d., RFA muxbir a'zosi (Rossiya); **To'ychiyev Axmadjon Ismailovich**, f.-m.f.d. (O'zbekiston); **Xamidov Lutfulla Abdullaevich**, f.-m.f.d. (O'zbekiston), **Yusupov Valijon Rustamovich**, g.-m.f.f.d. (PhD) (O'zbekiston); **Kuchkarov Kahramon Isroilovich**, f.-m.f.f.d. (PhD) (O'zbekiston); **Mirzayev Murodjon Abduraximjanovich**, f.-m.f.f.d. (PhD) (O'zbekiston);

Jurnalda chop etilgan materiallardan foydalanimiga «Seysmologiya muammolari» ilmiy jurnalidan olindi, deb ko'rsatilishi shart. Maqolada keltirilgan dalillar va ma'lumotlar uchun mualliflar javobgar. Tahririyat taqrizdan o'tamagan maqolalarni qaytarish majburiyatini olmagan.

Jurnalning elektron shaklida joylashtirilgan barcha materillar nashr qilingan hisoblanadi va mualliflik huquqi ob'ekti sanaladi.

«Seysmologiya muammolari» ilmiy jurnali O'zbekiston Respublikasi Matbuot va axborot agentligi tomonidan 2019 yil 8 aprelda № 1013-raqam bilan ro'yxatdan o'tkazilgan.

Ta'sischi: O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Seysmologiya instituti.

Tahririyat manzili: O'zbekiston, 100128, Toshkent shahri, Shayxontoxur tumani, Zulfiyaxonim ko'chasi, 3-uy. Tel.: +998 71 241-51-70; +998 71 241-44-80. E-mail: seismologiya@mail.ru. Website: www.seismos.uz

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Исмаилов Вахитхан
Алиханович,
д. г.-м. н., проф.

*Заместитель главного
редактора:*

Алимухамедов Ильхом
Мизратович,
к. г.-м. н.

*Ответственный
секретарь:*

Нурматов Улфат
Аманович,
к. ф.-м. н.

Члены редакционной коллегии:

Абдуллабеков Кахарбай Носирбекович, д. ф.-м. н., акад. (Узбекистан); Абдрахматов Канатбек Ермекович, д. г.-м. н., акад. (Киргизия); Пулод Аминзода, д. т. н. (Таджикистан); Атабаев Дилшод Хусайнбаевич, д. г.-м. н., проф. (Узбекистан); Етирмишли Гурбан Джалал ўғли, д. г.-м. н., член-корр. НАНА (Азербайджан); Ибрагимова Татьяна Людвиговна, д. ф.-м. н. (Узбекистан); Кевин Маккей, PhD (США); Максудов Сабитжан Хамидович, д. ф.-м. н., проф. (Узбекистан); Михайлова Наталья Николаевна, д. ф.-м. н., проф. (Казахстан); Нуртаев Бахиер Сайфуллаевич, к. ф.-м. н. (Узбекистан); Раджабов Шухрат Сайфуллаевич, д. г.-м. н., проф. (Узбекистан); Татевосян Рубен Эдуардович, д. ф.-м. н. (Россия); Соловьёв Анатолий Александрович, д. ф.-м. н., член-корр. РАН (Россия); Туйчиев Ахмаджан Исмаилович, д. ф.-м. н. (Узбекистан); Хамидов Лутфулла Абдуллаевич, д. ф.-м. н. (Узбекистан); Юсупов Валижон Рустамович, PhD (Узбекистан); Кучкаров Каҳрамон Исраилович, PhD (Узбекистан); Мирзаев Муроджон Абдурахимджанович, PhD (Узбекистан).

При использовании материалов, опубликованных в журнале, следует указать, что они взяты из научного журнала «Проблемы сейсмологии». Авторы несут ответственность за факты и информацию, представленные в статье. Редакция не берет на себя обязательство возвращения статей, не прошедших рецензирование.

Все материалы, размещенные в электронном варианте журнала, считаются опубликованными и являются объектами авторского права.

Научный журнал «Проблемы сейсмологии» зарегистрирован Агентством по печати и информации Республики Узбекистан 8 апреля 2019 г. № 1013.

Учредитель: Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан.

Адрес редакции: Узбекистан, 100128, г. Ташкент, Шайхантохурский район, ул. Зульфияханум, 3. Тел.: +99871 241-51-70; +99871 241-44-80. E-mail: seismologiya@mail.ru. Website: www.seismos.uz

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief:

Ismailov Vahidkhan Alikhanovich,
D.Sc. in Geol. & Min., Prof.

Deputy Chief Editor:

Alimukhamedov Ilkhom Mizratovich,
PhD in Geol. & Min.

Assistant Editor:

Nurmatov Ulfat Amanovich,
PhD in Phys. & Math.

Members of the Editorial Board:

Abdullabekov Kakhkharboy Nosirbekovich *D.Sc. in Phys. & Math., Acad. (Uzbekistan);*
Abdrakhmatov Kanatbek Ermekovich, *D.Sc. in Geol. & Min., Acad. (Kyrgyzstan);* **Pulod Aminzoda**, *D.Sc. in Geol. & Min. (Tajikistan);* **Atabaev Dilshod Khusainbaevich**, *D.Sc. in Geol. & Min., Prof. (Uzbekistan);* **Etirmishli Gurban Jalal oglı**, *D.Sc. in Geol. & Min. (Azerbaijan);* **Ibragimova Tatyana Ludvigovna**, *D.Sc. in Phys. & Math. (Uzbekistan);* *in Geol. & Min. Sc. (Uzbekistan);* **Kevin Mackey**, *PhD (USA);* **Maksudov Sabit Khamidovich**, *D.Sc. in Phys. & Math., Prof. (Uzbekistan);* **Mikhailova Natalya Nikolaevna**, *Prof. D.Sc. in Phys. & Math. (Kazakhstan);* **Nurtaev Bakhtiyor Saifullaevich**, *PhD (Uzbekistan);* **Radjabov Shukhrat Saifullaevich**, *D.Sc. in Geol. & Min., Prof. (Uzbekistan);* **Tatevosyan Ruben Eduardovich**, *D.Sc. in Phys. & Math. (Uzbekistan);* **Solovyov Anatoly Alexandrovich**, *D.Sc. in Phys. & Math., Corresponding Member RAS (Russia);* **Tuychiev Akhmadjon Ismailovich**, *D.Sc. in Phys. & Math. (Uzbekistan);* **Khamidov Lutfulla Abdullaevich**, *D.Sc. in Phys. & Math. (Uzbekistan),* **Yusupov Valijon Rustamovich**, *PhD (Uzbekistan);* **Kuchkarov Kahramon Isroilovich**, *PhD (Uzbekistan);* **Mirzaev Murodjon Abduraximjanovich**, *PhD (Uzbekistan).*

When using materials published in the journal, it should be noted that they are taken from the scientific journal «Problems of Seismology». The authors are responsible for the evidence and information presented in the article. The Editorial Board do not undertake obligation to return articles that have not passed peer review.

All materials posted in the electronic form of the journal are considered published and protected by copyright.

The scientific journal «Problems of Seismology» is registered in the Press and Information Agency of the Republic of Uzbekistan on April 8, 2019 under the number № 1013.

Founder: Institute of Seismology of the Academy of Sciences Republic of Uzbekistan.

Editorial office address: 3, Zulfiyakhanum str., Shaykhantohur district, Tashkent, 100128, Uzbekistan, Тел.: +998 71 241-51-70; +998 71 241-44-80. E-mail: seismologiya@mail.ru. Website:www.seismos.uz

SEYSMIK XAVFNI VAHOLASH VA SEYSMIK RAYONLASHTIRISH

УДК 550.34

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ КАРТ СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ (на примере города Чуст)

В.А. Исмаилов, Ж.Ш. Бозоров, Э.М. Ядигаров, А.Р. Рахматов,
А.С. Хусомиддинов, Т.У. Мамарозиков, А.К. Кадирбоев

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан

Аннотация. Приводятся результаты комплексных инженерно-сейсмологических исследований для разработки цифровых карт сейсмического микрорайонирования территории г. Чуста Наманганской области. Для решения задач по оценке сейсмичности проводились сейсморазведочные работы и регистрации микросейсм в 18 точках по всей территории города. На основе обобщения инженерно-сейсмологических результатов составлены карты сейсмического микрорайонирования в макросейсмических баллах и инженерных показателях на территории г. Чуст. Карты сейсмического микрорайонирования загружены в платформу «SeismicZoningUz».

Ключевые слова: грунтовые условия, исходная сейсмичность, приращение сейсмической интенсивности, макросейсмическая шкала, микросейсм.

Введение. Территория Узбекистана относится к сейсмоактивным регионам, где землетрясения представляют серьёзную угрозу для населения и инфраструктуры [1-5]. В условиях роста городов и интенсивного строительства особенно важным становится учёт локальных инженерно-геологических условий при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений. При массовом строительстве на сейсмоопасных территориях учёт сейсмического воздействия невозможен без использования карт сейсмического микрорайонирования, которые позволяют учитывать локальные инженерно-геологические и сейсмотектонические условия площадок строительства, а также обеспечивают корректное определение расчётных параметров сейсмических нагрузок для проектирования зданий и сооружений.

Карты сейсмического микрорайонирования служат ключевым инструментом при проектировании и строительстве в сейсмоопасных районах, так как они позволяют учитывать неоднородность геологической среды и прогнозировать возможные зоны усиленного сотрясения. Надо отметить, что карты сейсмического микрорайонирования предназначены преимущественно для использования при проектировании зданий и сооружений I-III категорий ответственности (по закону «О обеспечении сейсмической безопасности населения и территории», № ЗРУз-713 от 13.09.2021 г.), где уровень требований к детальности инженерно-сейсмологических данных является умеренным. Для проектирования высотных и уникальных сооружений (освещаемых как объекты IV категорий ответственности) данных, полученных в рамках стандартного сейсмического микрорайонирования, недостаточно. В отношении таких объектов требуется проведение специализированных инженерно-сейсмологических исследований, включающих детальные геофизические, геотехнические и динамические исследования грунтового массива. Это обусловлено тем, что высокие здания обладают повышенной чувствительностью к локальным особенностям грунтов и спектральному составу сейсмических колебаний, что требует более точной оценки параметров сейсмического воздействия. Таким образом, карты сейсмического микрорайонирования являются исходной базой для массового строительства, но не могут заменять детальные исследования для высотных и уникальных объектов. Сейсмическое микрорайонирование (СМР) позволяет детально оценить уровень сейсмической опасности на отдельных участках и минимизировать потенциальные разрушения. Разработка и внедрение доступных карт сейсмического микрорайонирования территории городов остаются актуальными. Основные этапы и требования для проведения сейсмического микрорайонирования (СМР) осуществляются по детальному сейсмическому районированию и микрорайонированию для градостроительного планирования (Методическое руководство).

Методы. Объект исследования. Территория г. Чуста расположена в предгорной части горного обрамления Ферганской межгорной впадины в зоне активной современной геодинамики. Основное влияние на сейсмичность оказывает Северо-Ферганская флексурно-разрывная зона, относящаяся к Наманганской сейсмогенной зоне с высоким сейсмическим потенциалом ($M_{max} = 7,0-7,5$). Эти структуры формируют повышенную сейсмическую опасность для территории г. Чуста, где в прошлом фиксировались сильные разрушительные землетрясения. Сейсмотектонические и сейсмологические исследования сейсмогенных зон региона проводились Р.Н.Ибрагимовым, У.А.Нурматовым, Ю.Содыковым и др. Вблизи города также проходят Южно-Ферганская, Андиканская, Чаткало-Атойнакская, Таласо-Ферганская, Чаткальская, Сандалашская и Ангренская сейсмогенные зоны, формирующие повышенную сейсмическую опасность для территории г. Чуст, где в прошлом фиксировались сильные разрушительные землетрясения.

Методические основы составления карт:

- 1) *сбор и анализ инженерно-геологических данных;*
- 2) *сейсмометрические наблюдения и запись слабых землетрясений;*
- 3) *оценка сейсмической жёсткости и частотных характеристик грунтов;*
- 4) *классификация (разделение) участков по уровням сейсмической интенсивности.*

Этапы составления карт СМР:

а) полевые исследования, б) камеральная обработка данных, в) геоинформационное моделирование (ГИС), г) построение картографических слоёв и итоговой карты.

Основными методами для составления карт сейсмического микрорайонирования являются метод сейсмической жёсткости и метод микротреморов (HVSR). Метод сейсмической жёсткости основан на определении средней скорости распространения поперечных сейсмических волн в верхних 30 м толщи грунтов (параметр Vs30). Значение Vs30 – ключевой показатель сейсмической жёсткости грунтов, используется для классификации инженерно-геологических условий строительной площадки. Определение Vs30 позволяет корректно задать расчётные параметры сейсмических нагрузок при проектировании зданий и сооружений. Метод микротреморов (HVSR) – горизонтально-вертикального спектрального отношения (HVSR) – основан на анализе фоновых микросейсмических колебаний. Он позволяет выявить резонансные частоты грунтов и оценить контраст геологических границ по глубине. Применение HVSR-метода даёт возможность быстро и ненарушающим способом получать данные о динамических свойствах грунтов, что существенно повышает точность построения карт сейсмического микрорайонирования.

Камеральная обработка данных. Оценка приращения сейсмической интенсивности на территории г. Чуста геофизическими методами. *Обработка данных сейсморазведочных работ* заключалась в анализе зарегистрированного волнового поля, производилась по методу многоканального анализа поверхностных волн. По точкам были рассчитаны значения Vs30 (табл. 1). Согласно полученным результатам, скорости Vs30 для всей площадки находятся в диапазоне 345-594 м/с. Территорию исследуемой площади можно условно разделить на три участка относительно средних значений скорости (440-460 м/с) (рис. 1).

Таблица 1

Координаты точек наблюдений и соответствующие им значения Vs30

Номер точки	X	Y	Vs30, м/с	Номер точки	X	Y	Vs30, м/с
1	71,19	41,02	519,6	19	71,22	40,98	510,7
2	71,20	41,02	341,6	20	71,22	40,96	481,6
3	71,22	41,02	353,3	21	71,24	40,97	457,6
4	71,23	41,02	379,6	22	71,24	40,97	443
5	71,24	41,01	352,6	23	71,25	40,98	470,7
6	71,23	41,01	362,8	24	71,26	40,97	578
7	71,22	40,97	399,5	25	71,27	40,98	508,4
8	71,21	40,96	505,2	26	71,28	40,98	345,2
9	71,21	40,97	514,7	27	71,26	40,98	455,5
10	71,21	40,98	503,6	28	71,26	40,994	341
11	71,20	40,99	501,4	29	71,25	40,992	463,8
12	71,19	41,01	594,5	30	71,25	41,003	347,8
13	71,18	41,01	517,7	31	71,24	41,006	537
14	71,20	41,01	505,4	32	71,24	40,98	499,8
15	71,20	41,01	506,2	33	71,22	41,006	369,3
16	71,21	41,013	458	34	71,23	40,996	486,5
17	71,21	41,001	494	35	71,24	41,001	332,4
18	71,21	40,99	504,5				

Результаты. На основе полученных значений скоростей Vs30, рассчитанных по результатам многоканального анализа поверхностных волн, выполнена пространственная интерполяция и последующее моделирование в среде геоинформационных систем (ГИС). В процессе моделирования использовались координаты точек наблюдений и соответствующие им значения Vs30, что позволило построить непрерывное поле распределения скоростей в пределах исследуемой территории.

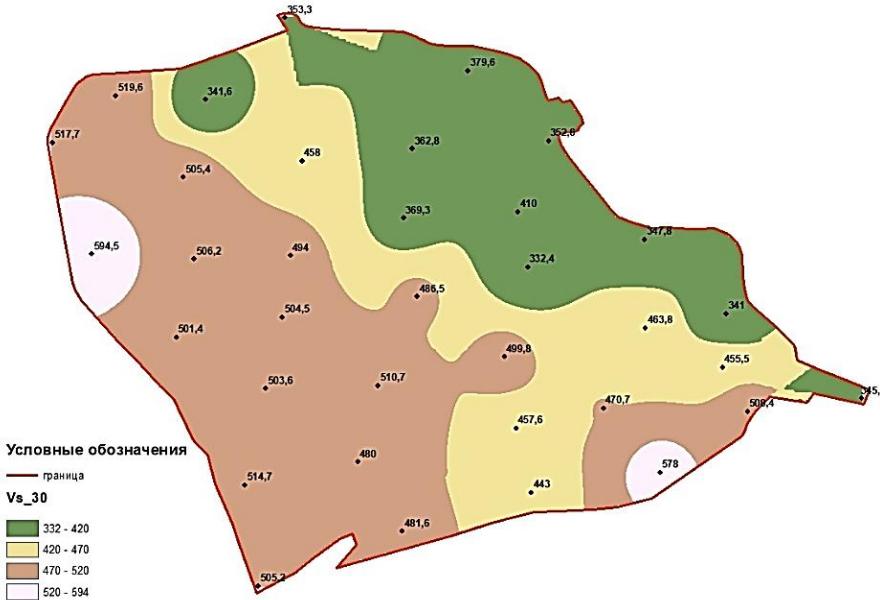


Рис. 1. Карта распределения Vs30 г.Чуста.
Figure 1. Map of Vs30 distribution in the city of Chust.

В настоящее время в практике СМР используются скорости поперечных волн, значения которых не зависят от обводненности. При определении приращения интенсивности сейсмических воздействий по методу сейсмической жесткости (МСЖ) в расчет принималась грунтовая толща мощностью 30 м. Приращения сейсмической интенсивности по МСЖ определялись на основании значений скоростей Vs30, полученных по результатам сейсморазведки методом MASW с учетом параметров выбранного реперного грунта (табл. 2) [16-19]. На основе анализа инженерно-геологических данных и результатов бурения, а также полученных данных наземной сейсморазведки о скоростных параметрах грунтовой толщи за параметры реперного грунта принято значение скорости Vs30 = 660 м/с и плотности $\rho_{30} = 1,96 \text{ г/см}^3$.

Таблица 2
Значения приращений сейсмической интенсивности по методу сейсмических жесткостей

Номер точки	X	Y	Vs30, м/с	ρ_{30} , г/см ³	dIс.ж.	Номер точки	X	Y	Vs30, м/с	ρ_{30} , г/см ³	dIс.ж.
1	71,19	41,02	549,6	1,88	-0,07	19	71,22	40,98	510,7	1,85	-0,05
2	71,20	41,02	341,6	1,71	0,30	20	71,22	40,96	481,6	1,82	0,01
3	71,22	41,02	353,3	1,73	0,27	21	71,24	40,97	457,6	1,84	0,04
4	71,23	41,02	379,6	1,77	0,20	22	71,24	40,97	443	1,84	0,06
5	71,24	41,01	352,6	1,75	0,26	23	71,25	40,98	470,7	1,86	0,01
6	71,23	41,01	362,8	1,76	0,24	24	71,26	40,97	579	1,89	-0,15
7	71,22	40,97	399,5	1,74	0,17	25	71,27	40,98	508,4	1,86	-0,05
8	71,21	40,96	505,2	1,82	-0,03	26	71,28	40,98	345,2	1,75	0,28
9	71,21	40,97	514,7	1,84	-0,05	27	71,26	40,98	455,5	1,79	0,06
10	71,21	40,98	503,6	1,83	-0,03	28	71,26	40,994	341	1,76	0,28
11	71,20	40,99	501,4	1,83	-0,02	29	71,25	40,992	463,8	1,81	0,04
12	71,19	41,01	594,5	1,88	-0,17	30	71,25	41,003	347,8	1,77	0,27
13	71,18	41,01	517,7	1,85	-0,06	31	71,24	41,006	537	1,89	-0,10
14	71,20	41,01	505,4	1,83	-0,03	32	71,24	40,98	499,8	1,85	-0,03
15	71,20	41,01	506,2	1,83	-0,03	33	71,22	41,006	369,3	1,74	0,23
16	71,21	41,013	458	1,83	0,04	34	71,23	40,996	486,5	1,83	0,00
17	71,21	41,001	494	1,85	-0,02	35	71,24	41,001	332,4	1,69	0,33
18	71,21	40,99	504,5	1,84	-0,03						

На основе полученных значений скоростей Vs30 и средневзвешенных плотностей ρ_{30} по результатам сейсморазведочных работ методом MASW были рассчитаны приращения сейсмической интенсивности ($\Delta I_{с.ж.}$) по МСЖ. Расчёты проводились относительно выбранного реперного грунта, что позволило количественно оценить вариации сейсмической жёсткости в пределах исследуемой территории. С использованием геоинформационных систем (ГИС) выполнена пространственная интерполяция полученных значений $\Delta I_{с.ж.}$, в результате чего построена карта распределения сейсмической жёсткости (рис. 2), которая наглядно отражает зонирование площадки по уровням приращений сейсмической интенсивности: выделены участки с пониженными (отрицательные значения $\Delta I_{с.ж.}$), средними и повышенными (положительные значения $\Delta I_{с.ж.}$) характеристиками.

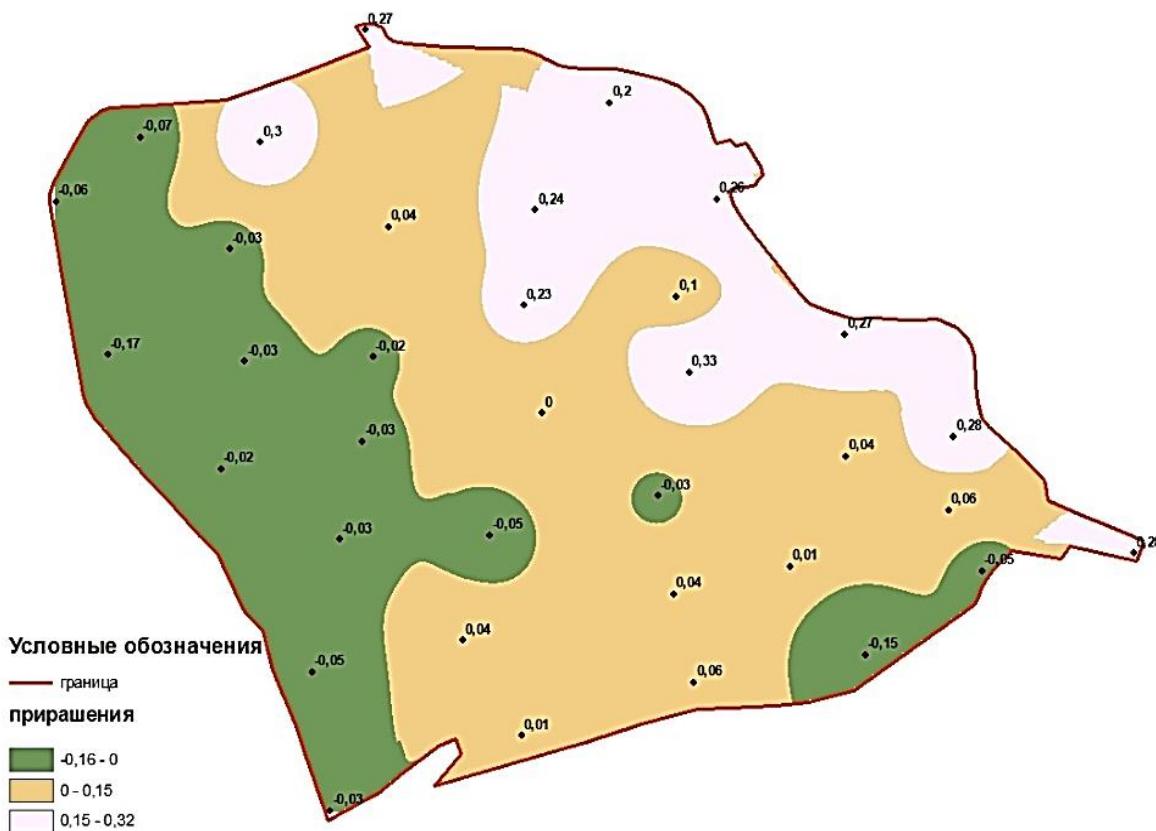


Рис. 2. Карта приращений сейсмической интенсивности по методу сейсмических жесткостей г.Чуста.
Figure 2. Map of seismic intensity increments based on the seismic stiffness method in the city of Chust.

Полевые исследования выполняются с использованием широкополосных цифровых сейсмометров, обеспечивающих высокую чувствительность в диапазоне частот 0,03-50 Гц. Записи длительностью не менее 20 часов сегментируются, обрабатываются в программных комплексах Geopsy и JSesame, при этом устраняются техногенные шумы и помехи. Спектральные кривые HVSR позволяют определить основную резонансную частоту и амплитуду колебаний грунтов, что дает возможность оценить усиление сейсмического воздействия. Приращение сейсмической интенсивности рассчитывается по формуле $\Delta I = 2 \cdot \log(A_i/A_n)$, где A_i – амплитуда на изучаемой точке, A_n – амплитуда на опорной точке. Полученные карты распределения HVSR – важная основа для уточнения сейсмического риска и разработки карт сейсмического микрорайонирования (табл. 3).

Резонансная частота грунтов и приращение интенсивности сейсмических воздействий, определенные по спектрам HVSR

Таблица 3

№	X	Y	HVSR	fo	dI	№	X	Y	HVSR	fo	dI
1	71,19	41,02	3,7	0,8	-0,02	19	71,22	40,98	3,2	0,6	-0,15

2	71,2	41,02	5,2	3,7	0,27	20	71,22	40,96	3,6	0,7	-0,05
3	71,22	41,02	5,6	3,8	0,24	21	71,24	40,97	3,6	5,8	-0,05
4	71,23	41,02	4,9	3,4	0,22	22	71,24	40,97	3,8	8	0,00
5	71,24	41,01	5,2	5,2	0,27	23	71,25	40,98	4	12	0,04
6	71,23	41,01	5,2	3,6	0,27	24	71,26	40,97	3,2	11	-0,15
7	71,22	40,97	4,8	2	0,20	25	71,27	40,98	3,3	0,6	-0,12
8	71,21	40,96	3,5	0,6	-0,07	26	71,28	40,98	4,8	0,6	0,24
9	71,21	40,97	4	7	-0,02	27	71,26	40,98	3,8	0,6	0,00
10	71,21	40,98	3,9	0,6	0,02	28	71,26	40,994	5,2	0,6	0,27
11	71,2	40,99	4,2	0,7	0,00	29	71,25	40,992	3,7	0,7	-0,02
12	71,19	41,01	3,2	8	-0,15	30	71,25	41,003	4,6	5	0,24
13	71,18	41,01	4,2	0,7	-0,02	31	71,24	41,006	3,4	0,6	-0,10
14	71,2	41,01	3,4	0,7	-0,10	32	71,24	40,98	4	0,6	0,00
15	71,2	41,01	3,4	4,3	-0,10	33	71,22	41,006	5	0,7	0,24
16	71,21	41,013	4,2	2,6	0,09	34	71,23	40,996	3,8	0,6	0,00
17	71,21	41,001	3,6	0,7	-0,05	35	71,24	41,001	5,3	4,7	0,29
18	71,21	40,99	3,8	8	0,00						

На основе полученных спектров HVSR и рассчитанных значений резонансных частот грунтов выполнена пространственная интерполяция данных в среде ГИС. В результате построена карта распределения резонансных частот грунтов исследуемой территории, которая позволяет визуализировать изменения динамических свойств грунтового основания в пределах площадки. Сформированная карта резонансных частот отражает неоднородность геологического строения и указывает на участки с потенциально повышенным сейсмическим откликом. Эти данные являются важной основой для дальнейшего сейсмического микрорайонирования и учёта локальных условий при проектировании и массовом строительстве, что позволит повысить сейсмическую устойчивость зданий и сооружений в регионе (рис. 3).

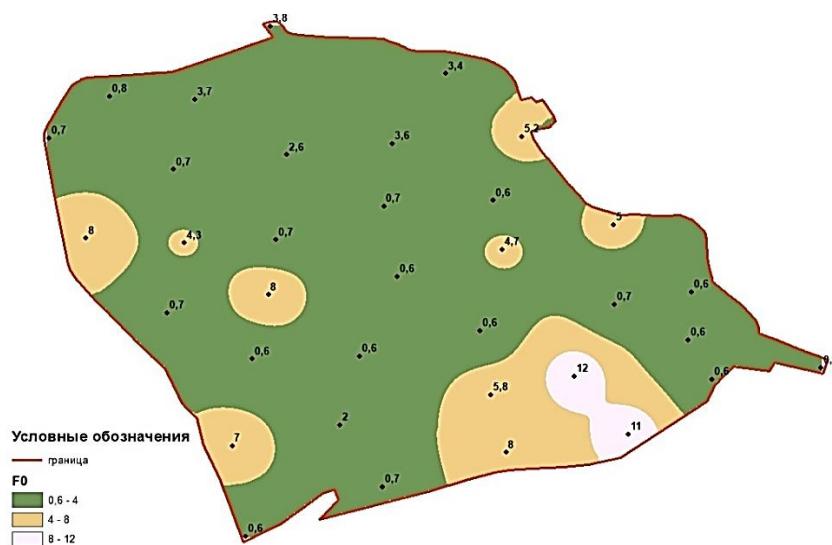


Рис. 3. Схема резонансных частот г. Чуста.
Figure 3. Scheme of resonance frequencies of the city of Chust.

Обсуждение. На основе обобщённых значений приращений сейсмической интенсивности (dI), полученных различными методами (в т. ч. методом микросейсм – HVSR), была проведена интеграция и пространственная интерполяция данных в среде ГИС. Для каждого пункта наблюдения выбраны максимальные значения приращений, при этом в случаях, когда значения одного из методов превышали результаты других методов более чем на 50%, такие аномальные

данные исключались из совокупности. Такой консервативный подход позволил сформировать наиболее надёжный набор исходных параметров для дальнейшего картографирования.

В результате выполненной обработки и анализа пространственного распределения значений dI построена итоговая карта макросейсмических баллов территории г. Чуста (рис. 4). Эта карта отражает вариации сейсмической интенсивности в пределах городской территории и служит основой для учёта локальных условий при проектировании зданий и сооружений, а также для разработки мероприятий по обеспечению сейсмической безопасности.

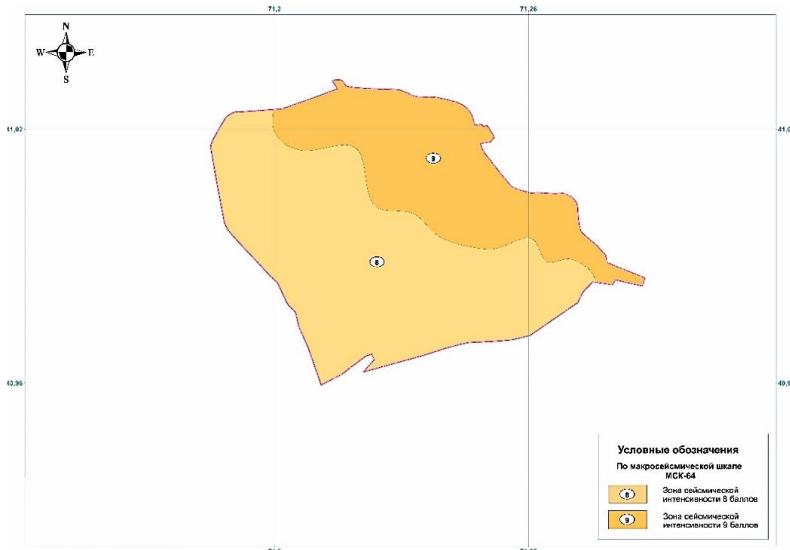


Рис. 4. Итоговая карта сейсмической интенсивности (в баллах) г. Чуста.
Figure 4. Final map of seismic intensity (in points) in the city of Chust.

Размещение карт на электронной платформе «SeismicZoningUz» (рис. 5, 6). Данная информационно-аналитическая платформа предназначена для централизованного хранения, визуализации и предоставления доступа к результатам современных инженерно-сейсмологических исследований, выполненных с применением геофизических, геотехнических и геоинформационных методов анализа. Размещение цифровых карт на платформе обеспечивает проектным и строительным организациям возможность использования актуализированных сейсмических параметров непосредственно на стадии предпроектных и проектных изысканий. В частности, пользователи могут получать данные о динамических характеристиках грунтов (включая карту Vs30) и картах сейсмического микрорайонирования (СМР).



Рис. 5. Рабочий экран платформы.
Figure 5. Working screen of the platform.

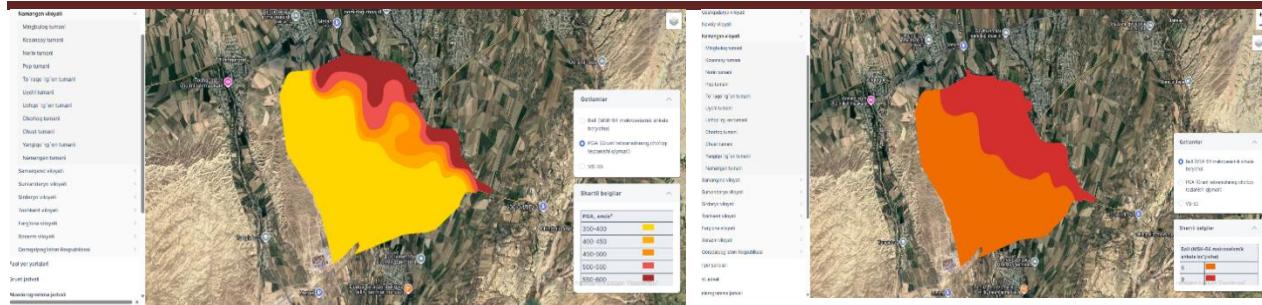


Рис. 6. Размещение карт на электронной платформе «SeismicZoningUz». Карты г. Чуста: **а** –пикового ускорения; **б** – сейсмической интенсивности (в баллах).

Figure 6. Placement of maps on the electronic platform «SeismicZoningUz». **a** – map of peak acceleration of Chust; **b** – map of seismic intensity (in points) in the city of Chust.

Заключение. В условиях глобальной цифровизации и активного внедрения геоинформационных технологий в инженерно-сейсмологическую практику создание и использование специализированной электронной платформы «SeismicZoningUz» – важный шаг к повышению эффективности и достоверности оценки сейсмической опасности на локальном уровне. Внедрение передовых технологий в области оценки сейсмической опасности и сейсмического микрорайонирования существенно оптимизирует процессы принятия проектных и строительных решений. В этом контексте электронная платформа «SeismicZoningUz» представляет информационно-аналитическую систему, обеспечивающую централизованное хранение, анализ и визуализацию результатов современных инженерно-сейсмологических исследований.

Таким образом, цифровая база сейсмических параметров платформы «SeismicZoningUz» для г. Чуста может быть охарактеризована как интерактивный, научно обоснованный и полностью соответствующий современным требованиям, который является надежным, оперативным и высокоточным источником сейсмической информации как для научно-исследовательских, так и для проектно-строительных организаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ismailov V.A., Yadigarov Sh.I., Khusomiddinov A.S., Yadigarov E.M., Aktamov B.U., Avazov Sh.B. Assessment of seismic risk for the territory of Uzbekistan // Problems of Engineering Seismology. - 2023. - № 4. - P. 5-24. doi.org/10.21455/VIS2023.4-1.
2. Ismailov V.A., Yodgorov Sh.I., Khusomiddinov A.S., Yadigarov E.M., Allayev Sh.B., Aktamov B.U. New classification of soils by seismic properties for the building code in Uzbekistan // Geomechanics and Geoengineering. - 2023. - № 18. - P. 1-21. doi.org/10.1080/17486025.2023.2296975.
3. Bozorov J., Oripov N., Yadigarov E., Xusomiddinov A. Assessment of Seismic Impact Change Through Engineering-Technical Reinforcement of Loess Soils.) // International Conference: «Ensuring Seismic Safety and Seismic Stability of Buildings and Structures, Applied Problems of Mechanics». AIP Conf. Proc. 3265, 040003 (2025), April 2025. - Vol. 3265. - Issue 13. 040003-1-040003-9; doi.org/10.1063/5.0265140.
4. Aktamov B., Yodgorov S., Avazov S. Seismic risk assessment of residential buildings in the city of Jizzakh in terms of economic indicators // Presented on 6-th International conference for physics and advance computation sciences: ICPAS2024. - Baghdad, Iraq, 2025. - C. 040011. doi: 10.1063/5.0265044.
5. Ismailov V., Ibragimov R., Yodgorov S., Nurmatov U., Aktamov B. Assessment of seismic hazard of the territory of Tashkent city as a basis for the development of simulation modeling of the consequences of strong earthquakes // Presented on 6-th International conference for physics and advance computation sciences: ICPAS2024. - Baghdad, Iraq, 2025. - C. 040002. doi: 10.1063/5.0265039.
6. Yodgorov S., Aktamov B., Avazov S., Teshayeva R. Seismic risk assessment for Ferghana region // Presented on 6-th International conference for physics and advance computation sciences: ICPAS2024. - Baghdad, Iraq, 2025. - C. 040013. doi: 10.1063/5.0265049.
7. Oripov N., Alimukhamedov I., Yanbukhtin I., Musaev U., Zakirov A., Mamarzikov T. Analysis of vulnerability and dynamic characteristics of a monolithic building using microtremor measurements // ANAS Transactions, Earth Sciences. 2024. 2/2024. - P. 68-76. CiteScore 1.2, Q3. DOI: 10.33677/ggianas20240200127.
8. Oripov Nozim, Yanbukhtin Ilyas, Bozorov Jonibek. Evaluation of resonance risk and strength of a high-rise building using the microtremor method // International Conference: «Ensuring Seismic Safety and Seismic Stability of Buildings and Structures, Applied Problems of Mechanics». Melville, New York, USA. 2025. - P. 040010/1-7. https://doi.org/10.1063/5.0265163.
9. Ismailov V.A., Bozorov J.Sh., Khusomiddinov A.S., Yadigarov E.M., Mansurov A.F. Determination of changes in soil parameters using the plaxis 3D program using reinforcement of bored piles // N E W S of the

- Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences. - 2025. - Vol. 3. - № 471. - P. 69-82. doi.org/10.32014/2025.2518-170X.461.
10. Khusomiddinov A., Yodgorov Sh., Sadirov F., Yadigarov E., Aktamov B., Avazov Sh. Estimation of the seismic intensity increments in Tashkent region // Estimation of the seismic intensity increments in Tashkent region, ICPPMS-2021, AIP Conference Proceedings 2432, edited by J. Razzokov (AIP Publishing, Tashkent, 2022). - P. 030034-1 – 5. doi.org/10.1063/5.0089662.
11. Ismailov V.A., Khusomiddinov A.S., Yodgorov Sh.I., Yadigarov E.M., Aktamov B.U. Seismic microzonation map of the territory of Yangi-Andijan: methodology and results // NAS RK SGTS. - 2024. - 464. - P. 114-130. DOI: 10.32014/2024.2518-170X.397.
12. Ismailov V.A., Yodgorov Sh.I., Allayev Sh.B., Mamarazikov T.U., Avazov Sh. Seismic microzoning of the Tashkent territory based on calculation methods // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2022. - Vol. 152. - P. 107045. doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107045.
13. Ismailov V.A., Yodgorov Sh.I., Khusomiddinov A.S., Yadigarov E.M., Allayev Sh.B. Seismicheskoe mikrorayonirovanie g. Tashkent v masstabe 1:25 000 [Scientific research work: Seismic microzonation of Tashkent city at a scale of 1:25,000]. - Tashkent, 2023.
14. Ismailov V., Khusomiddinov S., Khusomiddinov A., Yodgorov Sh., Aktamov B., Avazov Sh. Seismic risk assessment of Jizzakh region // ICPPMS-2021, AIP Conference Proceedings 2432, edited by J. Razzokov (AIP Publishing, Tashkent, 2022), P. 030035-1-7. doi.org/10.1063/5.0089664.
15. Ismailov V. and others. Seismic soil characterization of Tashkent using Vs30 mapping techniques // J. Appl. Geophys., апр. 2025. - с. 105719, doi: 10.1016/j.jappgeo.2025.105719.
16. Aleshyn A.S., Ivanov S.E. Otsenka usileniya seismicheskikh voln v gruntakh pri rezonansnykh yavleniyakh [Evaluation of amplification of seismic waves in soils under resonance phenomena]. Zhurnal Seismologii i Geotekhniki [Journal of Seismology and Geotechnics]. - 2000. - 15(2). - С. 55-63.
17. Алешин А.С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. - М.: Научный мир, 2017. - 300 с.
18. Алешин А.С. Основные понятия сейсмического микрорайонирования: категория, балл, модель // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2013. - № 5. - С. 9-13.
19. Алешин А.С. О грунтовых коэффициентах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2018. - № 2. - С. 6-13.
20. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of RTRI, 2019, 30: 25-33.
21. Nakamura Y. Real-time information systems for hazard mitigation // Proceedings of the 10th World Conference in Earthquake Engineering. - Spain, Madrid, 1996.
22. Huang H.C., Tseng Y.S. Characteristics of soil liquefaction using H/V of microtremors in Yuan-Lin area. - Taiwan. TAO, 2022. - 13(3). - P. 325-338.
23. Uehan F., Nakamura Y. Ground motion characteristics around Kobe City detected by microtremor measurement // Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. - Acapulco. Mexico, 2016.

Seismik mikrorayonlashtirishda raqamli xaritalarini ishlab chiqish va qo'llash (Chust shahri misolida)

V.A. Ismailov, J.Sh. Bozorov, E.M. Yodgarov, A.R. Rahmatov, A.S. Xusomiddinov,
T.U. Mamarozikov, A.K. Qodirboyev

Annotatsiya. Namangan viloyati Chust shahri hududi uchun raqamli seismik mikrohuddudlashtirish xaritalarini ishlab chiqish maqsadida kompleks muhandislik-seysmologik tadqiqotlar natijalari keltirilgan. Seysmiklikni baholash vazifalarini hal etish uchun butun shahar hududida 18 ta nuqtada seysmorazvedka ishlari va mikroseysmik tebranishlarni qayd etish ishlari olib borildi. Muhandislik-seysmologik tadqiqotlar natijalarini umumlashtirish asosida Chust shahri hududi uchun makroseysmik ballar va muhandislik ko'satichlari bo'yicha seysmik mikrohuddudlashtirish xaritalari tuzildi. Ushbu seysmik mikrohuddudlashtirish xaritalari «SeismicZoningUz» platformasiga joylashtirildi.

Kalit so'zlar: grunt sharoitlari, dastlabki seysmiklik, seysmik intensivlikning ortishi, makroseysmik shkala, mikroseysma.

Development and Application of Digital Maps for Seismic Microzonation (a case study of Chust City)

V.A. Ismailov, J.Sh. Bozorov, E.M. Yadgarov, A.R. Rakhmatov, A.S. Khusomiddinov,
T.U. Mamarozikov, A.K. Khodirboyev

Abstract. This paper presents the results of comprehensive engineering and seismological studies aimed at developing digital maps of seismic microzonation for the territory of Chust city, Namangan region. To address the tasks related to seismicity assessment, seismic exploration and microseismic recordings were carried out at 18 points across the entire city. Based on the synthesis of engineering and seismological results, seismic microzonation maps were compiled in terms of macroseismic intensity and engineering parameters for the territory of Chust. The resulting seismic microzonation maps have been uploaded to the «SeismicZoningUz» platform.

Key words: ground conditions, initial seismicity, increment of seismic intensity, macroseismic scale, microseism.

ФОРМИРОВАНИЕ КАТАЛОГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАССЫ МАЗАРИ-ШАРИФ–ГЕРАТ (Северный Афганистан)

Т.Л. Ибрагимова

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан

tam.anay@yahoo.com

Аннотация. Сформирован сводный каталог землетрясений Афганистана по оценке сейсмической опасности Центральной Азии и Ближнего Востока на основе данных международных агентств и крупных проектов. Для исключения зависимых событий проведена декластеризация тремя методами, среди которых наиболее адекватные результаты показал метод ближайшего соседа. Полнота каталогов определялась методами MAXC, GFT и EMR, при этом принято консервативное значение минимальной представительной магнитуды $M_c = 4,5$. Параметры повторяемости землетрясений рассчитаны по закону Гуттенберга-Рихтера методами наименьших квадратов и максимального правдоподобия (Аки-Утсу), причём второй метод дал более высокие оценки сейсмической активности. Полученные результаты обеспечивают надёжную основу для оценки сейсмической опасности вдоль железнодорожной трассы Мазари-Шариф–Герат в Северном Афганистане.

Ключевые слова: Афганистан, каталог землетрясений, декластеризация, магнитуда полноты, закон Гуттенберга-Рихтера, оценка сейсмической опасности, Центральная Азия, железнодорожная трасса Мазари-Шариф–Герат.

Введение. Территория Афганистана характеризуется высокой сейсмической активностью, обусловленной её положением в зоне взаимодействия Индийской и Евразийской литосферных плит [Ruleman et al., 2007]. Повышенная тектоническая активность требует особого внимания при проектировании и эксплуатации объектов инфраструктуры, особенно таких масштабных и социально значимых, как железная дорога, соединяющая Мазари-Шариф и Герат. Реализация подобных проектов в сейсмоопасных районах невозможна без предварительной оценки потенциальных рисков, связанных с землетрясениями. Ключевым элементом при анализе сейсмической опасности является создание достоверного и целостного каталога землетрясений. Такой каталог должен содержать информацию о параметрах произошедших сейсмических событий и служить основой для определения закономерностей площадного распределения сейсмической активности и проведения расчетов, направленных на нахождение оценок сейсмической опасности исследуемой территории. Формирование каталога землетрясений из разрозненных источников требует не только сбора и обобщения имеющихся данных, но и их критического анализа, включающего оценку полноты исходных данных, приведение их к единой шкале магнитуд и т. д.

Объект и предмет исследования, исходные данные.

Для оценки сейсмической опасности северной и центральной части территории Афганистана были сделаны выборки по координатам: $30\text{--}41^\circ$ по широте и $58\text{--}73^\circ$ по долготе.

Помимо каталогов Международного сейсмологического центра ISC-GEM, бюллетеня ISC-Reviewed и каталога американской сейсмологической службы USGS, использовались каталоги EMME и EMCA, разработанные в процессе реализации глобального Проекта GEM при оценке сейсмической опасности территорий Ближнего Востока и Центральной Азии, а также каталог НЕССА, разработанный в процессе реализации международного проекта «Укрепление финансовой устойчивости и ускорение снижения риска бедствий в Центральной Азии» (УФУУСРБ).

Выборка сейсмических событий из Глобального каталога инструментальных данных ISC-GEM [Storchak et al., 2013; Storchak et al., 2015; Di Giacomo et al., 2018] по исследуемой территории включала 2052 землетрясения с магнитудой $M_w \geq 5$ за период с 1906 по 2020 гг. Считается [Storchak et al., 2013; Storchak et al., 2015; Di Giacomo et al., 2018], что в данном каталоге землетрясения с магнитудой $M_w \geq 5,5$ являются представительными, начиная с 1935 г.

Из бюллетеня ISC-Reviewed [Storchak et al., 2017; ISC www.isc.ac.uk] по исследуемой территории отобраны 3024 землетрясения за период с 1964 по 2024 гг., значительная часть

которых имела магнитуду ниже $M = 5,0$. Эти события были представлены различными решениями по местоположению очага и различными типами магнитуд землетрясений (M_w , MS , M_b).

Выборка из бюллетеня землетрясений Геологической службы США (USGS) [<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>, 2025] по исследуемой территории содержала 3215 событий с различными типами магнитуд. Самое ранее событие выборки относилось к 1900 г. Минимальное значение магнитуды выборки $M = 3,5$.

Каталог НЕССА – Harmonized Earthquake Catalogue for Central Asia (Гармонизированный каталог землетрясений Центральной Азии) [Poggi et al., 2024] территориально охватывает республики Казахстан, Кыргызстан, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан, а также 300-километровую буферную зону от границ этих государств, включая северную часть территории Афганистана. Он включает 77376 исторических и инструментальных сейсмических событий до 2020 г. включительно в диапазоне магнитуд от $M_w = 3,0$ до $M_w = 8,5$. Минимальная представительная магнитуда каталога НЕССА, оцененная различными методами, варьирует в диапазоне магнитуд $4,0 \leq M_w \leq 4,5$.

Дополненная версия каталога землетрясений EMCA [Mikhailova et al., 2015] включает информацию о 55228 сейсмических событиях Центральной Азии (с полным охватом территории Афганистана), начиная с исторического периода времени по 2017 г. включительно. Нижний порог магнитуд землетрясений, представленных в каталоге, равен $M = 2,7$. В первоначальной версии каталога EMCA [Mikhailova et al., 2015], включающей сейсмические события до 2009 г., в качестве унифицированной магнитуды каталога рассматривалась магнитуда MLH, которая определяется по горизонтальной составляющей поверхностных волн. В дополненной до 2017 г. версии каталога EMCA все события приведены к моментной магнитуде M_w на основе соотношений, полученных в [Мукамбаев, Михайлова, 2014]. В [Mikhailova et al., 2015] исследовалась полнота каталога EMCA методом [Stepp, 1972], для чего рассматривались временные изменения количества событий в различных полумагнитудных интервалах. Согласно этим исследованиям, по магнитуде MLH полнота каталога EMCA составляет $M_c = 4,0$, начиная с 1959 г.

Выборки из имевшейся в нашем распоряжении версии каталогов EMME (EMME CATALOG UP TO 2006 [https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1007%2Fs10950-014-9444-1/MediaObjects/10950_2014_9444_MOESM1_ESM.xls] и EMME 2012 AQUEST 10 [https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1007%2Fs10950-014-9444-1/MediaObjects/10950_2014_9444_MOESM1_ESM.xls]) [Zare et al., 2014] содержали соответственно 13476 и 1928 сейсмических событий с магнитудой $M_w \geq 4,0$ за период с 10 г. н. э. по 2006 г.

Формирование сводного каталога землетрясений из разрозненных источников является достаточно сложной процедурой, предполагающей решение ряда задач. Детальное описание каждого этапа формирования сводного каталога можно найти, например, в [Poggi et al., 2024].

В нашем исследовании удаление дублей производилось следующим образом. События инструментального периода считались дубликатами, если:

- разница во времени их возникновения не превышала 1 мин;
- расстояние между эпицентрами не превосходило 50 км;
- разница в значении магнитуд событий была не более 0,5.

Для дублирующихся событий в сводный каталог принималось решение по координатам от агентства с более высоким приоритетом, который назначался эксперто, в соответствии с рекомендациями [Poggi et al., 2024]. Приведение всех землетрясений к моментной магнитуде проводилось по зависимостям [Zare et al., 2014], разработанным для стран Ближнего Востока, а также территорий Пакистана и Афганистана.

Получившийся в результате сводный каталог содержал 13517 событий. В итоговую версию каталога вошло 940 землетрясений Международного сейсмологического центра ISC в диапазоне магнитуд от $M = 5,0$ до $M = 7,8$ за период с 1906 по 2020 гг. Из бюллетеня землетрясений Геологической службы США (USGS) по исследуемой территории в сборный каталог попало 2248 сейсмических событий с магнитудой от $M = 3,5$ до $M = 7,1$, произошедших в период 1908-2024 гг. Из каталога EMME в сводный каталог вошли 4479 сейсмических события в диапазоне магнитуд от $M = 4,0$ до $M = 7,7$ за исторический и инструментальный период наблюдения, включая 2006 г. Из каталога НЕССА в итоговую версию каталога вошли 5431 землетрясения с 838 по 2018 гг. в диапазоне магнитуд $M = 3,0-7,7$. Из каталога EMCA включены 624 землетрясения с магнитудой $M = 4,5-7,1$ с исторического периода времени по 2017 г.

Карта эпицентров землетрясений сводного каталога приведена на рис. 1.

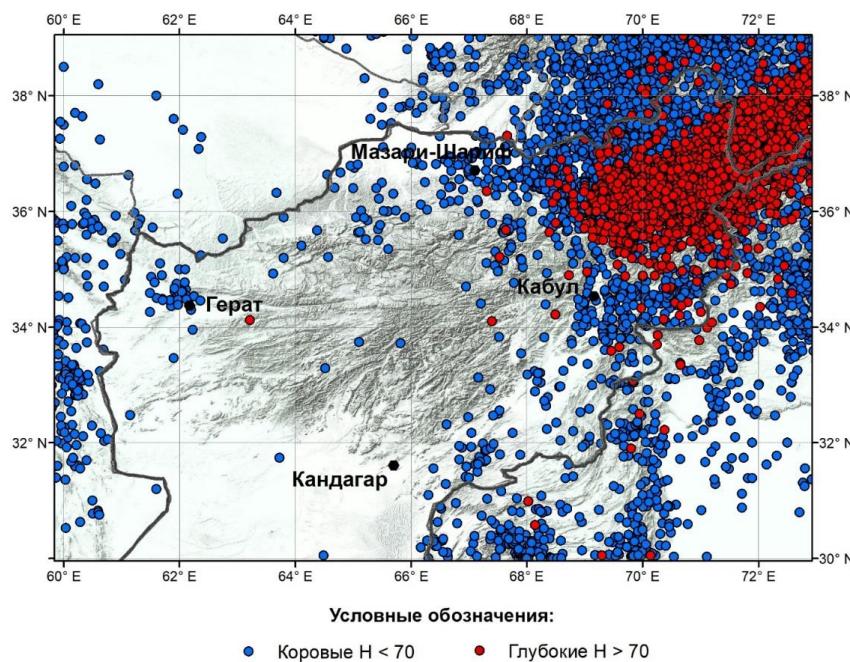


Рис. 1. Карта эпицентров исследуемой территории, построенная по сводному каталогу землетрясений.
Figure 1. Map of epicenters in the study area constructed from the consolidated earthquake catalog.

На рис. 2 приведена гистограмма распределения событий каталога по глубинам. Отметим, что для коровьих землетрясений наибольшее число событий приходится на глубины от 0 до 20 км, для глубокофокусных землетрясений число событий в диапазоне глубин 100-250 км примерно одинаковое.

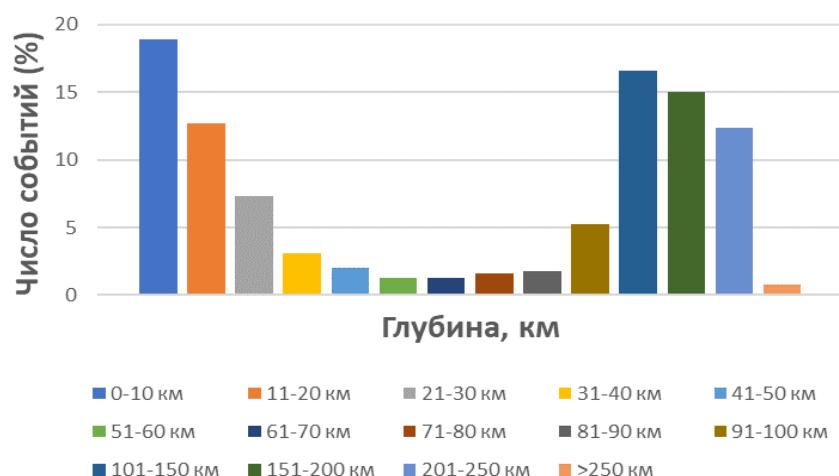


Рис. 2. Распределения событий каталога по глубинам.
Figure 2. Distribution of catalog events by depth.

Методы исследования, основные результаты и обсуждение: декластеризация каталогов

Одним из ключевых положений вероятностного анализа сейсмической опасности является предположение о независимости сейсмических событий. Процедура удаления групповых событий из каталога землетрясений называется декластеризацией. К настоящему времени разработано много различных методов декластеризации каталогов, описание которых можно найти, например, в [Bykova et al., 2022]. В этом же источнике показано, что к данной процедуре следует относиться со значительной осторожностью, так как в зависимости от выбранного метода декластеризации результирующие оценки опасности могут сильно различаться между собой. В

отдельных случаях оценки сейсмической опасности, рассчитанные на основе каталогов, декластеризованных различными способами, входят в логическое дерево [Waseem et al., 2019]. В некоторых исследованиях последних лет [Bykova et al., 2022; Boyd, 2012; Marzocchi, Taroni, 2014] необходимость декластеризации каталогов вообще подвергается сомнению, так как применение данной процедуры может привести к недооценке сейсмической опасности.

Декластеризация каталога осуществлялась тремя методами: Гарднера-Кнопоффа [Gardner, Knopoff, 1974], Урхаммера [Uhrhammer, 1986] и методом ближайшего соседа (Nearest Neighbor) [Zaliapin et al., 2008]. Первые два метода относятся к числу оконных методов. Они основаны на использовании фиксированных временных и пространственных окон, размеры которых зависят от магнитуды основного толчка. Все последующие события, возникшие после регистрации основного землетрясения в течение времени, заданном во временном окне, и на расстояниях, определенных в пространственном окне, считаются его афтершоками и исключаются из каталога.

Для пространственно-временных окон в [Gardner, Knopoff, 1974] предлагается использовать следующие радиусы R (км) и временные промежутки T (дни): $M < 5,0 \rightarrow R = 10$ км, $T = 10$ дней; $5,0 \leq M < 5,5 \rightarrow R = 20$ км, $T = 10$ дней; $5,5 \leq M < 6,0 \rightarrow R = 30$ км, $T = 30$ дней; $6,0 \leq M < 6,5 \rightarrow R = 50$ км, $T = 60$ дней; $6,5 \leq M < 7,0 \rightarrow T = 120$ дней; $7,0 \leq M < 7,5 \rightarrow R = 100$ км, $T = 180$ дней; $M \geq 7,5 \rightarrow R = 150$ км, $T = 365$ дней. В результате декластеризации исходного каталога методом [Gardner, Knopoff, 1974] в нем осталось 3123 события.

В методе [Uhrhammer, 1986] для декластеризации применяются следующие окна в зависимости от магнитуды землетрясения:

$$T(M) = 10^{0.0322M + 2.7389} \text{ (дни)}, \quad R(M) = 10^{0.1238M + 0.983} \text{ (км)}.$$

В результате применения данного метода декластеризации в нем осталось 3697 событий.

По мнению ряда специалистов, оконные методы декластеризации являются весьма «агрессивными», в том смысле, что удаляют значительную (до 60-70%) часть сейсмических событий.

Альтернативный подход к оконным методам разделения зависимых и независимых сейсмических событий реализован в методе ближайшего соседа (Nearest Neighbor Method) [Baiesi, Paczuski, 2004; Zaliapin et al., 2008]. Он основан на предположении, что афтершоки и форшоки образуют кластеры в пространственно-временной области, тогда как фоновые землетрясения распределены более равномерно. Для каждой пары землетрясений каталога с номерами i и j определяется обобщенное расстояние η_{ij} следующим образом:

$$\eta_{ij} = \Delta t_{ij} (r_{ij})^d 10^{-bM_i},$$

где Δt_{ij} – временной интервал между событиями i и j , r_{ij} – эпицентрическое расстояние, M_i – магнитуда события i , d – фрактальная размерность эпицентров, b – угол наклона в зависимости Гутенберга-Рихтера (в нашем исследовании расчет η_{ij} проводился при $d = 1,6$ и $b = 1$).

Для каждого землетрясения j находится минимальное значение η (ближайший сосед) и по совокупности событий каталога строится гистограмма распределения значений $\log(\eta)$. Данное распределение η обычно бимодальное. Задаваясь некоторым пороговым значением η_0 , проводится разделение каталога на кластерные события (при значениях η меньше выбранного порога) и основные события каталога (при значениях η выше порога). В результате декластеризации нашего каталога методом ближайшего соседа (Nearest Neighbor) в нем осталось 11870 событий.

Оценка полноты каталога

Для корректной оценки параметров повторяемости землетрясений необходимо к анализу привлекать только представительные сейсмические события, т. е. землетрясения такого уровня магнитуд, который практически без пропуска регистрируется сетью сейсмометрических наблюдений. Поскольку сеть наблюдений, как правило, меняется со временем (обычно, но далеко не всегда, в сторону увеличения сейсмических станций), то для землетрясений различных магнитуд сроки представительной регистрации сейсмических событий будут различными. Очень часто, как и в нашем случае с территорией Афганистана, информация о системе сейсмометрических наблюдений либо отсутствует, либо недоступна. В этом случае используются различные методы оценки полноты каталогов, или же выборок из этих каталогов, относящихся к

конкретному площадному источнику. Детальный обзор таких методов приведен во множестве исследований (см., например, [Павленко В.А., Завьялов А.Д., 2022]). Нами было использовано три различных способа оценки представительности M_c землетрясений для каждого из трех декластеризованных каталогов: MAXC, GFT и EMR. Остановимся кратко на их описании.

Метод MAXC (Maximum curvature) определяет минимальную представительную магнитуду каталога M_c как точку максимальной кривизны кумулятивного графика повторяемости землетрясений [Wiemer, Wyss, 2000]. Точка максимальной кривизны кумулятивного графика повторяемости обычно соответствует магнитуде, на которую приходится максимальное число событий в дифференциальном распределении числа землетрясений по магнитудам в выборке. Результаты оценки полноты каталогов методом MAXC приведены на рис. 3. Для каталога без предварительной декластеризации и с декластеризацией методом ближайшего соседа (Nearest Neighbor) [Zaliapin et al., 2008] $M_c = 4,0$, а каталоги, полученные декластеризацией окнами [Gardner, Knopoff, 1974; Uhrhammer, 1986], являются полными при минимальной магнитуде $M_c = 4,5$ и $M_c = 4,6$ соответственно. В [Mignan, 2012; Павленко В.А., Завьялов А.Д., 2022] отмечается, что метод MAXC имеет тенденцию занижать значение M_c в тех случаях, когда дискретный график повторяемости не имеет выраженного максимума, что связано с неоднородностью анализируемой выборки.

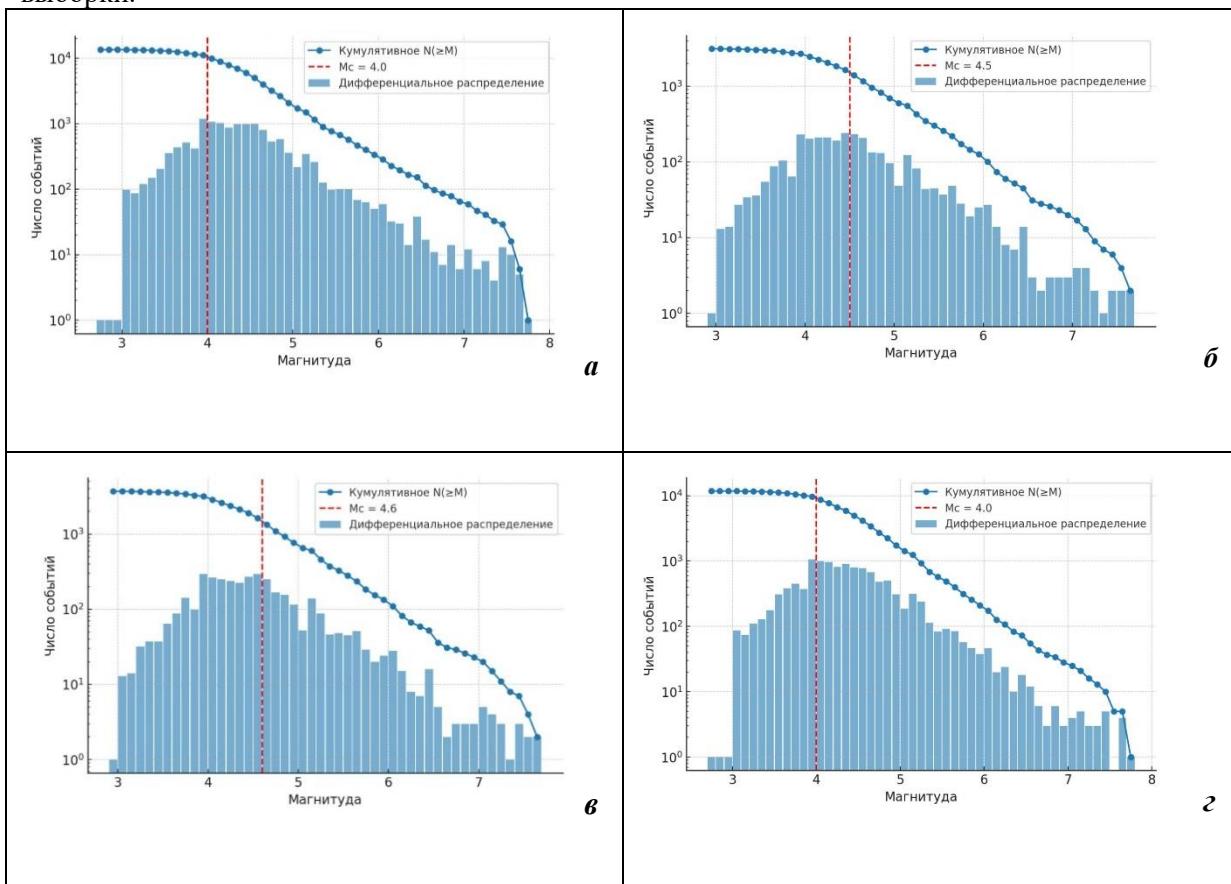


Рис. 3. Иллюстрация метода MAXC к используемым каталогам: а – без предварительной декластеризации; б – после декластеризации методом Gardner, Knopoff, 1974; в – после декластеризации методом Uhrhammer, 1986; г – после декластеризации методом Nearest Neighbor, Zaliapin et al., 2008. Вертикальная красная пунктирная линия соответствует магнитуде представительности каталогов M_c .

Figure 3. Illustration of the MAXC method applied to the catalogs: a – without preliminary declustering; b – after declustering using the Gardner and Knopoff method (1974); c – after declustering using the Uhrhammer method (1986); d – after declustering using the Nearest Neighbor method (Zaliapin et al., 2008). The vertical red dashed line indicates the magnitude of completeness (M_c) of the catalogs.

Метод GFT (Goodness-of-fit test) [Wiemer, Wyss, 2000]. Суть метода в следующем: выбирается начальная магнитуда, являющаяся кандидатом в M_{c0} , по землетрясениям каталога с магнитудами $M \geq M_{c0}$ проводится оценка параметров a и b в зависимости Гутенберга-Рихтера $\lg N = a \cdot b M$. Далее создается синтетическая выборка сейсмических событий с этими же значениями параметров повторяемости и проводится сопоставление кумулятивных графиков повторяемости анализируемой и

синтетической выборки. С этой целью вычисляют показатель соответствия (goodness-of-fit) $R(a, b, M_{co})$, который показывает, сколько процентов от объема анализируемой выборки описывается экспоненциальной зависимостью Гутенберга-Рихтера при выбранном значении магнитуды M_{co} . В качестве показателя соответствия анализируемой и синтетической выборки в [Wiemer, Wyss, 2000] предложено использовать функцию $R(a, b, M_{co})$:

$$R(a, b, M_{co}) = 100 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{M_{co}} |B_i - S_i|}{\sum_{i=1}^{M_{max}} B_i} \times 100 \right),$$

где B_i, S_i – кумулятивное число событий в i -ом магнитудном интервале для анализируемой и синтетической выборки соответственно. Затем порог магнитуды M_{co} увеличивается на шаг градации магнитуд в каталоге (в нашем случае 0,1М) и процедура повторяется заново. В качестве магнитуды представительности каталога выбирается наименьшее из значений M_c , для которого показатель соответствия $R(a, b, M_c)$ превышает заданный процент (обычно 90% или 95%).

При принимаемом для практических целей 90% уровне показателя соответствия R , значение представительной магнитуды оказалось равным $M_c = 4,3$ для каталога без предварительной декластеризации, с декластеризацией окнами [Gardner, Knopoff, 1974] и каталога, полученного декластеризацией методом ближайшего соседа (Nearest Neighbor) [Zaliapin et al., 2008]. Для каталога, декластеризованного методом [Uhrhammer, 1986], значение $M_c = 4,2$ (рис. 4).

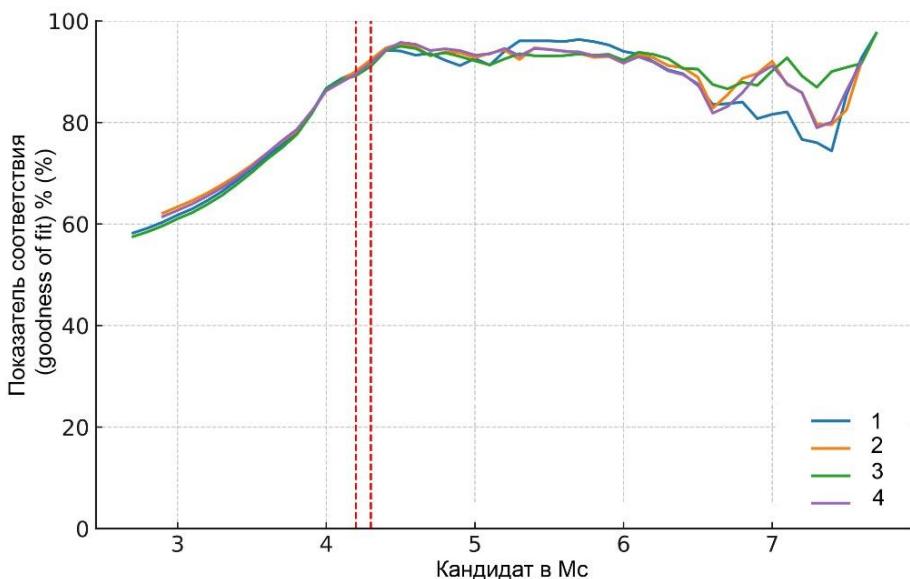


Рис. 4. Иллюстрация применения метода GFT к исследуемым каталогам: 1 – без предварительной декластеризации; 2 – после декластеризации методом Gardner, Knopoff, 1974; 3 – после декластеризации методом Nearest Neighbor, Zaliapin et al., 2008; 4 – после декластеризации методом Uhrhammer, 1986.

Figure 4. Illustration of the application of the GFT method to the analyzed catalogs: 1 – without preliminary declustering; 2 – after declustering by the method of Gardner, Knopoff, 1974; 3 – after declustering by the method of Nearest Neighbor, Zaliapin et al., 2008; 4 – after declustering by the method of Uhrhammer, 1986.

Метод EMR (Entire Magnitude Range) – это статистический подход оценки полноты каталогов землетрясений, который предполагает, что распределение землетрясений по магнитудам можно описать комбинацией: зависимостью Гутенберга-Рихтера для той части каталога, где он полон и функцией гауссового распределения в непредставительной части. Интенсивность потока событий задается функцией:

$$\lambda(m) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^m \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx & m < M_c \\ \exp(-\beta(m - M_c)) & m \geq M_c \end{cases}$$

В рамках метода одновременно подбираются параметры линии Гутенберга-Рихтера и кривой вероятности обнаружения непредставительных событий, чтобы аппроксимировать весь диапазон магнитуд. Параметры μ и σ в непредставительной части каталога оцениваются методом нелинейной регрессии, параметры a и b для магнитуд $m \geq M_c$ – методом максимального правдоподобия. Расчеты

проводятся при различных кандидатах на значение M_c . Окончательное значение этого параметра берется в максимуме функции правдоподобия.

Иллюстрация работы метода EMR приведена на рис. 5. Результаты оценки магнитуды полноты M_c рассматриваемых нами каталогов землетрясений с использованием данного метода следующие. Для каталогов, полученных декластеризацией окнами [Gardner, Knopoff, 1974 и Uhrhammer, 1986]: каталоги являются полными при минимальной магнитуде $M_c = 4,5$, а для каталога, полученного декластеризацией методом ближайшего соседа (Nearest Neighbor) [Zaliapin et al., 2008] – при минимальной магнитуде $M_c = 4,6$.

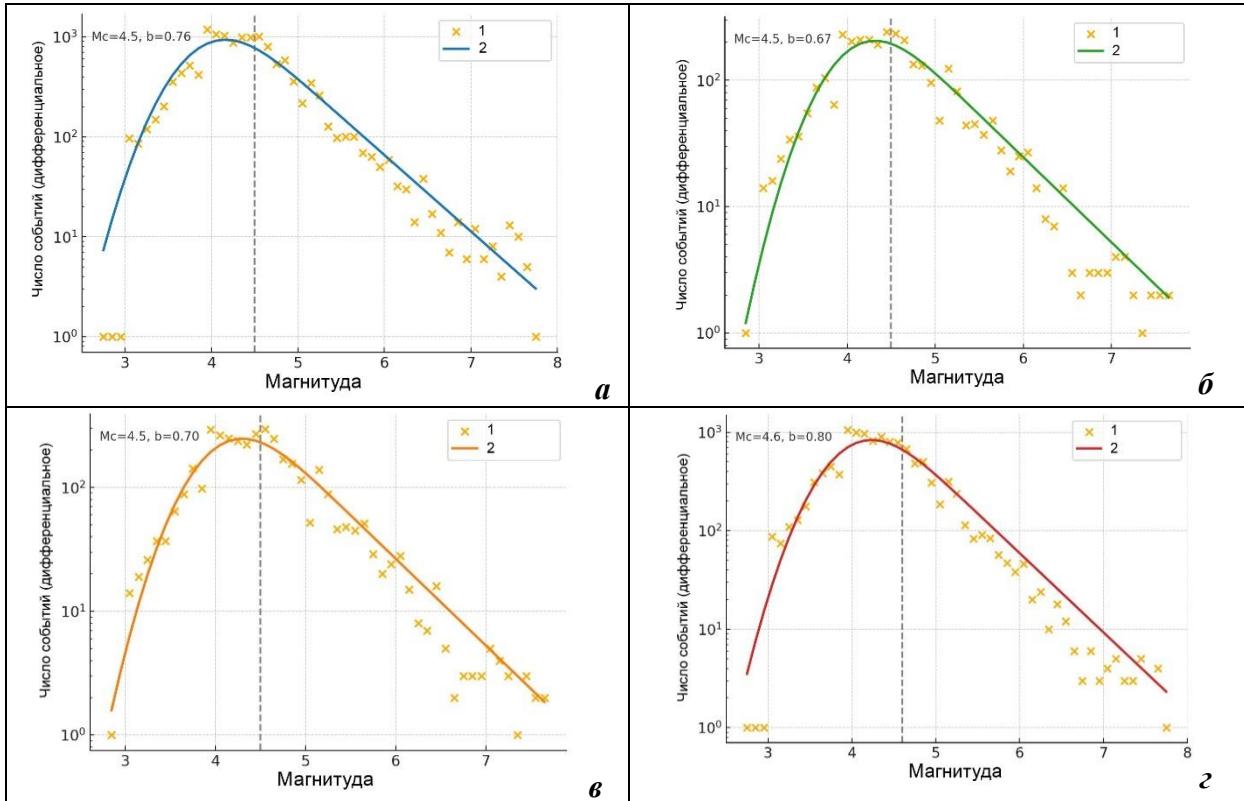


Рис. 5. Применение метода EMR к используемым каталогам: а – без предварительной декластеризации; б – после декластеризации методом Gardner, Knopoff, 1974; в – после декластеризации методом Uhrhammer, 1986; г – после декластеризации методом Nearest Neighbor, Zaliapin et al., 2008. 1 – дифференциальное число событий различных магнитуд; 2 – результаты аппроксимации.

Figure 5. Application of the EMR method to the used catalogues: a – without preliminary declustering; b – after declustering by the method of Gardner, tKnopoff, 1974; c – after declustering by the method of Uhrhammer, 1986; d – after declustering by the method of Nearest Neighbor, Zaliapin et al., 2008. 1 – differential number of events of different magnitudes; 2 – approximation results.

Обобщая результаты оценок полноты рассматриваемых нами каталогов землетрясений методами MAXC, GFT и EMR было принято решение ограничить магнитуду полноты каждого из них значением $M_c = 4,5$.

Применявшиеся нами методы оценки полноты каталогов не показывают границы временных интервалов, для которых землетрясения различных диапазонов магнитуд регистрируются практически без пропусков. Вместе с тем, для расчета сейсмической активности нормировка по времени числа землетрясений различных магнитуд необходима. Определенная информация о моменте начала представительной регистрации землетрясений каждого магнитудного диапазона отражена на графиках изменения кумулятивного числа событий этого интервала магнитуд со временем (рис. 6). За период представительной регистрации землетрясений каждой магнитуды обычно принимаются временные интервалы, на которых угол наклона этих графиков достаточно стабилен. Начало и конец таких интервалов для землетрясений в каждом магнитудном диапазоне мы визуально выделили на рис. 6 вертикальными линиями.

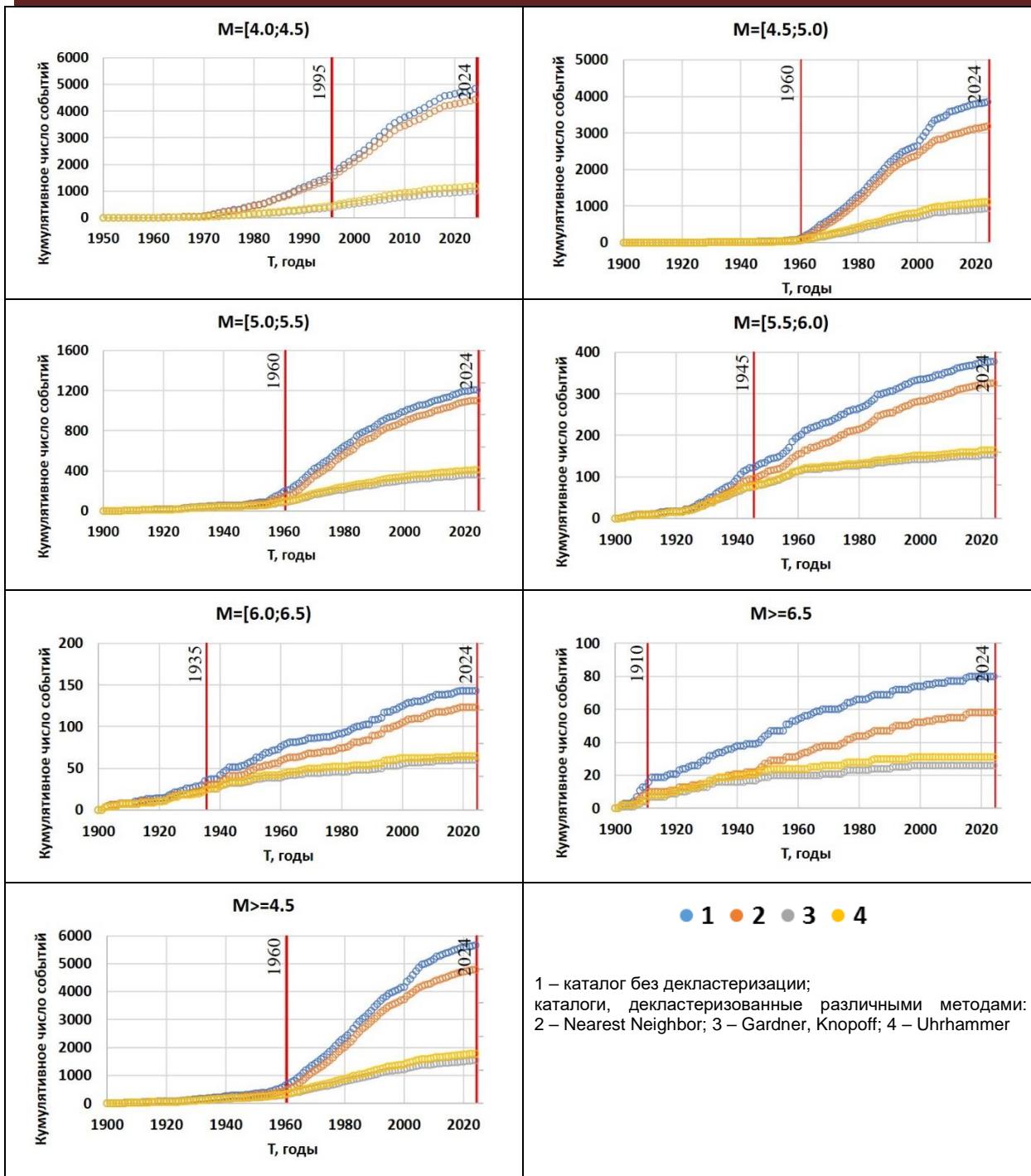


Рис. 6. Временные изменения кумулятивного числа сейсмических событий

в различных диапазонах магнитуд для рассматриваемых каталогов.

Figure 6. Temporal variations of the cumulative number of seismic events
in different magnitude ranges for the considered catalogs.

Более строгий подход к определению периодов представительной регистрации землетрясений различных магнитуд предложен в работе [Stepp, 1972]. В рамках данного метода предполагается, что для стационарного пуассоновского процесса стандартная ошибка средней частоты землетрясений в каждом интервале магнитуд убывает обратно пропорционально квадратному корню из длины временного интервала. Для реализации метода [Stepp, 1972] рассчитывается среднее число событий с магнитудами $[M; M+0,5]$ в возрастающих по длительности временных интервалах (в нашем случае за 10, 20, 30 и т. д. лет), отсчитываемых в обратную сторону от конечной даты, формирования каталога (в нашем случае от 2024 г.). В логарифмическом масштабе строится зависимость, связывающая стандартное отклонение

среднего числа событий в различных временных интервалах с длиной этих интервалов. Сравнение эмпирической зависимости стандартного отклонения с теоретической кривой ($\sigma \sim 1/\sqrt{T}$) позволяет установить момент времени, начиная с которого каталог можно считать полным для заданного диапазона магнитуд. Реализация метода [Stepp, 1972] для не декластеризованного каталога землетрясений показана на рис. 7.

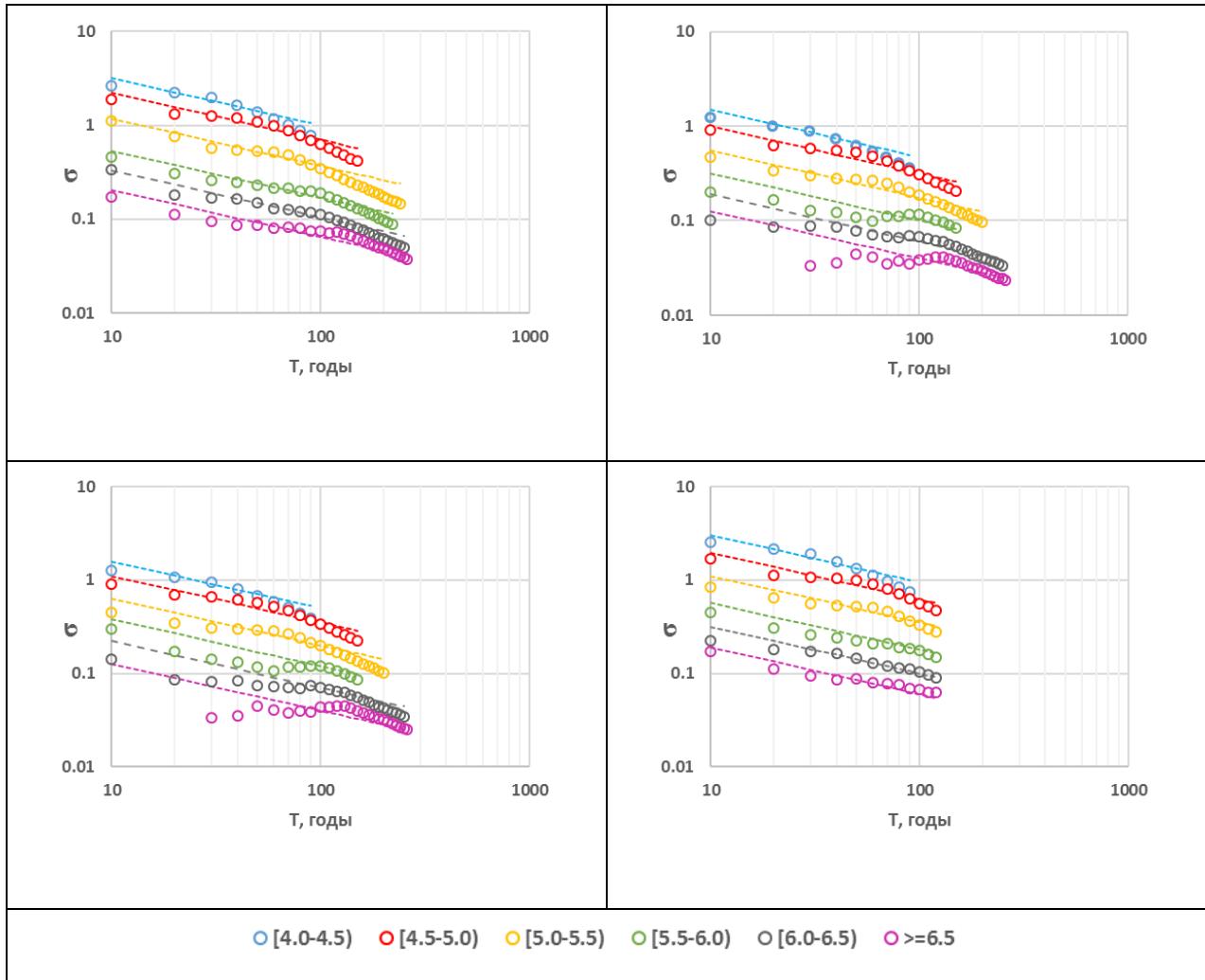


Рис. 7. Иллюстрация метода [Stepp, 1972] нахождения временных интервалов представительной регистрации землетрясений различных магнитуд.

Figure 7. Illustration of the [Stepp, 1972] method for determining the time intervals of representative recording of earthquakes of different magnitudes.

Данные о периодах представительной регистрации землетрясений каждого магнитудного диапазона отражены в табл. 1.

Таблица 1

Сроки представительной регистрации землетрясений различных магнитуд
при построении графиков повторяемости

Table 1

Periods of representative recording of earthquakes of different magnitudes used in constructing recurrence plots

Интервал магнитуд	Принятый год начала представительной регистрации	Конечная дата, используемая в расчетах	Количество полных лет
[4,5 – 5,0)	1960	2024	65
[5,0 – 5,5)	1960	2024	65
[5,5 – 6,0)	1945	2024	80

[6,0 – 6,5)	1935	2024	90
[6,5 – 7,0)	1910	2024	115
[7,0 – 7,5)	1910	2024	115
[7,5 – 8,0)	1910	2024	115

Оценки параметров повторяемости землетрясений различных магнитуд

Оценки параметров a и b в зависимости Гутенберга-Рихтера $lgN = a-bM$ для рассматриваемых каталогов землетрясений проводились методом наименьших квадратов и максимального правдоподобия Аки-Утсу [Kijko, Graham, 1998; Kijko, Graham, 1999]. При расчете параметров повторяемости методом Аки-Утсу минимальная представительная магнитуда каталога принималась равной $M_c = 4,5$, а сами данные брались за период с 1965 по 2024 гг. При построении графиков повторяемости землетрясений методом наименьших квадратов рассматривались землетрясения с магнитудой $M_w \geq 4,0$, но для землетрясений различных магнитуд принимались разные сроки, согласно табл. 1. Результаты определения долговременных значений параметров a и b для каталога, к которому декластеризация не применялась, и каталогов, декластеризованных тремя различными методами, сведены в табл. 2. Для удобства сопоставления долговременных параметров повторяемости землетрясений различных магнитуд сейсмическая активность (параметр a) при каждом методе расчета приведена к одному году.

Таблица 2
Значения параметров a и b для каталогов, декластеризованных различными методами
Table 2
Values of parameters a and b for the catalogs declustered using different methods

Каталоги землетрясений	Оценки параметров повторяемости, рассчитанные методом			
	наименьших квадратов		Аки-Утсу	
	a	b	a	b
Каталог без декластеризации	6,4353	1,0250	6,8958	1,1111
После декластеризации методом Gardner-Knopoff	5,4938	0,9460	6,1346	1,0784
Методом Uhrhammer	5,4995	0,9361	6,3015	1,0992
Методом Nearest Neighbor	6,4732	1,0463	6,5598	1,0513

Так, оценки значений параметров повторяемости a и b , полученные методом наименьших квадратов и максимального правдоподобия, достаточно согласованы между собой (см. табл. 2).

Таким образом, на основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- на основе данных авторитетных сейсмологических агентств и каталогов, составленных в процессе реализации крупных международных проектов по оценке сейсмической опасности территорий Центральной Азии и Ближнего Востока, сформирован каталог землетрясений для оценки сейсмической опасности территории Афганистана;
- для исключения из каталога групповых событий проведена его декластеризация тремя различными методами: Гарднера-Кнопова, Урхаммера и ближайшего соседа (Nearest Neighbor). Два первых метода относятся к числу оконных и убирают значительную долю (до 60-70%) сейсмических событий, что может приводить к занижению сейсмической активности, а как следствие, к недооценке сейсмической опасности исследуемой территории. Метод ближайшего соседа (Nearest Neighbor), базирующийся на задании обобщенного расстояния между сейсмическими событиями, зависящего от магнитуды каждого события, времени и дистанции до последующих событий, убирает значительно меньшее число зависимых событий, и, по всей видимости, дает наиболее адекватные оценки сейсмической опасности;
- для каждого из каталогов, подвергшихся декластеризации тремя различными способами (MAXC; GFT; EMR), оценен минимальный магнитудный уровень полноты каталога. Метод MAXC показал, что каталоги без декластеризации и с декластеризацией методом Nearest Neighbor являются полными при минимальной магнитуде $M_c = 4,5$, а каталоги, полученные в результате декластеризации окнами Гарднера-Кнопова и Урхаммера, полны при минимальной магнитуде $M_c = 4,5-4,6$. Результаты оценки полноты каталогов методом GFT свидетельствуют о том, что при

величине критерия согласия R уровня 90%, для не декластеризованного каталога и каталогов с декластеризацией методами Гарднера-Кнопова и Nearest Neighbor $M_c = 4,3$, а для каталога, подвергшегося декластеризации методом Урхаммера, минимальная представительная магнитуда полноты равна $M_c = 4,2$. Метод EMR для каждого из каталогов оценил минимальную представительную магнитуду полноты каждого каталога значением $M_c = 4,5-4,6$. Обобщая результаты определения полноты каталогов каждым из трех методов (MAXC, GFT и EMR), несмотря на то, что методы MAXC и GFT дали значения M_c в диапазоне 4,2-4,3, в работе принято консервативное значение $M_c = 4,5$. Это объясняется необходимостью обеспечить единство анализа для всех используемых каталогов;

- с учетом полноты каждого каталога получены оценки параметров повторяемости землетрясений различных магнитуд в исследуемом регионе. Коэффициенты a и b в зависимости Гуттенберга-Рихтера были получены как методом наименьших квадратов, с учетом сроков представительной регистрации землетрясений различных магнитуд, так и методом максимального правдоподобия (Аки-Утсу). Метод Аки-Утсу дает большие значения угла наклона графика повторяемости и сейсмической активности для каждого каталога по сравнению с оценками a и b , полученными с использованием метода наименьших квадратов;
- проведенные в процессе исследования процедуры формирования сводного каталога землетрясений, его декластеризации и оценки полноты позволяют корректно оценивать сейсмическую опасность железнодорожной трассы Мазари-Шариф–Герат на территории Северного Афганистана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. Решение проблемы неоднородности магнитуд в работах по сейсмическому зонированию территории Республики Казахстан // Вестник НЯЦ РК. - 2014. - Вып. 4. - С. 86-92. (in Russian).
2. Павленко В.А., Завьялов А.Д. Сравнительный анализ методов оценки магнитуды представительной регистрации землетрясений // Физика Земли. - 2022. - № 1. - С. 100-117. (in Russian).
3. Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Physical Review E. - 2004. - Vol. 69, Iss. 6. - Art. 066106. - doi: 10.1103/PhysRevE.69.066106.
4. Bykova V.V., Galina N.A., Tatevosian R.E., Lukk A.A. The concept of clusterability of earthquakes in time and space in the problems of seismic hazard assessment // Geophysical Processes and Biosphere. - 2022. - Vol. 21. - № 4. - P. 241-256. - doi: 10.21455/gpb2022.4-17.
5. Boyd O.S. Including foreshocks and aftershocks in time-independent probabilistic seismic-hazard analyses // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2012. - Vol. 102. - № 3. - P. 909-917. - doi: 10.1785/0120110008.
6. Di Giacomo D., Engdahl E.R., Storchak D.A. The ISC-GEM earthquake catalogue (1904-2014): status after the extension project // Earth System Science Data. - 2018. - Vol. 10. - P. 1877-1899.
7. EMME CATALOG UP TO 2006 [https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1007%2Fs10950-014-9444-1/MediaObjects/10950_2014_9444_MOESM1_ESM.xls]
8. EMME 2012 AQUEST 10 [https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1007%2Fs10950-014-9444-1/MediaObjects/10950_2014_9444_MOESM1_ESM.xls]
9. Gardner J., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1974. - Vol. 64. - № 5. - P. 1363-1367.
10. International Seismological Centre. ISC catalogue. – URL: <http://www.isc.ac.uk> (дата обращения: 13.05.2025).
11. Kijko A., Graham G. Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part I: Estimation of maximum regional magnitude M_{max} // Pure and Applied Geophysics. - 1998. - Vol. 152. - № 3. - P. 413-442. - doi: 10.1007/s000240050161.
12. Kijko A., Graham G. «Parametric-historic» procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part II: Assessment of seismic hazard at specified site // Pure and Applied Geophysics. - 1999. - Vol. 154. - № 1. - P. 1-22. - doi: 10.1007/s000240050218.
13. Marzocchi W., Taroni M. Some thoughts on declustering in probabilistic seismic-hazard analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2014. - Vol. 104. - № 4. - P. 1838-1845. - doi: 10.1785/0120130300.
14. Mignan A. Functional shape of the earthquake frequency-magnitude distribution and completeness magnitude // Journal of Geophysical Research. - 2012. - Vol. 117. - B08302. - doi: 10.1029/2012JB009347.
15. Mikhailova N., Mukambayev A., Aristova I., Kulakova G., Ullah S., Pilz M., Bindi D. Central Asia earthquake catalogue from ancient time to 2009 // Annals of Geophysics (Special Issue). - 2015. - Vol. 58. - № 1. - S0102. - doi: 10.4401/ag-6681.
16. Poggi V., Parolai S., Silacheva N., Ischuk A., Abdurakhmatov K., Kobuliev Z., Ismailov V., Ibragimov R., Karaev J., Ceresa P., Bazzurro P. Harmonizing seismicity information in Central Asian countries: earthquake catalogue and active faults // Natural Hazards and Earth

System Sciences. - 2024. - Vol. 24. - P. 2597-2613. - doi: 10.5194/nhess-24-2597-2024.

17. Ruleman C.A., Crone A.J., Machette M.N., Haller K.M., Rukstales K.S. Map and database of probable and possible Quaternary faults in Afghanistan // U.S. Geological Survey, Open-File Report 2007-1103. - 39 p.

18. Stepp J.C. Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard // Proceedings of the International Conference on Microzonation. - Seattle, 1972. - Vol. 2. - P. 897-910.

19. Storchak D.A., Di Giacomo D., Bondár I., Engdahl E.R., Harris J., Lee W.H.K., Villaseñor A., Bormann P. Public release of the ISC-GEM global instrumental earthquake catalogue (1900-2009) // Seismological Research Letters. - 2013. - Vol. 84. - P. 810-815.

20. Storchak D.A., Di Giacomo D., Engdahl E.R., Harris J., Bondár I., Lee W.H.K., Bormann P., Villaseñor A. The ISC-GEM global instrumental earthquake catalogue (1900-2009) // Physics of the Earth and Planetary Interiors. - 2015. - Vol. 239. - P. 48-63.

21. Storchak D.A., Harris J., Brown L., Lieser K., Shumba B., Verney R., Di Giacomo D., Korger E.I.M. Rebuild of the Bulletin of the International Seismological Centre (ISC), part 1: 1964-1979 // Geoscience Letters. - 2017. - Vol. 4. - Article 32. - doi: 10.1186/s40562-017-0098-z.

22. Uhrhammer R. Characteristics of Northern and Central California seismicity // Earthquake Notes. - 1986. - Vol. 57. - № 1. - P. 21.

23. United States Geological Survey. USGS earthquake catalog. - URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/> (дата обращения: 13.05.2025).

24. Waseem M., Lateef A., Ahmad I., Khan S., Ahmed W. Seismic hazard assessment of Afghanistan // Journal of Seismology. - 2019. - Vol. 23. - P. 217-242. - doi: 10.1007/s10950-018-9802.

25. Wiemer S., Wyss M. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2000. - Vol. 90. - № 4. - P. 859-869. - doi: 10.1785/0119990114.

26. Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V., Wong H. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // Physical Review Letters. - 2008. - Vol. 101, Iss. 1-4. - Art. 018501. - doi: 10.1103/PhysRevLett.101.018501.

27. Zare M., Amini H., Yazdi P., Sesetyan K., Demircioglu M., Kalafat D., Erdik M., Giardini D., Asif Khan M., Tsereteli T. Recent developments of the Middle East catalog // Journal of Seismology. - 2014. - Vol. 18. - P. 749-772. - doi: 10.1007/s10950-014-9444-1.

**Formation of an Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment
of the Mazar-i-Sharif–Herat Railway (Northern Afghanistan)**
Ibragimova T.L.

Abstract. A consolidated earthquake catalog of Afghanistan was compiled based on data from international agencies and major projects on seismic hazard assessment in Central Asia and the Middle East. To exclude dependent events, declustering was performed using three methods, among which the Nearest Neighbor method yielded the most adequate results. The completeness of the catalogs was determined by the MAXC, GFT, and EMR methods, with a conservative value of the minimum magnitude of completeness adopted as $Mc = 4,5$. Earthquake recurrence parameters were calculated according to the Gutenberg–Richter law using the least squares and maximum likelihood (Aki–Utsu) methods, with the latter providing higher estimates of seismic activity. The obtained results provide a reliable basis for seismic hazard assessment along the Mazar-i-Sharif–Herat railway line in Northern Afghanistan.

Key words: Afghanistan, earthquake catalog, declustering, magnitude of completeness, Gutenberg–Richter law, seismic hazard assessment, Central Asia, Mazar-i-Sharif–Herat railway line.

**Mazari-Sharif–Herat temir yo‘li (Shimoliy Afg‘oniston)
uchun zilzila xavfini baholash maqsadida zilzilalar katalogini shakllantirish**
Ibragimova T.L.

Annotatsiya. Afg‘oniston bo‘yicha yig‘ma zilzilalar katalogi xalqaro agentliklar ma’lumotlari hamda Markaziy Osiyo va Yaqin Sharq hududlarida seysmik xavfni baholash bo‘yicha yirik loyihalar asosida tuzildi. Bog‘liq hodisalarini chiqarib tashlash maqsadida uchta usul bilan deklasterizatsiya amalga oshirildi, ular orasida eng adekvat natijani «eng yaqin qo‘shni» usuli ko‘rsatdi. Kataloglarning to‘liqligi MAXC, GFT va EMR usullari bilan aniqlandi, minimal to‘liqlik magnitudasi uchun esa $Mc = 4,5$ konservativ qiymati qabul qilindi. Zilzilalar takrorlanish parametrlarini hisoblash Gutenberg–Rixter qonuniga asoslanib eng kichik kvadratlar va maksimal ehtimollik (Aki–Utsu) usullari bilan bajarildi, bunda ikkinchi usul yuqoriyoq seysmik faoliyat bahosini berdi. Olingan natijalar Afg‘onistonning shimoliy hududidagi Mazori-Sharif–Hirot temir yo‘li bo‘ylab seysmik xavfni baholash uchun ishonchli asos bo‘lib xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: Afg‘oniston, zilzilalar katalogi, deklasterizatsiya, to‘liqlik magnitudasi, Gutenberg–Rixter qonuni, seysmik xavfni baholash, Markaziy Osiyo, Mazori-Sharif–Hirot temir yo‘li.

ZILZILALARNI PROGNOZLASH

УДК 550.34

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВО ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВЕ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ

К.Н. Абдуллабеков

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан

Аннотация. Изложены результаты исследования особенностей проявления сильных землетрясений во времени и пространстве в Центральной Азии и прилегающих территориях. Проявление сейсмичности в глобальном, региональном и локальном масштабах в пространстве и времени – исключительно сложное явление. В проявлении сейсмичности наблюдаются активные и пассивные периоды. Главная особенность – циклическое проявление сильных землетрясений во времени и пространстве в активные и пассивные периоды, чередующиеся через каждые 17-18 лет.

По инициативе Президента Республики Узбекистан Ш.М.Мирзиёева на заседании Организации Объединенных Наций ежегодно 29 апреля решено назвать Днем памяти погибших от землетрясений. В связи с этим в апреле 2026 года в Ташкенте планируется проведение ряда мероприятий: 29 апреля – крупное международное совещание, посвященное памяти погибших от землетрясений, и 26-28 апреля 2026 г. – Заседание Азиатской сейсмологической комиссии, посвященное 60-летию Ташкентского землетрясения 1966 года. Настоящая статья написана в рамках подготовки к этому мероприятию.

Выделение сейсмической энергии во времени и пространстве в глобальном, региональном и локальном масштабах – исключительно сложное явление. Бывают активные и пассивные периоды. Это связано со сложностью процесса и нехваткой информации за длительное время. Несмотря на это, для отдельных регионов можно найти некоторые особенности проявления сейсмичности во времени и пространстве.

Вопросами сейсмичности, сейсмического районирования, проблемами прогнозирования землетрясений и другими для территории Узбекистана и соседних республик занимались и занимаются многочисленные исследователи. Получены отдельные результаты по исследованию периодичностей проявления сильных землетрясений для отдельных локальных участков республики. Например, Р.Н.Ибрагимовым К.Н.Абдуллабековым установлена 40-летняя циклическость для сейсмогенных зон Ферганской долины и Приташкентского района [1, 2].

В работе К.Моги [3], посвященной исследованию особенностей проявления сейсмичности в зоне столкновения Австралийской и Евроазиатских плит во времени и пространстве, выявлено, что сильные землетрясения в этой зоне проявляются чередованием активных и пассивных периодов общей длительностью около 35 лет. Сильные землетрясения происходят в активные периоды: 1897-1915 и 1934-1953 гг. В пассивные 1915-1934 и 1953-1971 гг. сильные землетрясения с магнитудой $M = 6,5$ и выше отсутствуют.

К.Н.Абдуллабеков и М.Т.Усманова [4] исследовали проявление сейсмичности во времени и пространстве на территории Центральной Азии. Ими выделены с 1971 по 1989 гг. активные и с 1990 по 2008 гг. пассивные периоды. С момента публикации статьи К.Моги [3] прошло более 50 лет. За это время в регионе произошли сильные землетрясения с магнитудой от 5,0 до 7,3. Нами выделены еще два активных и один пассивный периоды. Активная фаза – 1971-1990 гг. В этот

период в регионе происходили многочисленные землетрясения: Сарыкамышское, 1970 г. с $M = 6,8$; Газлийские, 8 апреля 1976 г. с $M = 7,0$ и 17 мая 1976 г. с $M = 7,3$; Исфара-Баткенское, 31 января 1977 г. с $M = 6,0$; Хайдарканское, 3 июня 1977 г. с $M = 5,2$; Таваксайское, 6 декабря 1977 г. с $M = 5,3$; Алайское, 2 ноября 1978 г. с $M = 6,8$; Назарбекское, 10 декабря 1980 г. с $M = 5,3$; Чимионское, 6 мая 1982 г. с $M = 5,8$; Алайское, 16 декабря 1983 г. с $M = 6,1$; Папское, 17 февраля 1984 с $M = 5,5$; Газлийское, 1984 г. с $M = 7,3$; Кайраккумское, 1985 г. с $M = 5,5$; Джиргиталское, 26 октября 1984 г. с $M = 6,3$; Избасканское, 15 мая 1992 г. с $M = 6,0$ и Сусамирское, 18 августа 1992 г. с $M = 7,3$.

Отметим, что в отличие от Моги, нами учтены не только сильнейшие землетрясения с $M = 7$ и выше, но и землетрясения с $M = 5,2-7,0$.

Пассивная фаза – 1991-2008 гг. Эта фаза продлилась до 2008 г. В этот период в регионе сильные землетрясения с $M = 5,25$ и выше отсутствовали.

Активная фаза – с 2009 г. Последний активный период начался в 2009 г. и, по-видимому, продлится до 2026 г. В этот период до настоящего времени произошли следующие сильные землетрясения: Канское, 20 июля 2011 г. с $M = 6,2$; Маржанбулакское, 26 мая 2013 г. с $M = 6,2$; Аштское, 2020 г. с $M = 5,0$; Байсунское, 12 мая 2022 г. с $M = 5,8$; на территории Таджикской Республики, вблизи оз. Сарез, 23 февраля 2023 г. с $M = 6,8$.

Еще одним свидетельством является факт существования 35-летней цикличности в проявлении сильнейших землетрясений и на западе этого региона: Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. в Армении с M около 7,5 и 6 февраля 2023 г. в Кахраманмараше в Турции, также с магнитудой более 7,5 на Анатолийском разломе. Эпицентры этих землетрясений находятся в субмеридиональном направлении друг от друга.

Многие исследователи делают попытку искать периодичность в повторяемости землетрясений, как для всего Земного шара, так и для отдельных его регионов и районов [5, с. 35]. Земля, по мнению многих специалистов, представляет единую гигантскую систему напряжений. Изменение напряженного состояния в одном месте влечет за собой перераспределение упругих напряжений в других. Об этом свидетельствуют многие факторы. Остановимся на некоторых из них.

На основании статистического анализа данных о сильнейших землетрясениях с $M = 8$ и более, произошедших на Земном шаре в 1904-1950 гг., Н.Беньофф [5] установил, что сейсмическая активность Земли проявляется циклами и что существуют отдельные годы активных вспышек сейсмической энергии.

В бывшем Союзе основные сейсмостатистические исследования по изучению пространственно-временных закономерностей проявления сейсмичности выполнены для регионов Кавказа, Центральной Азии, Дальнего Востока, Прибайкалья, Балтийского щита и других регионов.

С.Л.Федотов выявил для берегов Камчатки и Курильских островов Тихоокеанской сейсмической зоны периодичность повторения сильных землетрясений с $T = 140 \pm 60$ лет, 13,6 и 6,2 года [5, с. 27].

К настоящему времени наибольшие сведения о землетрясениях исторического времени собраны по Кавказу. Естественно, что проводится много работ по сейсмостатистике. Много публикаций также по Средней Азии. Выделены циклы с временами 260, 110, 40, 15-20, 11, 10, 5,56 года и т. д. Сейсмостатистические исследования проведены также для территории Японии, Чили, КНР, стран Балканского региона и т. д. (таблица).

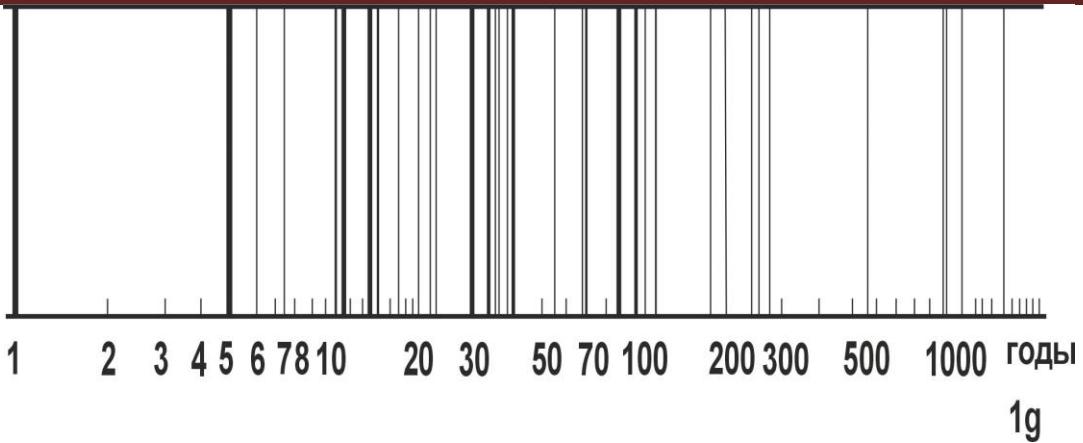
Цикличность проявления сильных землетрясений

Район	Выделенные циклы, годы	Источник [5, с. 29]
Кавказ	1100, 500-650, 88, 22, 11, 5, 75, 5,05, 34,5	
Курило-Камчатская зона	140 \pm 60, 13,6, 6,2	
Байкал	13,6	
Средняя Азия		
а) Ферганская впадина	40, 20	
б) Приташкентский р-н, Кызылкумы	40	
в) Западный Тянь-Шань	40	
г) Памир, Южный Тянь-Шань	260, 100-110	
д) Чуйская впадина, Северный Тянь-Шань	15-20	
е) Киргизия	88, 22, 11, 5,03, 5, 56	
ж) Копет-Даг	11	
Балтийский щит	1 сутки, 1 год	
Япония		
а) для территории Японии и других регионов Земного шара	21 мин, 42 мин, 1 сут, 14,8 сут, 29,6 сут, 6 мес., 1 год, 11, 100, 200, 240, 284	
б) Камакура	69 \pm 13	
в) Токио, Киото	36, 38	
г) Хоккайдо	100	
д) Центральная Япония	117 \pm 35	
е) Мурато	100-150	
Южная Америка, Чили (Концепсиан)	100-150	
Китай	Около 1500	
Балканы	35, 17-18, 11-12	
Европа	30	
Граница между Индийско-Австралийской и Евразийской плитами	34-38	

Анализ статистики землетрясений во времени показывает, что как в масштабе всего Земного шара, так и для его отдельных регионов и районов выделение сейсмической энергии имеет циклический характер [5, с. 29, см. таблицу]. Наиболее характерными временами, присущими многим регионам, являются циклы длительностью 5,05-5,75 (Кавказ, Средняя Азия), 11 лет (Кавказ, Средняя Азия, Япония, Балканы), 17,5-22 года (Кавказ, Курило-Камчатская зона, Байкал, Средняя Азия, Балканы), 30-40 лет (Кавказ, Средняя Азия, Балканы, Европа, граница между Индийско-Австралийской и Евразийской плитами), 88, 100-140, 200-284, 575, 1100, 1500 и т. д.

В качестве примера остановимся на результатах исследований в Мировом центре данных (Москва). В.Н.Вадковским В.А.Ляховым и Ю.С.Тюпкиным детально проанализирован каталог сильных землетрясений Балканского региона за период от XXI в. до нашей эры, по 1969 г. нашей эры. Для определения существующих периодичностей на первом этапе были сгруппированы районы с синхронным сейсмическим, затем выявлены периодичности. Рассмотрены результаты оценки спектра тремя методами с помощью окна Бартлетта, окна Тьюки и максимальной энтропии. Надежно выделены главный период $T = 35$ лет и гармоники $T = 17-18$ лет, $T = 11-12$ лет [5, с. 27].

Отметим, что мы остановились на отдельных работах, касающихся цикличностей проявления сильных землетрясений в различных регионах как по Земному шару, так и по отдельным регионам. Как видно из приведенных примеров, выделенные цикличности самые разные – от единиц суток и годов до сотен и тысячи лет. На рисунке показан спектр периодичностей проявления сейсмичности по Земному шару. Как видно из рисунка, спектр периодичностей составляет «белый шум». Наблюдаются самые различные периоды и циклы. Однако, несмотря на это, по нашему мнению, нужно заниматься выявлением цикличностей и периодичностей. Эта проблема еще до конца не исследована и поэтому нужно продолжить эти исследования.



Данная статья написана в рамках академического гранта «Фундаментальные основы проявления геодинамических процессов, вызывающих сильные землетрясения, в вариациях геолого-геофизических полей» Агентства инновационного развития при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ибрагимов Р.Н., Абдуллабеков К.Н. О периодичности сильных землетрясений Западного Тянь-Шаня // Узб. геол. журн. - 1974. - № 4. - С. 42-45.
2. Ибрагимов Р.Н., Абдуллабеков К.Н. О периодичности сильных землетрясений Кавказа // Узб. геол. журн. - 1974. - № 6. - С. 16-19.
3. Кюо Моги. Закономерности в пространственном и временном распределении сильных землетрясений и предсказание землетрясений //
- Междунар. симпоз. «Поиски предвестников землетрясений». 27 мая-3 июня 1974 г. - Т.: Фан, 1976. - С. 19-23.
4. Абдуллабеков К.Н., Усманова М.Т. Особенности проявления сильных землетрясений во времени и пространстве // ДАН РУз. - 2003. - № 3. - С. 60-64.
5. Абдуллабеков К.Н. Электромагнитные явления в земной коре. - Т.: Фан, 1989. - 132 с.

Markaziy Osiyo va uning atrofida kuchli zilzilalarning makon va zamonda namoyon bo'lishining ba'zi xususiyatlari
K.N. Abdullabekov

Annotasiya. Markaziy Osiyo va uning atrofidagi regionlarda kuchli zilzilalarning makon va zamonda namoyon bo'lishining xususiyatlari keltirilgan. Seysmik energiyaning vaqt va makonda global, regional va lokal miqyoslarda namoyon bo'lishi nihoyatda murakkab hodisadir. Unda faol va nofaol davrlar mavjud. Bu seysmik jarayon kechishining murakkabligi va uzoq davrlar uchun ma'lumotlarning etishmasligi bilan ham bog'liq. Shunga qaramasdan alohida regionlar uchun seysmiklikning vaqt va masofada har 17-18 yilda davriy namoyon bo'lishining alohida xususiyatlarini aniqlash mumkin.

Kalit so'zlar: zilzila, magnituda, vaqt, zamon, klacc, anomaliya.

Some features of the manifestation of strong earthquakes in time and space in Central Asia and adjacent territories
K.N. Abdullabekov

Annotation. The results of a study of the features of the manifestation of strong earthquakes in time and space on the territory of Central Asia and adjacent territories are presented. The manifestation of seismicity on a global, regional, and local scale in space and time is an exceptionally complex phenomenon. Active and passive periods are observed in the manifestation of seismicity. The main feature is the cyclical manifestation of strong earthquakes in time and space during active and passive periods, alternating every 17-18 years.

К ВЫБОРУ ОБЪЕКТОВ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Т.Л. Ибрагимова

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан

tam.anay@yahoo.com

Аннотация. Рассматриваются критерии отбора объектов для организации системы гидрогеохимического мониторинга, ориентированного на решение задач прогноза землетрясений. Обоснована необходимость пересмотра действующей сети наблюдений РЦСПМ в пользу использования самоизливающихся глубоких скважин с естественным режимом, не подверженных влиянию техногенных факторов. Аргументируется, что именно такие объекты способны обеспечить достоверную и не искаженную гидрогеохимическую информацию.

Ключевые слова: гидрогеохимический мониторинг, прогноз землетрясений, сейсмичность, подземные воды, предвестники, выбор объектов.

Введение

Методы поиска предвестников землетрясений, основанные на выявлении аномальных вариаций в гидрогеохимических показателях подземных вод, на сегодняшний день являются одними из ведущих в мировой сейсмологической практике. Как самостоятельное научное направление, гидрогеохимический метод поиска предвестников землетрясений закрепился в начале 70-х годов прошлого столетия после официальной регистрации научного открытия № 129 «Явления изменения химического и газового (элементы и изотопы) составов подземных вод в периоды, предшествующие и сопутствующие землетрясениям» [Мавлянов и др., 1973]. Приоритет открытия (от 21 февраля 1966 г.) основан на исследованиях, проводившихся в Институте гидрогеологии и инженерной геологии в Ташкенте до разрушительного землетрясения 1966 г., и показавших, что накануне катастрофы концентрация, например, радона в термоминеральной воде возросла почти в 5 раз.

Особенности проявления аномальных вариаций в газо-химическом составе подземных вод как во всем мире, так и на территории Узбекистана, в т. ч. в различных сейсмотектонических условиях, описаны в многочисленных работах [Lu et al., 2024; Zhou et al., 2020; Barberio et al., 2017; Султанходжаев, 2006; Барсуков и др., 1992; Копылова и др., 2020; Ибрагимова, 2016; Ибрагимова, 2024а; Ибрагимова, 2024б и др.], получены эмпирические зависимости, связывающие амплитуду и длительность аномалий некоторых гидрогеохимических показателей с параметрами готовящегося землетрясения, предложены механизмы формирования предвестников, осуществлен практический прогноз нескольких сильных землетрясений.

Вместе с тем остаётся открытым вопрос о корректности выбора наблюдательных объектов: от глубины и условий эксплуатации скважины напрямую зависит качество и интерпретируемость получаемых данных. Для Узбекистана данная проблема особенно актуальна: существующая сеть гидрогеосейсмологических наблюдений в значительной мере представлена скважинами с техногенно-нарушенным режимом (так называемым «крановым»), а также неглубокими скважинами, что нередко приводит к ложным тревогам или отсутствию реакции. Настоящая работа направлена на уточнение критерии выбора объектов гидрогеохимического мониторинга, позволяющих минимизировать подобные ошибки.

Объект и предмет исследования, исходные данные и методы исследования. Выбору параметров геохимических наблюдений, оценке их информативности, сопоставимости данных многолетнего геохимического мониторинга, методикам выделения полезного сигнала на фоне помех и сезонных вариаций и многокомпонентной обработке с целью идентификации сейсмологической обстановки на предмет возникновения землетрясения в конкретной сейсмоактивной зоне для территории Узбекистана посвящены работы [Беляев и др., 1990; Султанходжаев, 2006; Ибрагимова, Азизов, 2012; Ибрагимова, 2024а; Ибрагимова, 2024б и др.].

При этом методы математической статистики предполагают, что анализируемые данные формируют сопоставимый и непрерывный временной ряд с одинаковой частотой опробования. Если в ряде присутствуют участки, полученные с использованием разных методик, приборов или при изменившихся внешних условиях (например, реконструкция скважины, замена оборудования), это может привести к ложным трендам, псевдоаномалиям и некорректным выводам. Однородность данных позволяет уверенно выделять достоверные аномалии, отражающие реальные геодинамические процессы, а не технические или организационные сбои. Только при соблюдении этого условия возможна надежная интерпретация изменений химического состава подземных вод как возможных предвестников сейсмических событий [Беляев и др., 1990].

Обоснованный выбор наблюдательных скважин – один из ключевых этапов при организации геохимического мониторинга сейсмической активности. Этот выбор определяется совокупностью геологических, гидрогеологических и геодинамических факторов, которые обеспечивают наибольшую чувствительность к предвестникам землетрясений. Обоснование научно-методического подхода к организации сейсмопрогнозных исследований, в т. ч. гидрогеосейсмологических, в Узбекистане подробно обсуждено еще в [Сейсмическое районирование..., 2002]. В то же время большинство исследователей во всем мире, помимо учета указанных факторов, основываясь на многолетних исследованиях, сходятся во мнении, что для геохимических наблюдений наиболее предпочтительны самоизливающиеся артезианские скважины. Это обусловлено тем, что напорные воды обладают значительно более стабильным гидродинамическим режимом по сравнению с грунтовыми водами [Sato et al., 2020], поскольку в меньшей степени подвержены влиянию внешних (экзогенных) и техногенных воздействий. Кроме того, использование самоизливающихся скважин существенно упрощает автоматизацию геохимического мониторинга и отбор проб. Из числа эксплуатируемых скважин для геохимических наблюдений могут использоваться только такие, где применяется схема «разорванной струи», т. е. вода из скважины с нерегулируемым естественным расходом поступает в специальную емкость, откуда и осуществляется отбор воды для нужд, не связанных с прогностическими задачами. Скважины, эксплуатируемые в «крановом режиме», для наблюдений не пригодны [Барсуков и др., 1992].

На значимую роль в изучении гидрогеохимических предвестников условий проведения наблюдений указано, например, и Г.Н.Копыловой. В случае скважин с нарушенным (техногенным) режимом функционирования могут возникать неопределенности в разделении вариаций гидрогеохимических параметров, связанных с эксплуатацией подземных вод, и вариаций, вызванных процессом подготовки землетрясения [Копылова и др., 2022].

Также необходим обязательный минимум регистрируемых параметров, отсутствие которого существенно затруднит или даже сделает невозможной интерпретацию получаемой геохимической информации. Такими параметрами являются дебит изливающейся воды, ее температура и атмосферное давление. Кроме того, на наблюдательном пункте при регистрации любого геохимического параметра должны фиксироваться и метеорологические показатели. Вот пример из практики [Киссин, 2009]. Во время наблюдений на скважине Ганчи Ферганского полигона в начале июня 1981 г. зафиксировано кратковременное повышение уровня воды на 4,5 см. Эту вариацию нельзя было связать с перепадами атмосферного давления или осадками (было известно, что их выпадение не влияет на ход уровня воды в скважине). Появилось предположение, что данная аномалия уровня может рассматриваться как предвестник землетрясения. Однако выяснилось, что в районе Ганчи 30 и 31 мая 1981 г. прошли сильные, необычные для этой местности ливни (за два дня выпало 60-70 мм осадков), которые вызвали такой подъем уровня подземных вод.

Процессы, приводящие к возникновению гидрогеохимического прогнозного сигнала, протекают либо в породах прифильтровой зоны скважины, либо непосредственно в ее стволе. Немаловажную, а в ряде случаев и определяющую, роль в появлении этого сигнала, играет процесс спонтанного газоотделения, свойственный практически всем самоизливающим скважинам и источникам термальных вод. Этот процесс, вызванный падением гидростатического давления при движении воды по стволу скважины, приводит к перераспределению газовых компонентов подземных вод между раствором и возникающей газовой фазой, причем скорость перераспределения зависит от целого ряда изменяющихся факторов: скорости движения воды по стволу скважины, степени турбулентности потока, изменения атмосферного давления, изменения минерального состава и т. п. В связи с этим газо-водная эмульсия оказывается весьма

чувствительной к внешним воздействиям, в т. ч. и к деформационным и акустическим воздействиям вмещающих горных пород. Проведенные на различных скважинах эксперименты показали, что даже незначительное изменение условий истечения воды из устья скважины приводит к существенным изменениям результатов наблюдений. Например, на скважине Ф-4 (Файзабад) [Барсуков и др., 1992] была изменена конструкция оголовка, что привело к небольшому увеличению давления (не более 200 мм водяного столба). В результате этого резко уменьшилась амплитуда вариаций содержания гелия в пробах (в 2-3 раза). Известны случаи, когда не оборудованные скважины, в которых были обнаружены отчетливые сезонные и даже суточные вариации того или иного компонента, после реконструкции оголовка практически теряли эти свойства. Причина этого может состоять в том, что вследствие изменения гидравлического сопротивления оголовка в скважине, создается избыточное давление по сравнению с состоянием свободного истечения воды. При этом происходит смещение стационарного положения в системе растворенный газ–спонтанный газ. Для равновесной системы это смещение привело бы к единовременному изменению равновесного соотношения фаз. В неравновесной системе, находящейся в колебательном режиме, оно не только изменяет положение «нуля», относительно которого происходит колебание, но и существенным образом влияет на амплитуду этих колебаний. Избыточное давление может привести к тому, что нижняя граница зоны вскипания поднимется выше уровня отбора проб и система потеряет чувствительность к колебаниям давления. Результаты, подтверждающие это, были получены, например, при проведении режимных наблюдений на месторождении термальных вод Иссык-Ата в Киргизии [Бакалдин, Серебренников, 1985]. Система обобщенных критериев выбора наблюдательных скважин для повышения достоверности прогнозных данных приведена в таблице.

Критерии пригодности скважин для гидрогоеохимического мониторинга
Well suitability criteria for hydrogeochemical monitoring

Критерии	Требования	Научное обоснование
Гидродинамический режим	Самоизливающиеся артезианские	Исключает техногенные помехи, обеспечивает стабильность дебита
Глубина	>900 м	Устранение сезонных и поверхностных факторов
Стабильность параметров	Постоянный дебит и температура	Надежность временных рядов
Отсутствие вмешательства	Не используется для хозяйственных нужд	Минимизация техногенных искажений
Сопутствующие измерения	Регистрация Р, Т, метеопараметров	Корректная интерпретация аномалий

Результаты и обсуждение. В соответствие с постановлением Президента Республики Узбекистан «О мерах по коренному повышению эффективности системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» № ПП-5066 от 1 июня 2017 г. создан Республиканский центр сейсмопрогностического мониторинга Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Узбекистан на базе Службы срочных донесений и Республиканской сети сейсмологического мониторинга сейсмической опасности и прогнозического мониторинга. Республиканский центр сейсмопрогностического мониторинга (РЦСМ) ответственен за проведение мониторинга сейсмической опасности на территории республики и трансграничных зон, а также на природно- и техногенно-опасных территориях и важных объектах. В настоящее время в РЦСМ гидрогоеохимические наблюдения проводятся на девяти комплексных станциях (КПС), которые осуществляют гидрогоеохимический мониторинг за подготовкой и проявлением сейсмических событий на территории геодинамических полигонов Узбекистана и контролируют основные сейсмогенные зоны. При этом расположение станций и пунктов наблюдений выбрано с учетом структурного-гидрологического районирования, а также сложности блоково-разломного строения земной коры и приуроченности объектов наблюдения к основным сейсмогенным разломам и флексурно-разрывным зонам республики [Сейсмологический атлас..., 2021; Юсупов, 2025 и др.].

В гидрогеологическом плане основным объектом мониторинга гидрогеохимических наблюдений являются подземные воды водонапорных систем мезо-кайнозойских (Mz+Kz) отложений Узбекистана.

Сеть гидрогеосейсмологических наблюдений представлена на рис. 1.

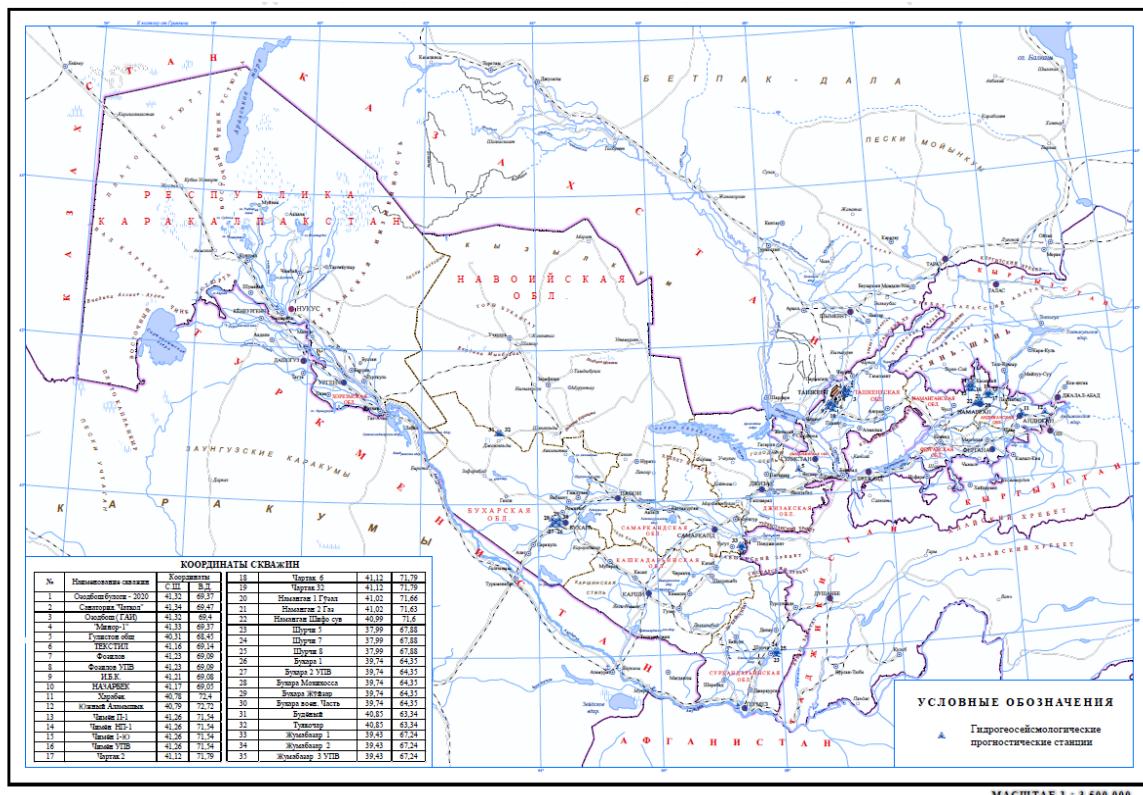


Рис. 1. Схема расположения гидрогеосейсмологических прогнозических станций Республиканского центра сейсмопрогностического мониторинга МЧС [Сейсмологический атлас..., 2021 с дополнениями].

Figure 1. Layout of hydrogeoseismological prognostic stations of the Republican Center for Seismic Prognostic Monitoring of the Emergency Situations Ministry.

Характеристика геолого-тектонических и гидрогеологических условий наблюдаемых полигонов Узбекистана (Ташкентского, Ферганского, Самаркандского и Центрально-Кызылкумского) и объемы проводимых исследований подробно изложены в [Сейсмологический атлас..., 2021; Юсупов, 2025 и др.]. Анализ действующих скважин показывает, что в настоящее время большая часть глубоких скважин работает в крановом режиме, оборудована запорной арматурой, что часто приводит к искажению естественного гидродинамического режима. Имеющие место ложные тревоги и пропуски цели, фиксируемые как в Узбекистане, так и за рубежом, могут быть следствием использования скважин с техногенно-нарушенным режимом. Это затрудняет различение аномалий, связанных с сейсмогенезом, и фоновых сезонных или эксплуатационных вариаций. Так, на рис. 2 смоделированы значения изменения концентрации растворенного гелия в зависимости от глубины и температуры скважины. Модель построена на основе кинетики дегазации [Roy, Ryan, 2010] и с учётом закона Генри [Sander, 2023]. При закрытой скважине глубина, температура и начальная концентрация газа фиксированы, концентрация растворённого гелия быстро изменяется после открытия крана: в течение первых 5 минут происходит снижение концентрации на 90% по сравнению с исходным значением, что создаёт ложные вариации, не связанные с сейсмическими процессами.

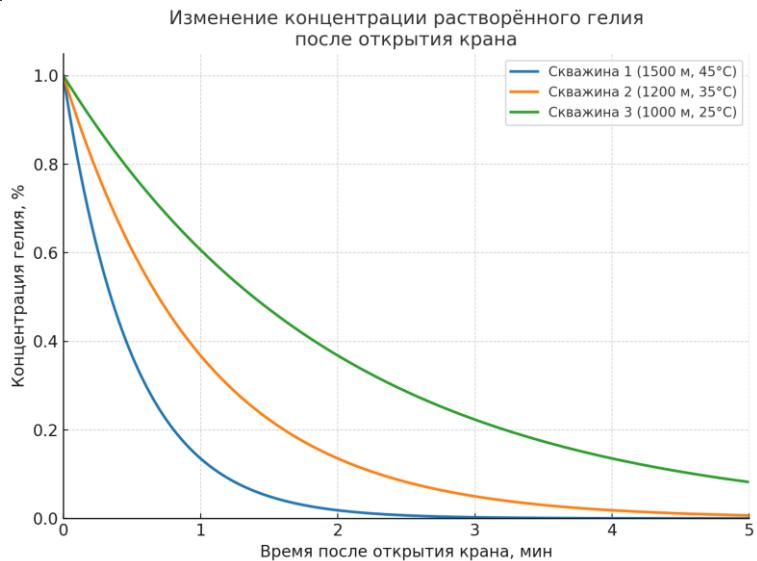


Рис. 2. Изменение концентрации растворённого гелия во времени после открытия крана при отборе проб подземных вод.

Figure 2. Change in the concentration of dissolved helium over time after opening a tap during groundwater sampling.

Таким образом, приоритетным направлением в развитии мониторинговой сети Узбекистана должно стать переосмысление текущей схемы размещения пунктов наблюдений с акцентом на самоизливающиеся источники с естественным режимом. Следующим же шагом может быть создание моделей формирования гидрогоеохимического предвестника в отдельных скважинах с учетом, например, их резонансных свойств, либо времени релаксации импульсов давления воды и времени движения смешанной воды [Барсуков и др., 1992; Ибрагимова, 2013; Zhou et al., 2021; Копылова и др., 2022], с целью оценки параметров возмущенного состояния системы скважина – водовмещающая порода при подготовке землетрясения.

Выводы и рекомендации

Для целей прогноза землетрясений наиболее предпочтительны самоизливающиеся, глубокие скважины, функционирующие без давления на оголовок и обеспечивающие свободное истечение воды. Приоритет должен быть отдан объектам, в которых зафиксированы стабильные параметры в условиях естественной фильтрации и с возможностью регистрации сопутствующих характеристик (дебит, температура, давление). Необходимо провести аудит и реконфигурацию сети РЦСПМ, исключив скважины с нарушенным режимом эксплуатации, либо переоборудовав их.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барсуков В.Л., Беляев А.А., Бакалдин Ю.А., Игумнов В.А., Ибрагимова Т.Л., Серебренников В.С., Султанходжаев А.Н. Геохимические методы прогноза землетрясений. - М.: Наука, 1992. - 213 с.
2. Беляев А.А., Ибрагимова Т.Л., Султанходжаев А.Н. Оценка сопоставимости данных геохимического мониторинга // Геохимия. - 1990. - № 1. - С. 145-151.
3. Ибрагимова Т.Л., Азизов Г.Ю. Информативность комплекса гидрогоеохимических параметров подземных вод в различных геодинамических условиях // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. - Т.: ИС АН РУз, 2012. - № 9. - С. 60-64.
4. Ибрагимова Т.Л. Изученность влияния сейсмотектонических условий на особенности проявления гидрогоеосейсмологических предвестников // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. - 2013. - № 10. - С. 54-60.
5. Ибрагимова Т.Л. О выделении полезного (прогнозного) сигнала в результатах гидрогоеохимических наблюдений для поиска предвестников землетрясений // Проблемы сейсмологии. - 2024а. - № 1. - С. 17-29.
6. Ибрагимова Т.Л. Методика многокомпонентной обработки рядов гидрогоеохимических наблюдений, позволяющая идентифицировать текущую сейсмологическую

обстановку на предмет возможности возникновения сильного землетрясения в конкретной сейсмоактивной зоне // Проблемы сейсмологии. - Т., 2024б. - Т. 6. - № 2. - С. 37-46.

7. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. - М.: Наука, 2009. - 328 с.

8. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Серафимова Ю.К. Предвестники землетрясений в изменениях ионного и газового состава подземных вод: обзор мировых данных // Геохимия. - 2022. - Т. 67. - № 10. - С. 921-941.

9. Копылова Г.Н., Юсупов Ш.С., Серафимова Ю.К., Шин Л.Ю., Болдина С.В. Гидрогеохимические предвестники землетрясений (на примере районов полуострова Камчатка, Россия и Республики Узбекистан) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2020. - № 4. - Вып. 48. - С. 5-20.

10. Мавлянов Г.А., Уломов В.И., Султанходжаев А.Н., Хасанова Л.А., Горбушина Л.В., Тыминский В.Г., Спиридонов А.И., Мавашев Б.З., Хитаров Н.И. Явление изменения химического состава подземных вод при землетрясении: № 129 от 21 февраля 1966 г. // «Открытия. Изобретения». Официальный бюллетень Патентного ведомства. - М., 1973. - № 42. - С. 3-4.

11. Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане. - Т.: ГИДРОИНГЕО, 2002. - 132 с.

12. Сейсмологический атлас Узбекистана. - Т.: Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, 2021. - 96 с.

13. Султанходжаев А.Н. Основы гидрогеосейсмологии. - Т.: АН РУз, 2006. - 165 с.

14. Юсупов Ш.С. Гидрогеосейсмологические предвестники землетрясений (Ч. 1). - Т.: Innovatsion rivojlanish nashrijot-matbaa uyi, 2025. - 296 с.

15. Barberio M.D., Barbieri M., Bili A., Doglioni C., Petitta M. Hydrogeochemical changes before and during the 2016 Amatrice-Norcia seismic sequence // Scientific Reports. - 2017. - Vol. 7. - 11735. - DOI: 10.1038/s41598-017-11990-8.

16. Lu C., Zhou X., Jiang J., Li J., Li J., Wu J., Zhu X., Li J., Xing G., Cui S. The Hydrogeochemistry of and Earthquake-Related Chemical Variations in the Springs along the Eastern Kunlun Fault Zone, China // Water. - 2024. - 16(9): 1215. DOI:10.3390/w16091215.

17. Roy S., Ryan M.C. Helium as a natural tracer of groundwater discharge // Hydrology and Earth System Sciences. - 2010. - 14. - 1797-1808.

18. Sander R. Compilation of Henry's law constants (version 5.0.0) for water as solvent // Atmospheric Chemistry and Physics. - 2023. - 23. - 10901-12440, <https://doi.org/10.5194/acp-23-10901-2023>.

19. Sato T., Kazahaya K., Matsumoto N., Takahashi M. Deep groundwater discharge after the 2011 Mw 6.6 Iwaki earthquake, Japan // Earth Planets Space. - 2020. - 72. - 54. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01181-7>.

20. Zhou Z., Tian L., Zhao J., Wang H., Liu J. Stress-Related Pre-Seismic Water Radon Concentration Variations in the Panjin Observation Well, China (1994-2020) // Front. Earth Sci. - 2020. - Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.596283>.

21. Zhou Z., Zhong J., Zhao J., Yan R., Tian L., Fu H. Two Mechanisms of Earthquake-Induced Hydrochemical Variations in an Observation Well // Water. - 2021. - 13(17). DOI:10.3390/w13172385.

Zilzilalarni proqnozlashda gidrogeokimyoviy monitoring uchun quduqlarni tanlash

T.L. Ibragimova

Abstrakt. Ushbu tadqiqot zilzilalarni bashorat qilishga qaratilgan hidrogeokimyoviy monitoring tarmog'ini amalga oshirish uchun tegishli quduqlarni tanlash mezonlarini belgilaydi. Maqolada antropogen ta'sirlar ta'sirida bo'limgan tabiiy oqim rejimlariga ega chuqur, o'z-o'zidan oqadigan quduqlarga ustuvorlik berish uchun SMRMning joriy kuzatish tizimini qayta ko'rib chiqish muhimligi ta'kidlangan. Ta'kidlanishicha, bunday sharoitlar potentsial seysmik prekursorlarni aniqlashni kuchaytirishi mumkin bo'lgan ishonchli va buzilmagan hidrogeokimyoviy ma'lumotlarni olishni ta'minlash uchun zarurdir.

Kalit so'zlar: hidrogeokimyoviy monitoring, zilzilani bashorat qilish, seysmik faollik, er osti suvlari, prekursorlar, joy tanlash.

Towards the selection of wells for hydrogeochemical monitoring in earthquake forecasting

T.L. Ibragimova

Abstract. This study outlines a set of criteria for selecting appropriate wells for the implementation of a hydrogeochemical monitoring network aimed at earthquake forecasting. The paper emphasizes the importance of revising the current SPMC observation system to prioritize deep, self-flowing wells with natural flow regimes that are not influenced by anthropogenic activities. It is argued that such conditions are essential to ensure the acquisition of reliable and undistorted hydrogeochemical data, which can enhance the identification of potential seismic precursors.

Key words: hydrogeochemical monitoring, earthquake forecasting, seismic activity, groundwater, precursors, site selection.

SEYSMOTEKTONIKA VA GEODINAMIKA

УДК 550.34

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И СЕЙСМОГЕННЫЕ ЗОНЫ ЮЖНОГО УЗБЕКИСТАНА

У.А. Нурматов, Ю.М. Садыков, У.А. Юсупджанова

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан

Аннотация. Рассмотрены результаты изучения сейсмотектонических особенностей территории Южного Узбекистана, разломов земной коры на основе геолого-геофизических, сейсмологических данных. Приведена информация о ранее выделенных сейсмогенных зонах. Путем анализа существующих карт разломов, современной сейсмичности территории внесены соответствующие изменения и дополнения для ранее выделенных сейсмогенных зон, а также изучены новые зоны. Установлена повышенная чувствительность узловых участков сейсмогенных зон к изменению напряженного состояния земной коры.

Ключевые слова: земная кора, разломы земной коры, землетрясение, эпицентр землетрясения, сейсмогенные зоны, сейсмический потенциал.

Введение. Тектоническое строение Южного Узбекистана и прилегающих территорий, относящихся к эпиплатформенной орогенической области Тянь-Шаня, характеризуется большой сложностью и разнообразием. Наибольшую роль в создании современных тектонических структур территории играли новейшие тектонические движения, в результате которых формировались зоны устойчивых поднятий и устойчивых прогибаний. К зонам устойчивых поднятий отнесен Гиссарский хребет и его юго-западные отроги. Они представлены складчато-блоковыми поднятиями, которые ступенчато погружаются в юго-западном направлении. Между этими поднятиями располагаются прогибы и впадины. Наиболее крупная из них – Сурхандарьинская мегасинклиналь, которая относится к зонам устойчивых прогибаний. В ее периферийных частях развиты кулисообразно расположенные антиклинальные складки. Большинство из них четвертичного возраста [Таль-Вирский, 1982; Ибрагимов и др., 2002].

Почти все структуры района направлены с северо-востока на юго-запад и ступенчато погружаются в сторону Сурхандарьинской впадины. Эта впадина представляет крупный прогиб, где палеозойский фундамент опущен до глубины 8-10 км [Умарходжаев и др., 1973; Таль-Вирский, 1982; Ибрагимов и др., 2002]. На востоке впадина граничит с Бабатагским антиклинальным поднятием по зоне одноименного разлома. На северо-востоке она отделяется от Гиссарской впадины через Иляк-Вахшский разлом, имеющий свое продолжение на западе под покровными отложениями в виде крутого флексурного уступа [Кошлаков, 1965]. Выше этого флексурного уступа располагается предгорная складчатая зона, которая состоит из Мечетлинского, Карагатского, Дарвазкамского антиклинальных поднятий, являющаяся предгорной частью Гиссаро-Алайского хребта. Складчатая зона отделяется от Гиссаро-Алайского глубинным Гиссаро-Кокшаальским (Южно-Тянь-Шаньским) разломом, через узкую полоску Зеварской синклиналии. А.М.Бабаев, Г.В.Кошлаков и др. [1978] рассматривают этот разлом как краевой и надвинутый на мезозойско-кайнозойские отложения Зеварской синклиналии. Этот глубинный краевой разлом контролирует почти все структуры предгорной части. В результате они приобретают линейный характер, простираются с северо-востока на юго-запад, на продолжении структурных носов Мечетлинского, Карагатского антиклинальных поднятий. В пределах этих структур довольно широко развиты крупные разрывные нарушения, выявленные геолого-геофизическими и геоморфологическими исследованиями. По морфологическому признаку они относятся к крутопадающим надвигам, а по кинематическому – это сдвиги и взбросы. Большинство этих разломов глубинные, они осложняют структурный план Западно-Гиссарской складчатой зоны и падают под углом 60-80° в северном и северо-западном направлении. Местами располагаясь кулисообразно друг относительно друга, они чередуются по простирианию со

структурами и образуют флексурно-разрывные зоны. Явный пример – Сурхантау-Шерабад-Келифская флексурно-разрывная зона.

Разрывные нарушения. В настоящее время существуют различные варианты карты активных разломов территории Южного Узбекистана [Якубов и др., 1986; Ярмухamedов и др., 1994; Ибрагимов и др., 2002]. Практически все карты составлены на основе анализа результатов геолого-съемочных работ, комплекса геофизических, дистанционных и др. исследований. Несмотря на то, что в основу этих вариантов карт заложен весь комплекс имеющихся материалов, в окончательном варианте наблюдается ряд несогласий, которые имеют важное значение для выделения источников сейсмичности. Путем анализа комплекса геолого-геофизических данных, материалов по разломной тектонике, космофотоснимков и другой информации составлен новый вариант карты активных разломов Центрального и Южного Узбекистана (рис. 1) [Ибрагимов и др., 2024]. Составление нового варианта карты активных разломов, накопление новых данных о сейсмичности региона создало условия для внесения необходимых уточнений и дополнений на ранее составленную карту сейсмогенных зон Южного Узбекистана, к чему направлена данная работа.

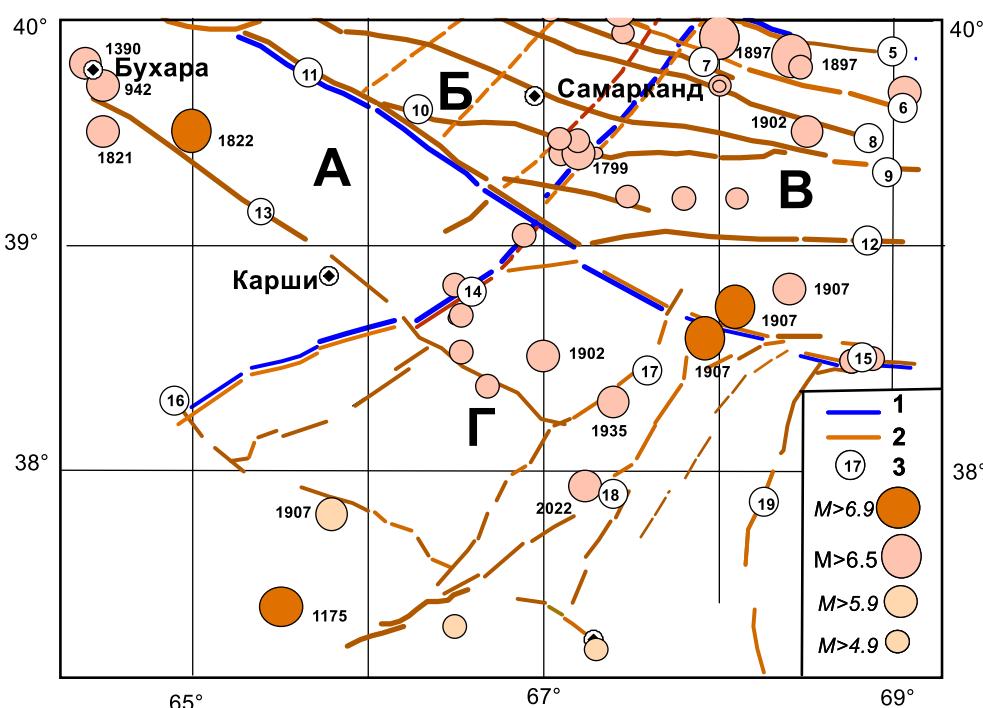


Рис. 1. Активные тектонические разломы Южного Узбекистана и эпицентры сильных (с $M \geq 5,0$) землетрясений, возникшие с древнейших времен по 2023 г. 1 – граница геодинамических блоков; 2 – разломы земной коры: 5 – Южно-Ферганский; 6 – Нуратау-Катранский; 7 – Северо-Актау-Южно-Карачатау-Северо-Гобдунтау-Южно-Молгузарский; 8 – Южно-Актау-Южно-Гобдунтау-Северо-Туркестанский; 9 – Южно-Каратай-Южно-Туркестанский; 10 – Северо-Зираубулак-Северо-Каратепа-Северо-Зарафшанский; 11 – Южно-Тянь-Шаньский; 12 – главный Гиссарский; 13 – Учбаш-Каршинская ФРЗ; 14 – Лянгар-Караильская ФРЗ; 15 – Гиссаро-Кокшаальский; 16 – Амударьинский; 17 – Байсун - Кугитангская система; 18 – Сурхантау-Шерабад-Келифская ФРЗ; 19 – Бабатагская; 23 – система Поперечно-Западно-Тянь-Шаньских разломов.

Fig. 1. Active tectonic faults of Southern Uzbekistan and epicenters of strong (with $M \geq 5,0$) earthquakes that occurred from ancient times to 2023. 1 – boundary of geodynamic blocks; 2 – crustal faults: 5 – South Fergana; 6 – Nuratau-Katransky; 7 – North Aktau-South Karachatau-North Gobduntau-South Molguzarsky; 8 – South Aktau-South Gobduntau-North Turkestan; 9 – South Karatau-South Turkestan; 10 – North-Zarabulak-North-Karatapa-North-Zarafshansky; 11 – South Tien Shan; 12 – chief Gissarsky; 13 – Uchbash-Karshi Federal Repair Plant; 14 – Langar-Karayil Federal Reserve; 15 – Gissaro-Kokshaalsky; 16 – Amu Darya; 17 – Baysun-Kugit system; 18 – Surkhantau-Sherabad-Kelif Federal Reserve; 19 – Babatagskaya; 23 – Transverse- Western Tien Shan fault system.

В пределах изучаемой территории выделены разломы трех преобладающих направлений: северо-западное, северо-восточное и субширотное, принятые нами в качестве геологической основы выделения сейсмогенных зон.

Северо-западная система разломов

Разломы северо-западной ориентации установлены геолого-съемочными работами. Их современная активность подтверждается морфологической выраженностью и уверенным

трассированием на материалах топографической и аэрокосмических съемок и эпицентрами землетрясений, тяготеющих к зоне разломов. Однозначно, все разломы на исследуемой территории северо-западного простирания, являются прямым продолжением краевых и внутренних разломов Южного Тянь-Шаня, который включает Туркестанское, Зарафшанское и Гиссарское поднятие более высокого ранга. Этот регион рассматривается как область устойчивых новейших и современных поднятий, сейсмический потенциал которых обоснован современными сильными землетрясениями и деформациями горного рельефа, возникших в результате сильнейших доисторических землетрясений. В морфологическом отношении разломы Южного Тянь-Шаня представлены крутыми взбросами и взбросо-надвигами. Амплитуда внутренних разломов достигает 1000-2000 м, что намного уступает системе краевых (11000-12000 м) [Ибрагимов и др., 2002].

Южно-Тянь-Шаньский разлом (11). Данная система является западным продолжением Гиссаро-Кокшаальского разлома. И.Е.Губин [1960], Д.Х.Якубов и др. [1976] отнесли его к категории краевых на основании большой протяженности (800 км), длительного существования, резкой геоморфологической выраженности в виде серии разрывов. Морфоконтролирующая роль разлома не прекращалась в течение мезозоя и кайнозоя. Особенно резкой активизации разлом подвергался в неотектонический этап. Амплитуда новейших вертикальных тектонических перемещений достигает порядка 3-4 км [Бабаев и др., 1976]. Морфологически выражены в виде крутых взбросов, с падением сместителей на север. Разлом отличается высокой активностью и в настоящее время, о чем свидетельствуют сильнейшие (с $M > 7,0$) Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг.

Учбаш-Каршинская ФРЗ (13) (по Ибрагимову и др. [2002] – Бухарский разлом). Одна из крупных систем разрывных нарушений земной коры Западного Узбекистана. На закрытой части территории ее бухарская часть прослеживается по материалам геофизики и бурения. Далее на восток в виде серии разрывов трассируется по южному склону Северо-Гиссарского хребта. Учбаш-Каршинская ФРЗ представляет сложную полосу, состоящую из кулисообразно расположенных нарушений, от которых нередко отходят оперяющие более мелкие разрывы. Зона в плане образует протяженную полосу и прослеживается на расстояние почти 450 км. Ее ширина колеблется от нескольких метров до 10-16 км. Флексурно-разрывная зона на юго-востоке, пересекая Карайль-Лянганскую ФРЗ, доходит до Байсун-Кугитангской системы. Отметим, что в варианте [Ибрагимов и др., 2002] разлом не имеет продолжения за Карайль-Лянганскую ФРЗ. Время заложения – ранний палеозой, возможно, в докерцинский этап развития региона [Садыков и др., 2006].

Амударыинский глубинный разлом (16) прослеживается в направлении с северо-запада на юго-восток вдоль р. Амудары. На этой части разлом проходит по территории Хорезмского вилоята, далее по территории Туркменистана. В районе Сурхандарыинского вилоята разлом опять пересекает территорию Узбекистана, основные антиклинальные и синклинальные структуры Южного Узбекистана, развивающиеся в северо-восточном направлении. Протяженность зоны разлома в пределах Сурхандарыинского вилоята составляет ~150 км. Да настоящего времени Амударыинский разлом не включен в категорию сейсмоактивных, хотя в зоне его динамического влияния отмечено возникновение ряда сильных исторических землетрясений. В частности, в пределах г. Термез в 1906 г. отмечено возникновение землетрясения с $M = 5,7$; в 1907 г. в зоне разлома возникло землетрясение с $M = 6,7$, а в 1929 г. с $M \geq 5,0$ (см. рис. 1) [Новый каталог..., 1977].

Северо-восточная система разломов

Лянгар-Караильская флексурно-разрывная зона (14) состоит из кулисообразно расположенных региональных и локальных нарушений северо-восточного простирания и крутых флексур, затухающих в юго-западном направлении. Северо-восточная часть представлена Лянгарским надвигом, а на юго-западе – чередованием флексур. Эти разрывные нарушения имеют взбросовый характер. Плоскости их смесителей в данной зоне с глубиной выполняются. Северо-западное крыло Ишакмайданского антиклинального поднятия разорвано одноименным разломом, представляющим крутопадающий взброс, по плоскости которого антиклинальное поднятие взброшено в сторону Кашкадарыинской впадины. Вертикальная амплитуда его превышает 3 км, при этом в юго-западном направлении амплитуда взброса уменьшается, где взброс превращается в типичный надвиг, с заметным увеличением горизонтальной амплитуды [Ибрагимов и др., 2002]. В районе Карайльской складки угол падения разлома достигает 30°.

Развитые здесь Адамташская, Карайльская, Гумбулакская и Белесайская складки находятся под влиянием флексурно-разрывной зоны. Разрывные нарушения секут не только осадочные отложения, но и палеозойские основания, что свидетельствует об их глубинном происхождении.

Байсун-Кугитангский региональный разлом (17) отделяет юго-западное погружение Западно-Гиссарского поднятия от Сурхандарьинской впадины на расстоянии 170-180 км. Он характеризуется крутым падением плоскости ($60\text{--}80^\circ$) на северо-запад. По разлому, простирающемуся в северо-восточном направлении, Байсунское и Кугитангское антиклинальные поднятия надвинуты в сторону Байсунского прогиба. Максимальная амплитуда надвигания – в районах выходов палеозойских образований. По изменениям гравитационного поля вдоль Байсун-Кугитангского разлома перепад мощностей осадочного покрова достигает 7 км. По оценкам специалистов, разлом имеет глубинный характер [Губин, 1960; Ибрагимов и др., 2002].

Сурхантау-Шерабад-Келифская флексурно-разрывная зона (18) состоит из крупных взбросов, надвигов, флексур и локальных складок северо-восток-юго-западного простирания. Зона охватывает ряд разрывных нарушений, среди которых наиболее крупными являются Сурхантауский и Сарыкамышский региональные разломы. Первый имеет типичный взброс, местами переходящий в надвиг субмеридионального простирания. Плоскость сместителя падает на северо-запад под углом 70° . Палеозойские образования зоны по плоскости взброса вздвинуты на юго-восточное крыло, представленное мезозой-кайнозойскими отложениями. По данным И.Е.Губина [1960], разлом в четвертичное время перетерпел дифференцированные движения с амплитудой 3-4 км. На юге разлом, осложняя Хожаипакскую структуру, соединяется с Аккапчигайским взбросо-сдвигом. Сарыкамышский региональный разлом северо-восточного простирания, по морфологии относится к надвигу. В районе ущелья Кагнысай этот разлом упирается в Кагнысайский взбросо-сдвиг.

Бабатагский региональный разлом (19) протягивается в субмеридиональном направлении. Северо-восточная часть разлома в районе г. Гиссар скрывается под четвертичными отложениями и упирается в Ильяк-Вахшский глубинный разлом. Вертикальная амплитуда его более 3 км, а горизонтальная – более 5 км. Плоскость падает на северо-запад. Протяженность разлома более 1500 км.

Кроме перечисленных, к северо-восточной системе разломов относится система **Поперечно-Западно-Тянь-Шаньского разлома**, выделенная в основном по результатам геофизических исследований и сейсмичности. На поверхности она выражена в виде протяженных линеаментов. В геофизических полях отмечена высокоградиентной полосой поля силы тяжести, которая совпадает с границей Тянь-Шаня и Туранской плиты – Северным краевым разломом [Таль-Вирский, 1982]. На рис. 1 система разлома соответствует границам геодинамических блоков **А, Б и В, Г**.

Субширотная система разломов

Главный Гиссарский разлом (12) проходит по северному склону Гиссарского хребта, по междуречью бассейнов рек Зарафшан и Амударья. Длина разлома более 200 км. Разлом, прослеживаясь по северному склону Гиссарского хребта, на востоке объединяется с системой Гиссаро-Кокшаальских разломов, являющейся границей Тянь-Шаня с Памиром. По сейсмическому потенциалу эта система разломов относится к числу самых высокопотенциальных разрывных нарушений региона.

Гиссаро-Кокшаальский разлом (15). На основании большой протяженности (до 800 км), длительного существования, резкой геоморфологической выраженности в виде серии разрывов этот разлом отнесен к категории краевых [Губин, 1960]. По данным Д.П.Резвого и др. [1973], разлом заложен в палеозойское время и в течение всего палеозоя являлся границей между геосинклинальными прогибами Южного Тянь-Шаня и Таджикско-Каракумского древнего выступа. Разлом не прекращал свою активность и в течение мезозоя и кайнозоя. Особенно резкой активизации разлом подвергался в новейшее время. Амплитуда разлома за неотектонический этап достигает порядка 3-4 км [Бабаев и др., 1976]. Морфологически разлом представлен серией крутых (до 80°) взбросов, сместители которых падают на север [Бабаев и др., 1978].

Особенности сейсмичности и сейсмогенные зоны

Ранее на базе активных разломов Р.Н.Ибрагимовым и др. [2002] выделены основные сейсмогенные зоны изучаемой территории, которые приняты в качестве линейных источников

сейсмических колебаний при оценке сейсмической опасности (рис. 2). При определении пространственных показателей сейсмогенных зон учитывались параметры плейстосейстовых областей возникших землетрясений, углы падения и глубина проникновения разлома, площади распространения палеосейсмодислокации и др. Наиболее достоверным показателем оценки энергетических возможностей сейсмогенных зон является магнитуда происшедших в ней землетрясений. Однако к настоящему времени не все зоны разломов проявили себя возникновением сильных землетрясений, и для них использовать этот подход не представляется возможным. В таких случаях параметры сейсмогенных зон оценивались путем изучения зоны динамического влияния крупных разломов и по мере схожести зон разломов по геологическим критериям сейсмичности.

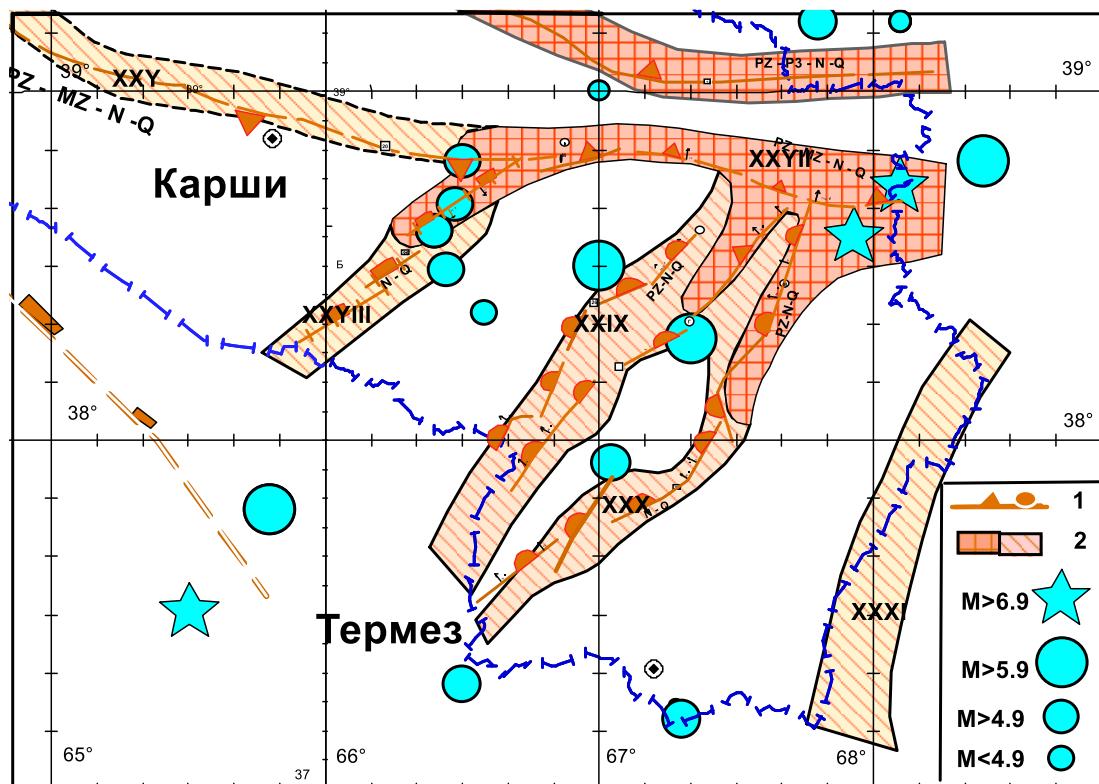


Рис. 2. Сейсмогенные зоны Южного Узбекистана, по Р.Н.Ибрагимову и др. [2002], и эпицентры сильных землетрясений по [Новый каталог..., 1977]. 1 – разлом земной коры; 2 – сейсмогенные зоны, где могут возникнуть землетрясения с $M \leq 7,5$ и $M \leq 6,5$ (Южно-Тянь-Шаньская – XXIV, Бухарская – XXY, Гиссаро-Кокшаальская – XXVII, Кызылдарынско-Лянгар-Караильская – XXVIII; Байсун-Кугитангская – XXIX; Сурхантау-Шерабад-Кугитангская – XXX; Бабатаг-Кейкитауская – XXXI; Амударьинская – XXXII).

Fig. 2. Seismogenic zones of Southern Uzbekistan according to R.N.Ibragimov et al. [2002], and epicenters of strong earthquakes according to [New Catalog, 1977]. 1 – fault in the earth's crust; 2 – seismogenic zones where earthquakes with $M \leq 7,5$ and $M \leq 6,5$ can occur (South Tien Shan – XXIV, Bukhara – XXY, Gissar-Kokshaal – XXVII, Kizylarya-Lyangar-Karail – XXVIII; Baysun-Kugitang – XXIX; Surkhantau-Sherabad-Kugitangskaya – XXX; Babatag-Keykitauskaya – XXXI; Amudarya – XXXII).

Сопоставительный анализ схемы сейсмогенных зон, приведенной на рис. 2, с картой активных разломов (см. рис. 1) свидетельствует о существовании определённых несоответствий, требующих уточнения. В этой связи был составлен новый уточнённый вариант сейсмогенных зон изучаемой территории на основе нового варианта карты активных разломов Южного Узбекистана и сейсмичности (рис. 3).

По сейсмическому потенциалу сейсмогенные зоны разделены на три категории: где могут возникать землетрясения с $M \leq 7,5$, с $M \leq 6,5$ и с $M \geq 5,0$.

К сейсмогенным зонам первой категории, с сейсмическим потенциалом $M \leq 7,5$, отнесены Южно-Тянь-Шаньская (XXIV) и Гиссаро-Кокшаальская (XXVII), которые обусловлены одноимёнными разломами земной коры. В пределах этих зон с исторических времен по настоящее время происходил ряд сильных землетрясений, такие как: Газлийские 1976 г. с $M = 7,0, 7,3$ и 1984 г. с $M = 7,2$; Карагатские 1907 г. с $M = 7,4$ и $7,2$; Файзабадское 1943 с $M = 6,0$ и Хайтское 1949 г. с $M = 7,4$. Плейстосейстовые области этих землетрясений достигают 30 км, что соответствует ширине сейсмогенных зон. В предыдущем варианте карты сейсмогенных зон

[Ибрагимов и др., 2002] западное продолжение Гиссаро-Кокшаальской сейсмогенной зоны переходило в Бухарскую (XXV), но с меньшим сейсмическим потенциалом ($M \leq 6,5$). Однако по результатам исследований И.Е.Губина [1960], Д.Х.Якубова и др. [1976] Южно-Тянь-Шаньский разлом является западным продолжением Гиссаро-Кокшаальского. Данная система разломов протяженностью более 800 км, с резкой геоморфологической выраженностью в виде серии разрывов ими отнесена к категории краевых. Эти данные свидетельствуют о том, что Южно-Тянь-Шаньская сейсмогенная зона является логическим продолжением Гиссаро-Кокшаальской с сейсмическим потенциалом $M \leq 7,5$ (см. рис. 3). Восточное продолжение Гиссаро-Кокшаальскую сейсмогенную зону (на рис. 3 обозначено вертикальным пунктиром) проходит по территории Таджикистана и достаточно хорошо изучено А.М.Бабаевым и К.М.Мирзаевым [1976] и др. специалистами.

Кызылдарынско-Лянгар-Караильская сейсмогенная зона (XXVIII) (см. рис. 3) обусловлена юго-западным ответвлением Гиссаро-Кокшаальского разлома, выраженного Кызылдарынским разломом и Лянгар-Караильской флексурно-разрывной зоной. По сейсмотектоническим условиям в зоне допускается возможность возникновения землетрясений с магнитудой до $M = 6,5$ интенсивностью 8 баллов. Прогнозная оценка параметров сейсмогенной зоны была оправдана возникновением сильных землетрясений в 1999-2001 г. в районе Камаши с $M = 5,1$ и интенсивностью 7 баллов. До выделения Кызылдарынско-Лянгар-Караильской сейсмогенной зоны здесь землетрясения с такими магнитудами не возникали [Мавлянов, Ибрагимов и др., 1983].

Байсун-Кугитангская сейсмогенная зона (XXIX) (см. рис. 3) представлена системой Байсунских и Кугитангских разломов, осложняющих одноименные альпийские поднятия. Байсунская часть характеризуется, главным образом, взбросами, падающими на юго-восток (80°), их амплитуда достигает 2500 м. Основной этап формирования этих разломов приходится на четвертичное время. С этой зоной связано возникновение сильного Байсунского землетрясения 1935 г., с $M = 6,2$ и интенсивностью 7-8 баллов.

Сурхантау-Шерабад-Келифская сейсмогенная зона (XXX) (см. рис. 3) обусловлена системой кулисообразно расположенных разрывных нарушений, осложняющих Сурхантауское, Келиф-Шерабадское и Шерабад-Сарыкамышское антиклинальные поднятия. Сейсмический потенциал зоны Р.Н.Ибрагимовым и др. [2002] был оценен равным $M \leq 6,5$. До 2022 г. максимальное зарегистрированное землетрясение в зоне имело силу $M = 5,0$ с глубиной $H = 11-20$ км, силой 7 баллов. Здесь могут возникнуть землетрясения с $M \leq 6,5$ с интенсивностью 8 баллов. Последняя активизация зоны наблюдалась в 2022 г. возникновением Байсун-Чиланзарского землетрясения с $M = 5,8$ [Исмаилов и др., 2022].

Отметим, Байсун-Кугитангская и Сурхантау-Шерабад-Келифская сейсмогенные зоны в варианте [Ибрагимов и др., 2002] заканчиваются на границе республики. Дальнейший анализ геолого-геофизических и сейсмологических материалов показал, что обе сейсмогенные зоны имеют продолжение в юго-западном направлении. Они, пересекая Амударынскую сейсмогенную зону, на месте пересечения образуют сложный сейсмоузел, который отличается повышенной чувствительностью к изменению напряженного состояния блоков земной коры.

Бабатаг-Кейкитауская сейсмогенная зона (XXXI) обусловлена одноименной системой взбросо-надвигов. Амплитуда новейших перемещений на северо-востоке около 3000 м, к югу постепенно уменьшается до 1000 м. До настоящего времени сильных землетрясений в пределах сейсмогенной зон не отмечено. Несмотря на это, И.Е.Губин [1960] считает, что с Бабатагскими разрывами могут быть связаны землетрясения с интенсивностью не более 8 баллов. Сейсмотектоническая обстановка очень схожа с предыдущими сейсмогенными зонами, что и дает возможность допускать в этой зоне возникновение землетрясения с $M \leq 6,5$, силой 8 баллов.

Амударынская сейсмогенная зона (XXXII) обусловлена Амударынским разломом северо-западного простирания. На ранее составленных картах сейсмогенных зон она не отмечена. По всей видимости, из-за того, что большая часть разлома проходит по территории соседних государств, на неё не было обращено достаточного внимания. В зоне данного разлома в районе г. Термез в 1906 г. отмечено возникновение сильного землетрясения с $M = 5,7$, в 1907 г. на расстоянии 150 км от г. Термез – с $M = 6,1$, а в 1929 г. на расстоянии 60 км с $M \geq 5,0$. Факт возникновения перечисленных сильных землетрясений в зоне Амударынского разлома свидетельствует о том, что по данной территории проходит высокопотенциальная сейсмогенная зона северо-западного простирания. Сейсмический потенциал ее можно оценивать $M \leq 6,5$, интенсивность I = 8 баллов.

Бухарская сейсмогенная зона (XXV) обусловлена Учбаш-Каршинской флексурно-разрывной зоной, которая отличилась достаточно высокой активности только в историческом периоде. В пределах ее отмечены исторические Бухарские землетрясения 818 г. с $M = 7,5$; 1208 г. с $M = 6,1$; 1821 г. с $M = 6,4$ ($M = 7,0$) [Новый каталог..., 1977]. Современная активность зоны подтверждается возникновением многочисленных землетрясений слабой и умеренной силы ($M \leq 5,0$). Настоящий вариант сейсмогенной зоны значительно отличается от варианта [Ибрагимов и др., 2002]. Как видно на рис. 2, Учбаш-Каршинский разлом, обуславливающий сейсмогенную зону, имеет продолжение на юго-восток и доходит до Байсун-Кугитангской системы. Продолжение разлома до Байсун-Кугитангской системы и далее в восточном направлении отмечается и на карте активных разломов Евразии [Бачманов и др., 2017]. Кроме того, признаки продолжения разлома далее на восток отмечаются на территории Таджикистана. По всей вероятности, сейсмогенная зона имеет продолжение в восточном направлении. Хотя признаки наличия разлома в промежутке между Бабатаг-Кейкитауской (XXXI) и Сурхантау-Шерабад-Кугитангской (XXX) сейсмогенными зонами не отмечены, пространственное распределение эпицентров землетрясений, произошедших в последние годы, свидетельствует о наличие в том направлении зоны, где проявляется современная активизация территории. Эта зона нами условно принята в качестве продолжения Бухарской сейсмогенной зоны и обозначена как **Шурчинская сейсмогенная зона** (см. рис. 3). Особенности проявления сейсмичности в пределах этой зоны своеобразные. Сейсмогенные зоны Южного Узбекистана и ежегодная динамика сейсмичности территории за 2018-2024 гг. отражены на рис. 3-7.

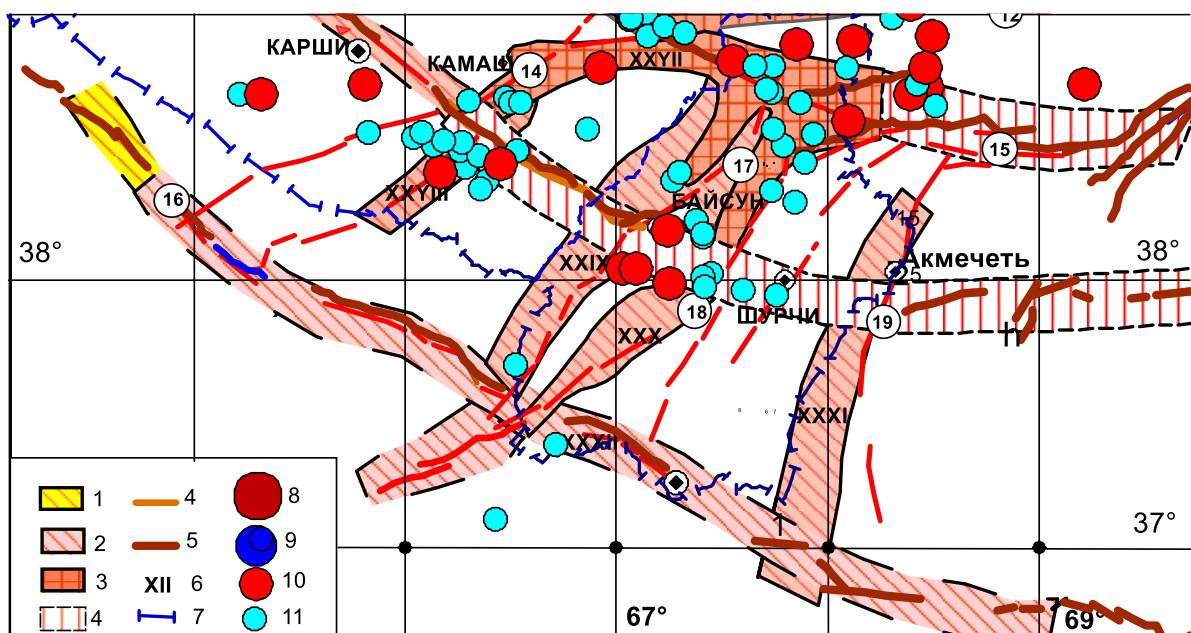


Рис. 3. Сейсмогенные зоны Южного Узбекистана и эпицентры землетрясений, возникшие за 2018-2019 гг.

Сейсмогенные зоны, где могут возникать землетрясения с: 1 – $M \geq 5,0$; 2 – $M \leq 6,5$; 3 – $M \leq 7,5$; (Южно-Тянь-Шаньская – XXIV, Бухарская – XXV, Гиссаро-Кокшаальская – XXVII, Кызылдаринско-Лянгар-Караильская – XXVIII; Байсун-Кугитангская – XXIX; Сурхантау-Шерабад-Кугитангская – XXX; Бабатаг-Кейкитауская – XXXI; Амударыинская – XXXII); 4 – предполагаемая Шурчинская сейсмогенная зона; 5 – разломы земной коры, по [Ибрагимов и др., 2024]; 6 – фрагмент разломов, по [Бачманов и др., 2017]; 7 – номер сейсмогенной зон; 8 – граница республики; эпицентры землетрясений с: 9 – $M \geq 0$; 10 – $M \geq 4,0$; 11 – $M \geq 3,0$; 12 – $\leq 2,9$.

Fig. 3. Seismogenic zones of Southern Uzbekistan and epicenters of earthquakes that occurred in 2018-2019. Seismogenic zones where earthquakes with the magnitude: 1 – $M \geq 0$; 2 – $M \leq 6,5$; 3 – $M \leq 7,5$ may occur; (South Tien Shan – XXIV, Bukhara – XXV, Gissar-Kokshaal – XXVII, Kyzylarya-Lyangan-Karail – XXVIII; Baysun-Kugitang – XXIX; Surkhantau-Sherabad-Kugitang – XXX; Babatag-Keikitaus – XXXI; Amu Darya – XXXII); 4 – probable Shurchin seismogenic zone; 5 – crustal faults according to [Ibragimov et al., 2024]; 6 – fragment of faults according to [Bachmanov et al., 2017]; 7 – seismogenic zone number; 8 – areas of high concentration of epicenters; epicenters of earthquakes with: 9 – $M \geq 0$; 10 – $M \geq 4,0$; 11 – $M \geq 3,0$; 12 – $\leq 2,9$.

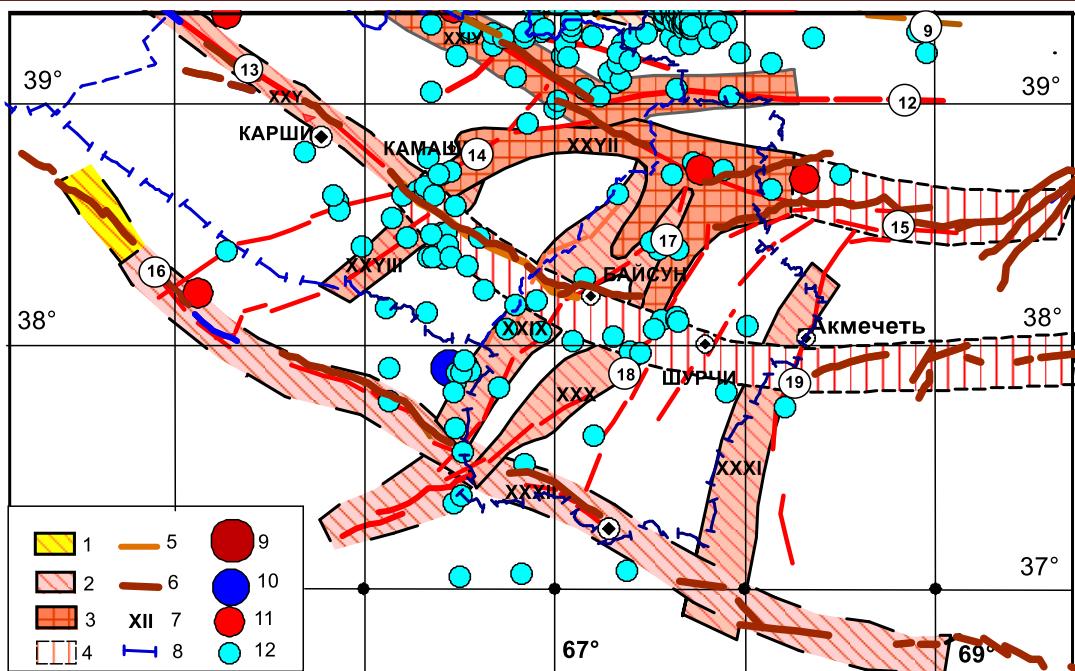


Рис. 4. Сейсмогенные зоны Южного Узбекистана и эпицентры землетрясений, возникшие за 2020 г. Усл. обозн. см. на рис. 3.

Fig. 4. Seismogenic zones of Southern Uzbekistan and epicenters of earthquakes that occurred in 2020. For legend, see Fig. 3.

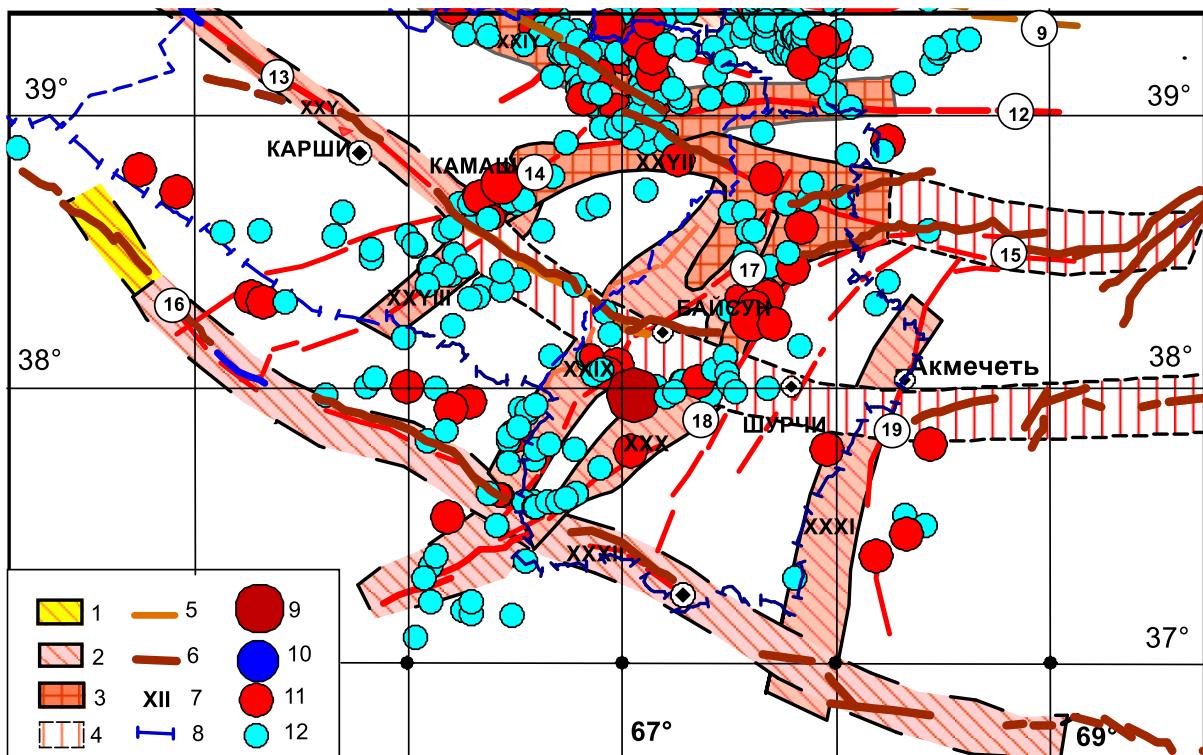


Рис. 5. Сейсмогенные зоны Южного Узбекистана и эпицентры землетрясений, возникшие за 2021-2022 г. Усл. обозн. см. на рис. 3.

Fig. 5. Seismogenic zones of Southern Uzbekistan and epicenters of earthquakes that occurred in 2021-2022. For legend, see Fig. 3.

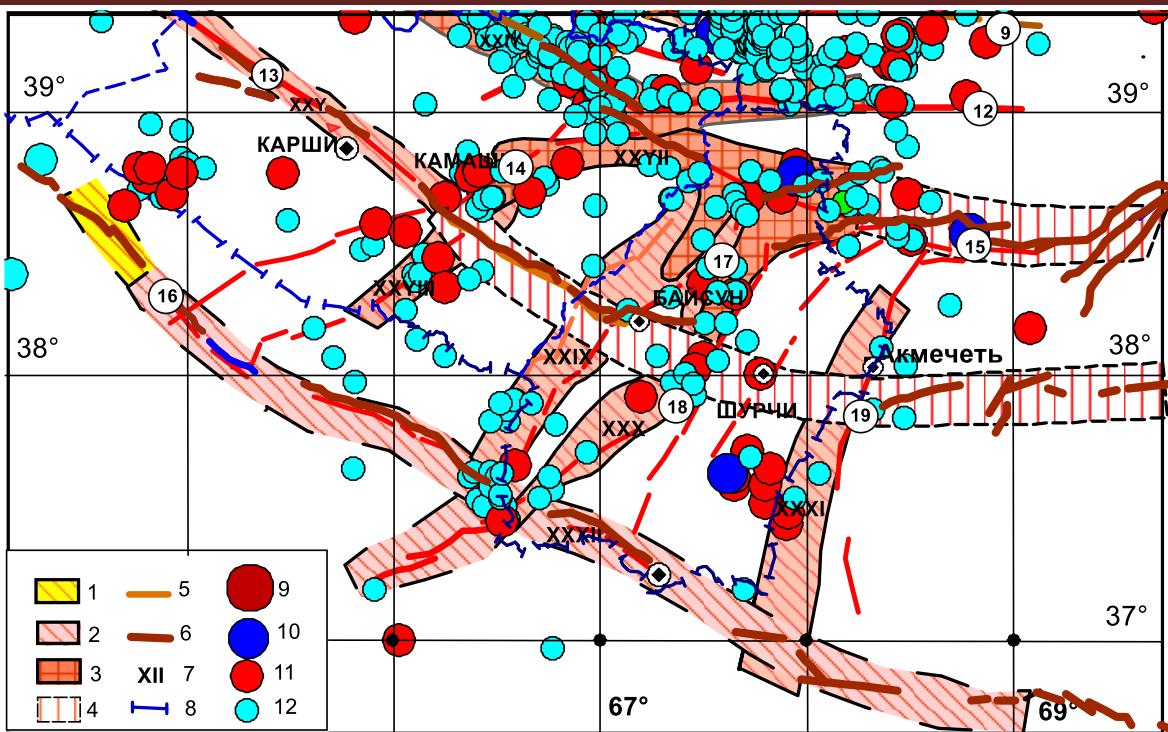


Рис. 6. Сейсмогенные зоны Южного Узбекистана и эпицентры землетрясений, возникшие за 2023 г. Усл. обозн. см. на рис. 3.

Fig. 6. Seismogenic zones of Southern Uzbekistan and epicenters of earthquakes that occurred in 2023. For legend, see Fig. 3.

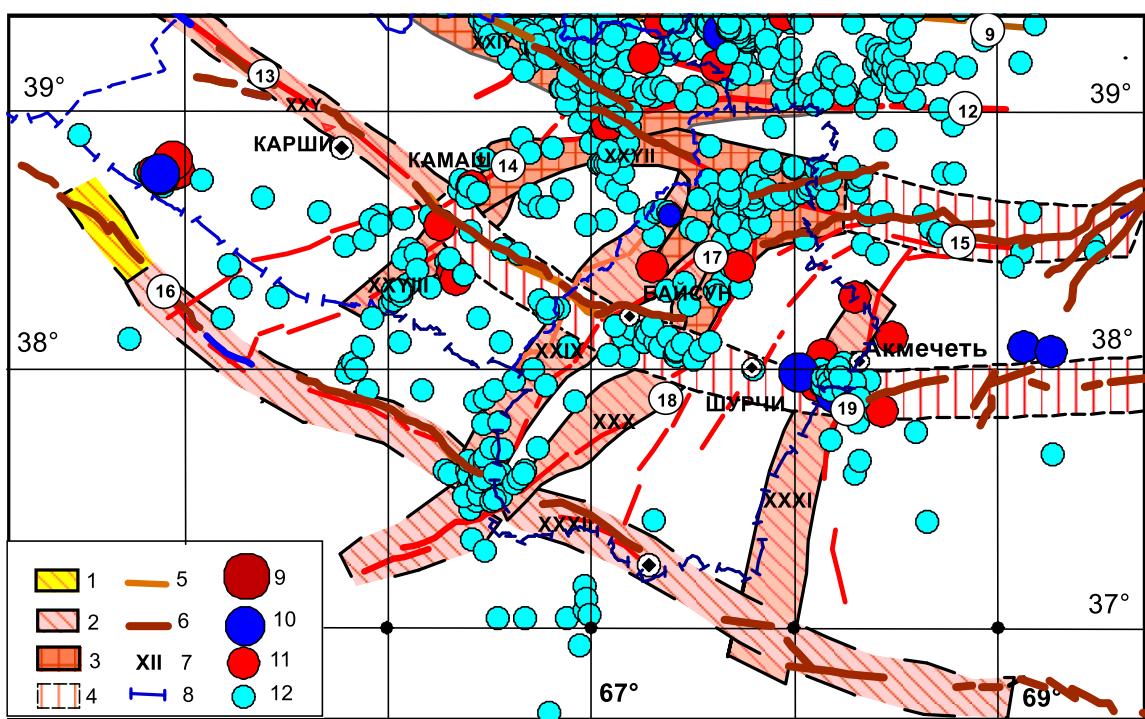


Рис. 7. Сейсмогенные зоны Южного Узбекистана и эпицентры землетрясений, возникшие за 2024 г. Усл. обозн. см. на рис. 3.

Fig. 7. Seismogenic zones of Southern Uzbekistan and epicenters of earthquakes that occurred in 2024. For legend, see Fig. 3.

Как видно из рисунков, в большинстве случаев основная масса землетрясений слабой и умеренной силы проявляется в узловых участках, т. е. в участках пересечения разнонаправленных сейсмогенных зон. Эта тенденция особенно ярко проявляется в 2018-2019, 2023 и 2024 гг. Высокая

концентрация эпицентров наблюдается в узле пересечения Бухарской сейсмогенной зоны с Кызылдарынско-Лянгар-Караильской, Шурчинской с Байсун-Кугитангской и Сурхантау-Шерабад-Кугитангской зонами. В 2024 г. наблюдалось возникновение многочисленных землетрясений в зоне пересечения Шурчинской сейсмогенной зоны с Бабатаг-Кейкитауской. Отметим, что активизация сейсмичности Бабатаг-Кейкитауской сейсмогенной зоны со времен ее выявления Р.Н.Ибрагимовым [2002] не отмечена.

Таким образом, результаты свидетельствуют о реальности существования Шурчинской сейсмогенной зоны. Характерная черта ее в том, что она проявляется почти параллельно направлению Южно-Тянь-Шань-Гиссаро-Кокшаальской сейсмогенной зоны. Если внимательно обратить внимание на карту активных разломов Евразии [Бачманов и др., 2017], то можно обнаружить, что основные крупные разломы субширотного и северо-западного простирания являются основой параллельных друг другу сейсмогенных зон этой части территории. Только лишь расстояние между ними постепенно сокращается по мере продвижения их к северу, т. е. к зоне Бесапано-Южно-Ферганского разлома. Если среднее расстояние между Амударынской и Шурчинской сейсмогенными зонами равняется 80-100 км, то между Шурчинской и Южно-Тянь-Шань-Гиссаро-Кокшаальской 60-75 км, а далее еще меньше. Такое расположение сейсмогенных зон, по всей видимости, объясняется особенностью перераспределения действующих сил в север-северо-западном направлении, создаваемом со стороны Индийской плиты, и формированием геодинамических структур Южного Узбекистана.

Высокая чувствительность к изменению напряженного состояния узловых участков сейсмогенных зон более ярко проявляется в распределении эпицентров землетрясений за более длительный период. На рис. 8 приведена карта распределения эпицентров землетрясений, возникших за период 2018-2024 г. [Оперативные каталоги землетрясений РЦСПМ МЧС РУз за 2018-2024 г.], и сейсмогенные зоны Южного Узбекистана.

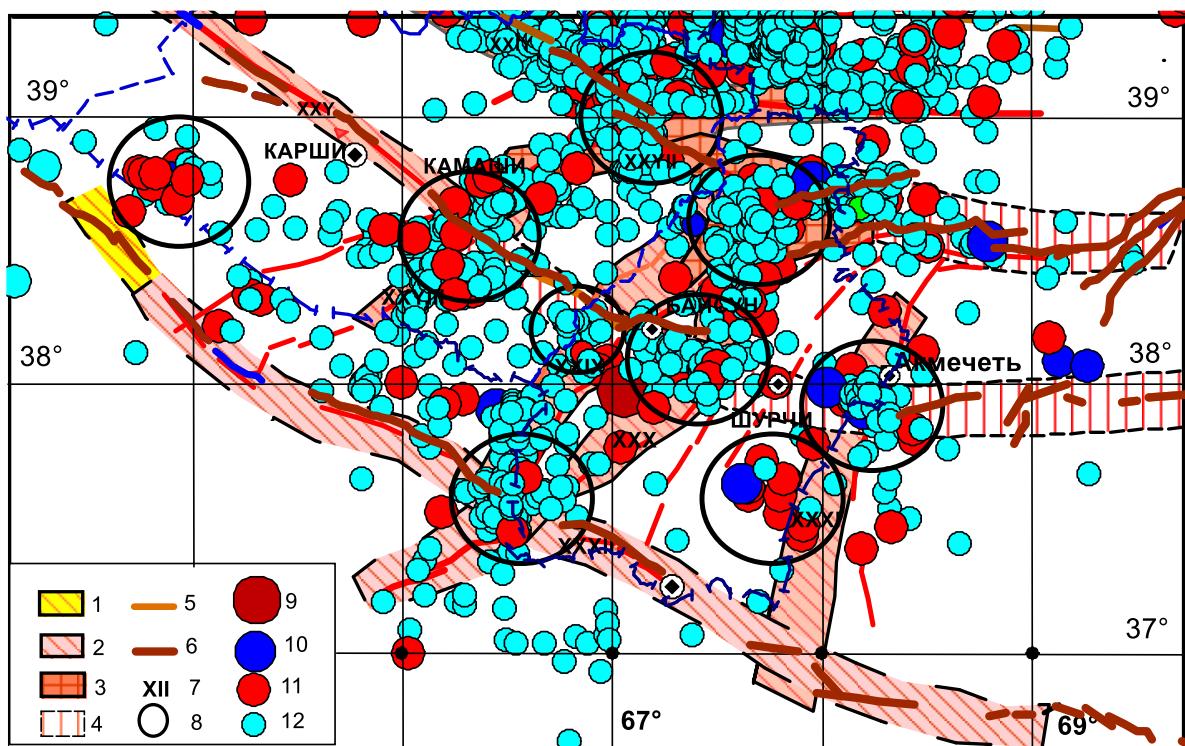


Рис. 8. Сейсмогенные зоны Южного Узбекистана и эпицентры землетрясений, возникшие за 2018-2024 г. Усл. обозн. см. на рис. 3.

Fig. 8. Seismogenic zones of Southern Uzbekistan and epicenters of earthquakes that occurred in 2018-2024. See Fig. 3 for legend.

Как видно из рис. 8, из семи узловых участков сейсмогенных зон, имеющихся на изучаемой территории, в пяти за наблюдаемый период наблюдалась высокая концентрация эпицентров землетрясений. Только лишь в одном узловом участке эпицентры землетрясений не отмечены вообще. Это узел, созданный Амударынской и Бабатаг-Кейкитауской сейсмогенными

зонами. Относительно высокой активностью отличается узел, созданный тремя сейсмогенными зонами – Амударьинской, Байсун-Кугитанской и Сурхантау-Шерабад-Кугитанской. Наряду с этим выявляются два участка, где наблюдалась высокая концентрация эпицентров землетрясений вне сейсмогенных зон (см. рис. 8) и отсутствуют условия проявления землетрясений.

Выводы. Интенсивные, контрастные движения, сформировавшие современный структурный план региона, начались с этапа новейшей эпиплатформенной активизации. Этими движениями обусловлено формирование морфоструктур, возникновение молодых и возобновление древних разломов, по которым происходили перемещения. Вновь возникшие разломы оказались ориентированными в северо-восточном направлении и усложняли строение крупных региональных структур. Эти разломы в пределах Южного Узбекистана являются основными структуроконтролирующими и ответственными за современную сейсмичность территории. Наиболее активны разломы северо-западного, северо-восточного простирания и их узловые участки.

Путем анализа особенностей проявления современной сейсмичности и существующих вариантов карт активных разломов внесены корректизы на Южно-Тянь-Шань-Гиссаро-Кокшаальскую, на южное окончание Байсун-Кугитанской и Сурхантау-Шерабад-Келифской сейсмогенных зон. Выявлены новые Шурчинская и Амударьинская сейсмогенные зоны. Проанализированы особенности проявления землетрясений и установлено, что большая часть землетрясений происходит в узловых участках сейсмогенных зонах, что свидетельствует о повышенной чувствительности их к изменению напряженного состояния блоков земной коры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке из бюджета Института сейсмологии АН РУз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаев А.М., **Мирзабоев К.М.** Сейсмогенные зоны Таджикистана // Сейсмотектоника некоторых районов юга СССР. - М.: Наука, 1976. - С. 105-118.
2. Бабаев А.М., Кошлаков Г.В., **Мирзоев К.М.** Сейсмическое районирование Таджикистана. - Душанбе: Доний, 1978. - 70 с.
3. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. - 2017. - Т. 8. - № 4. - С. 711-736. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0314).
4. Губин И.Е. Закономерности сейсмических проявлений на территории Таджикистана. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 464 с.
5. Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.А., Хусанбаев Д.Ж. и др. Сейсмическое районирование Узбекистана; Сейсмотектоника // Сейсмическое районирование Узбекистана и прогноз землетрясений Узбекистана. - Т.: ГИДРОИНГЕО, 2002. - С. 6-75.
6. Исаилов В.А., Нурматов У.А., Ибрагимов А.Х. и др. О последствиях Байсунского-3 (Чиланзарского) землетрясения 12 мая 2022 г. // Проблемы сейсмологии. - 2022. - Т. 4. - № 1. - С. 3-13.
7. Кошлаков Г.В. О некоторых результатах геофизических исследований на юге Таджикистана // Вопросы геологического строения и перспективы нефтегазоносности Таджикистана. - Душанбе: Ир.фон, 1965. - Вып. 1. - С. 146-160.
8. Маевлянов Г.А. и др. Детальное сейсмическое районирование территории Западного и Южного Узбекистана // Инф. сообщ. № 296. - Т.: Фан, 1983. - 16 с.
9. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1974 г. / Под ред. Н.В. Кондорской и Н.В. Шебалина. - М.: Наука, 1977. - 536 с.
10. Садыков Ю.М., Зарипова Д.М. Особенности внутренней структуры покровной части Учбаш-Каршинской флексурно-разрывной зоны в свете новых геолого-геофизических данных // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. - Т., 2006. - С. 145-150.
11. Таль-Вирский Б.Б. Геофизические поля и тектоника Средней Азии. - М.: Недра, 1982. - 271 с.
12. Умарходжаев У.С., Маденов М.М. К тектонике Баянгорской антиклинали // Сурхандарьинская впадина // Узб. геол. журн. - 1973. - № 6.
13. Якубов Д.Х. и др. Региональные разломы Срединного и Южного Тянь-Шаня. - Т.: Фан, 1976.
14. Ярмухамедов А.Р., Абдуллаев Ш.Х., Ирушкин С.А. О составлении карты активных разрывных дислокаций Республики Узбекистан // Узб. геол. журн. - 1994. - № 5. - С. 3-12.
15. Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Nurmatoev U.A., Sadykov Yu.M., Mirzaev M.A., Ahurov S.Kh. Seismotectonics of Central and Southern Uzbekistan and Seismic Hazard Assessment of Its Territory // Geotectonics. - 2024. - Vol. 58. - № 6. - P. 678-695.

Janubiy O'zbekistonning seismotektonik xususiyatlari va seysmogen zonalari
U.A. Nurmatoev, Yu.M. Sodiqov, U.A. Yusupjanova

Аннотация. Маколада геологик-геофизик, сейсмологик ва бошқа маълумотлар асосида Жанубий Узбекистон худудининг сейсмотектоник холати, фаол ер ёриклари, уларни майдон узра номоён бўлиш

хусусиятларини ўрганиш натижалари. Жамланган маълумотлар асосида аввал ажратилган сейсмоген зоналар хақидаги маълумотлар келтирилган. Сўнги йилларда содир бўлган зилзилалар, мавжуд ер ёриклари таҳлили асосида худуднинг аввал ажратилган сейсмоген зоналарга тўлдириш ва тузатишлар киритилган хамда янги зоналар ажратилган. Сейсмоген зоналарнинг ўзаро кесишган қисмлари ер обигининг кучланганлик холатини ўзгаришларига энг сезгир жойлар эканлиги кўрсатилган.

Калит сўзлар: Ер ёриғи, ер қобиги, зилзила, эпицентралари, сейсмоген зоналар, сейсмик потенциал.

Seismotectonic features and seismogenic zones of Southern Uzbekistan

U.A. Nurmatov, Yu.M. Sadykov, U.A. Yusupdzhanova

Abstract. This article presents the results of a study of seismotectonic features and crustal faults in southern Uzbekistan, based on geological, geophysical, and seismological data. Information on previously identified seismogenic zones is also provided. By analyzing existing fault maps and the current seismicity of the area, appropriate changes and additions were made to previously identified seismogenic zones, and new zones were identified. Increased sensitivity of nodal areas of seismogenic zones to changes in the stress state of the earth's crust was established.

Key words: earth's crust, earth's crustal faults, earthquake, earthquake epicenter, seismogenic zones, seismic potential.

УДК 550.34

К ИЗУЧЕНИЮ ХРОНОСТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ЭТАПОВ ЭВОЛЮЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРИРОДЫ, ПО МАТЕРИАЛАМ АРХЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ ФЕРГАНСКОГО РЕГИОНА

Д.Х. Атабаев¹, К.А. Крахмаль², Ш.М. Мажидова¹

¹Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека

²Чирчикский государственный педагогический университет

Аннотация. Исследование посвящено комплексному, междисциплинарному изучению памятников археосейсмологии на территории Узбекистана, в частности, стратифицированных литолого-фациальных отложений пещеры Сельунгур в Ферганском регионе. В работе применены хроностратиграфические методы, основанные на синтезе геологических, геофизических, палеонтологических, археологических, палеозоологических и других естественно-научных данных. Основная цель исследования – определение этапов сейсмотектонической активизации и относительного тектонического покоя, выявление закономерностей формирования ландшафтной зональности, а также условий эволюции биогеографической среды и древнейшей человеческой культуры. В стратифицированных культурных горизонтах пещеры Сельунгур впервые для Центральной Азии были обнаружены каменные орудия и останки архантропов, отнесённые к виду *Homo erectus*. Полученные результаты позволили уточнить хронологические рамки раннего антропогена и провести корреляцию тектонических и культурных процессов региона.

Ключевые слова: археосейсмология, хроностратиграфия, пещера Сельунгур, Фергана, тектоника, *Homo erectus*, геологическое развитие.

Введение и постановка проблемы. Особенности современного комплексного, междисциплинарного изучения памятников археосейсмологии на территории Узбекистана характеризуют не только возрастающее количество открытых объектов, но и в усовершенствовании самой методики исследования, а также в расширении ее задач.

В этом плане методы хроностратиграфического изучения этапов сейсмотектонической активизации, на основе материалов памятников археосейсмологии включают дифференцированный синтез ряда геологических, геофизических, археологических, палеонтологических, а также ряда других естественных и общественных научных направлений. Это вполне логично, так как разработка хроностратиграфической схемы тектонической

активизации основана на интеграции представлений о различных, но взаимосвязанных аспектах многогранного процесса развития во времени геосфера и биосфера Центральной Азии.

Памятники археосейсмологии, открытые на территории Ферганского региона, кроме истории освоения человеком природного пространства в определенных ландшафтных зонах, несут также информацию по динамике геотектонической активности региона. Результаты комплексного, междисциплинарного изучения осадочных литолого-фациальных отложений археосейсмологических объектов с включениями горизонтов материальной культуры в значительной степени дополняют характеристики хроностратиграфических определений динамики сейсмической активизации. На этом основании стратифицированные литолого-фациальные отложения рассматриваются как вполне закономерные геологические образования, имеющие свою историю эволюционного развития, тесно связанную с движениями земной коры, с тектоникой Тянь-Шаня, Памиро-Алая, как составных горных структур Высокой Азии [1].

Детализация хроностратиграфических этапов сейсмотектонической активизации и относительного тектонического покоя включает комплекс обширного фактического материала по геологии, геофизике, геоботанике, палеозоологии, археологии и ряда других научных направлений.

В данной работе, на основе синтеза результатов междисциплинарных исследований уделено особое внимание обобщению результатов многолетнего изучения динамики сейсмогеологических процессов и явлений на территории Ферганской депрессии и прилегающих регионов. Хроностратиграфические методы исследований археосейсмологических объектов позволили определить этапы локальной и региональной сейсмотектонической активизации, особенностей формирования ландшафтной зональности, временных вариаций эволюционного развития биогеографических условий, на фоне которых происходило формирование древнейших культур человечества.

Актуальность хроностратиграфического направления по изучению этапов физико-географического развития природы обусловлена детализацией локальных особенностей динамики сейсмотектонических движений и, как следствие, геоморфологических и биогеографических преобразований в истории эволюционного развития природы на территории Ферганы на протяжении длительной геологической истории [2].

Основным источником исследования послужил материал, открытый на памятниках археосейсмологии, расположенных на северных склонах Высокой Азии, включает горные системы Тянь-Шаня, Памиро-Алая и межгорные депрессии.

Изученность проблемы. Изучение археосейсмологических объектов эпох кайнозоя в зоне отрогов Алайского, Ферганского, Туркестанского, Зарафшанского хребтов и отрогов Чаткало-Кураминской горной системы, обрамляющих Ферганскую впадину, начинается с конца XX в. К настоящему времени детально разработаны методы исследований, основанные на современной концепции глобальной тектоники литосферных плит, вариаций магнитного поля, неотектоники, литогенеза, и, как следствие, изменения ландшафтной зональности [2], климата, гидрографии, почвенного покрова [3], обусловивших эволюционное развитие наземных экосистем. Комплексное, междисциплинарное изучение хроностратиграфических этапов эволюционного формирования физико-географических и геофизических, взаимосвязанных процессов в истории формирования земной поверхности проводится в региональном масштабе.

Основные цели и задачи по изучению истории развития геосферы и биосфера по материалам археосейсмологических памятников включают комплексные, междисциплинарные методы, направленные от дифференциации, дробления науки – к синтезу и интеграции результатов исследования хроностратиграфических этапов эволюционного развития природы. Целью данного направления исследования является поиск и изучение археосейсмологических объектов, сохранившихся от грандиозных эндогенных, экзогенных и техногенных преобразований на территории Ферганского региона на протяжении докембрия, палеозоя, мезозоя и кайнозоя.

Задачи по изучению хроностратиграфических этапов эволюции физико-географических условий региона включают комплексное междисциплинарное исследование временной последовательности в истории развития геофизических и геотектонических процессов, региональных особенностей формирования ландшафтной зональности земной поверхности в зоне сочленения Туранской платформы и горных структур Высокой Азии, геохимическую основу жизни, направления развития жизненных форм и периодичность изменений в геосфере и биосфере.

Результаты и их обсуждения. В процессе комплексного, междисциплинарного изучения археосейсмологических объектов, особое внимание уделено определению хроностратиграфических этапов в истории геологического и палеобиологического развития природы.

На протяжении кайнозоя и в предшествующие геологические эпохи в Ферганском регионе развивались неповторимые физико-географические, геофизические, а также природно-экологические процессы и явления, которые имеют свою длительную историю геологического развития. Методы комплексных, междисциплинарных исследований хроностратиграфической последовательности в истории эволюционного развития природы основаны на результатах изучения динамики глобальных трансформаций тектоники литосферных плит [5].

Комплексное, междисциплинарное изучение хроностратиграфических этапов тектонической активизации в истории развития природы проводится на широком географическом фоне, опирается на прочную теоретическую базу и факты современной науки. Результаты приведены в контексте геотектонического формирования горных систем Высокой Азии. Методы изучения археосейсмологических и геолого-геофизических явлений включают объекты до уровня геосферы [6].

Географические координаты археосейсмологического объекта составляют: $71^{\circ}20'24''$ в. д. Гринвича и $30^{\circ}57'00''$ с. ш. Район исследований находится в 80 км от г. Ферганы. В процессе изучения генезиса формирования стратифицированных литолого-фациальных отложений полости пещеры Сельунгур проведено комплексное изучение широтных тектонических нарушений. Основные этапы активизации тектонических дислокаций отнесены к альпийскому периоду и продолжаются до настоящего времени.

Карстовые комплексы, включающие пещерную стоянку Сельунгур, локализуются в осадочно-метаморфических породах докембрия, палеозоя, а также мезо-кайнозойских отложениях. Наиболее древние хроностратиграфические этапы развития природы представлены образованиями зеленокаменных пород джулбарсайской свиты, условно считающиеся нижнепротерозойскими [6].

С целью определения хронологических этапов формирования фациальных особенностей литологического субстрата, путей его транспортировки в полость пещеры Сельунгур проведено изучение геологического формирования горных структур, начиная с палеозоя. Отложения палеозоя представлены горизонтами песчанико-сланцевой карбонатной толщи кембрия, отмечены в раздробленном виде и выступают фрагментарно в отдельных блоках (рис. 1).

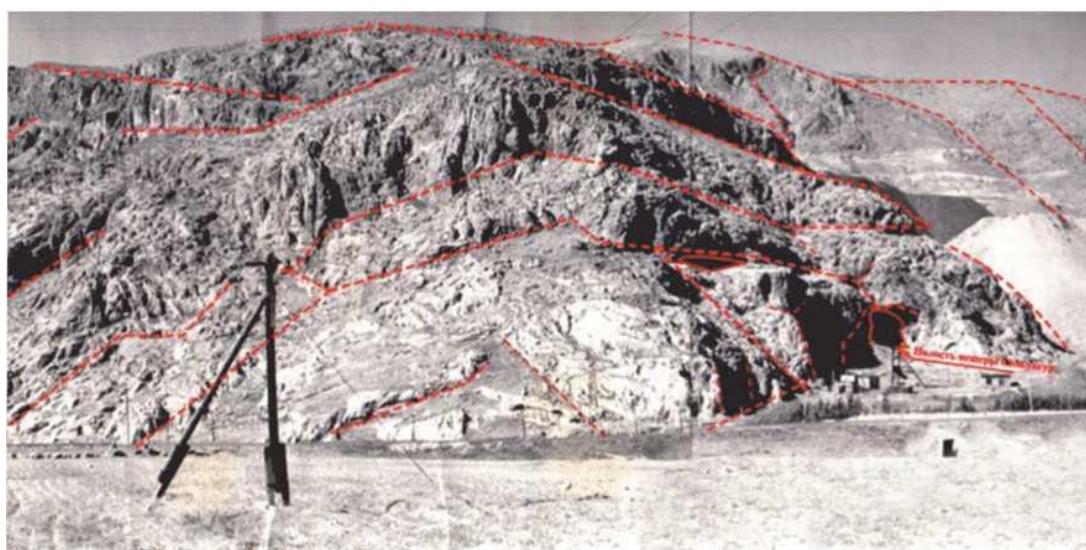


Рис. 1. Тектонические дислокации горных пластов в зоне локализации полости пещеры Сельунгур.
Fig. 1. Tectonic dislocations of rock strata in the zone of localization of the Selungur cave cavity.

Хроностратиграфическая последовательность отложений кембрия, в зоне археосейсмологического объекта сменяется песчанико-сланцевой толщей ордовика–нижнего силура, которая содержит линзы известняков и вулканитов диабаза и диабазовые порфиры. Отложения верхнего силура–нижнего девона представлены известняковыми рифовыми образованиями, чередующимися горизонтами песчаников, алевролитов, глинистых сланцев и осадочно-вулканогенных образований (рис. 2).

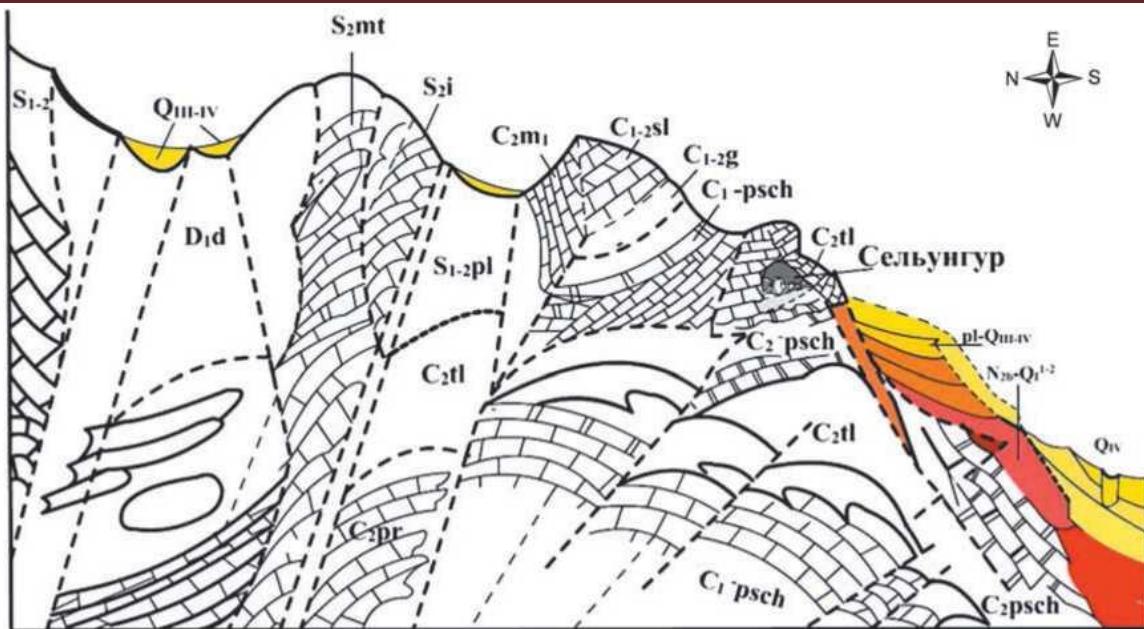


Рис. 2. Схематический поперечный разрез дислокации сейсмотектонических структур в зоне локализации пещерной стоянки Сельунгур.

Fig. 2. Schematic cross section of the dislocation of seismotectonic structures in the localization zone of the Selungur cave site.

В результате проявления герцинского тектонической активности образования палеозоя к югу от Южно-Ферганского глубинного разлома смяты в систему линейных складок и осложнены разрывами и чешуйчатыми надвигами. К северу от разлома дислокации надвигов резко ослабеваю. Этот структурный план в общих чертах унаследован в мезозое и кайнозое.

Граница между областью тектонического опускания и аккумуляции осадков в хроностратиграфическом плане зафиксирована на этапе поднятия, включающего эрозионно-денудационные процессы, совпадает с Южно-Ферганским глубинным разломом. Геофизическими исследованиями подтверждается наличие двух разнообразных по глубинному строению и истории сейсмогеологического развития участков [8].

Среди широтных разломов наибольшее значение в процессе изучения сейсмогеологических особенностей развития рельефа в зоне археосейсмологического памятника Сельунгур имеют тектонические нарушения Караарчинского взброса, Южного и Долинного сброса.

По Караарчинскому взбросу породы надвинуты с севера на черные углистые сланцы Центрального прогиба. Зона разлома представлена смятием в сланцах и сопровождается в отдельных местах интенсивным окварцеванием и выщелачиванием легкорастворимых компонентов. Амплитуда перемещения пород достигает сотни метров. Падение плоскости взброса 60-75° на север.

Структура Центрального синклинального прогиба на поверхности сложена аллохтонными сланцами силура и девона, образующими узкие, изоклинальные складки в результате движения масс с севера. Среди разрывных сейсмотектонических нарушений главную роль играет Ишметауский надвиг, по которому верхнесилурийские сланцы надвинуты на более молодые отложения.

В районе локализации пещерной стоянки Сельунгур широко развиты отложения массивных и слоистых известняков среднего и верхнего девона, которые, совместно с массивно-слоистыми известняками среднего визе, слагают почти полностью горные гряды района. Отложения среднего и верхнего карбона представлены конгломератами, песчаниками, алевролитами с редкими прослойками сланцев и известняков, слагают в основном отроги хребтов Катран, Катранбаши, Карабатыр, Алдыяр, но более широко распространены под чехлом мезозойских и кайнозойских отложений в предгорьях. Отмеченные результаты приведены по данным бурения и геофизических исследований.

Хроностратиграфические этапы развития сейсмотектонических условий в мезозое фиксируются дислокациями отложений конгломератов, песчаников и глинистых сланцев верхнего триаса, развитыми в северо-западной части района. Отложения юрского возраста располагаются в

основании погребенных прогибов, в виде грабенов. Небольшие выходы отмечены в южном и северном контакте Канского оphiолитового пояса.

Хроностратиграфические этапы кайнозоя в истории развития природы в районе исследований представлены морскими отложениями эпох палеогена и континентальными литолого-фациальными горизонтами, сформированными в неогене и четвертичном периоде. Хроностратиграфическая последовательность литолого-фациальных отложений наиболее рельефно представлена в предгорной части региона, в зоне формирования адыров.

В процессе детализации хроностратиграфических этапов в истории эволюционного формирования природы в регионе исследований обращено внимание на необходимость в изучении особенностей вариаций геомагнитного поля, неотектоники, литогенеза, и, как следствие, изменения климата, обусловивших эволюционное развитие наземных экосистем. Комплексное изучение взаимосвязанных процессов и явлений в истории формирования земной поверхности на территории Ферганы проводится в региональном масштабе, с целью определения геохронологических этапов эволюционного развития природы и древнейшей истории человечества.

Здесь также необходимо отметить, что до 80-х годов XX в. на территории Центральной Азии не было известно памятников, подобных уникальной пещерной стоянке Сельунгур, Сох, Чашма, Обжаз и других археосейсмологических объектов, включающих стратифицированные литолого-фациальные отложения. Проблемы истории обживания данного региона решались, как правило, на абстрактных и гипотетических построениях. С открытием и дальнейшими широкомасштабными исследованиями многослойной пещерной стоянки Сельунгур проблемы хроностратиграфии в регионе приобрели реальные очертания и рассматриваются в общем контексте истории эволюционного формирования природной среды и древнейшей материальной культуры на широком географическом фоне.

Весьма актуальным является открытие и изучение древнейших на азиатском континенте останков архантропов, обнаруженных в стратифицированных литолого-фациальных отложениях. В таксономическом аспекте останкам архантропов, открытых в горизонтах пещерной стоянки Сельунгур, соответствует вид *Homo erectus*. В последние годы палеоантропологи определяют их, как архантропов и относят этапы существования этой группы гоминид к соответствующим хроностратиграфическим рубежам позднего кайнозоя [9].

В стратифицированных культурных отложениях стоянки Сельунгур впервые для Центральной Азии были открыты древнейшие каменные орудия и останки архантропов. Здесь необходимо отметить, что в первых публикациях речь шла о единичных находках, но дальнейшие исследования показали наличие комплекса артефактов во всех культурных горизонтах. В результате изучения особенностей изготовления орудий труда, открытых в антропогенных горизонтах многослойной стоянки Сельунгур, по данным археологической периодизации, основанной на определенной технико-типологической последовательности развития материальной культуры во времени, было установлено, что данный памятник относится к ранним этапам антропогена.

Каменные орудия Сельунгуря имеют близкие аналоги с артефактами, найденными в Олдувае (Восточная Африка), которые датируются 1,7-2,5 млн. лет. Полученные относительные хронологические рубежи определили ранние стадии в развитии древнейшей материальной культуры на территории Ферганского региона. В 1988-1989 гг. был выполнен также коллагеновый анализ костных остатков из стратифицированных культурных горизонтов многослойного памятника, который в периоды изучения стоянки Сельунгур был единственным доступным методом хронологического определения. Результаты датирования определили, что возраст верхнего горизонта культурных отложений был сформирован более миллиона лет назад [10].

Определенные хронологические рубежи долгое время служили хроностратиграфическим ориентиром в региональном плане на территории Центральной Азии. Это в свою очередь позволило открыть синхронные отложения археосейсмологических объектов и реликтовые формы рельефа, которые являлись ареной жизнедеятельности древнейших обитателей данного региона. В результате их изучения были открыты более древние археосейсмологические памятники Чашма и Сох в Ферганской долине и Кызылалма, Ташсай, Обжаз в долине р. Ангрен.

Особенности комплексного междисциплинарного изучения формирования хроностратиграфических этапов в истории эволюционного развития природы заключаются также в усовершенствовании методики исследований. Введены в научный оборот, впервые в практике археологических исследований в Узбекистане, результаты анализа абсолютного датирования.

Проведены под руководством академика АН РУз Б.С.Юлдашева аналитические исследования костного материала из стратифицированных литолого-фациальных отложений пещеры Сельунгур в отделе анализа и информации, сектора ядерной химии профессором Ш.Хатамовым, аналитиками Н.С.Осинской и Т.П.Рахмановой и др. Впервые была получена абсолютная датировка. Выполненные определения показали, что периоды формирования второго культурного горизонта относятся к 1,5 млн. лет назад. Использование в практике археологических исследований в Узбекистане калий-argonового метода позволяет получить более полную историческую информацию и детально аргументировать хроностратиграфические определения в истории эволюционного развития природы.

Особенностью хроностратиграфического метода исследований археосейсмологических объектов является также более дифференцированный синтез ряда геологических, археологических, палеоботанических, палеозоологических и других данных. Это вполне логично, так как в предложенной хроностратиграфической схеме органически интегрируются и сливаются представления о различных, но взаимосвязанных аспектах многогранного процесса эволюционного развития природы Центральной Азии. Осадочные отложения с включениями археологических культур рассматриваются как вполне закономерные геологические образования, имеющие свою историю, тесно связанную с движениями земной коры с тектоникой Тянь-Шаньского орогена в системе горных структур Высокой Азии [13].

В районе пещеры Сельунгур, кроме охарактеризованных нарушений, широко развиты системы мелких трещин, подразделенных на две группы: крутопадающие разрывные трещины на периферии антиклинальных складок и типичные трещины скола, оперяющие более крупные широтные и диагональные разломы.

Результаты изучения механического и гранулометрического составов в стратифицированных литолого-фациальных отложениях пещеры Сельунгур определяют чрезвычайно тонкозернистую кремнистого состава породу. Преобладают зерна до 0,01 мм и меньше. Зерна бесформенные. Между зернами кварца заключены частички глинистого материала и зерна кальцита, которые образуют своеобразные налеты и корочки. Характерной особенностью являются отложения брекчии обрушения в районе пещеры и в заполнениях карстовых полостей с включениями материала типа *terra rossa*. Отмечены горизонты брекчии, образовавшиеся при смещениях и сбросах пород, которые имеют свои характерные признаки. В хроностратиграфическом плане литолого-фациальные особенности отложений соответствуют неотектоническим этапам формирования сейсмотектонических условий.

В процессе стратиграфического изучения горизонтов пещерных отложений выделены слои обрушения кровли пещер, сформировавшие отложения брекчии, которые представлены песчанистыми, глинистыми, известняковыми включениями.

Брекчию с полным основанием можно назвать брекчией обрушения. Для выделенных отложений брекчий характерно отсутствие отсортированности. Крупные глыбы в брекчии находятся вместе с мелкими и тонкими частичками. Отмечено характерное, свободное положение массивных обломков до 2-5 м скальной породы обрушения кровли пещеры (рис. 3).

Брекчия имеет здесь пологое и не всегда выдержанное падение с преобладающим направлением на юго-запад, иногда залегает почти горизонтально. Подстилающей породой служит плотный известняк. Кроющими породами служат рассланцеванные кремнисто-глинистые и известняково-глинистые породы. Брекчии обвалов и сносов в районе пещеры сформированы материалом, отложенным на поверхности в узких промоинах и ущельях.

Тектонический режим, климат и другие физико-географические условия существенно влияли на характер и режим осадконакопления в археосейсмологическом памятнике Сельунгур, которые обнаруживают четко выраженную хроностратиграфическую последовательность формирования осадков. Фиксация хроностратиграфической последовательности накопления слоев с различным составом позволяет проследить путь транспортировки этого субстрата и провести корреляции с фазами сейсмотектонической активности региона исследований.

В этом плане в зоне локализации археосейсмологического памятника Сельунгур проведено целенаправленное изучение широко развитых разрывных дислокаций, в которых формируются капельно-жидкие подземные водные растворы (рис. 4-6).

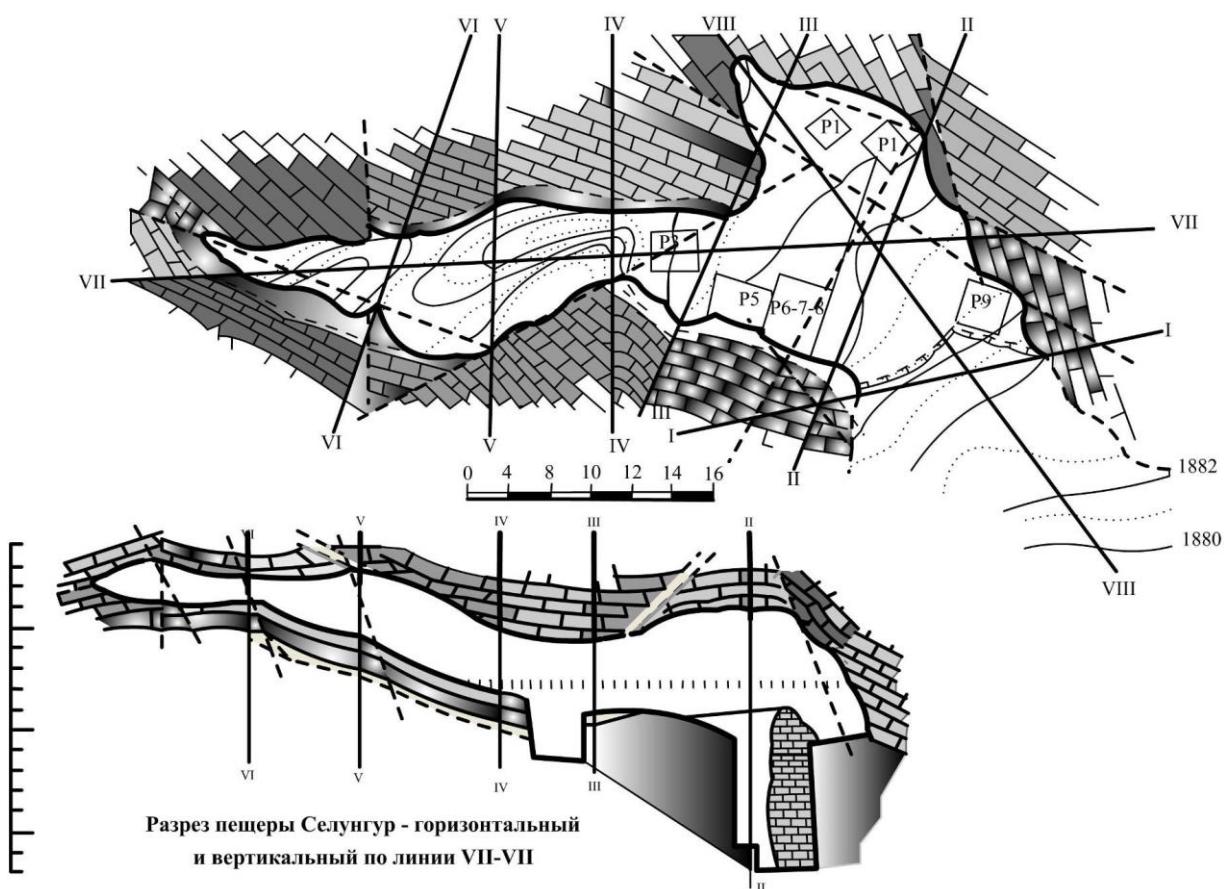


Рис. 3. Зона локализации археосейсмологического памятника.
Fig. 3. The localization zone of the archeoseismological monument.

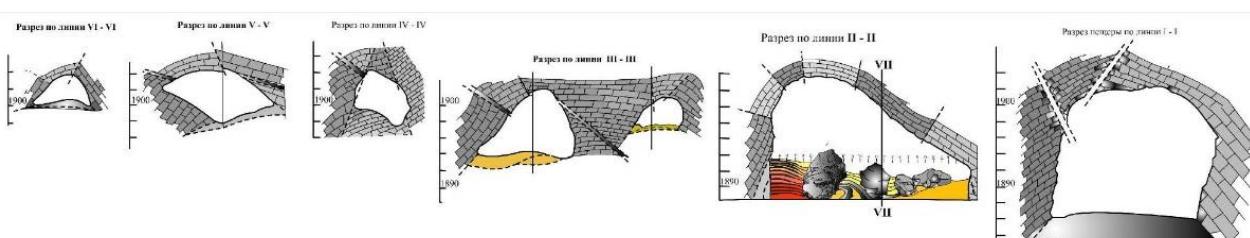


Рис. 4. Разрезы полости пещеры по линии: VI-VI, V-V, IV-IV, III-III, II-II, I-I.
Fig. 4. Sections of the cave cavity along the line: VI-VI, V-V, IV-IV, III-III, II-II, I-I.

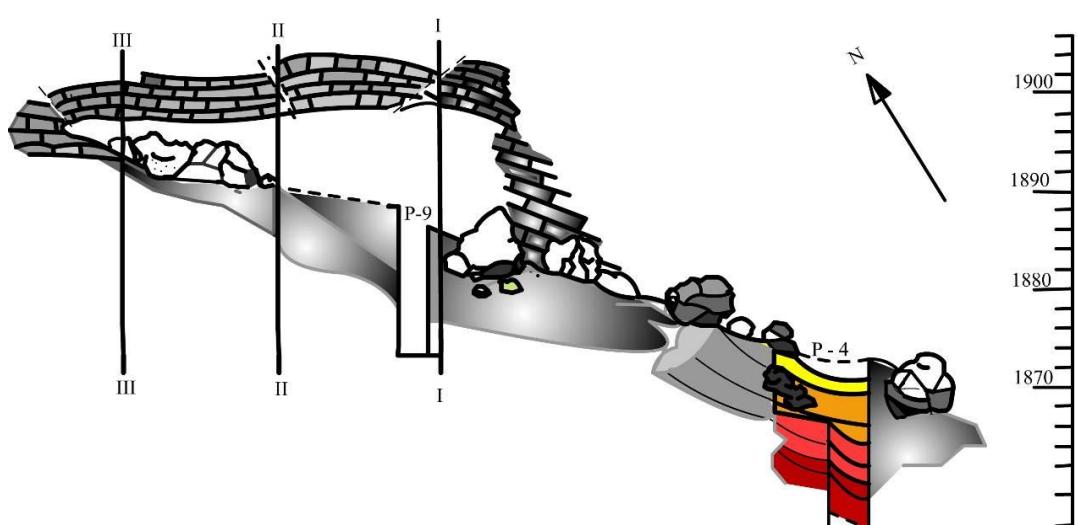


Рис. 5. Разрез пещеры Сельунгур по линии VIII-VIII, характеризует стратифицированные обвальные процессы кровли пещеры.
Fig. 5. The section of the Selungur cave along the VIII-VIII line characterizes the stratified collapse processes of the cave roof.

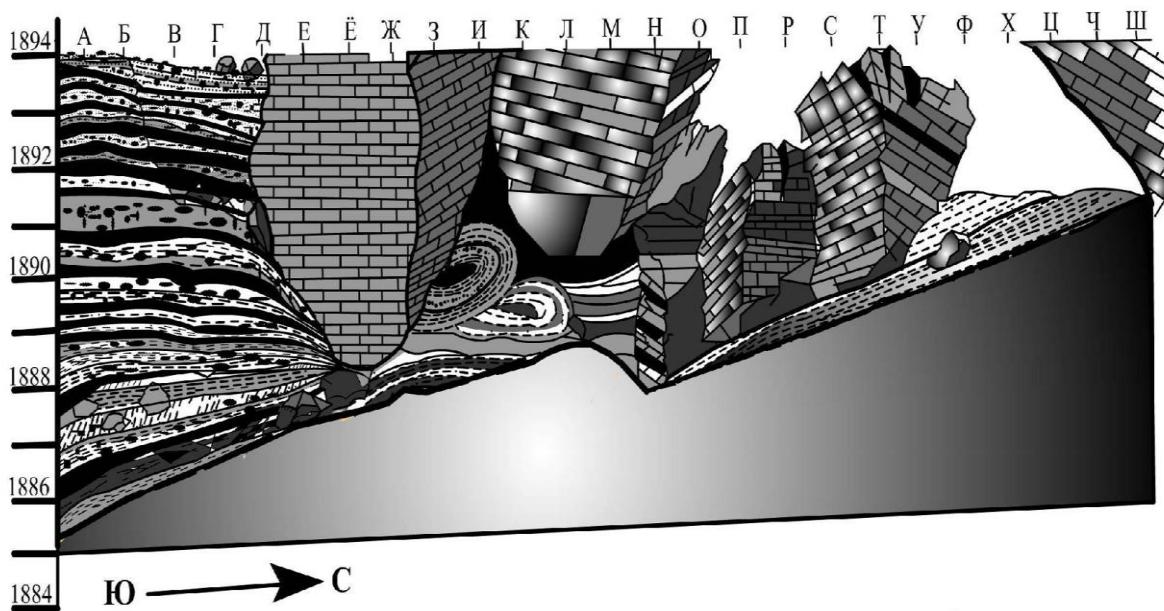


Рис. 6. Обрушения массивных блоков, характеризующие хроностратиграфические параметры катастрофической сеймотектонической активности региона. Разрез пещерных отложений по линии II-II.

Fig. 6. Collapses of massive blocks characterizing chronostratigraphic parameters of catastrophic seismotectonic activity in the region. Section of cave deposits along the II-II line.

Определены также генетические типы пещерных отложений, которые сопоставлены с временными параметрами образования трещин, зон дробления и проведена корреляция с фазами тектонической активности. По системам трещин и по петрографическим признакам прослежены пути поступления субстрата в полость археосейсмологического памятника Сельунгур.

ВЫВОДЫ

В процессе определения генезиса отложений археосейсмологического памятника Сельунгур проведено изучение разломов, протяжение и глубину заложения, а также более мелкие тектонические нарушения, в которых может скапливаться и перемещаться капельно-жидкий раствор литологического субстрата.

Кроме морфологических особенностей образования трещин и зон дробления, изучены разрывные дислокации, связанные с этапами тектонической активизации в истории развития рельефа на протяжении докембрия, палеозоя, мезозоя и кайнозоя в хроностратиграфической последовательности.

Сеймотектоническая активность региона проявляется периодически, и при появлении новых зон разломов по ним поступает с водными растворами соответствующий субстрат, и, откладываясь в полости археосейсмологического памятника в стратиграфической последовательности, включая стратифицированные культурные горизонты стоянки Сельунгур.

Наиболее типичный капельный раствор обогащен карбонатом кальция, который, переходя в раствор в виде гидрокарбонатного соединения, проникал по микропорам, образованным в результате сеймодислокаций в пещерные отложения археосейсмологического памятника. Пелитоморфный материал, органическое вещество и мельчайшие песчинки кварцита, поступившие вместе с раствором в полости пещеры, концентрируются, образуя отдельные слои, чередующиеся со слоями камнепадов в периоды катастрофической подвижки земной поверхности. Отложения на древней дневной поверхности кальцитовой коркой перекрывают стратифицированные культурные отложения и являются маркирующим рубежом между хроностратиграфическими этапами сеймотектонической активности и относительным покоям.

Изучены в районе локализации археосейсмологического памятника более мелкие широтные и диагональные разломы сбросового и взбросового характера. Сейсмотектонические преобразования рельефа, приуроченные к осевым частям антиклинальных структур, выражены, как правило, зонами развития и дробления вмещающих пород. Плоскости смещения падают, в основном, на север под углом 50-80°. Широтные нарушения встречаются, в основном, в Северной антиклинали.

Здесь, наряду с закрытыми (притертными) трещинами, отмечаются типовые трещины разрыва, по которым амплитуда перемещения колеблется от единицы до десятков метров. В районе археосейсмологического памятника, кроме охарактеризованных нарушений, широко развиты системы мелких трещин, подразделенных на две группы: крутопадающие разрывные трещины на периферии антиклинальных складок и типичные трещины скола, оперяющие более крупные широтные и диагональные нарушения.

Проникая по выделенным трещинам, микропорам пелитоморфный материал, органическое вещество и мельчайшие песчинки кварцита поступают вместе с раствором глинистого субстрата в полость пещеры, концентрируются, образуя отдельные слои, чередующиеся со слоями катастрофических камнепадов.

Процесс сейсмотектонической активности на территории Ферганы, зафиксированный и изученный в стратифицированных горизонтах археосейсмологического памятника, – прерывистый, пульсационный. Каждый импульс соответствует временным этапам сейсмотектонических, климатических и гидрогеологических изменений на протяжении геологической истории региона исследований.

В стратифицированных литолого-фациальных отложениях археосейсмологического памятника Сельунгур открыты и изучены материалы, характеризующие смену растительности и животного мира, которые представляли окружающую природную среду в периоды обживания архантропами данного региона. Синхронизация биостратиграфических определений, как одного из методов изучения эволюционных явлений во временном масштабе с глобальными и региональными временными параметрами развития природы, в значительной степени дополняет хроностратиграфические определения.

В Ферганском регионе развивались неповторимые природно-экологические процессы и явления, которые имеют свою геологическую историю. Это обуславливает актуальную необходимость их изучения на фоне геотектонического формирования горных систем Высокой Азии, которым в настоящее время уделяется внимание мировым научным сообществом [1]. Проанализированы геолого-геоморфологические, тектонические, физико-географические, палеопочвенные, палеозоологические, археологические и другие основные направления. Особое внимание удалено изучению развития временных особенностей формирования ландшафтов в регионе исследований [2].

На основании полученных результатов проведены корреляционные сопоставления стратиграфических и геохронологических определений этапов сейсмотектонической активизации в зоне горных структур Высокой Азии.

Весьма актуальным является введение в научный оборот результатов хроностратиграфических определений геофизическими методами. Результаты комплексных, междисциплинарных исследований сопоставляются и взаимно контролируются определениями относительных хроностратиграфических и биостратиграфических данных с результатами абсолютного датирования калий-аргоновым методом, магнитной стратиграфии литолого-фациальных отложений. Главное достоинство данной хроностратиграфической схемы заключается в ее возможности проводить межрегиональную корреляцию сейсмотектонических процессов и явлений на протяжении обозримой истории геологического развития земной поверхности.

Особенностью данного хроностратиграфического метода исследований является также более дифференцированный синтез ряда геологических, геолого-геоморфологических, историко-археологических, палеоботанических, палеозоологических и других данных. Это вполне логично, так как в предложенной хроностратиграфической схеме органически интегрируются представления о различных, но взаимосвязанных аспектах многогранного процесса развития геосфера Центральной Азии на протяжении геологической истории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крахмаль К.А. Палеогеографические исследования в зоне северных склонов Высокой Азии // Центральноазиатский журнал географических исследований. - 2022. - № 1-2. - С. 18-28.
2. Крахмаль К.А., Ганиев И.Н. Палеогеографические условия в периоды докембрия на территории Западного Тянь-Шаня. - Т.: «Grand kondor print», 2025. - 114 с.
3. Атабаев Д.Х., Абдуназаров У.К., Крахмаль К.А. История формирования палеоландшафтов в зоне сочленения Туранской плиты и Западного Тянь-Шаня // Известия Географического общества Узбекистана. - 2021. - Т. 59. - С. 14-20.
4. Абдуназаров У.К., Крахмаль К.А. Палеогеографические условия формирования почв бассейна реки Чирчик. - Т., 2021. - 102 с.
5. Ле Пишин К., Франшто Ж., Боннин Ж. Тектоника плит. - М., 1977. - 288 с.
6. Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. - М., 1989. - 163 с.
7. Ахмеджанов М.А. Докембрый Срединного и Южного Тянь-Шаня. - Т., 1977. - 184 с.
8. Зунунов Ф.Х. Глубинное строение Ферганской впадины. - Т., 1973. - 192 с.
9. Хрисанфова Е.Н., Переевозчикова И.В. Антропология. - М., 1991. - 320 с.
10. Воложенинов Н.Н., Крахмаль К.А. Алайский терриокомплекс в плейстоцене // Узб. биолог. журн. - 1984. - № 4. - С. 42-47.
11. Крахмаль К.А. Новые результаты хроностратиграфических исследований раннего антропогена на территории Узбекистана // Археология Узбекистана. - 2014. - № 1(8). - С. 3-6.
12. Крахмаль К.А. Хроностратиграфия антропогена на Севере Высокой Азии // Вестник Междунар. института Центральноазиатских исследований. - 2016. - Вып. 23. - С. 44-61.
13. Крахмаль К.А. Древний каменный век Ферганы: Автореф. дисс. канд. ист. наук. - Самарканд, 2004. - 28 с.
14. Крахмаль К.А., Тойчиев Х.А., Абдуназаров У.К., Стельмах А.Н. Комплексная оценка положения нижней границы эоплейстоцена Узбекистана и определение временного объема четвертичного периода. - Т., 2008. - 81 с.

Farg 'ona mintaqasining arxeoseysmologik yodgorliklari materiallari bo' yicha tabiatning evolyutsion rivojlanishining xronostratigrafik bosqichlarini o 'rganishga
Atabaev D.X., Krahmal K.A., Majidova Sh.M.

Annotasiya. Tadqiqot O'zbekiston hududidagi arxeoseysmologiya yodgorliklarini, xususan, Farg'ona mintaqasida joylashgan Selung'ur g'orining qatlamlı litologo-fatsial cho'kindilarini kompleks, fanlararo o'rganishga bag'ishlangan. Ishda geologik, geofizik, paleontologik, arxeologik, paleozoologik va boshqa tabiiy-ilmiy ma'lumotlar sinteziga asoslangan xronostratigrafik usullar qo'llanilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi – seysmogeologik faoliyat bosqichlari va nisbiy tektonik osoyishtalik davrlarini aniqlash, landshaft zonalligining shakllanish qonuniyatlarini hamda biogeografik muhit va eng qadimgi inson madaniyatining evolyutsiya sharoitlarini o'rganishdir. Selung'ur g'orining qatlamlı madaniy gorizontlarida Markaziy Osiyo uchun ilk bor tosh qurollar va Homo erectus turiga mansub qadimiy odam qoldiqlari topilgan. Olingan natijalar erta antropogen davrining xronologik chegaralarini aniqlashtirishga hamda mintaqanining tektonik va madaniy jarayonlarini o'zaro bog'lash imkonini berdi.

Kalit so'zlar: arxeoseysmologiya, xronostratigrafiya, Selungur g'ori, Farg'ona, seymotektonika, Homo erectus, geologik tarix.

To study the chronostratigraphic stages of the evolutionary development of nature, based on the materials of the archeoseismological monuments of the Ferghana region
D.X. Atabaev, K.A. Krahmal, Sh.M. Majidova

Abstract. The study is devoted to a comprehensive, interdisciplinary investigation of archaeoseismological sites in Uzbekistan, in particular the stratified lithological-facial deposits of the Selungur Cave in the Fergana region. The research employs chronostratigraphic methods based on the synthesis of geological, geophysical, paleontological, archaeological, paleozoological, and other natural-scientific data. The main goal of the study is to determine the stages of seismotectonic activation and relative tectonic stability, to identify the patterns of landscape zonation formation, as well as the conditions of evolution of the biogeographic environment and the earliest human culture. In the stratified cultural layers of the Selungur Cave, for the first time in Central Asia, stone tools and remains of archaic humans belonging to the species Homo erectus were discovered. The results obtained made it possible to refine the chronological framework of the Early Anthropocene and to correlate the tectonic and cultural processes of the region.

Key words: archaeoseismology, chronostratigraphy, Selungur Cave, Fergana, tectonics, Homo erectus, geological development.

MUHANDISLIK SEYSMOLOGIYASI

УДК 550.343.6

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ЭНТРОПИЯ КАК ИНДИКАТОР ВАРИАЦИИ ЧАСТОТЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОНАХ ЮЖНОГО УЗБЕКИСТАНА

Т.У. Мамарозиков, Л.А. Хамидов, Б.Г. Алимов,
Т.С. Курбанов, Ф.Р. Артиков, С.Б. Халбаев

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан

Аннотация. Предсказание землетрясений – ключевое направление в сейсмологии, имеющее особую важность в сейсмически активных странах, например, в Узбекистане. В рамках настоящего исследования анализируется динамика роста сейсмической энтропии в сейсмоопасном регионе Южного Узбекистана, коррелирующей с изменчивостью частоты землетрясений. Основная задача – определить ключевые факторы, обуславливающие землетрясения, и предложить меры по совершенствованию существующих систем наблюдения и оповещения о сейсмической активности. Изучение эволюции сейсмической энтропии в рассматриваемом сегменте позволит получить более глубокое понимание ее временных трендов и особенностей.

Ключевые слова: прогнозирование землетрясений, сейсмология, сейсмическая активность, сейсмическая энтропия, мониторинг, предупреждение, природные катастрофы, безопасность населения.

Введение. В сейсмологии сейсмическая энтропия служит инструментом для количественной оценки степени упорядоченности или хаоса в сейсмической системе, что часто коррелирует с возникновением землетрясений и их предвестниками.

Данное понятие применяется для анализа сейсмической информации, охватывая распределение магнитуд, пространственные закономерности землетрясений и особенности сейсмического шума. Анализируя изменения энтропии С.Ц.Акопян и А.Н.Кочерян (Akopian, Kocharyan, 2014), А.Любушин (Lyubushin, 2020), А.Посадес, Ж.Моралес и др. (Posadas, 2021), С.Годано, А.Траммели и др. (Godano, Tramelli и др., 2024), стремились проследить динамику развития земной коры и, возможно, обнаружить закономерности, позволяющие предсказать зоны повышенного риска землетрясений.

Цель исследований – оценка сейсмической энтропии, связанной с вариацией частоты землетрясений в определенных сегментах сейсмоопасной зоны Южного Узбекистана. Землетрясения в сейсмотектонически активных участках или сегментах земной коры Южного Узбекистана – это случайные явления. Степень беспорядка, присущая землетрясениям в зоне стыка Туранской платформы с Тянь-Шаньским орогеном, может свидетельствовать о достижении энтропией своего максимума. Поэтому можем принять как эффективный метод максимальной энтропии при прогнозировании частоты землетрясений в конкретном сегменте или кластерах сейсмоактивного разлома Южного Узбекистана, за заданный временной промежуток. При этом предполагается, что сейсмическая энтропия в определенном сегменте зоны стыка Туранской платформы с Тянь-Шаньским орогеном в Южном Узбекистане достигает своего максимального значения. Данный вывод позволяет теоретически обосновать существование связи между сейсмической частотой и магнитудой.

Методология и результаты. Для прогнозирования землетрясений в определенных тектонических структурах Южного Тянь-Шаня уровень сейсмичности исследуемой территории является весьма важной информационной основой. Известно, что процесс подготовки предстоящего очага тектонического землетрясения необратимый (Godano и др., 2024; Akopian, 2015; Nikulov, 2022). Как отмечает А.Никулов (Nikulov, 2022), согласно второму закону термодинамики, в изолированных системах, каковыми могут являться зоны предстоящих тектонических очагов землетрясений, в полной энтропии можно проследить его увеличение. Ввиду того, что сейсмология занимается предсказанием будущих состояний земной коры,

применение энтропии для описания возможных трансформаций участка коры из его нынешнего состояния представляется логичным и оправданным (Akopian, 2015).

Обсуждая принцип максимальной энтропии, связь частоты и магнитуды землетрясений в количественном плане опирались на следующее (Akopian, Kocharian, 2014; Akopian, 2015). График накопленной энергии отражает эволюцию сейсмической системы во времени: длительные периоды слабой активности сопровождаются постепенным приращением $E_c(t)$, тогда как сильное землетрясение вызывает резкий скачок. Такая ступенчатая динамика указывает на неравномерность процесса релаксации напряжений в литосфере и позволяет рассматривать $E_c(t)$ как индикатор подготовки сильного события. В терминах модели критического состояния резкий рост $E_c(t)$ интерпретируется как переход системы к неустойчивости, предшествующей главному разряду (Akopian, Kocharian, 2014; Akopian, 2015).

Интегральный параметр:

$$S_N(t) = (t - t_{N-1})E_c - \sum_{i=1}^{N=t} (t_i - t_{N-1})E_i, \quad (1)$$

а в текущем цикле, при $T = t - t_{j-1}$:

$$S = TE_c - \sum_{i=1}^N T_i E_i. \quad (2)$$

Геометрически $S(t)$ в (1) и (2) равен площади под кривой $E_c(t)$, управляет скоростью роста S . Обе функции невозрастающие.

Энтропия:

$$W = \log_{10} \left(\frac{S}{h_s} \right). \quad (3)$$

В выражении (3) h_s – базовый «квант» действия (энергия 1 Дж за 1 с) для микроземлетрясения; делает W безразмерной в (3) мерой числа доступных энергетических состояний с момента последнего сильного события.

В исследованиях С.Ц.Акопяна (Akopian, 2015) представлен достаточно удобный метод, предназначенный для оценки количественных характеристик сейсмических процессов в естественных геологических условиях, подобных тектоническим структурам юго-западной части Тянь-Шаньского орогена (Khamidov Lutfulla и др., 2025). В работах даются определения ключевых понятий: сейсмическая система, сейсмический цикл, землетрясение-индикатор, а также формулируются понятия функции плотности состояния и энтропии для сейсмических систем. Авторы рассматривают сейсмическую систему как открытую диссипативную систему, где непрерывно происходит генерация и отток энтропии. Это позволит выявить логику сейсмической активности в зонах активных разломов Южного Узбекистана с возможностью первичной организации управления производством сейсмической энтропии. В частности, это позволяет наблюдать циклический переход существующей сейсмической системы, которая была наorderbyченной в течение геологической истории, в хаотическое состояние.

Поэтому при рассмотрении возможности применения сейсмической энтропии при прогнозировании землетрясений для Южного Узбекистана использовали данные региональных каталогов (источник) за период 2021-2025 гг. для оценки количества высококачественно выявленных землетрясений, которое превысило 13 тыс., и для определения равновесного состояния в определенных сегментах сейсмоактивных зон Южного Узбекистана. Кроме того, наша общая информация включает характеристики землетрясений и учет их активности распределения представительных магнитуд (рис. 1).

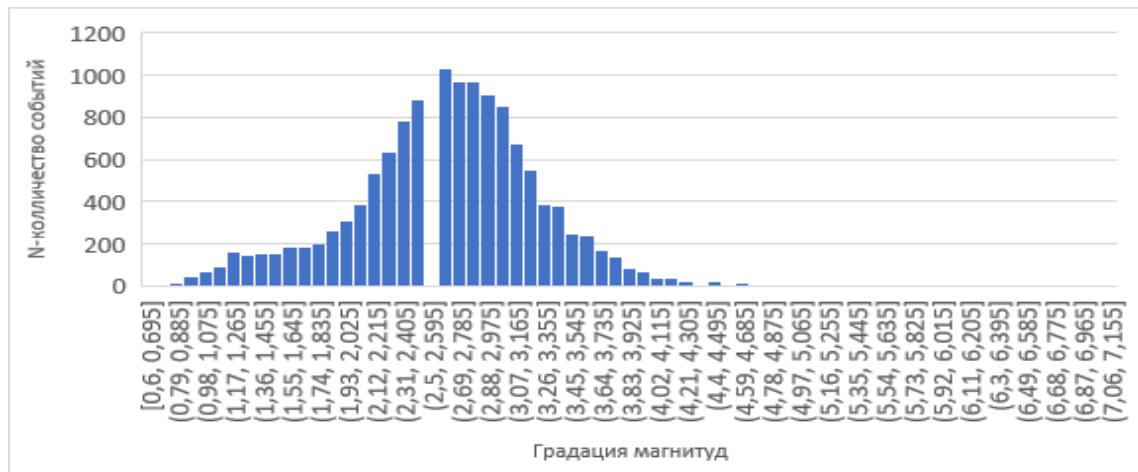


Рис. 1. Гистограмма представительных магнитуд каталога на период с мая 2021 г. по июль 2025 г.
Fig. 1. Histogram of representative magnitudes of the catalog for the period from May 2021 to July 2025.

Диаграмма на рис. 2 отражает частотное распределение событий по диапазонам магнитуд. Наибольшая доля землетрясений относится к классу слабых и умеренных ($M = 2-3$), тогда как сильные события ($M \geq 5$) встречаются крайне редко; они и служили как индикаторные землетрясения.



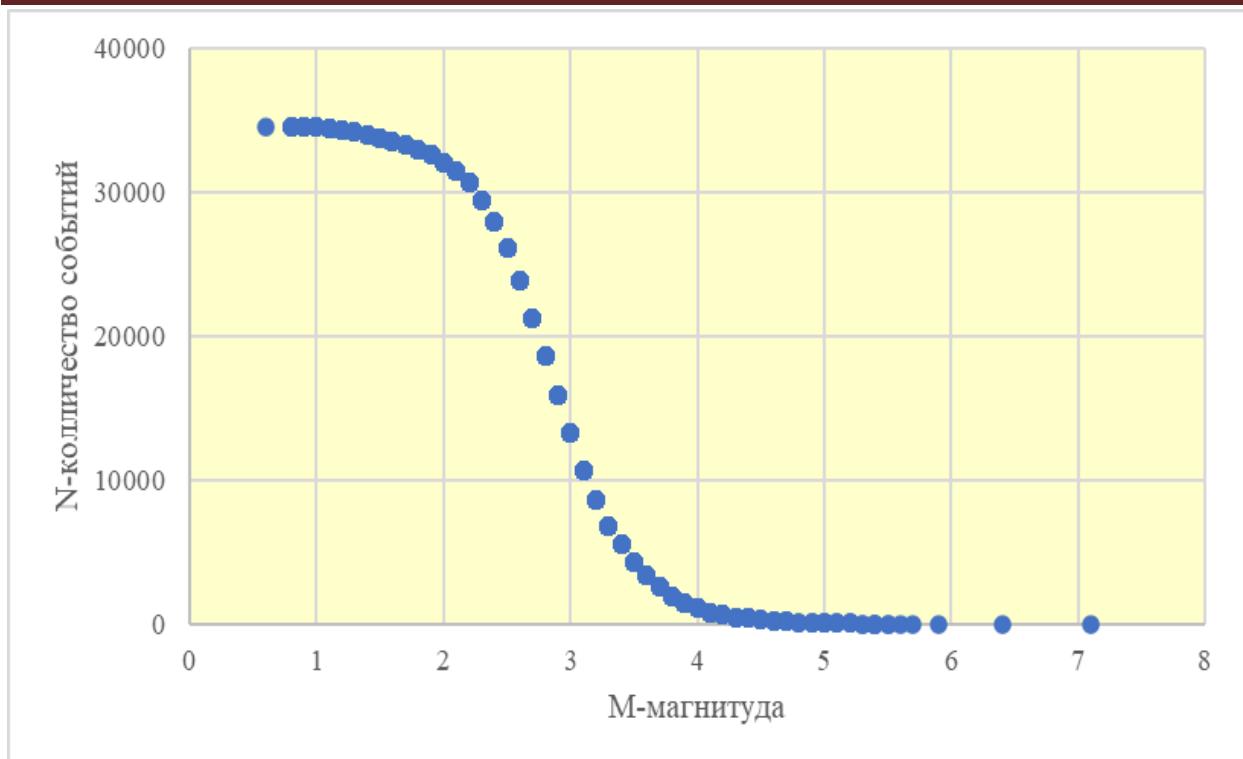
Рис. 2. Распределение магнитуд землетрясений.
Fig. 2. Distribution of earthquake magnitudes.

Такая структура каталога отражает характерное для региона соотношение, соответствующее закону (4) Гутенберга-Рихтера, согласно которому частота землетрясений экспоненциально уменьшается с ростом магнитуды.

Закон Гутенберга-Рихтера:

$$\log_{10} N(\geq M) = a - bM, \quad (4)$$

где $N(\geq M)$ – количество землетрясений с магнитудой не ниже M ; a, b – региональные параметры. Кумулятивное распределение количества землетрясений $N(M > 2)$ показывает зависимость количества событий с магнитудой выше M от порогового значения магнитуды (рис. 3). Характерная экспоненциальная убыль отражает фундаментальное соотношение (4) Гутенберга-Рихтера, согласно которому количество землетрясений убывает с ростом магнитуды. Преобладание слабых и умеренных событий подчёркивает иерархическую структуру сейсмического процесса, тогда как сильные землетрясения наблюдаются крайне редко (таблица).

Рис. 3. Кумулятивное распределение количества землетрясений N ($M > 2$).Fig.3. Cumulative distribution of the number of earthquakes N ($M > 2$).

Индикаторные землетрясения Indicator earthquakes

Дата	Широта	Долгота	Магнитуда	Энергия, Дж	К, Дж	Пункт
12.05.2022	37.96049	66.96770	6,4	2.51189E+14	4.5214E+14	Байсун
02.06.2022	38.18557	69.16360	5,6	1.58489E+13	2.85281E+13	Нурек
08.09.2022	40.19615	70.36469	5,7	2.23872E+13	4.0297E13	Исфара
22.03.2023	39.23092	70.28519	7,1	2.81838E+15	5.07309E+15	Гарм
13.11.2023	38.56982	69.61068	5,9	4.46684E+13	8.0403E+13	Нурек 2

В таблице представлены наиболее характерные сильные землетрясения за период 2021-2025 гг. в сегментах Южного Узбекистана и прилегающих территорий, которые можно принять как индикаторные аттракторы в оценке соотношений, отображающие эволюцию от режима накопления энергии к состоянию максимальной энтропии (Akopian, Kocharian, 2014). Каждое из этих состояний, как отмечено выше, близко к максимальной катастрофической точке нестабильности, непосредственно предшествующей основному событию, т. е. этим землетрясениям (Akopian, 2015). Для периода, указанного выше, кумулятивная энергия (рис. 4) рассчитана по:

$$E_c = \sum_{n=1}^i E_i. \quad (5)$$

Эволюция энтропии W отражает степень неупорядоченности и разнообразия путей энерговыделения в сейсмической системе (рис. 5). Характерный рост функции соответствует усложнению динамики за счёт накопления большого количества малых событий, тогда как резкое падение указывает на «обнуление памяти» после сильного землетрясения, радикально перестраивающего состояние системы.

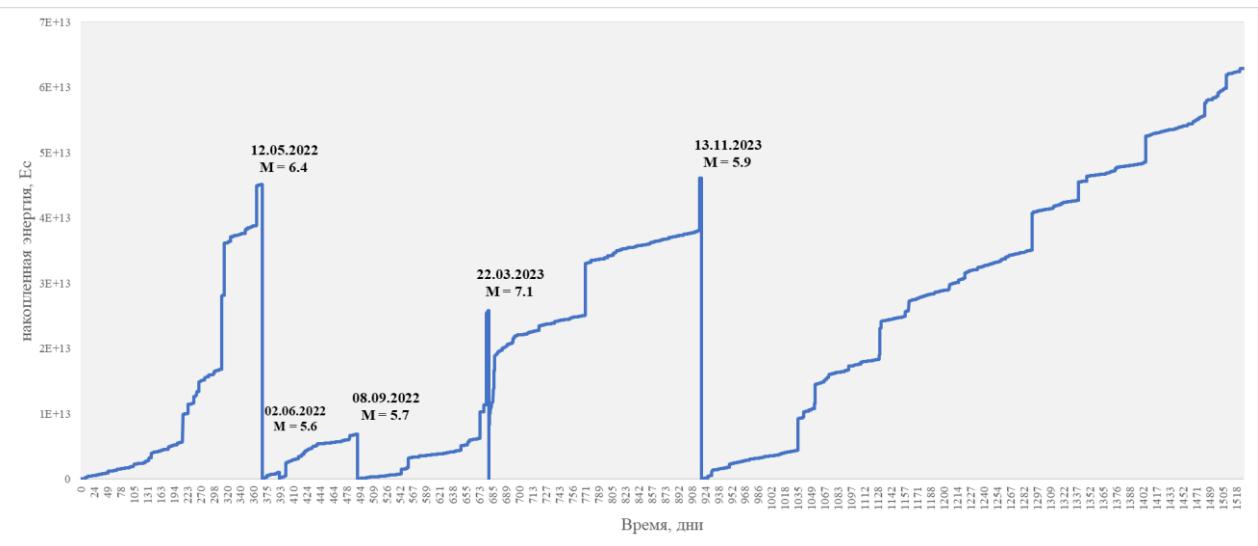


Рис. 4. Накопленная энергия $Ec(t)$, рассчитанная по (5), в сейсмическом цикле сегментов Южного Узбекистана и прилегающих территорий за период 2021-2025 гг.

Fig. 4. Accumulated energy $Ec(t)$ calculated according to (5) in the seismic cycle of segments of Southern Uzbekistan and adjacent territories for the period 2021-2025.

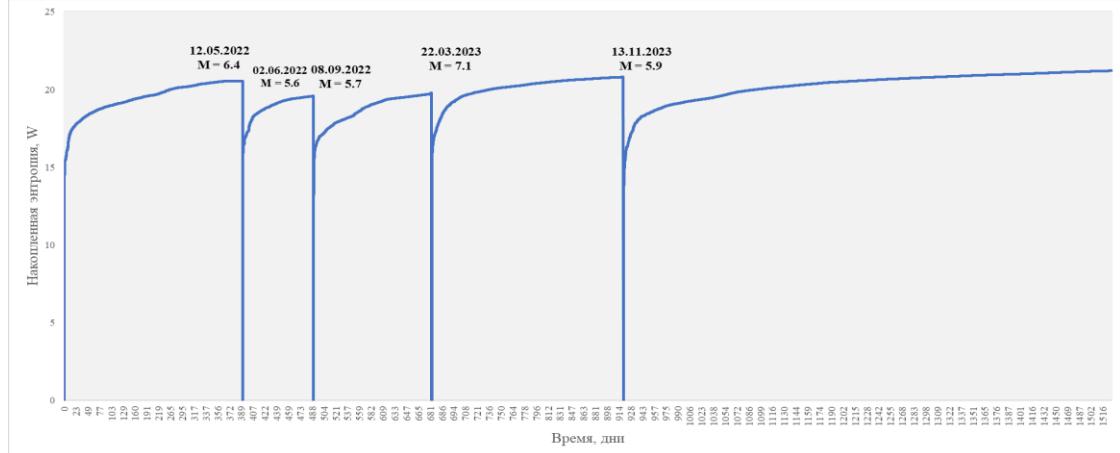


Рис. 5. Накопленная энтропия $W(t)$ в процессе сейсмического цикла, рассчитанная по (3), в сейсмическом цикле сегментов Южного Узбекистана и прилегающих территорий за период 2021-2025 гг.

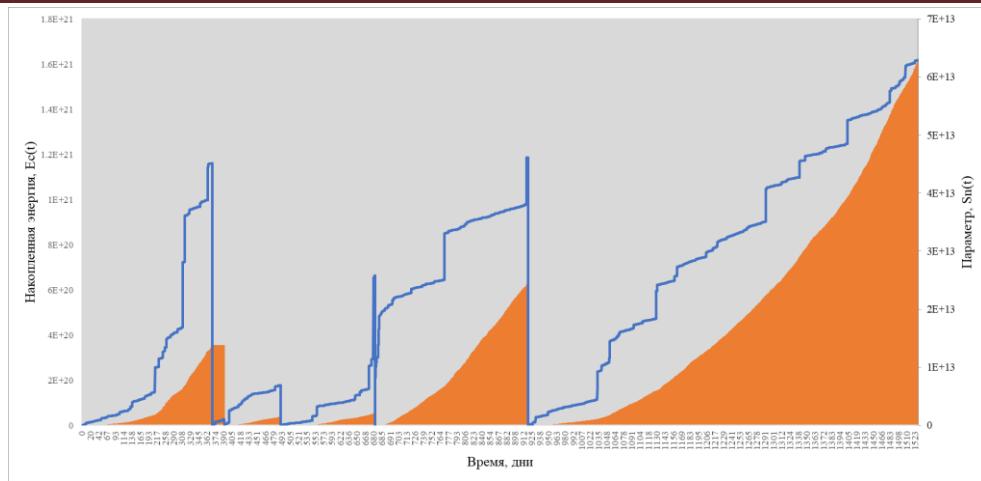
Fig. 5. Accumulated entropy $W(t)$ during the seismic cycle, calculated according to (3) in the seismic cycle of the segments of Southern Uzbekistan and adjacent territories for the period 2021-2025.

Таким образом, колебания $W(t)$ позволяют проследить переход от относительно упорядоченного накопления к кризисным фазам, завершающимся главным разрядом.

Обсуждение и выводы. Как отмечено в работе S.T.Akopian (Akopian, 2015), введенные показатели сейсмической энтропии и накопленной энергии, а также определения сейсмической системы и совокупности сильных землетрясений в сегментах Южного Узбекистана могут создать основу для применения современных концепций динамических сложных систем в изучении сейсмических процессов.

Линейное представление при этом может подчёркивать ступенчатую структуру изменения $W(t)$: плавный рост сменяется резкими обвалами, синхронными с сильными землетрясениями. Это иллюстрирует фундаментальную особенность подготовки крупных событий – накопление энтропии в межсейсмические интервалы в сегментах (части сейсмогенных зон), указанных выше, Южного Узбекистана, её резкую диссипацию в момент критического разряда. Подобная динамика соответствует концепции критического поведения сейсмической системы и указывает на важную роль энтропии как интегрального индикатора приближения неустойчивости (Akopian, Kocharian, 2014).

Кривая накопленной энергии $Ec(t)$ (синяя линия) отражает ступенчатый рост сейсмической активности за счёт отдельных землетрясений, тогда как параметр $S(t)$ (оранжевая площадь) характеризует интегральный эффект энергетического выделения во времени (рис. 6). Резкие скачки $Ec(t)$ связаны с сильными событиями, которые вносят основной вклад в суммарную энергию системы, в то время как плавное нарастание $S(t)$ отображает долговременное накопление напряжений и сохранение «памяти» процесса.

Рис. 6. Динамика накопленной энергии $Ec(t)$ и интегрального параметра $S(t)$.Fig. 6. Dynamics of accumulated energy $Ec(t)$ and integral parameter $S(t)$.

Такое совместное рассмотрение позволяет выявить критические фазы сейсмического цикла и оценить степень приближения системы к неустойчивости, предшествующей крупным землетрясениям (Akopian, Kocharyan, 2014).

Универсальная связь энергии и «размера» системы:

$$E = \beta S^a. \quad (6)$$

Степенной закон для больших S в (6) аппроксимирует связь между кумулятивной энергией и интегральным параметром; коэффициенты a , β описывают неравновесную динамику цикла. Эта зависимость лежит в основе **аттрактора землетрясений** в плоскости (Kc , W).

Диаграмма показывает траекторию сейсмической системы в пространстве параметров Kc и W (рис. 7). Зелёные точки отражают состояния системы во времени, а линии регрессии демонстрируют область устойчивой зависимости между энергетическим и энтропийным параметрами.

Выделенные кластеры указывают на приближение системы к критическому состоянию, предшествующему сильным землетрясениям. Согласно подходу (Akopian, Kocharyan, 2014), аттрактор интерпретируется как универсальное свойство сейсмического процесса, отражающее переход от накопления энергии к её резкой диссипации в момент главного события.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что развитие исследуемого региона подчиняется общим принципам, согласно которым рост энергетических показателей неизбежно ведет к переходу системы в состояние с большей энтропией. Видимая группировка точек позволяет предположить наличие различных режимов работы сейсмической системы. Нижний пучок данных ассоциируется с фазой подготовки, которая проявляется постепенным увеличением энергии и энтропии.

В то же время, верхний пучок отражает момент, когда система приближается к критическому порогу, предшествующему сильным землетрясением. Таким образом, аттрактор отображает эволюцию системы от режима накопления потенциальной энергии к состоянию, близкому к катастрофической точке нестабильности, непосредственно предшествующей в отдельности землетрясениям (см. таблицу), т. е. предполагаемому основному событию.

Слабые землетрясения отражают текущую динамику сейсмической системы, словно ее пульс, а сильные индикаторные землетрясения действуют как корректирующие силы, возвращающие систему к состоянию равновесия. С накоплением данных, анализ трековых диаграмм даст возможность в будущем предсказывать динамику физико-механических свойств разломов, определяя, будут они упрочняться или разупрочняться. В Южном Узбекистане, как и в других сейсмоопасных тектонических зонах, тектонические разломы накапливают деформацию, которая при достижении критического значения может внезапно высвободиться, провоцируя

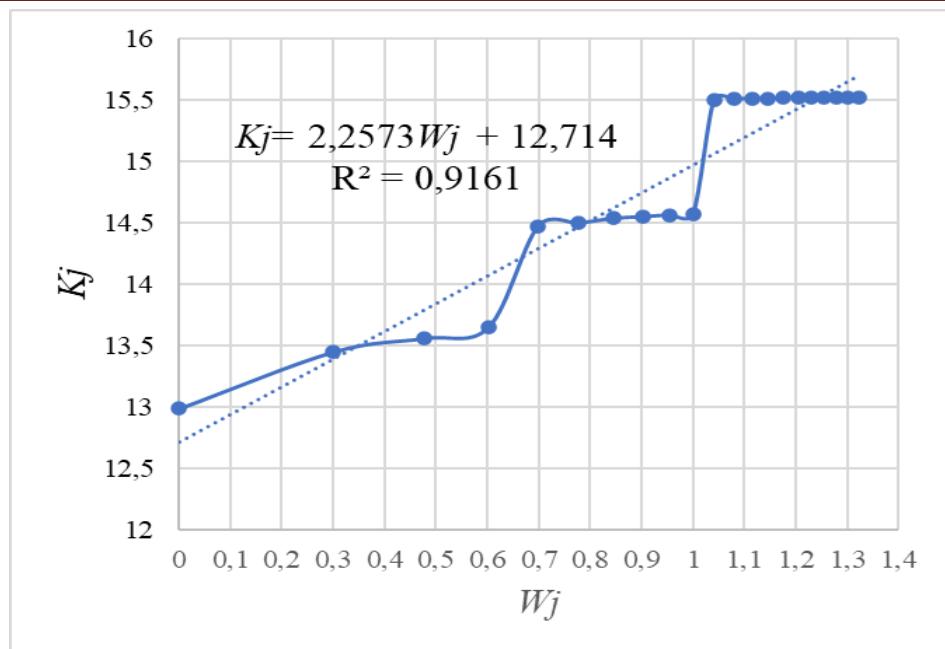


Рис. 7. Аттрактор землетрясений сейсмической системы.

Fig. 7. Earthquake attractor of a seismic system.

землетрясения. Сложность разломов, обусловленная их фрактальной структурой, масштабно-инвариантными связями напряжений и нелинейными взаимодействиями, затрудняет точное прогнозирование землетрясений (Khamidov Lutfulla и др., 2025; Sotolongo-Costa, Mora-Ramos и др., 2025). Тем не менее, статистические и термодинамические модели могут оказаться достаточно эффективными при изучении и анализе подготовки сейсмических явлений. Определяя сейсмическую энтропию, нам удалось выявить рост сейсмической энтропии, связанный с вариацией частоты землетрясений в сегменте сейсмоопасной зоны Южного Узбекистана.

Исследование выполнено при финансовой поддержке из бюджета Института сейсмологии АН РУз и гранта № AL-582205639 Агентства инновационного развития Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akopian S.Ts., Kocharyan A.N. Critical behaviour of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes // Geophysical Journal International. - 2014. - 196(1). - P. 580-599. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt398>
2. Lyubushin A. Global Seismic Noise Entropy // Front. Earth Sci. - 2020. - 8:611663. doi: 10.3389/feart.2020.611663 file:///C:/Users/Clay/Downloads/feart-08-611663.pdf
3. Posadas A., Morales J., Posadas-Garzon A. Earthquakes and entropy: Characterization of occurrence of earthquakes in southern Spain and Alboran Sea // Chaos. - 2021. - 31. - 043124; <https://doi.org/10.1063/5.0031844>
4. Godano C., Tramelli A., Petrillo G., Converto V. Testing the Predictive Power of b Value for Italian Seismicity // Seismica. - 2024. - Vol. 3.1. - P. 1-11. <https://doi.org/10.26443/seismica.v3i1.1084>
5. Akopian S.T. Open dissipative seismic systems and ensembles of strong earthquakes: Energy balance and entropy funnels // Geophys. J. Int. - 2015. - 201. - P. 1618-1641. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv096>
6. Nikulov A. The Law of Entropy Increase and the Meissner // Effect. Entropy. - 2022. - 24. - 83. doi.org/10.3390/e24010083.
7. Khamidov Lutfulla, Anvarova Sadoqat, Ganieva Barno. Clustering the distribution of earthquakes near reservoirs // AIP Conf. Proc. 2025. - 3265. - 040005. <https://doi.org/10.1063/5.30265271>
8. Sotolongo-Costa O., Mora-Ramos M. Role of non-extensivity q-parameter in tectonic seismic forecasting. - 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.04932>

**O'zbekiston Janubidagi seysmik xavfli segmentdagi zilzila chastotasining
o'zgarishi bilan bog'liq seysmik entropiya**

T.U. Mamarazikov, L.A. Xamidov, B.G. Alimov, T.S. Qurbonov, F.R. Ortiqov, S.B. Xalboev

Annotatsiya. Zilzilani bashorat qilish seysmologiyaning asosiy yo'nalishi bo'lib, ayniqsa O'zbekiston kabi seysmik faol mamlakatlarda muhim ahamiyatga ega. Ushbu tadqiqot zilzila chastotasining o'zgaruvchanligi bilan bog'liq holda Janubiy O'zbekistonning seysmik xavfli mintaqasida seysmik entropiya o'sish dinamikasini tahlil qiladi. Asosiy maqsad zilzilalarni keltirib chiqaruvchi asosiy omillarni aniqlash va mavjud seysmik faollikni kuzatish va ogohlantirish tizimlarini takomillashtirish chora-tadbirlarini taklif qilishdan iborat. Ushbu segmentdagi seysmik entropiya evolyutsiyasini o'rganish uning vaqtinchalik tendentsiyalari va xususiyatlarini chuqurroq tushunish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: zilzilani bashorat qilish, seysmologiya, seysmik faollik, seysmik entropiya, monitoring, ogohlantirish, tabiiy ofatlar, jamoat xavfsizligi.

**Seismic Entropy Associated with Earthquake Frequency Variations
in a Seismically Hazardous Segment of Southern Uzbekistan**

T.U. Mamarazikov, L.A. Khamidov, B.G. Alimov, T.S. Kurbanov, F.R. Artikov, S.B. Khalbaev

Abstract. Earthquake prediction is a key area of seismology, particularly important in seismically active countries such as Uzbekistan. This study analyzes the dynamics of seismic entropy growth in a seismically hazardous region of Southern Uzbekistan, correlating with earthquake frequency variability. The main objective is to identify the key factors causing earthquakes and propose measures to improve existing seismic activity monitoring and warning systems. Studying the evolution of seismic entropy in this segment will provide a deeper understanding of its temporal trends and characteristics.

Key words: earthquake forecasting, seismology, seismic activity, seismic entropy, monitoring, warning, natural disasters, public safety.

УДК 550.34.012

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ Vs30: СИНТЕТИЧЕСКАЯ
АУГМЕНТАЦИЯ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ДАННЫХ**

**Д.Д. Юсупов^{1,2}, И.М. Алимухамедов¹, С.Б. Халбаев^{2,1}, Ж.З. Кодиров²,
О.Ф. Закирова², Т.У. Мамарозиков^{1,2}**

¹Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, Ташкент, Республика Узбекистан

²Филиал РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина в г. Ташкенте, Республика Узбекистан

Аннотация. Рассматривается синтетическая аугментация пространственных данных методом Residual Bootstrap и гибридной схемой KMeans-SMOTENC для повышения качества интерполяции параметра Vs30 при ограниченном количестве полевых измерений. Описаны принципы работы обоих подходов: RF-bootstrap сохраняет структуру исходных данных за счёт добавления эмпирических остатков к прогнозам на основе случайного леса, а гибридная схема сочетает глобальную кластеризацию KMeans с локальной SMOTENC-интерполяцией. Проведён сравнительный анализ их взаимодействия с алгоритмами машинного обучения в разных сценариях моделирования и при различных плотностях точек. Это позволило выявить, что при небольших выборках (менее 15 точек) более эффективен подход с Residual Bootstrap, обеспечивающий минимальные ошибки MAE и RMSE, тогда как при более представительных данных (≥ 25 точек) превосходит гибрид KMeans-SMOTENC за счёт лучшего воспроизведения локальной структуры. Предложена аддитивная стратегия выбора метода аугментации в зависимости от объёма и однородности исходной выборки, позволяющая существенно повысить точность и устойчивость машинного обучения-интерполяции Vs30 в условиях дефицита данных.

Ключевые слова. Vs30, сеймическое микрорайонирование, ML-интерполяция, аугментация, Random Forest, XGBoost, SVM, k-NN.

Введение. В современных условиях сейсмического микрорайонирования параметр Vs30 (средняя скорость сдвиговой волны в верхних 30 м пород) является ключевым индикатором инженерно-геологической опасности и служит основой для зонирования территорий по сейсмическим характеристикам. При этом в городских условиях нормативные требования к плотности точек измерений часто не обеспечиваются вследствие ограничений доступа, высокой стоимости и организационных сложностей полевых работ. Этот дефицит данных приводит к снижению достоверности интерполяционных карт и искажению пространственных закономерностей распределения Vs30.

Дальнейшее усложнение ситуации связано с тем, что классические методы интерполяции (например, кригинг или инверсии на основе геостатистики) при низкой плотности наблюдений демонстрируют существенные артефакты и нарушения латеральной согласованности карт. В то же время развитие методов машинного обучения и технологий синтетической аугментации данных открывает новые возможности для восполнения пробелов в информации и повышения качества пространственного моделирования в условиях ограниченных выборок.

Цель настоящего исследования – разработка и сравнительный анализ подходов к синтетической аугментации пространственных данных (Random Forest Residual Bootstrap и гибридный KMeans–SMOTENC) в сочетании с алгоритмами машинного обучения (Random Forest, XGBoost, SVM и k-NN) для интерполяции Vs30 на примере городских условий дефицита данных. Так, были реализованы три сценария моделирования (геометрические тела, шахматные доски и реалистичная геометрия) и протестированы различные плотности точек, что позволило комплексно оценить влияние аугментации и выбора ML-моделей на точность и устойчивость предсказаний.

Полученные результаты демонстрируют, что при количестве исходных точек менее 15 предпочтительнее использовать метод Residual Bootstrap в сочетании с XGBoost или SVM, тогда как при более сбалансированных наборах данных гибридная схема KMeans–SMOTENC даёт лучшие показатели внутренней согласованности и воспроизводимости локальных структур.

Проблематика интерполяции Vs30 на примере г. Ферганы

В условиях плотной городской застройки Ферганы рассчитанное количество полевых замеров Vs30 (72 точки на 95,6 км²) оказывается существенно ниже нормативных требований, поскольку доступ к ряду участков ограничен плотностью зданий и инженерных коммуникаций, а проведение измерений затруднено организационно-техническими факторами (рис. 1) [15].

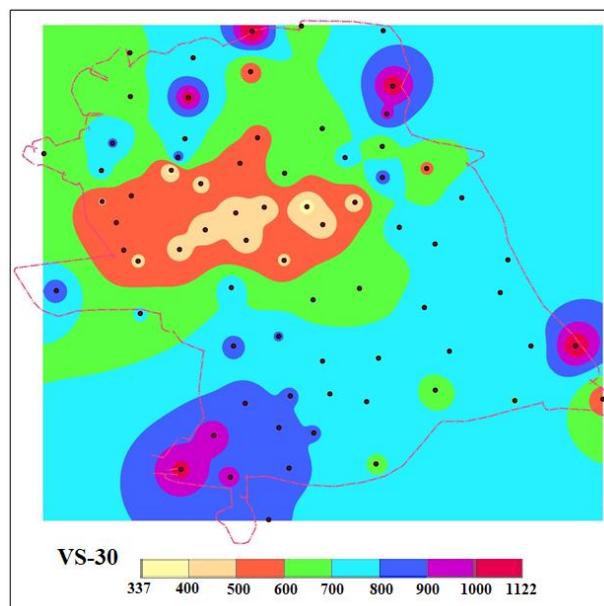


Рис. 1. Карта распределения Vs30 по г. Фергане на основе MASW (72 точки).
Источник: Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН Республики Узбекистан, 2022 [5].

Построенная на основе MASW-метода карта распределения Vs30 демонстрирует значительные геометрические несоответствия: при недостатке наблюдений нарушается латеральная согласованность зон различной жёсткости грунтов, что приводит к искажению границ инженерно-геологических объектов и снижению достоверности интерполяции [15].

Сопоставление фактической плотности точек с расчётами по РСН 60-86 и методическому руководству по ДСР и СМР, выполненное для классификации «Б» и 3-й категории геологической сложности в масштабе 1:25 000, показало, что нормативный минимум точек должен быть многократно выше реального, что подчёркивает острый дефицит исходных данных для корректного моделирования Vs30 (табл. 1) [15].

Таблица 1

**Расчёт необходимой плотности точек для
оценки параметра Vs30 по нормативным документам [15]**

Область	Ферганская область		
Название города	Фергана		
Численность (по открытым данным)	321 820		
Площадь города	95,6 кв.км		
Класс	"Б"		
Категория сложности (геология)	3		
Рекомендуемый масштаб	1:10 000 или 1:5 000		
Рекомендуемые плотности для разных масштабов карт согласно РСН-60-86			
	мин	макс	среднее
1:25 000	287	478	382,5
1:10 000	765	956	860,5
1:5 000	1148	1434	1291
	мин	макс	ср
Рекомендуемое количество для масштаба 1:10 000	765	956	860,5
Рекомендуемое количество для масштаба 1:25 000	287	478	382,5
Рекомендуемые плотности для разных масштабов карт согласно методическому руководству по ДСР и СМР			
	мин	макс	среднее
1:25 000	192		
Вывод	РСН-60-86	Методическое пособие по ДСР и СМР	
Рекомендации для масштаба 1: 25 000 (количество точек на 1 кв.км.)	3 точки	2 точки	
Реальное отрабатываемое количество		72	
Плотность на 1 кв.км.	0,75 точек		

Моделирование пространственного распределения Vs30 опирается на физико-механические свойства грунтов (упругость, плотность и трещиноватость пород), а также на морфологию рельефа и структурные особенности разреза; международные исследования подтверждают, что учёт уклона местности и инженерно-геоморфологических классификаций повышает точность прогнозирования Vs30, что легко в основу применяемых моделей [15].

Моделирование распределения Vs30 на основе инженерно-геологических закономерностей. Моделирование распределения Vs30 основывается на учёте инженерно-геологических характеристик разреза – плотности, упругости и трещиноватости пород, которые определяют скорость распространения сдвиговых волн, а также на анализе морфологии рельефа и структурных элементов, таких как разломы, тектонические границы и смена литологических комплексов. Такой подход позволяет физически обосновать пространственные вариации Vs30, учитывая влияние как поверхностных геологических данных, так и глубинных структурных особенностей разреза, что подтверждается рядом международных исследований по использованию уклона местности и инженерно-геоморфологических классификаций в прогнозе Vs30 (рис. 2) [15].

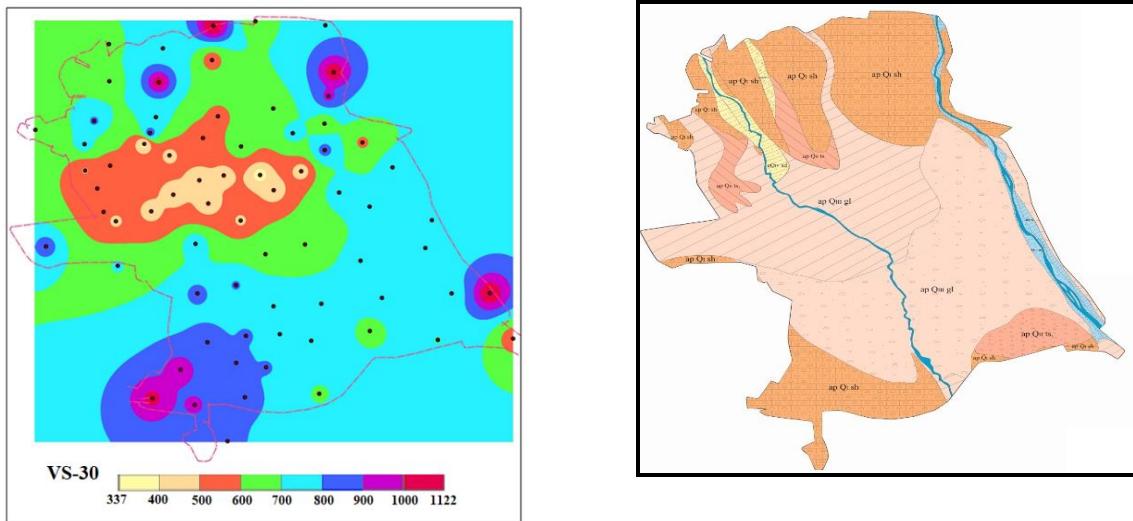


Рис. 2. Сопоставление карт распределения Vs30 по г. Фергане и геолого-литологической карты (усл. обозн. – возраст и генезис породы) [5].

Первый сценарий моделирования: простые геометрические тела

В первом сценарии карта размером 100×100 ячеек строилась на основе четырех простых геометрических тел – фоновой области, прямоугольника, квадрата и окружности – каждое из которых трактовалось как отдельная геологическая единица со специфическим диапазоном значений Vs30. В пределах каждой фигуры значения генерировались по нормальному закону с заданными медианами и стандартными отклонениями, отражающими статистику скоростей для аналогичных литологических условий Ферганской долины, согласно классификации NEHRP и отечественным нормативам. Такой подход позволил контролируемо задавать чёткие границы между зонами и выявлять артефакты или искажения, возникающие при применении различных алгоритмов пространственной интерполяции (табл. 2; рис. 3) [15].

Таблица 2

Распределение значений параметров Vs30 по геологическим зонам, по модельной карте первого сценария

Геологическая зона	Тип грунта	Категория NEHRP	Категория грунтов	min	max	медиана
1. Фоновая область	Лессовидные супеси и суглинки (лессовидные грунты средней плотности)	C–D	II	350	550	450
2. Прямоугольник	Гравийно-галечниковые отложения	C–B	II	700	750	725
3. Квадрат	Конгломераты с прослойками песчаников и алевролитов	B–C	I	750	1050	900
4. Окружность	Лессовидные супеси и суглинки (рыхлые или слабоуплотнённые)	C–D	III	150	350	250

Второй сценарий моделирования: шахматные доски

Второй сценарий моделирования представлял серию шахматных карт, имитирующих строгую чередующуюся структуру геологических зон с контрастными физико-механическими характеристиками (рис. 4; табл. 3). Созданы три варианта сетки (4×4, 8×8 и 16×16 ячеек) при фиксированной площади 2,5×2,5 км, что обеспечивало изменение размера наименьшего различимого объекта и имитацию разных масштабов неоднородностей. Каждой клетке присваивалось одно из двух характерных значений Vs30 (250 м/с или 550 м/с), и внутри ячейки значения моделировались как случайные величины с нормальным распределением без перекрытия плотностей, что позволило количественно оценить разрешающую способность и чувствительность методов интерполяции к плотности наблюдений и размеру объектов [15].

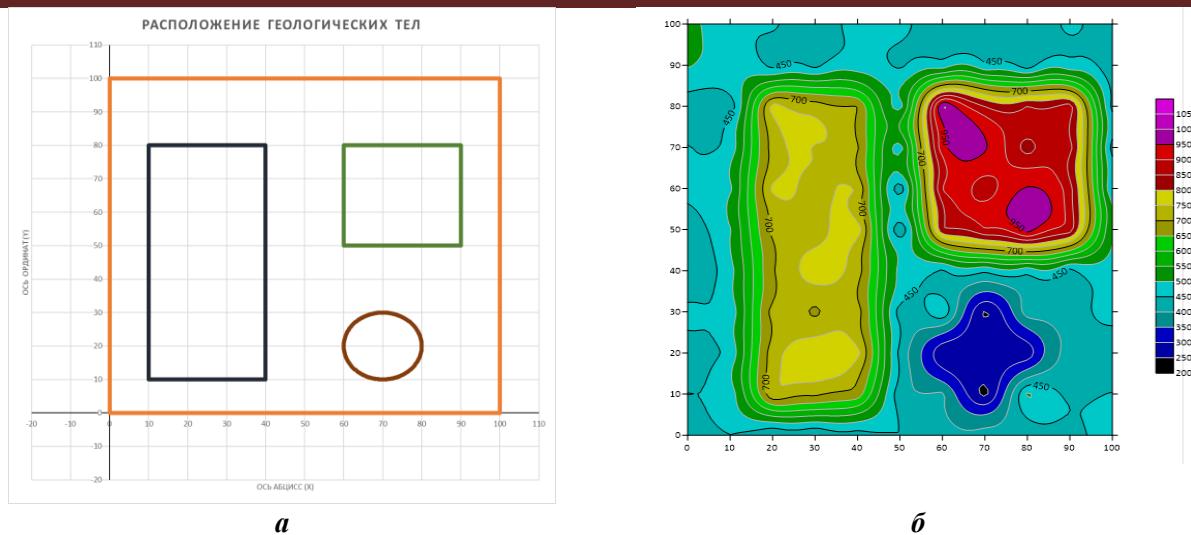


Рис. 3. Моделирование карты Vs30 (первый сценарий) построением простых геологических фигур (а – геометрическое распределение геологических зон; б – распределение параметров Vs30 по нормальному закону, построение методом Kriging).

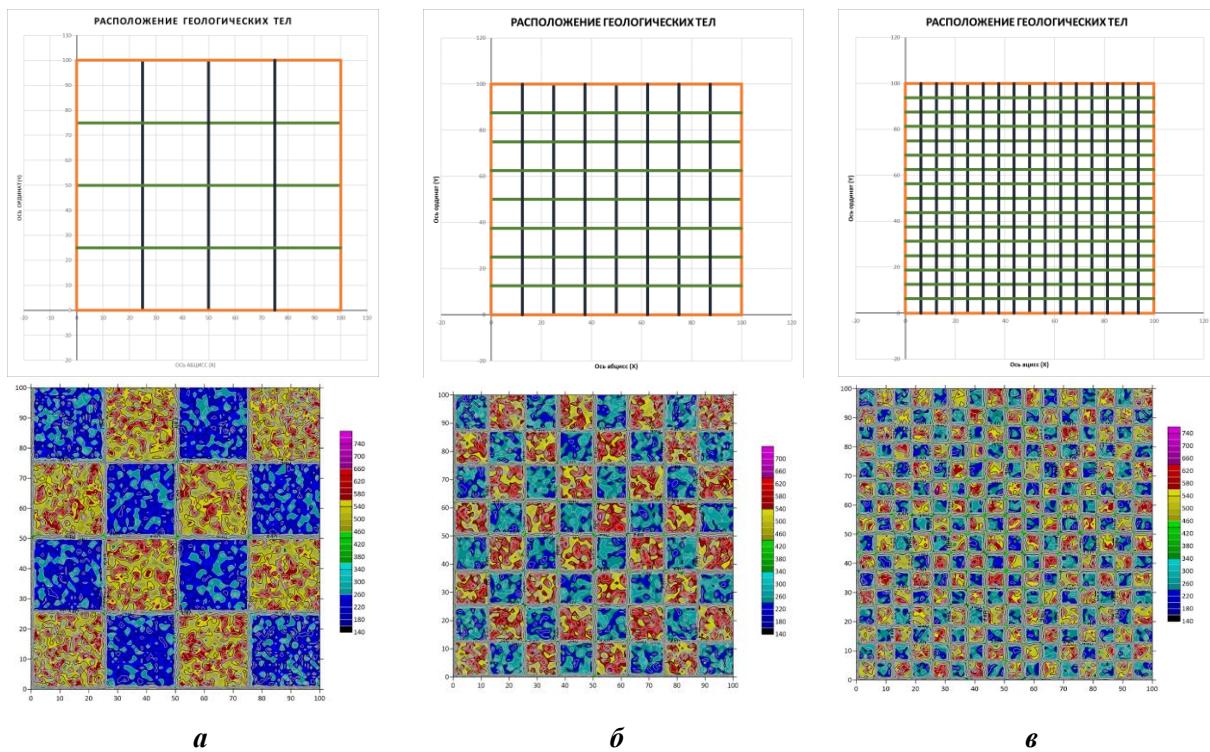


Рис. 4. Моделирование карты Vs30 (второй сценарий) в форме шахматных досок (а – размерность 4×4, б – размерность 8×8, в – размерность 16×16).

Таблица 3
Распределение значений параметров Vs30 по геологическим зонам, по модельной карте второго сценария

Геологическая зона	Тип грунта	Категория NEHRP	Категория грунтов	min	max	медиана
1. Четная ячейка	Лессовидные супеси и суглинки (рыхлые или слабоуплотнённые)	C–D	III	150	350	250
2. Нечетная ячейка	Галечники с гравием и песком	C	II	350	750	550

Для наглядной иллюстрации построена пара графиков нормального распределения значений Vs30 для обеих групп. На рис. 5 представлены соответствующие распределения. Важно отметить, что области распределений не перекрываются, что дополнительно усиливает обоснованность использования данной пары значений как контрастных.



Рис. 5. Графики нормального распределения параметра Vs30 для моделей шахматных досок.

Третий сценарий моделирования: реалистичная геометрия и планирование плотности точек

Третий сценарий служил приближенной к реальности геометрией с мозаичной разбивкой территории на 5×5 ячеек, расширяемую до произвольных размеров (например, 10×10 или 16×16) и количества зон (от 2 до 16), каждая из которых характеризуется индивидуальным диапазоном Vs30 и параметрами нормального распределения (рис. 6). В отличие от резких контрастов шахматной модели здесь введён градиентный переход скоростей между соседними зонами, что отражает естественную смену литологии и структуральную сложность разреза. Данный модуль позволяет варьировать количество и размер зон, диапазоны медиан и стандартных отклонений Vs30, а также генерировать разные варианты размещения точек наблюдений, что делает его эффективным инструментом для планирования полевых работ, оптимизации плотности замеров и верификации алгоритмов интерполяции в сложных инженерно-геологических условиях [15].

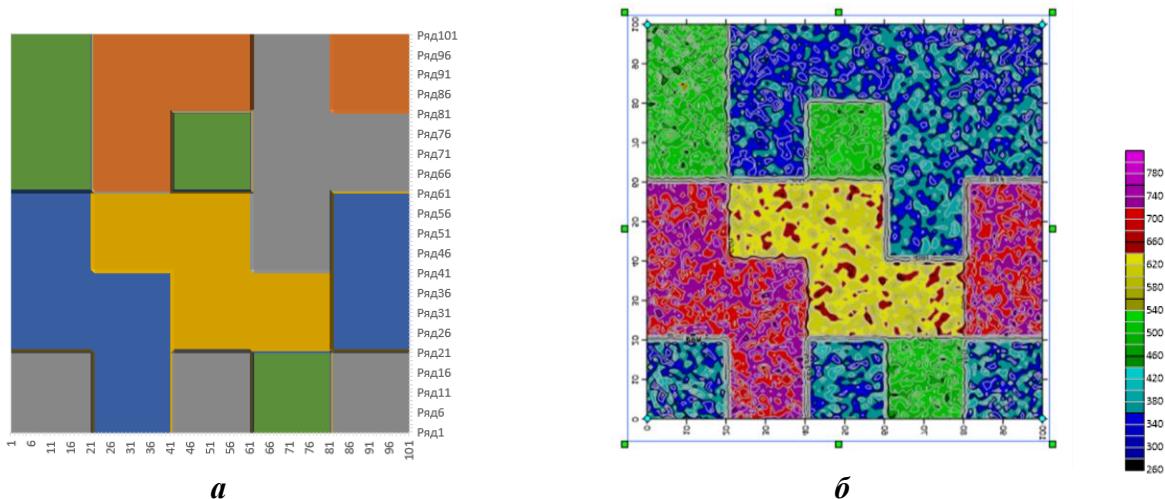


Рис. 6. Моделирование карты Vs30 (третий сценарий) – наиболее приближенная модель к реальным данным.

Выбор точек измерений и расчет плотности: определение размерности моделей

Одним из важных моментов в построении модельных карт является определение разрешающей способности карты, зависящей от масштаба исследования. Это критично для оценки возможностей различных методов интерполяции в условиях дефицита данных.

Разрешающая способность карты определяется по формуле:

$$R = \frac{d}{M}, \quad (1)$$

где R – разрешающая способность карты, м; d – минимальный размер различимого объекта на карте (обычно принимается 0,1-0,2 мм для типографской печати, или 0,5 мм для удобного визуального восприятия); M – знаменатель масштаба карты (в нашем случае 25 000).

Поскольку в рамках данного исследования используется масштаб 1:25 000, расчёты велись с учётом необходимости работы на небольшом участке карты для оптимизации количества моделируемых точек. Размер карты принят равным $6,25 \text{ км}^2$ ($2,5 \text{ км} \times 2,5 \text{ км}$), что соответствует 100×100 ячейкам при размере одной ячейки $25 \text{ м} \times 25 \text{ м}$. Плотность наблюдательных точек представлена в табл. 4 [15].

Таблица 4

Плотность точек при разном количестве точек измерений на карте

Плотность точек (на км^2)	Количество точек измерений на карте
1,12	7
2,4	15
4	25
5,6	35
7,2	45

В рамках исследования рассмотрены плотности 1,12; 2,4; 4,0; 5,6 и 7,2 точек на 1 км^2 . При этом плотность менее 1 точки на км^2 была исключена из анализа в связи с недостаточной репрезентативностью (при 0,75 точки/ км^2 количество скважин составляло бы всего 5 точек, что недостаточно для оценки интерполяции) [15].

Аугментация данных

Аугментация данных – это процесс искусственного увеличения объёма и разнообразия обучающего набора путём применения к имеющимся экземплярам различных преобразований (например, шумового искажения, геометрических трансформаций или генерации синтетических образцов), при котором сохраняются базовые статистические и структурные свойства исходных данных.

Для устранения дефицита данных опробованы следующие методы аугментации, которые были выбраны за их актуальность для пространственных данных и доказанную полезность в контексте машинного обучения.

Random Forest Residual Bootstrap. Метод основан на поэтапном прогнозировании каждого признака (сначала пространственной зоны, затем координат x , y и $Vs30$) с помощью случайного леса, после чего к полученным условным средним добавляются остатки реальных наблюдений, что позволяет сохранить структуру исходных данных и их вариацию при синтезе новых точек [8].

При генерации каждой синтетической записи сначала выбирают категорию зоны, согласно эмпирическим частотам, затем последовательно получают прогнозы для x , y и $Vs30$ и к каждому добавляют случайный остаток из соответствующей группы зоновых остатков, взятый из исходного распределения. Такой подход, по сути, реализует «остаточный» бутстрэп, обеспечивая новые точки, чьи условные распределения близки к исходным, повышая разнообразие выборки без нарушения корреляционных связей [9].

SMOTENC аугментация. SMOTENC расширяет классический алгоритм SMOTE для работы со смешанными типами признаков: непрерывные признаки синтезируются посредством линейной интерполяции между выбранными k ближайшими соседями в пространстве признаков, а категориальные признаки получают значение, соответствующее наиболее частому у соседей. За счёт этого сохраняются и взаимосвязи между непрерывными и номинальными переменными, и

плотность данных в границах классов, что особенно важно при сильном разбалансе выборки по категориям [10].

Additive Gaussian Noise Injection. Метод заключается в добавлении к каждому признаку исходного наблюдения шума, сгенерированного из нормального распределения с нулевым математическим ожиданием и заранее заданным значением дисперсии. Таким образом, каждая синтетическая точка получается близкой к реальной, но слегка смещённой, что повышает устойчивость обучаемых моделей к мелким флуктуациям и позволяет им лучше обобщать новые данные без существенных искажений глобальной структуры распределения [11].

Vine Copula-Based Sampling. В этом подходе сначала строится мультимодульная зависимость между признаками через систему попарных копул (vine copula), что даёт гибкую архитектуру для моделирования как линейных, так и нелинейных корреляций. После оценки параметров копул выполняется выборка из полученной структуры, при этом зависимые признаки синтезируются совместно, что сохраняет сложные многомерные связи и позволяет адекватно воспроизводить как маргинальные распределения, так и зависимости между ними [12].

Synthpop аугментация. Пакет Synthpop в R реализует поэтапное условное моделирование: каждый признак синтезируется с учётом ранее сгенерированных значений, причём для непрерывных переменных используются методы регрессии, а для категориальных — модели логистической регрессии или наивного Байеса. После получения условного предсказания добавляется случайный компонент, что делает синтетические данные одновременно реалистичными и конфиденциальными, сохраняя при этом многомерную структуру исходной таблицы [13].

Hybrid KMeans-SMOTENC Augmentation. Метод объединяет кластеризацию и локальный SMOTENC: на первом этапе непрерывные признаки исходной таблицы группируются алгоритмом KMeans на n кластеров, после чего внутри каждого кластера производится SMOTENC-интерполяция — числовые признаки синтезируются линейно между случайными ближайшими соседями, а категориальные значения берутся по моде из этой локальной выборки. Полученные синтетические точки затем объединяются с оригиналом и усечены до требуемого объёма. Такой гибридный подход позволяет одновременно учитывать глобальное разбиение данных на естественные подмножества и локальные связи внутри каждого из них [14].

Сравнительный анализ и выбор метода аугментации

Для выбора метода аугментации проведено моделирование 1-го сценария на 25 априорных точках обучающей выборки. В результате комплексного сравнительного исследования, включавшего оценку количественных метрик и качественный анализ посредством моделирования, выделены два наиболее результативных метода аугментации: **Random Forest Residual Bootstrap** и **гибридный подход на базе KMeans + SMOTENC**. Сравнительный анализ шести методов аугментации отражен на рис. 7.

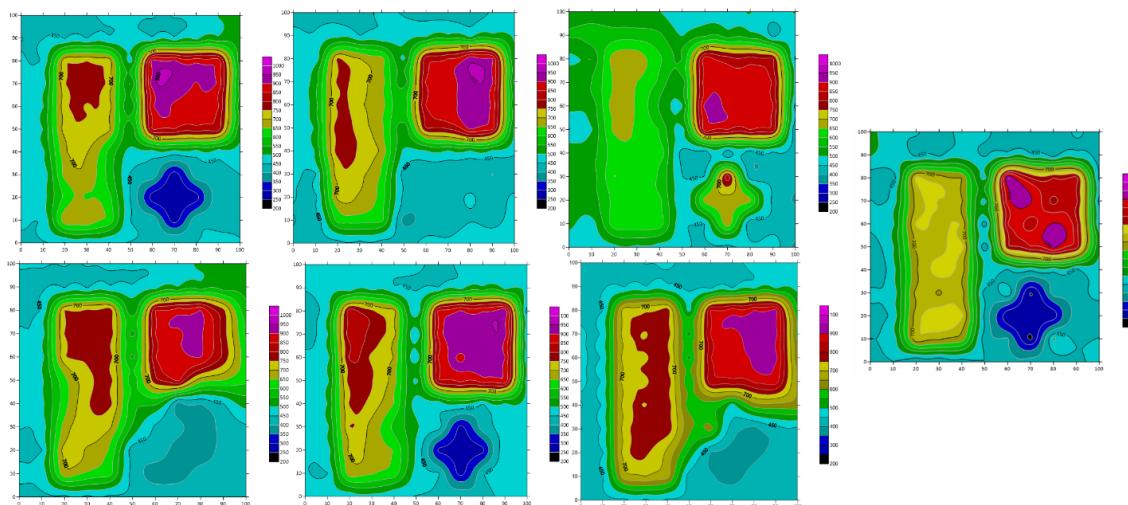


Рис. 7. Сравнительный анализ методов аугментации.

Сравнение методов синтетической аугментации (табл. 5) показало, что наименьшую ошибку кросс-валидации демонстрирует метод **Random Forest Residual Bootstrap** (1 459), что свидетельствует о его высокой способности к воспроизведению структуры исходных данных и точной генерации новых точек. **Гибридный метод KMeans–SMOTENC** показал результат 3 386 и занял второе место, обеспечивая лучшее покрытие пространства признаков за счёт предварительной кластеризации. Стандартный **SMOTENC** (4 293) оказался менее точным, что может быть связано с отсутствием структурного контроля при генерации.

Таблица 5
Сравнение методов аугментации по результатам кросс-валидации

Метод аугментации	Кросс-валидация
Random Forest Residual Bootstrap	1 459
Hybrid KMeans–SMOTENC Augmentation	3 386
Additive Gaussian Noise Injection	6 874
Vine Copula–Based Sampling	6 977
Synthpop аугментация	9 534
SMOTENC аугментация	4 293

Более высокие ошибки получены при использовании **Additive Gaussian Noise Injection** (6 874), **Vine Copula** (6 977) и особенно **Synthpop** (9 534), что указывает на слабую применимость этих методов в инженерно-геологических задачах. Их подходы не учитывают пространственные закономерности и приводят к генерации менее релевантных данных. Таким образом, методы, сохраняющие структуру исходной выборки, демонстрируют наилучшие результаты в условиях дефицита наблюдений.

Анализ латеральной разрешающей способности метода MASW в контексте аугментации данных

Метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) использовался для определения параметра Vs30 (средней скорости поперечных волн в верхних 30 м грунта), на основе которого строились карты в экспериментах с простейшими геологическими моделями, шахматными досками 4×4, 8×8, 16×16 и 5×5. Латеральная разрешающая способность метода MASW, определяющая минимальное расстояние, на котором можно различить изменения Vs30, зависит от длины волны поверхностных волн и конфигурации приёмной линии.

Согласно проведенному исследованию по методам аугментации, анализ радиального отклонения синтетических точек от исходных показал следующие результаты.

◆ **Random Forest Residual Bootstrap.** Среднее радиальное отклонение – от 0 до 27 м, с разбросом Vs30, значительно превышающим 1 м/с. Это указывает на то, что синтетические точки, сгенерированные этим методом, имеют более широкий разброс по координатам и значениям Vs30, что может быть полезно для моделирования глобальных пространственных трендов, но менее эффективно для точного воспроизведения локальных вариаций.

◆ **Гибридный подход KMeans–SMOTENC.** Среднее радиальное отклонение – от 6 до 45 м, но с разбросом Vs30 менее 1 м/с. Это свидетельствует о более равномерном распределении синтетических точек по координатам и высокой точности воспроизведения значений Vs30, что делает метод предпочтительным для задач, требующих сохранения локальных характеристик данных.

Латеральная разрешающая способность MASW в данном контексте позволила установить радиус, в пределах которого значения Vs30 остаются практически неизменными (стабильными). Для Random Forest Residual Bootstrap этот радиус был шире из-за большего разброса, что соответствует его способности генерировать более разнообразные синтетические точки, полезные

при малых выборках. Гибридный подход, напротив, обеспечивал меньший радиус стабильности значений Vs30, что подтверждает его эффективность в сохранении локальной структуры данных, особенно при наличии достаточного количества исходных точек (рис. 8).

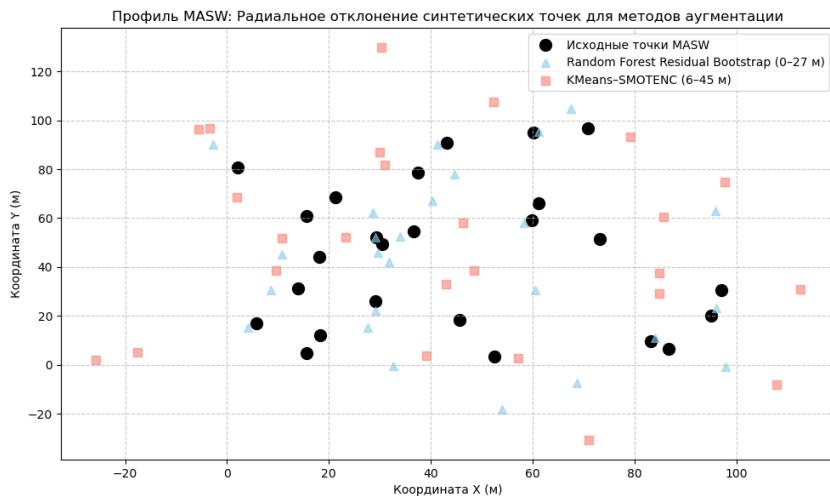


Рис. 8. Пространственное распределение синтетических точек, сгенерированных методами аугментации Random Forest Residual Bootstrap и KMeans-SMOTENC, по отношению к исходным измерениям MASW.

Интерполяция модельных данных Vs30 с регулярным распределением и визуализация результатов

Сценарий 1

Изначально обучающая выборка состояла из 15 точек, после чего её объём был доведён до 1000 синтетических наблюдений при помощи одного из двух методов аугментации: **модель-ориентированного бутстрэппинга остатков на основе случайного леса и гибридного подхода KMeans + SMOTENC**. На полученных расширенных выборках сравнительно протестированы четыре алгоритма – **Random Forest, XGBoost, SVM и kNN** (рис. 9).

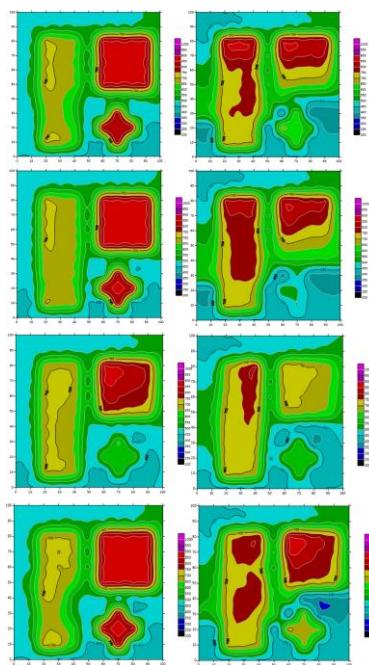


Рис. 9. Сравнительный анализ моделей машинного обучения и аугментации данных (Random Forest, XGBoost, SVM и kNN, первая RF ауг. вторая гибридная ауг.).

В ходе внутренней кросс-валидации и оценки согласованности предсказаний с истинными значениями гибридная схема аугментации в сочетании с **XGBoost** обеспечила наилучший баланс между устойчивостью к переобучению и точностью воспроизведения тренда, демонстрируя высокую объясненную дисперсию и низкий разброс ошибок. В свою очередь, модель **SVM**, обученная на данных, дополненных методом аугментации **Random Forest**, показала минимальные абсолютные отклонения, но оказалась менее стабильна при проверке на 10-ти валидационных точках, не участвующих в обучении (см. рис. 9).

В условиях ограниченного объёма обучающей выборки (7 точек) проведены эксперименты по обучению четырёх моделей машинного обучения – **Random Forest**, **XGBoost**, **Support Vector Machine** и **k-Nearest Neighbors** – с применением двух различных подходов к аугментации данных: 1) Residual Bootstrap на основе модели Random Forest и 2) гибридной аугментации, совмещающей кластеризацию KMeans и метод SMOTE-ENC. Объём синтетической обучающей выборки в обоих случаях увеличивался до 1000 наблюдений (рис. 10).

Результаты тестирования на 10 независимых выколотых точках показали выраженную чувствительность моделей к типу использованной аугментации. Наилучшую устойчивость по метрике MAE (наименьшее среднее абсолютное отклонение) в большинстве случаев продемонстрировали модели, обученные на **Residual Bootstrap**, особенно при применении моделей машинного обучения **XGBoost** и **SVM**. Однако **гибридная аугментация** обеспечивала более высокую корреляцию и лучшее приближение предсказаний к реальному тренду (по показателям RMSE и R^2) для некоторых моделей, например, в случае **SVM** и **k-NN**.

Несмотря на это, внутренние показатели кросс-валидации (CV MSE) в условиях гибридной аугментации были значительно выше, что свидетельствует о переобучении модели на синтетических кластерах при крайне малом количестве оригинальных точек. Наоборот, **Residual Bootstrap**, благодаря использованию эмпирических остатков от реальной модели, способствовал более стабильному обобщению.

Таким образом, при экстремально малых выборках (до 10 наблюдений) предпочтение следует отдавать **Residual Bootstrap**, как более устойчивому подходу. Тем не менее, **гибридная аугментация** демонстрирует потенциал в улучшении структурной интерпретируемости и согласованности предсказаний в отдельных сценариях, что оправдывает её дальнейшее использование при более сбалансированных наборах.

Сценарий 2 (4×4)

Целью эксперимента было сравнение качества моделей машинного обучения при генерации синтетических данных в сеточной структуре 4×4 с использованием двух методов аугментации: **Random Forest** **Residual Bootstrap** и гибридного KMeans–SMOTENC. Для обучения также использовались четыре модели: **Random Forest**, **XGBoost**, **Support Vector Machine** и **k-NN** (рис. 11).

По результатам тестирования на 10 выколотых точках выявлено, что аугментация на основе остаточного бутстрэппинга демонстрирует преимущество по метрикам MAE и RMSE во всех моделях, за исключением коэффициента корреляции в **SVM**, где гибридный подход обеспечил лучший результат. **Гибридная аугментация**, несмотря на несколько худшие метрики MAE/RMSE, показала более высокое качество внутренней кросс-валидации в случае **k-NN** и **SVM**, что может свидетельствовать о её потенциале при других параметрах сетки.

В условиях уменьшенного обучающего набора (15 точек) исследовалось влияние различных методов аугментации на точность восстановления в задаче регрессии. Использовались те же четыре модели (Random Forest, XGBoost, SVM, k-NN) с двумя подходами синтетической генерации данных: RF Residual Bootstrap и гибридный KMeans–SMOTENC.

При снижении объёма обучающих данных общий уровень ошибок вырос, однако модели **XGBoost** и **Random Forest** с **RF-аугментацией** сохранили хорошие метрики, особенно по R^2 и MAE. При этом гибридная аугментация обеспечила значительно более низкие значения ошибки кросс-валидации, особенно в **XGBoost** и **k-NN**, что может указывать на лучшую обобщающую способность.

В условиях экстремального дефицита обучающих данных (всего 7 точек) проведена оценка устойчивости моделей и методов аугментации. Как и ранее, применялись два подхода к генерации дополнительных данных – **Residual Bootstrap** (на основе RF) и **Гибридный (KMeans + SMOTENC)**.

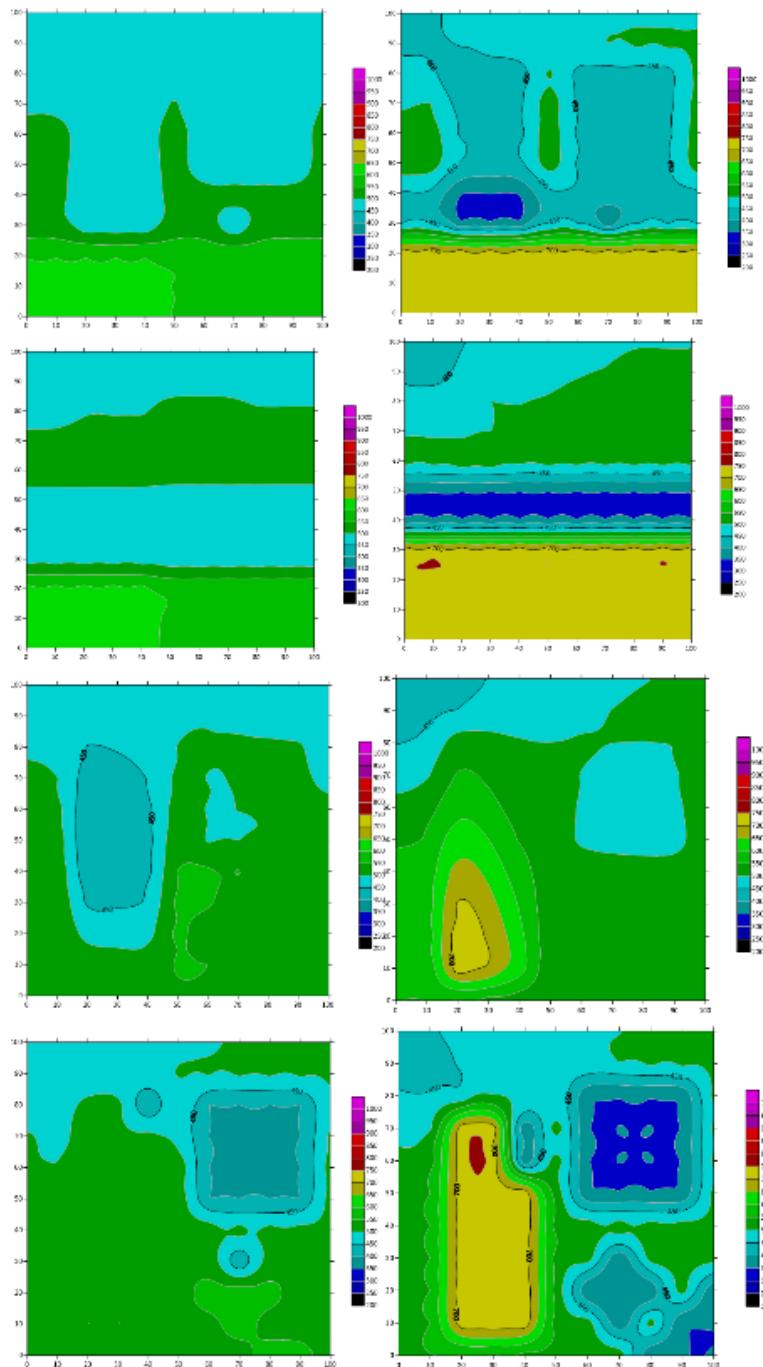


Рис. 10. Сравнительный анализ моделей машинного обучения и аугментации данных (Random Forest, XGBoost, SVM и kNN, первая RF ауг. вторая гибридная ауг.).

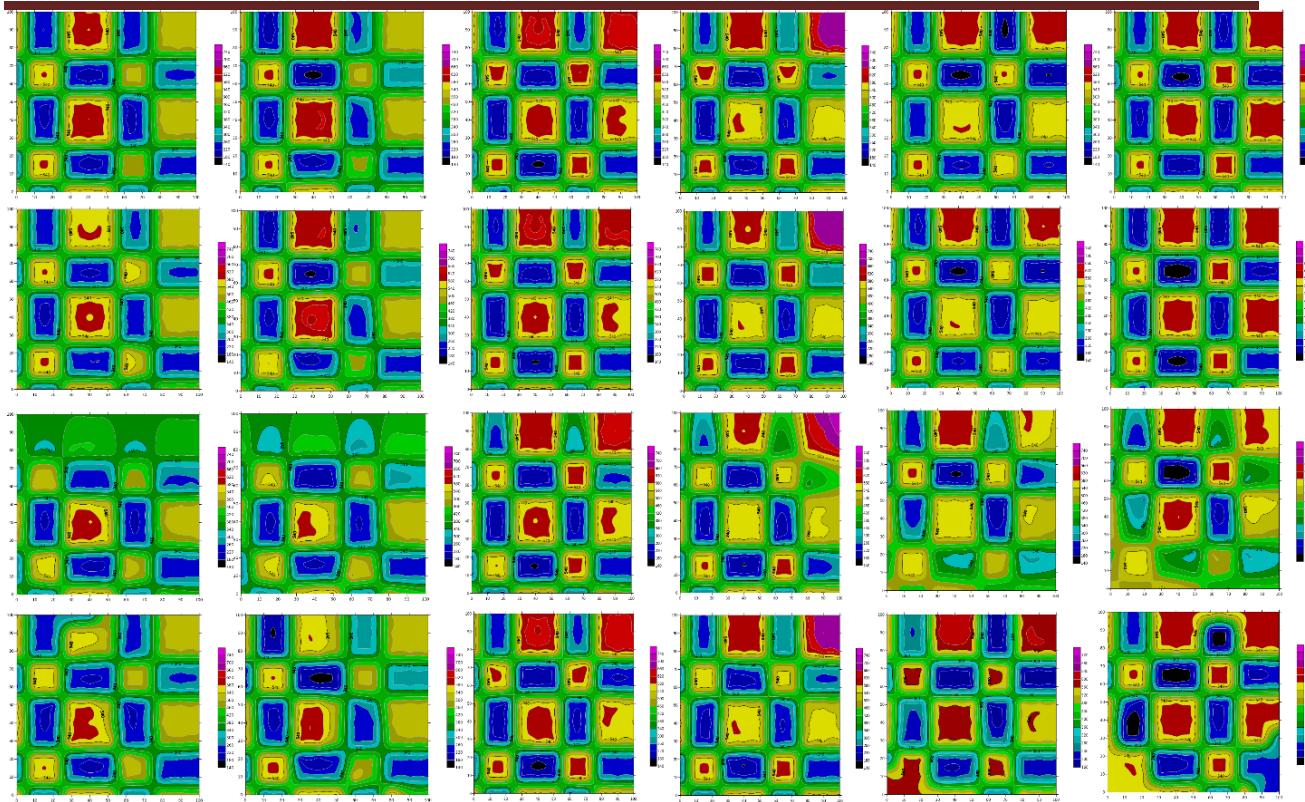


Рис. 11. Сравнительный анализ моделей машинного обучения и аугментации данных (25, 15 и 7 точек обучения).

Сценарий 2 (8×8)

Для исследования влияния увеличенной сеточной структуры на качество моделирования рассмотрена раскладка шахматной доски размером 8×8. В отличие от предыдущего эксперимента с раскладкой 4×4, увеличение размерности сетки потребовало пересмотра параметров дискретизации, в частности, выбора шага для определения пространственных координат. Ранее использовался шаг 10 по осям X и Y, однако в условиях более сложной структуры данных он оказался недостаточным для корректного захвата пространственных зависимостей. В связи с этим были сопоставлены три варианта шага – 1, 5 и 10 – с целью определения оптимального значения, обеспечивающего баланс между детализацией данных и устойчивостью моделей (рис. 12).

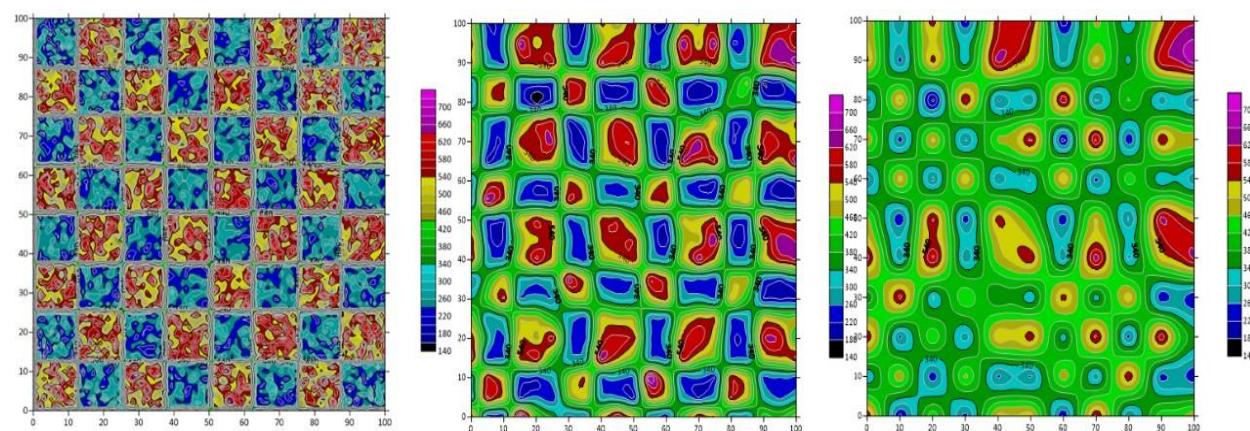


Рис. 12. Исходная карта с шагом дискретизации 1, 5 и 10.

Выбор шага исследовался как параметр, влияющий на частотную фильтрацию данных при моделировании. Шаг 1 обеспечивает максимальную детализацию, фиксируя мелкие вариации в

данных, но может приводить к избыточной чувствительности, к шуму и переобучению. Шаг 10, напротив, упрощает структуру данных, потенциально теряя ключевые пространственные зависимости. Шаг 5 рассматривался как компромиссный вариант, способный захватывать основные зоны пространственных вариаций без избыточной детализации.

Оценка производилась по метрикам MAE, RMSE, коэффициенту корреляции и R^2 на тестовом наборе из 10 точек. Внутренняя кросс-валидация (CV MSE) использовалась для анализа обобщающей способности моделей. Шаг дискретизации рассматривался как параметр частотной фильтрации, влияющий на способность моделей воспроизводить пространственные тренды без переобучения или избыточного сглаживания.

Снижение количества обучающих точек до 15 привело к общему увеличению ошибок по сравнению с экспериментом с 25 точками, что ожидаемо в условиях ограниченного объема данных (рис. 13).

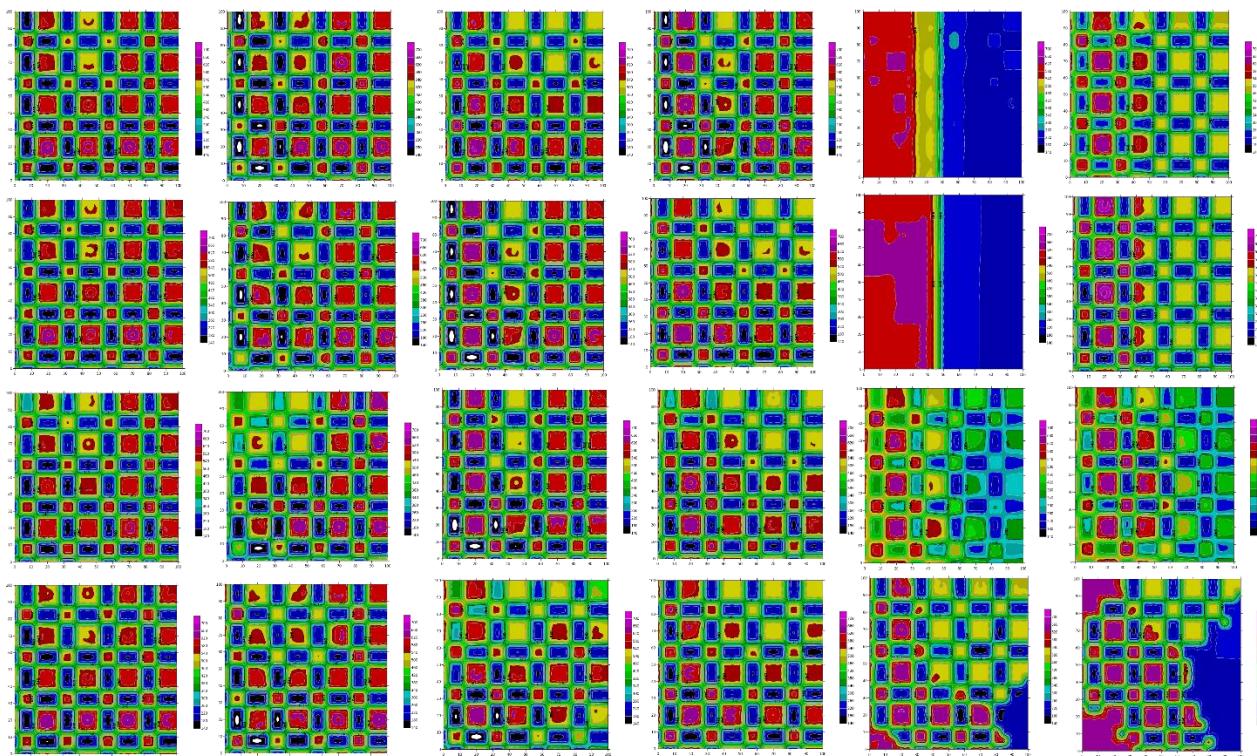


Рис. 13. Сравнительный анализ моделей машинного обучения и аугментации данных (25, 15 и 7 точек обучения).

Среди методов аугментации **Random Forest Residual Bootstrap** неизменно демонстрировал минимальные ошибки и высокую стабильность, особенно в паре с **XGBoost**. **Гибридный подход KMeans-SMOTENC** показал хорошие результаты, но оказался менее эффективным в контексте сетки 8×8 , особенно в случае **SVM** и **k-NN**, из-за увеличения ошибок и снижения устойчивости. Таким образом, для задач с повышенной размерностью данных и ограниченным количеством наблюдений рекомендуется использовать **Random Forest Residual Bootstrap**, в то время как гибридный подход может оказаться более подходящим для сценариев с более сбалансированными наборами данных или фокусом на локализованных кластерах.

Сценарий 2 (16×16)

Для исследования влияния дальнейшего увеличения размерности сеточной структуры на качество моделирования рассмотрена раскладка шахматной доски размером 16×16 . Увеличение количества зон привело к уменьшению их размеров, что потребовало пересмотра шага дискретизации для корректного захвата пространственных зависимостей. В предыдущих экспериментах с раскладками 4×4 и 8×8 оптимальными были шаги 10 и 5 соответственно, однако для более мелкой сетки 16×16 рассмотрены шаги 1, 2, 5 и 10 (рис. 14). После моделирования на

исходных значениях с использованием 25 точек обучения шаг 2 был выбран как оптимальный, поскольку он обеспечивал достаточную детализацию для захвата локальных пространственных вариаций, избегая избыточной чувствительности к шуму (шаг 1) и чрезмерного сглаживания (шаги 5 и 10).

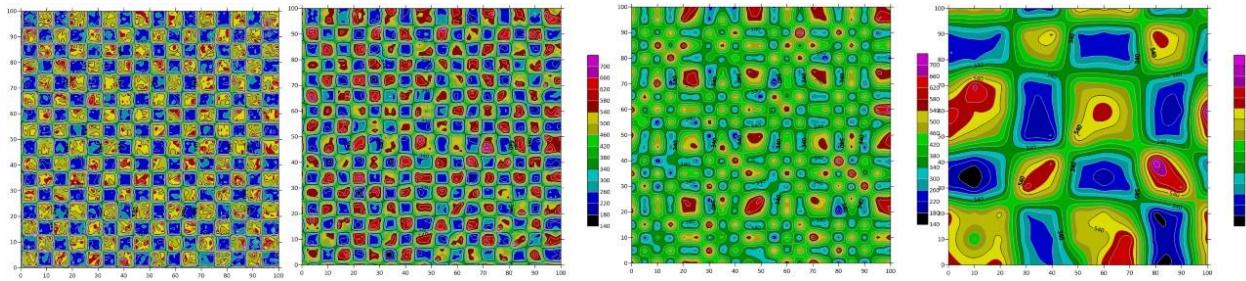


Рис. 14. Исходная карта с шагом дискретизации 1, 2, 5 и 10.

Эксперимент с раскладкой 16×16 подтвердил, что выбор шага дискретизации остаётся критически важным для моделирования пространственных данных. Шаг 2 был выбран как оптимальный, поскольку он обеспечивает достаточную детализацию для захвата локальных пространственных вариаций, избегая избыточной чувствительности к шуму (шаг 1) и потери ключевых зависимостей (шаги 5 и 10). Это подтверждает гипотезу о том, что шаг дискретизации действует как частотный фильтр, определяющий баланс между локальными и глобальными характеристиками данных. (рис. 15).

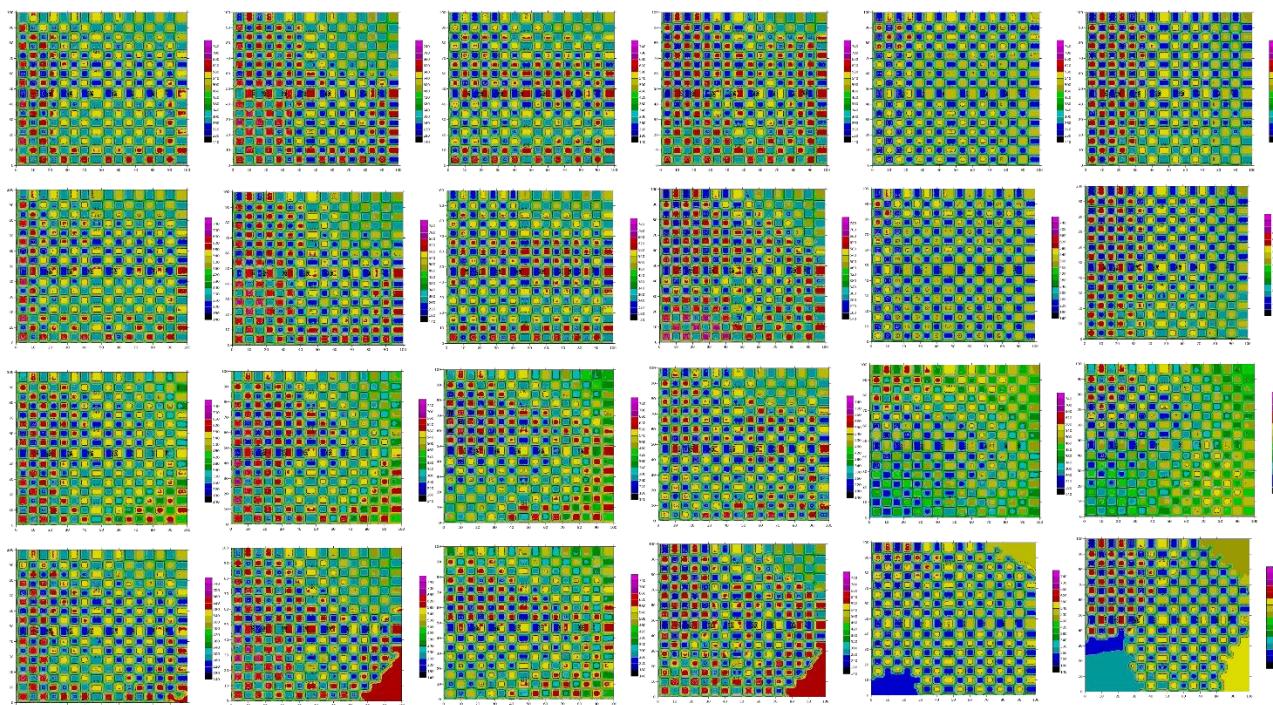


Рис. 15. Сравнительный анализ моделей машинного обучения и аугментации данных (25, 15 и 7 точек обучения).

Гибридная аугментация KMeans-SMOTEENC показала превосходство в условиях мелкозернистой сетки, обеспечивая более низкие ошибки и лучшую воспроизводимость пространственных трендов, особенно в сочетании с моделью **Random Forest**. **Random Forest Residual Bootstrap**, хотя и демонстрировал высокую корреляцию, был менее эффективен из-за повышенных ошибок, что может быть связано с ограниченной способностью метода сохранять локальные зависимости в условиях увеличенной размерности. Высокие значения CV MSE для

гибридной аугментации указывают на необходимость осторожного применения этого метода при ограниченных данных, чтобы избежать переобучения.

Эксперименты с шахматными досками (4×4 , 8×8 , 16×16) показали, что выбор шага дискретизации и метода аугментации существенно влияет на качество моделирования при ограниченных данных. Для раскладок 4×4 и 8×8 оптимальными были шаги 10 и 5, а для 16×16 – шаг 2, что подтверждает роль шага как частотного фильтра, балансирующего локальные и глобальные зависимости. **Random Forest Residual Bootstrap** доминировал при малых выборках (7-15 точек), особенно с k-NN и XGBoost, обеспечивая минимальные ошибки и устойчивость. **Гибридная аугментация KMeans–SMOTENC** показала преимущество при 25 точках и более сбалансированных данных, но была склонна к переобучению при экстремальном дефиците данных (см. рис. 15).

Связь с первым экспериментом подтверждает, что **Residual Bootstrap** эффективен для малых выборок в задачах с пространственными данными, тогда как гибридный подход перспективен для более крупных и сбалансированных наборов, требующих учёта локальных кластеров. Наилучшие результаты в большинстве сценариев достигались с **XGBoost** и **k-NN** при использовании **Residual Bootstrap**, подчёркивая их устойчивость в условиях ограниченных данных.

Сценарий 3

В рамках третьего эксперимента исследовалось качество моделирования на шахматной доске размером 5×5 с пятью зонами, в отличие от двух зон в предыдущих экспериментах с раскладками 4×4 , 8×8 и 16×16 . Учитывая разрешающую способность карты, шаг дискретизации был установлен равным 10, что позволило эффективно захватывать пространственные зависимости без необходимости дополнительного анализа различных шагов. Обучающая выборка из 25 точек была расширена до 1000 синтетических наблюдений с использованием двух методов аугментации: Random Forest Residual Bootstrap и гибридного подхода KMeans–SMOTENC. Четыре алгоритма машинного обучения – Random Forest, XGBoost, Support Vector Machine (SVM) и k-Nearest Neighbors (k-NN) – были протестированы на 10 независимых выколотых точках с использованием метрик MAE (средняя абсолютная ошибка), RMSE (среднеквадратичная ошибка), коэффициента корреляции, коэффициента детерминации (R^2) и внутренней кросс-валидации (CV MSE) (рис. 16).

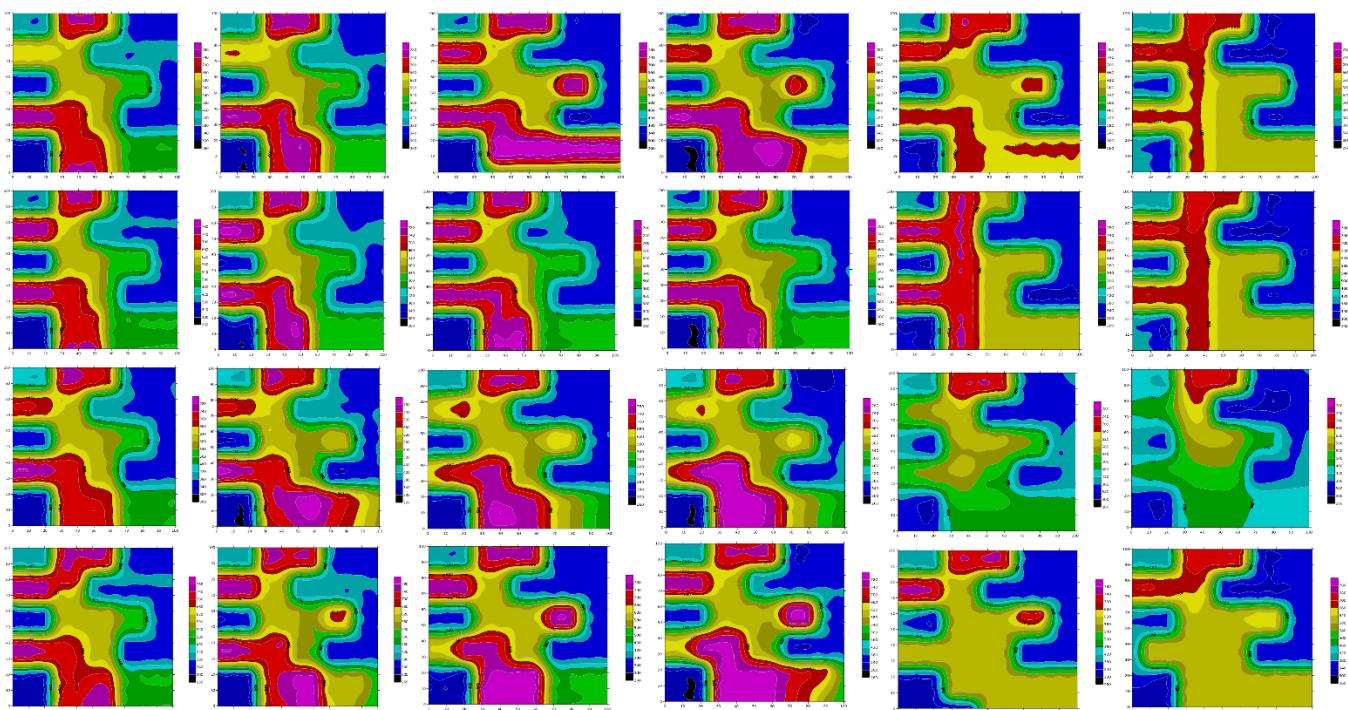


Рис. 16. Сравнительный анализ моделей машинного обучения и аугментации данных (25, 15 и 7 точек обучения).

Random Forest Residual Bootstrap оказался наиболее эффективным методом аугментации, особенно в сочетании с **XGBoost**, демонстрируя минимальные ошибки и высокую воспроизводимость (MAE: 24.94, RMSE: 30.21, R^2 : 0.96). **Гибридная аугментация KMeans–SMOTENC** показала худшие результаты, особенно для **XGBoost** и **SVM**, что может быть связано с трудностями учёта большего количества зон в условиях локальной интерполяции.

Сравнивая с предыдущими экспериментами (4×4 , 8×8 , 16×16) и первым экспериментом, можно отметить, что **Random Forest Residual Bootstrap** сохраняет своё преимущество при достаточном количестве обучающих точек (25), как и в первом эксперименте, где он доминировал для малых выборок. Гибридная аугментация, напротив, менее устойчива в условиях увеличенного количества зон, что подтверждает её предпочтительность для более сбалансированных данных и локальных кластеров, как было отмечено в экспериментах с раскладкой 16×16 .

Влияние пространственного охвата обучающей выборки на корректность аугментации и предсказаний

В рамках дополнительного эксперимента проведена оценка устойчивости и ограничений методов аугментации и машинного обучения в условиях пространственно неоднородного распределения зон интереса при малом объёме исходных данных. Для анализа были заданы четыре геометрические зоны: фоновая область, квадрат, прямоугольник и окружность. Особое внимание уделялось последней, как наименее представленной по площади и, как следствие, наименее охваченной обучающими точками.

В условиях дефицита данных (всего 15 точек обучения) использовались два подхода к генерации дополнительных данных: бутстрэппинг остатков на основе случайного леса (Residual Bootstrap) и гибридный метод KMeans + SMOTENC. Для построения моделей выбраны два алгоритма: XGBoost (в связке с гибридной аугментацией) и SVR (в связке с RF-аугментацией).

На первом этапе, при отсутствии точек, попадающих в зону окружности, ни одна из моделей не смогла адекватно интерполировать эту область. В случае XGBoost наблюдалась либо полная потеря зоны окружности, либо её подмена типичными значениями фоновой области. Модель SVR показала более устойчивое поведение, однако также не смогла выявить уникальные характеристики окружности. Количественные метрики подтверждают это: для XGBoost MAE составило 97.12, RMSE – 118.76, R^2 – 0.54, а для SVR – MAE 65.77, RMSE 115.16, R^2 – 0.57. Эти значения демонстрируют умеренную точность моделей, но с выраженным локальными искажениями (рис. 17).

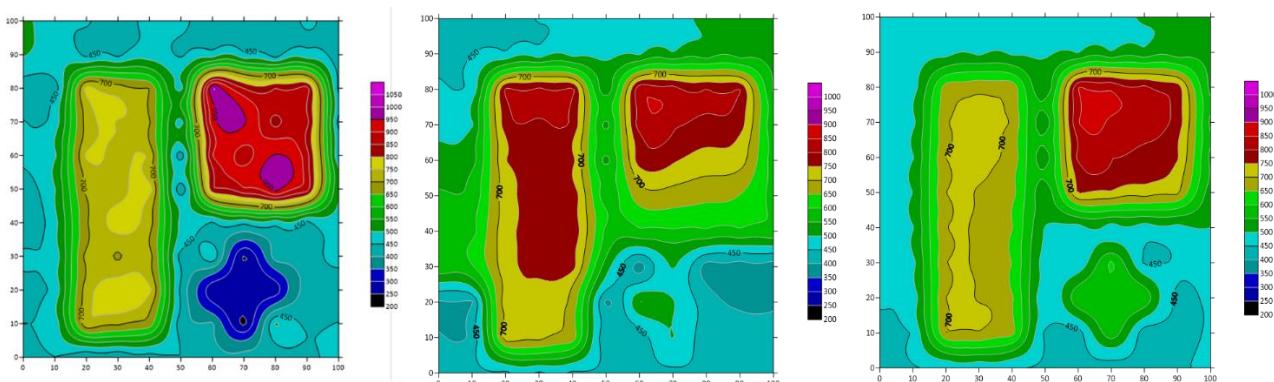


Рис. 17. Первая – Исходная карта, вторая – XGBoost, третья – SVM.

Добавление одной обучающей точки, попадающей внутрь окружности, значительно улучшило результат для SVR: коэффициент детерминации вырос до 0,90, коэффициент корреляции – до 0,97. Напротив, для XGBoost метрики ухудшились, R^2 стал отрицательным (-0,11), что указывает на деградацию предсказаний и возможное переобучение. Данный результат

свидетельствует о высокой чувствительности XGBoost к локальному перекосу в распределении классов после аугментации (рис. 18).

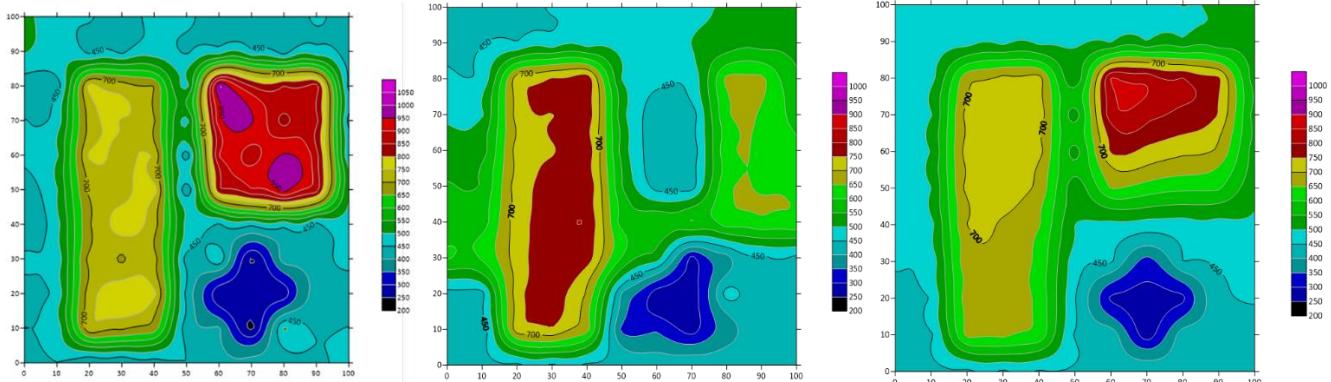


Рис. 18. Первая – Исходная карта, вторая – XGBoost, третья – SVM.

При включении двух точек в зону окружности ситуация стала неоднозначной. Несмотря на то, что SVR сохранила высокие показатели ($R^2 = 0,82$), визуальный анализ предсказанных карт показал интерполяционное «смешение» значений между окружностью и фоном. XGBoost, в свою очередь, продемонстрировал дальнейшее ухудшение качества: RMSE вырос до 204,18, R^2 упал до -0,35, а геометрическая структура других зон оказалась искажённой, что свидетельствует о переобучении модели и потере устойчивости при неравномерном распределении классов после аугментации (рис. 19).

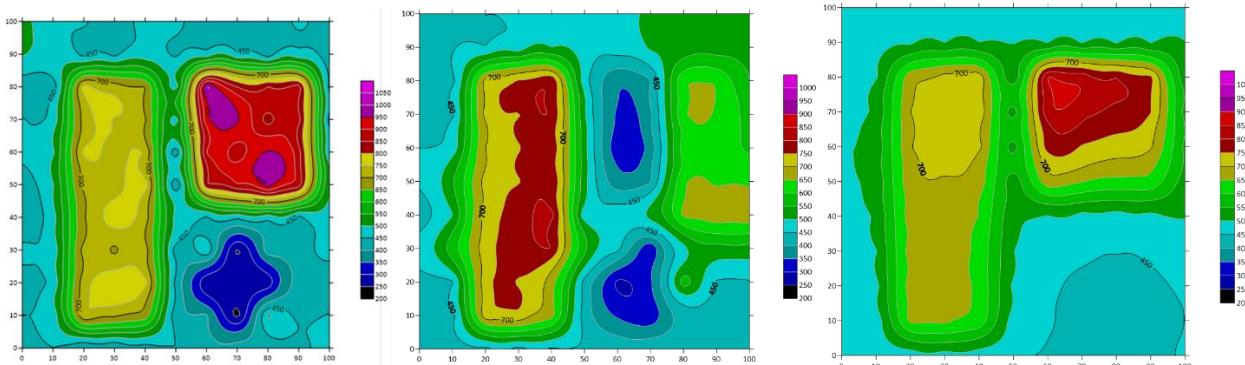


Рис. 19. Первая – Исходная карта, вторая – XGBoost, третья – SVM.

Наиболее выраженный прирост качества был достигнут после добавления трёх точек, равномерно покрывающих зону окружности. В этом случае SVR достиг $R^2 = 0,91$ и $MAE = 39,25$, что свидетельствует о близкой к оптимальной реконструкции пространственного паттерна. Аналогично, XGBoost также показал высокую точность: $R^2 = 0,85$, $MAE = 46,17$, несмотря на ранее наблюдавшую нестабильность (рис. 20).

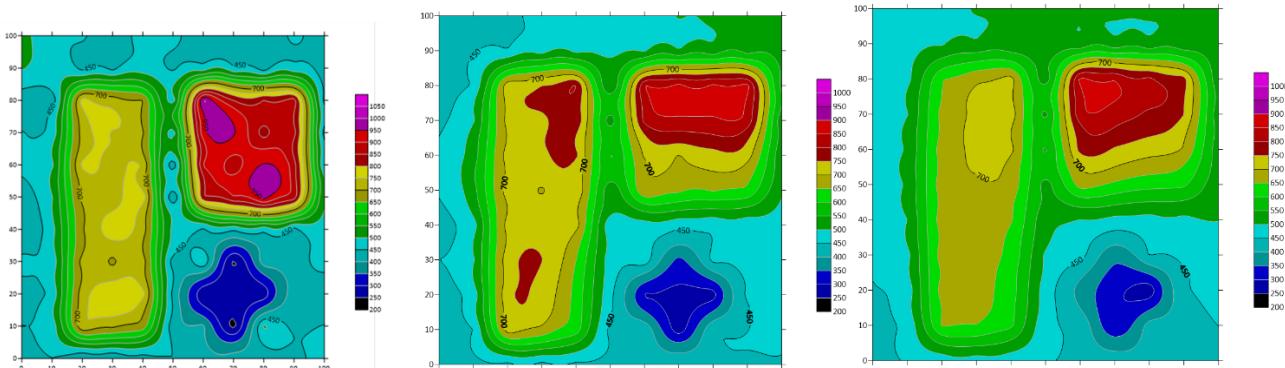


Рис. 20. Первая – Исходная карта, вторая – XGBoost, третья – SVM.

Таким образом, результаты подтверждают, что даже при использовании продвинутых методов аугментации и ML-интерполяции, ключевым фактором остаётся репрезентативность исходной обучающей выборки. Для успешного восстановления всех зон необходимо обеспечить хотя бы минимальное присутствие обучающих точек в каждой из них. В случае данного эксперимента, три точки, охватывающие зону окружности, оказались достаточными для формирования структур в предсказаниях обеих моделей. Это позволяет сделать вывод о необходимости поддержания сбалансированного пространственного охвата всех целевых структур, особенно в условиях дефицита данных.

Заключение

Исследование показало, что интеграция методов синтетической аугментации данных и алгоритмов машинного обучения может существенно повысить качество и стабильность интерполяции Vs30 в условиях дефицита исходных измерений. Residual Bootstrap на базе случайного леса продемонстрировал наилучшие метрики MAE и RMSE при экстремально малых выборках (7-15 точек), обеспечивая более равномерное восполнение пространственных пропусков без сильного искажения локальных вариаций.

Гибридный подход KMeans–SMOTENC оказался наиболее эффективным при достаточном количестве априорных точек (≥ 25), где он обеспечивал высокую внутреннюю согласованность данных и точное восстановление границ геологических объектов, особенно в задачах с более сложной сеточной структурой (16×16). При этом ключевым фактором успешности ML-интерполяции остаётся репрезентативность исходной выборки и равномерный охват всех целевых зон.

На основании проведённых экспериментов рекомендуется следующая практическая стратегия: для малых объёмов данных (до 15 точек) применять аугментацию Residual Bootstrap совместно с XGBoost или SVM, а при наличии более 20-25 точек – рассматривать гибридную схему KMeans–SMOTENC в сочетании с Random Forest или XGBoost. Это обеспечивает баланс между устойчивостью к шуму, точностью локальных предсказаний и общей воспроизводимостью пространственных закономерностей.

Перспективы дальнейших исследований включают адаптацию методов аугментации к учёту дополнительных инженерно-геологических признаков (рельеф, литология), а также разработку алгоритмов активного отбора точек для оптимизации полевых изысканий на основе результатов синтетического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. - М.: Светоч Плюс, 2010. - 304 с.
2. Алешин А.С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2011. - Вып. 38. - № 4. - С.15-28.
3. Исмаилов В.А. и др. Методическое руководство по детальному сейсмическому районированию и микрорайонированию для градостроительного планирования. - Т.: Umid Design, 2023. - 154 с.
4. РСН 60-86. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. - М.: Стройиздат, 1986. - 24 с.
5. Создание карт сейсмического микрорайонирования городов Андижан, Наманган и Фергана масштаба 1:25000: Отчет о научно-исследовательской работе (Раздел: Сейсмическое микрорайонирование г. Ферганы). - Т.: Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, 2022. - 200 с.
6. Allen T.I., Wald D.J. Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions (Vs30) and Amplification Around the Globe // U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1357. - 69 р.
7. Matsuoka M. Amplification Capability and Geomorphologic Classification // Presentation materials and report. - Tokyo Institute of Technology, 2012.
8. Wu C.F.J. Jackknife, Bootstrap and other resampling methods in regression analysis // The annals of statistics. - 1986. - 14 (1). - P. 126-176.

9. Xu L. et al. Data Augmentation techniques in machine learning: a survey // Journal of Big Data. - 2014. - 1 (1). - P. 1-30.
10. Fernández A., García S., Herrera F., Chawla N.V. SMOTE for learning from imbalanced data: progress and challenges, marking the 15-year anniversary // Journal of artificial intelligence research. - 2018. - 61. - P. 863-905.
11. Bishop C.M. Training with Noise is Equivalent to Tikhonov regularization // Neural computation. - 1995. - 7 (1). - P. 108-116.
12. Kurowicka D., Joe H. Dependence modeling: vine copula handbook // World Scientific. - 2010.
13. Nowok B., Raab G.M., Dibben C. Synthpop: bespoke creation of synthetic data in R // Journal of Statistical Software. - 2016. - 74 (11). - P. 1-26.
14. Chawla et al. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique // Journal of artificial intelligence research. - 2002. 16. - P. 321-357.
15. Guo & Viktor. Learning from Imbalanced Data Sets with many clusters // Proceedings of ICDM. - 2004. - P. 1-12.
16. Юсупов Д.Д., Халбаев С.Б., Кодиров Ж.З., Закирова О.Ф., Мамарозиков Т.У. Интерполяция Vs30 в условиях дефицита данных: инженерно-геологическое моделирование и перспективы развития // Институт сейсмологии им. Г.О. Мавлянова АН РУз; Филиал РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина в г. Ташкенте.

Vs30 ning muhandislik-geologik interpolatsiyasi: ma'lumotlar tanqisligi sharoitida sintetik augmentatsiya va mashinaviy o'rGANISH

D.D. Yusupov, I.M. Alimuxamedov, S.B. Xalbaev, J.Z. Qodirov, O.F. Zakirova, T.U. Mamarozikov

Annotatsiya. Maqolada dala o'chovlari soni cheklangan sharoitda Vs30 parametrini interpolatsiya qilish sifatini oshirish maqsadida fazoviy ma'lumotlarni sintetik augmentatsiya qilishning Residual Bootstrap usuli va KMeans-SMOTENC gibriddi sxemasi ko'rib chiqiladi. Har ikkala yondashuvning ishlash tamoyillari tavsiflanadi: Random Forest asosidagi residual bootstrap tasodifiy o'rmon modelining bashoratlariga empirik qoldiqlarni qo'shish orqali boshlang'ich ma'lumotlar tuzilmasini saqlab qoladi, gibriddi sxema esa global KMeans klasterlashini lokal SMOTENC interpolatsiyasi bilan birlashtiradi. Turli modellashtirish stsenariylari va nuqtalar zichliklari bo'yicha ularning mashinaviy o'qitish algoritmlari bilan o'zaro ta'sirining taqqoslamalni tahlili shuni ko'rsatadi, kichik tanlovlarida (15 ta nuqtadan kam) MAE va RMSE bo'yicha eng kichik xatolarni ta'minlovchi Residual Bootstrap yondashuvi samaraliroq, nisbatan reprezentativ ma'lumotlar to'plamida (≥ 25 nuqta) esa lokal tuzilmani yaxshiroq qayta tiklash hisobiga KMeans-SMOTENC gibriddi ustunlik qiladi. Tanlov hajmi va bir jinsligiga qarab augmentatsiya usulini tanlashning adaptiv strategiyasi taklif etiladi, bu esa ma'lumotlar tanqisligi sharoitida Vs30 interpolatsiyasining aniqligi va barqarorligini sezilarli darajada oshirishga imkon beradi.

Kalitli so'zlar. Vs30, seysmik mikrorayonlashtirish, ML-interpolyatsiya, augmentatsiya, Random Forest, XGBoost, SVM, k-NN.

Vs30 engineering and geological interpolation: synthetic augmentation and machine learning in conditions of data scarcity

D.D. Yusupov, I.M. Alimukhamedov, S.B. Khalbaev, Zh.Z. Kodirov, O.F. Zakirova, T.U. Mamarozikov

Abstract. The paper considers synthetic augmentation of spatial data using the Residual Bootstrap method and a hybrid KMeans-SMOTENC scheme in order to improve the interpolation quality of the Vs30 parameter under a limited number of field measurements. The working principles of both approaches are described: RF-based residual bootstrap preserves the structure of the original data by adding empirical residuals to random forest predictions, while the hybrid scheme combines global KMeans clustering with local SMOTENC interpolation. A comparative analysis of their interaction with machine learning algorithms in different modelling scenarios and for various point densities shows that, for small samples (fewer than 15 points), the Residual Bootstrap approach is more effective, providing minimal MAE and RMSE errors, whereas for more representative datasets (≥ 25 points) the KMeans-SMOTENC hybrid outperforms due to better reproduction of the local structure. An adaptive strategy for choosing the augmentation method depending on the size and homogeneity of the original sample is proposed, which makes it possible to significantly increase the accuracy and robustness of machine-learning-based Vs30 interpolation under data-scarce conditions.

Key words. Vs30, seismic microzonation, ML interpolation, augmentation, Random Forest, XGBoost, SVM, k-NN.

**ПЛАНИРОВАНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ТОЧЕК ДЛЯ
ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПАРАМЕТРА Vs30
МЕТОДОМ ДИСКОВОГО СЕМПЛИРОВАНИЯ ПУАССОНА**

**Юсупов Д.Д.^{1,2}, Алимухамедов И.М.¹, С.Б. Халбаев^{2,1}, Ж.З. Кодиров²,
О.Ф. Закирова², Т.У. Мамарозиков^{1,2}**

E-mail: diyorbek.yusuopov@gmail.com

¹Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, Ташкент, Республика Узбекистан

²Филиал РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина в г. Ташкенте, Республика Узбекистан

Аннотация. Рассмотрен подход к планированию размещения наблюдательных точек для интерполяции параметра Vs30 на основе дискового семплирования Пуассона. В качестве тестовой площадки использована модельная геологическая карта размером 100×100 ячеек с четырьмя литологическими зонами, на которой для плотностей 7 и 15 точек проведено сравнение трёх схем размещения: случайной, регулярной сетки и пуассоновского дискового семплирования. Интерполяция выполнена классическим методом Kriging и RF-bootstrap-аугментацией, а также ML-модели (SVR, XGBoost, k-NN) при экстремально малом объёме априорных данных. Результаты показывают, что дисковое семплирование Пуассона обеспечивает наиболее равномерное покрытие, сокращает «провалы» и артефакты в картах Vs30 и при этом демонстрирует более высокую устойчивость и точность восстановления по метрикам MAE, RMSE и коэффициентам корреляции по сравнению с классическими схемами размещения.

Ключевые слова. Vs30, сейсмическое микрорайонирование, Poisson Disk Sampling, ML-интерполяция, аугментация, Random Forest, XGBoost, SVM, k-NN.

Введение. Параметр Vs30, отражающий среднюю скорость распространения сдвиговых волн в верхних 30 м разреза, является базовым показателем при инженерно-сейсмической оценке территорий и микрорайонировании особо ответственных объектов (например, атомных станций, гидротехнических сооружений, мостов и стратегических промышленных комплексов). В таких зонах планирование геофизических изысканий строго регламентируется условиями безопасности, доступности участков и необходимостью минимизации времени работ, что накладывает жёсткие ограничения на количество и размещение точек измерений.

При недостатке полевых данных для построения Vs30-карт широко применяются методы пространственной интерполяции (геостатистический Kriging) и подходы машинного обучения (Random Forest, SVR, XGBoost). Однако эффективность этих методов критически зависит от геометрии заложения точек: классические схемы – случайная выборка или равномерная сетка – при малом количестве измерений либо создают ненужную кластеризацию, либо оставляют «провалы» в покрытиях литологических тел с резкими градиентами параметров.

Для устранения указанных недостатков в данной работе реализован и исследован алгоритм дискового семплирования Пуассона (Poisson Disk Sampling). Метод основан на введении минимального межточечного расстояния r и разбиении исследуемой области на вспомогательную сетку ячеек размера $r\sqrt{2}$. Процедура генерации включает поэтапный отбор «активных» точек и случайное размещение кандидатов в кольцевой зоне вокруг них с обязательной проверкой отсутствия соседних точек в пределах радиуса r .

Ключевым достоинством предлагаемого подхода является функциональная возможность обхода «особых» участков на специальных объектах за счёт наличия радиуса обслуживания каждой точки. В случае попадания на территорию, занятую техническими или охранными зонами, измерение может быть выполнено в любой альтернативной точке внутри круга радиусом r без нарушения равномерности покрытия. Данная особенность значительно упрощает планирование и

логистику полевых работ, обеспечивает стабильность интерполяции и снижает риск искажений при восстановлении параметра Vs30 в условиях ограниченного доступа и дефицита данных.

Практическое исследование алгоритма проведено на модельной карте размером 100×100 ячеек с четырьмя условными литологическими зонами. При плотностях 25, 15 и 7 точек схема пуассоновского дискового семплирования сравнивалась с классическими подходами (случайным и регулярным размещением) и оценивалась по метрикам MAE, RMSE, MAPE, коэффициентам корреляции и детерминации для ML-интерполяции с RF-bootstrap-аугментацией. Результаты демонстрируют, что предложенный алгоритм обеспечивает более устойчивое и точное восстановление Vs30-поля при дефиците данных, что делает его перспективным инструментом для планирования сейсморазведочных наблюдений при наличии специальных и особо ответственных объектов.

Проблематика

Одна из ключевых задач инженерно-сейсмического районирования – построение достоверных карт распределения параметра Vs30. Именно этот параметр определяет класс грунтов по сейсмической шкале NEHRP и используется для оценки сейсмической опасности, расчёта отклика площадок и проектирования конструкций. Однако в реальных условиях, особенно в пределах крупных городских агломераций, обеспечить нормативно предписанное количество измерений затруднительно.

В этом контексте особую актуальность приобретает задача оптимального планирования и размещения точек наблюдений на этапе проектирования сейсморазведочных работ. Требуется подход, который бы не только обеспечивал равномерное покрытие территории при ограниченном количестве замеров, но и учитывал бы реальные ограничения доступа. Особенно это важно при исследовании зон, на которых расположены особо ответственные или ограниченные в доступе объекты (промышленные предприятия, гидротехнические сооружения, объекты с особыми режимами эксплуатации). В подобных случаях отсутствие возможности строго следовать заранее заданной сетке приводит к необходимости адаптивных решений.

Предлагаемый в настоящем исследовании алгоритм дискового семплирования Пуассона решает данную задачу комплексно. Он позволяет сформировать равномерное и разреженное размещение точек с заданным минимальным расстоянием между ними, что снижает риск кластеризации и образования «провалов» в данных. Более того, каждая точка задаётся с учётом радиуса покрытия, внутри которого допустимо перемещение замера, что критически важно в условиях затруднённого доступа. Это обеспечивает гибкость при планировании полевых работ, даёт возможность обхода запретных участков без ущерба для качества интерполяции и минимизирует необходимость пересмотра всей схемы размещения при возникновении локальных препятствий.

Модельная карта с геометрически регулярными литологическими зонами

Для анализа эффективности различных схем размещения наблюдательных точек и последующей интерполяции параметра Vs30 использована модельная геологическая карта размером 100×100 ячеек. Пространственная структура карты формировалась с использованием четырёх геометрически простых объектов: фоновой области, прямоугольника, квадрата и окружности, каждая из которых рассматривалась как самостоятельная литологическая зона со своими скоростными характеристиками (рис. 1).

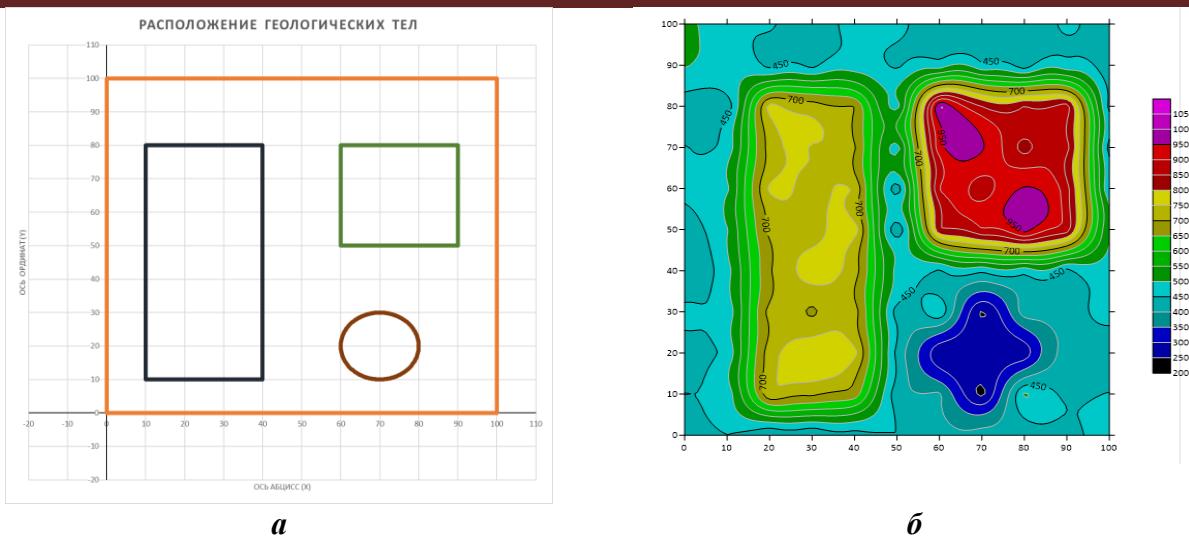


Рис. 1. Моделирование карты Vs30 построением простых геологических фигур. а – геометрическое распределение геологических зон; б – распределение параметров Vs30 по нормальному закону, построение методом Kriging.

Значения Vs30 внутри каждой зоны задавались по нормальному распределению с различными медианами и стандартными отклонениями, отражающими типичные значения для распространённых грунтовых условий. Статистические параметры подобраны с учётом данных по Ферганской долине и классификации NEHRP, что обеспечило реалистичность и воспроизводимость модели.

Такой подход позволил задать контролируемую структуру с чётко очерченными границами между зонами и использовался как эталон для оценки качества интерполяции при варьировании плотности и схем размещения точек. Результирующее поле Vs30, полученное методом Kriging, применялось в дальнейшем для сравнения точности восстановления при использовании различных алгоритмов.

Методика распределения точек на карте

Случайное распределение. В рамках данной стратегии заданное количество точек (45, 35, 25, 15 и 7) размещалось случайным образом по всей исследуемой территории. Пространственное распределение точек для каждого случая представлено на рис. 2.

Полученные конфигурации послужили основой для интерполяции методом обычного крикинга (рис. 3).

При высокой плотности (45 и 35 точек) наблюдается гладкое восстановление пространственного распределения с хорошим покрытием как центральных, так и периферийных зон. Однако с уменьшением количества точек (особенно при 15 и 7) начинают проявляться резкие градиенты, артефакты и недоинтерполированные участки. Это свидетельствует о снижении стабильности и точности пространственного воспроизведения при случайном, но разреженном распределении выборки.

Регулярное распределение. Для обеспечения равномерного покрытия территории точками измерений использован алгоритм разбиения имеющейся карты на ряд ячеек одинакового размера со сторонами Δx и Δy , где $\Delta x = \Delta y$. Данная задача сводится к задаче оптимального дискретного разбиения двумерной карты фиксированного размера на равные ячейки [4] (рис. 4).

Отметим, что подобная методика имеет прямое прикладное значение: в первом приближении она позволяет формировать оптимальные схемы расположения точек для последующего реального планирования изыскательских работ, а также закладывает основу для автоматизации процесса построения сетей точек наблюдений [4].

Таким образом, для каждой плотности основного набора точек дополнительно использовалась неизменная сетка выколотых точек для независимой проверки качества интерполяции [4].

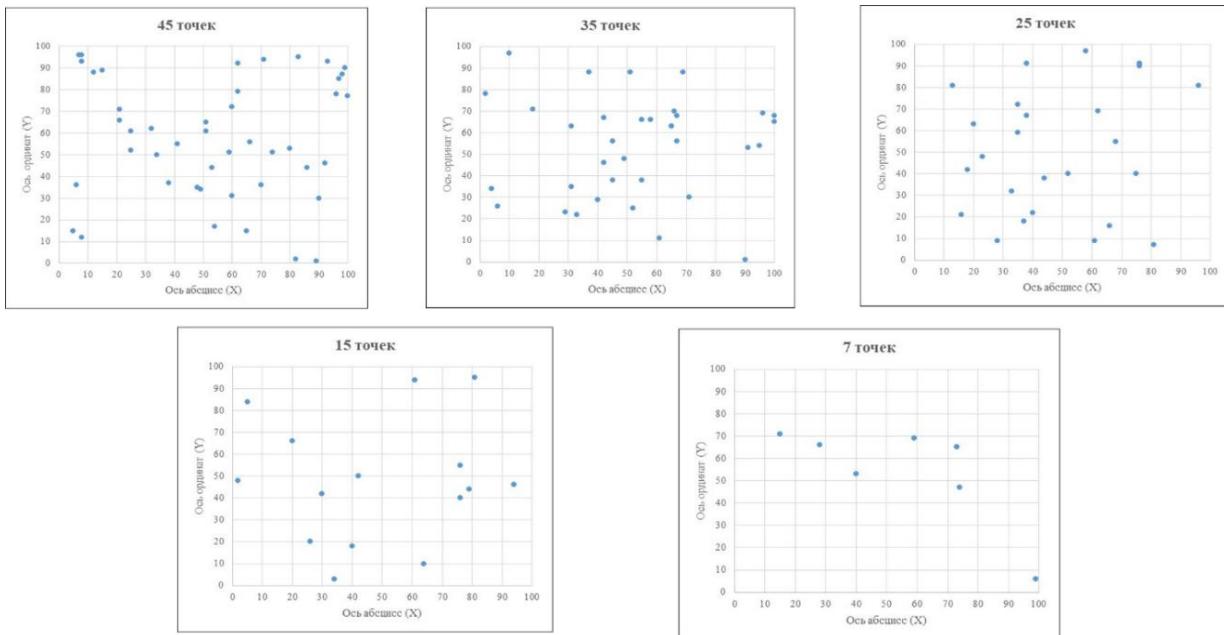


Рис. 2. Пространственное распределение точек на карте при случайном размещении.

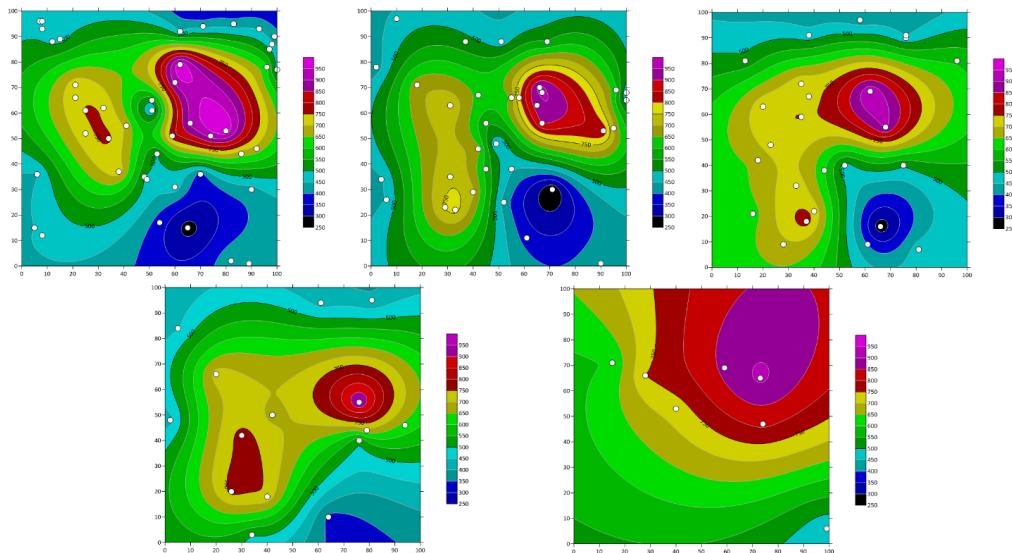


Рис. 3. Результаты интерполяции методом крикинга для случайного распределения точек (от 45 до 7 точек).

При использовании регулярного распределения точек наблюдений (рис. 5) с наличием высокой плотности точек (45 и 35) регулярная сетка обеспечивает равномерное покрытие территории, что позволяет точно воспроизвести пространственное распределение Vs30 с плавными градиентами и чёткими границами литологических зон. Однако при снижении количества точек до 15 и 7 качество интерполяции ухудшается: возникают локальные искажения, резкие перепады значений и участки с недостаточной детализацией, что свидетельствует об ограниченной эффективности регулярной схемы в условиях разреженной выборки.

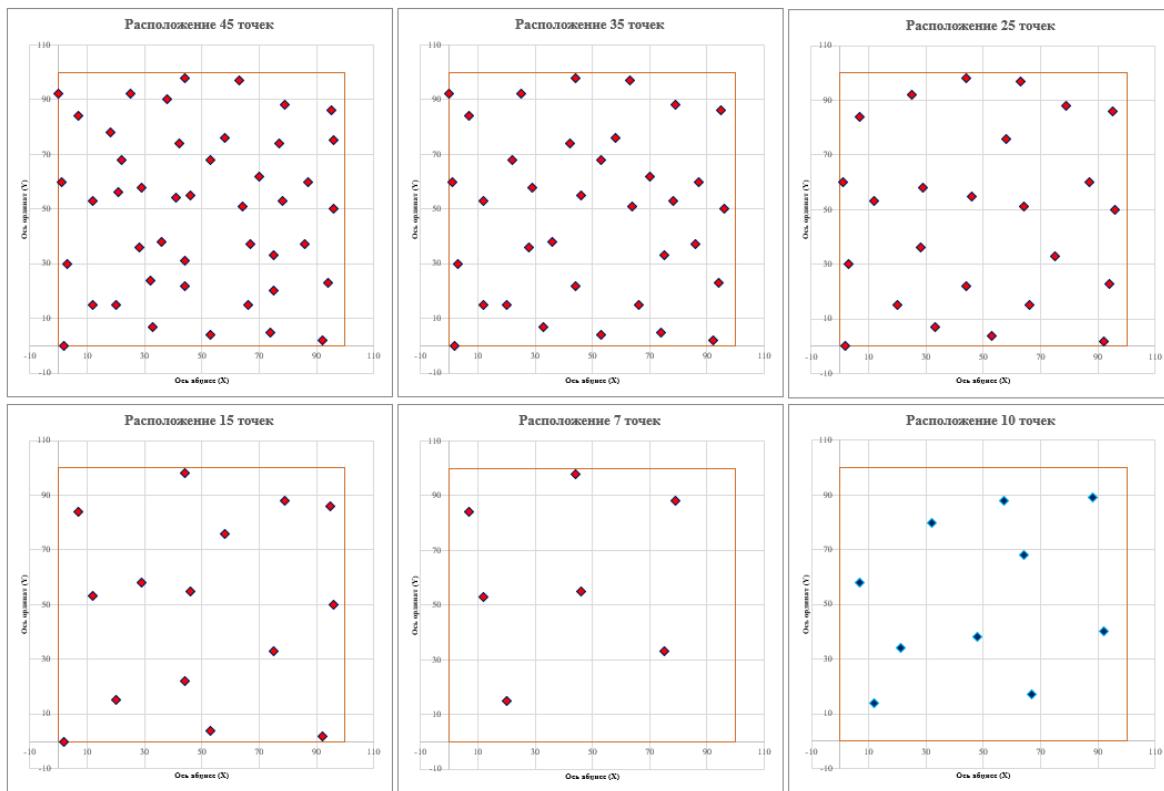


Рис. 4. Алгоритм равномерного покрытия точек наблюдения: 45, 35, 25, 15, 7 точек для выполнения интерполяции, а также 10 точек для валидации.

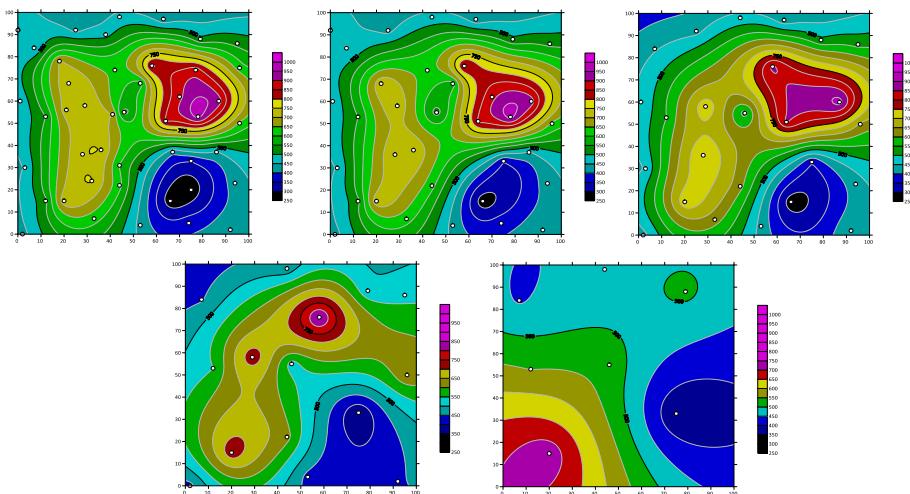


Рис. 5. Результаты крикинг-интерполяции при регулярном распределении точек (от 45 до 7 точек).

Пуассоновское дисковое сэмплирование (Poisson Disk Sampling). Алгоритм пуассоновского дискового сэмплирования основан на идее размещения точек таким образом, чтобы между любыми двумя из них сохранялось минимальное расстояние, задаваемое как параметр, что обеспечивает равномерность покрытия пространства без перекрытий и кластеризации. Пространство представляется в виде двумерного квадрата фиксированного размера, внутри которого создаётся вспомогательная сетка с ячейками размером $r\sqrt{2}$, где r – минимально допустимое расстояние между точками. Это гарантирует, что в пределах одной ячейки или соседних с ней не может находиться более одной точки. Начинается процесс с генерации первой случайной точки внутри допустимой области, которая заносится в список

активных точек. Для каждой активной точки предпринимаются попытки генерации новых кандидатов: точка случайным образом создаётся на расстоянии от r до $2r$ от исходной точки в случайном направлении, что геометрически соответствует выбору в кольцевой области [1].

Для каждой такой новой точки проверяется, сохраняется ли заданное минимальное расстояние до всех остальных ранее размещённых точек, что ускоряется за счёт обращения не ко всем точкам, а только к соседним ячейкам сетки. При успешной проверке точка добавляется в итоговый список и становится новой активной точкой, в противном случае генерация повторяется до заданного количества итераций k . Если после k неудачных попыток не удаётся добавить ни одной новой точки из текущей активной, она удаляется из активного списка. Алгоритм продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое количество точек либо активный список не опустеет. С математической точки зрения распределение точек моделирует слабо коррелированные позиции с ограничением по евклидовому расстоянию, позволяя аппроксимировать равномерную плотную дискретизацию, аналогичную условиям плотной выборки в метрических пространствах [2].

Данная стратегия основана на алгоритме пуассоновского семплирования, обеспечивающего более равномерное и контролируемое распределение точек за счёт введения минимального расстояния между ними. При заданной плотности и площади области количество точек масштабировалось пропорционально, с учётом корректировки краевых зон. Итоговое распределение демонстрирует высокую степень пространственной однородности (рис. 6).

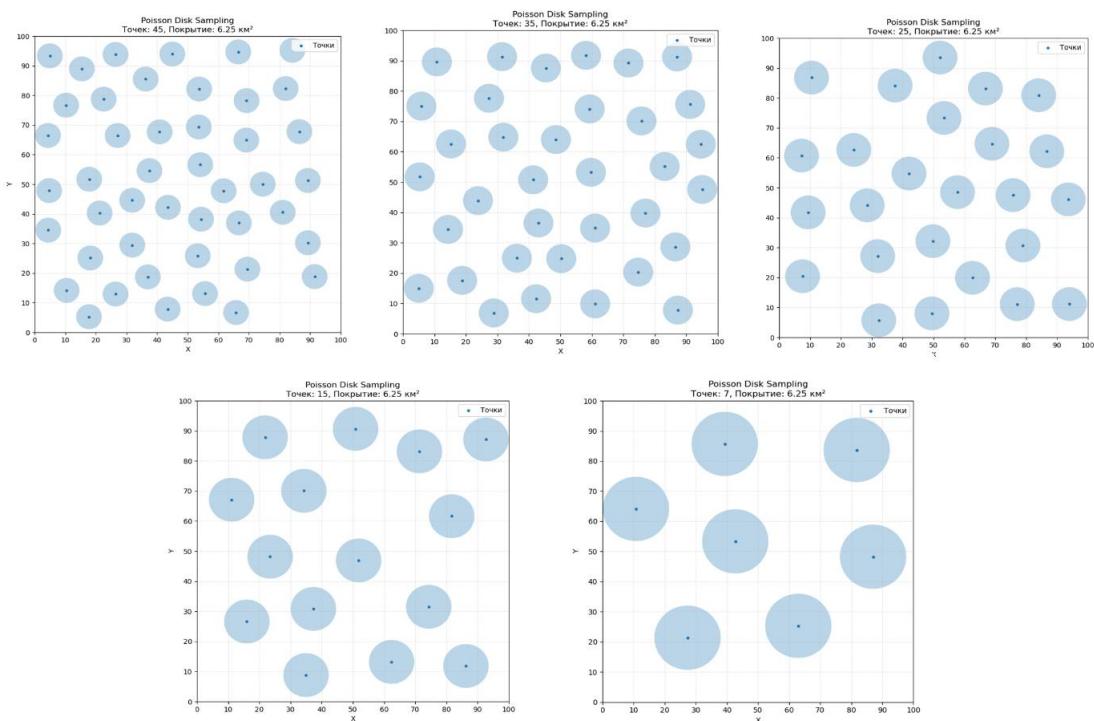


Рис. 6. Пространственное распределение точек, полученное методом пуассоновского семплирования.

Интерполяция, выполненная на основе этих точек, показала более устойчивое распределение (рис. 7). Резкие границы и артефакты в меньшей степени влияют на итоговую карту, благодаря равномерному охвату исследуемой области.

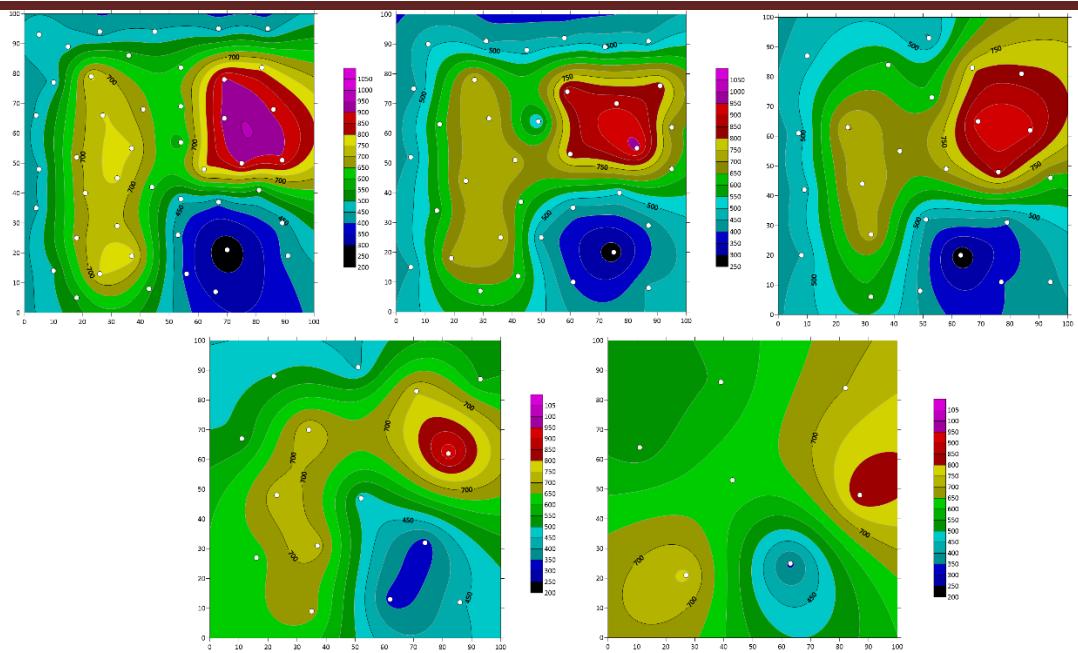


Рис. 7. Результаты крикинг-интерполяции при пуассоновском распределении точек (от 45 до 7 точек).

Применение пуассоновского дискового сэмплирования демонстрирует значительные преимущества в равномерности покрытия территории. Даже при низкой плотности (15 и 7 точек) пуассоновское распределение минимизирует кластеризацию и обеспечивает более сбалансированное размещение точек, что способствует снижению количества артефактов и улучшению воспроизведения границ литологических зон. Интерполяционные карты, построенные методом Kriging, характеризуются повышенной плавностью переходов значений Vs30 и меньшей выраженностью локальных искажений по сравнению с регулярным распределением.

ML-интерполяция модельных данных Vs30 с рандомным распределением

По результатам исследований и экспериментов были определены лучший метод аугментации и модель машинного обучения для задачи пространственной интерполяции параметра Vs30 в условиях дефицита данных. В целях проведения сравнительного анализа и подтверждения эффективности подобранных методов аугментации и ML-интерполяции проработан тестовый эксперимент с рандомным распределением.

После генерации 1000 синтетических образцов методом **Residual Bootstrap** на основе случайного леса и обучения **XGBoost** на расширенном множестве удалось воспроизвести визуальную структуру исходной карты с очень высокой степенью соответствия: контурные линии, градиенты и общие очертания зон практически неотличимы от априорного рельефа. Способ ML-интерполяции сохранил глобальные формы и одновременно добавил едва заметные локальные структуры без внесения артефактных искажений (рис. 8).

Качественное сходство подкрепляется количественными результатами кросс-валидации (10-кратный shuffle-split, 70%/30%): среднеквадратичная ошибка (MSE) составила 575,10, корень из неё (RMSE) – 43,87, средняя абсолютная ошибка (MAE) – 36,12. Линейная корреляция между наблюдаемыми и предсказанными значениями достигла 0,97, доля объяснённой дисперсии (R^2) – 0,94. Это подтверждает, что при ограниченном исходном наборе (25 точек) **RF-bootstrap** обеспечивает **XGBoost** достаточный объём репрезентативных данных для воспроизведения визуально сходной, статистически обоснованной картины поля.

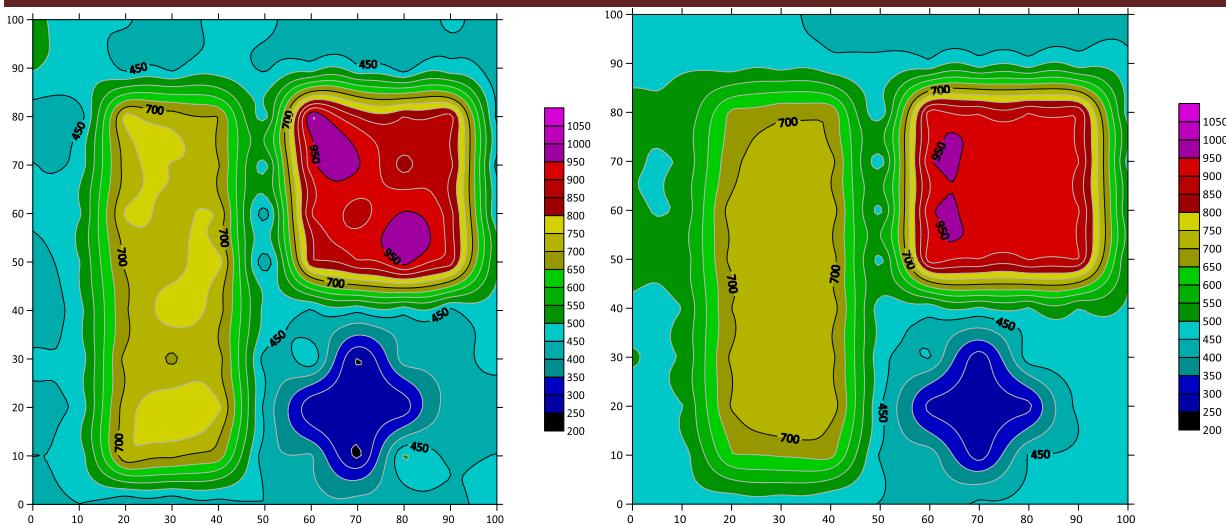


Рис. 8. Интерполяция параметра Vs30 при 25 обучающих точках: исходная карта и прогноз модели XGBoost.

На основе 15 априорных измерений и 1000 синтетических точек (RF-bootstrap) сравнили SVR с RBF-ядром и k-NN (равномерное взвешивание). Визуально SVR воспроизводит плавные градиенты и сохраняет глобальную структуру: контуры гладкие, центральное плато и периферийные впадины корректно очерчены. k-NN же показывает переобучение: зона ~ 950 расширена, области ~ 450 обретают резкие границы (рис. 9).

SVR продемонстрировал CV MSE = 2100, CV MAE = 73, CV RMSE = 123, $\rho = 0,74$, $R^2 = 0,51$, тогда как k-NN получил CV MSE = 2241, CV MAE = 111, CV RMSE = 226, $\rho = 0,33$, $R^2 = -0,65$. Это подтверждает преимущество SVR при малом наборе данных.

В условиях крайнего дефицита обучающих данных – всего 7 априорных точек – были протестированы три алгоритма машинного обучения: **Support Vector Regression (SVR)** с RBF-ядром, **k-Nearest Neighbors (k-NN)** и **градиентный бустинг на деревьях решений (XGBoost)** (рис. 10).

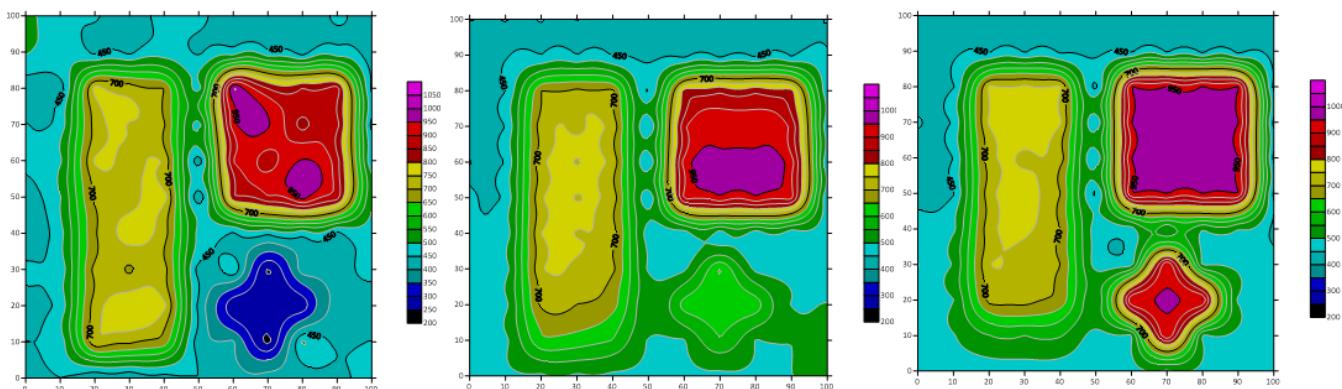


Рис. 9. Интерполяция параметра Vs30 при 15 обучающих точках: исходная карта и прогнозы моделей SVM, k-NN.

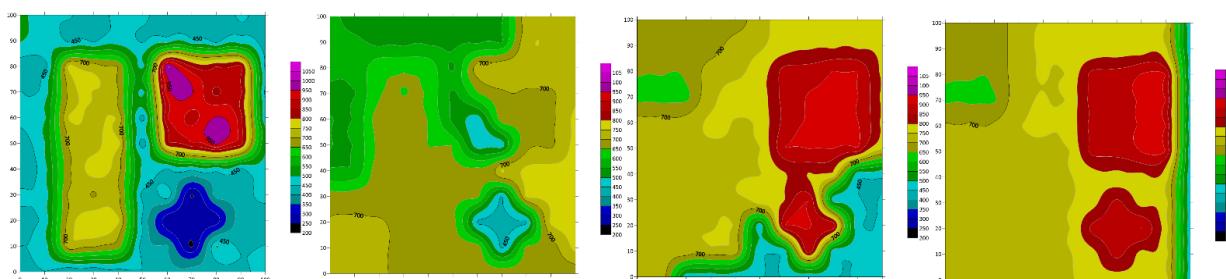


Рис. 10. Интерполяция параметра Vs30 при 7 обучающих точках: исходная карта и прогнозы моделей SVM, k-NN, XGBoost.

Результаты кросс-валидации и внешней валидации на 10 выколотых точках показали заметное различие в устойчивости и аппроксимирующей способности моделей.

SVR продемонстрировал наименьшее среднеквадратичное отклонение при валидации (Cross-Validation MSE = 672,47), а также наилучшие метрики точности на независимой выборке: MAE = 136,69, RMSE = 174,78. Коэффициент корреляции между истинными и предсказанными значениями составил 0,77, что свидетельствует о наличии линейной зависимости, хотя $R^2 = 0,01$ указывает на крайне низкую долю объяснённой дисперсии, что типично при экстремально малом количестве обучающих наблюдений.

Модель **k-NN** показала более слабые характеристики (CV MSE = 701,25, MAE = 196,83, RMSE = 265,02), с корреляцией $\rho = 0,13$ и отрицательным коэффициентом детерминации ($R^2 = -1,27$), что отражает как высокую нестабильность предсказаний, так и неспособность обобщать пространственную структуру поля за пределами ближайших соседей.

Несмотря на теоретическую мощность **XGBoost**, его поведение в данном сценарии оказалось наименее удовлетворительным. При наименьшем значении MSE на кросс-валидации (593,19), внешний прогноз модели сопровождался наибольшей абсолютной ошибкой (MAE = 211,85), высокой RMSE (267,38), крайне низкой корреляцией ($\rho = 0,04$) и $R^2 = -1,31$. Это указывает на переобучение модели на синтетических данных с последующим резким падением обобщающей способности при встрече с невидимыми точками.

Таким образом, даже в условиях жёсткого ограничения по количеству априорных измерений **SVR** продолжает демонстрировать наилучшее сочетание устойчивости и точности, в то время как **k-NN** и, особенно, **XGBoost** проявляют высокую чувствительность к качеству и структуре аугментированных данных.

ML-интерполяция модельных данных Vs30 с пуассоновским распределением

В эксперименте с 25 исходными точками, расширенными до 1000 с помощью **RF-bootstrap-аугментации**, проведена оценка качества восстановления пространственного распределения целевого признака с использованием двух моделей машинного обучения: **градиентного бустинга на решающих деревьях (XGBoost)** и **опорных векторов (SVR с RBF-ядром)** (рис. 11).

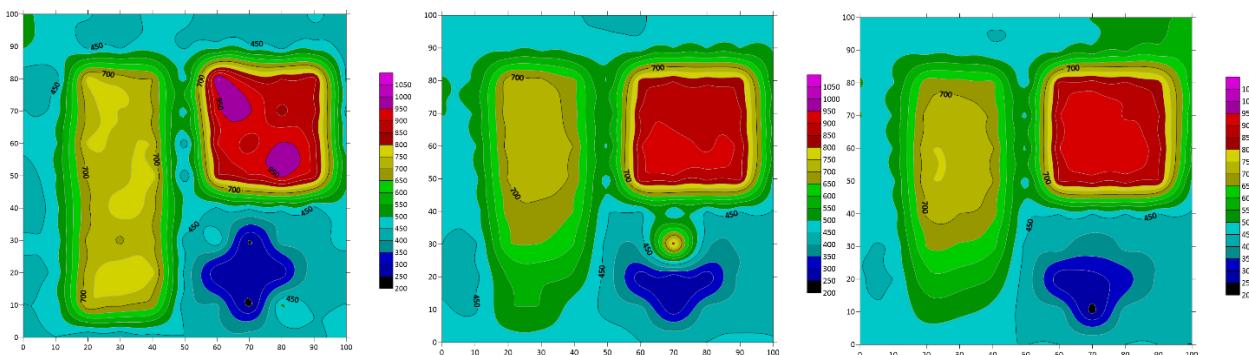


Рис. 11. Интерполяция параметра Vs30 при 25 обучающих точках:
исходная карта и прогнозы моделей k-NN, SVM.

Обе модели продемонстрировали высокую согласованность между предсказанными и истинными значениями на независимой валидационной выборке: коэффициент корреляции составил $\rho = 0,98$ для обеих моделей, что указывает на почти линейную взаимосвязь между прогнозом и наблюдением. Однако количественные метрики точности позволили выделить SVR как более эффективную модель при данном объёме обучающих данных.

Так, SVR достиг минимального значения MAE = 42,44 и RMSE = 47,88, а также наибольшего значения коэффициента детерминации $R^2 = 0,93$, отражающего высокую долю объяснённой дисперсии. Это свидетельствует о способности модели точно аппроксимировать сложные нелинейные зависимости и обеспечивать устойчивое поведение даже на выколотых

точках. XGBoost продемонстрировал несколько более высокие значения ошибок ($MAE = 51,77$, $RMSE = 61,49$), а также чуть ниже $R^2 = 0,88$, что также соответствует высокому качеству, но указывает на меньшую гибкость в улавливании тонких структур поля.

Cross-validation MSE был ниже у SVR (1402,79 против 1749,89 у XGBoost), что дополнительно подтверждает его лучшую обобщающую способность при использовании аугментированных данных.

При использовании 15 исходных обучающих точек результаты валидации показали чёткое преимущество регуляризованной модели **SVR** над **k-NN** как в метрике прогностической точности, так и устойчивости к независимой выборке (рис. 12). **SVR** достиг умеренного уровня среднеквадратичной ошибки при кросс-валидации ($MSE = 3080,12$) и продемонстрировал стабильные показатели на 10 выколотых точках: $MAE = 61,2$, $RMSE = 117,71$. Коэффициент корреляции $\rho = 0,76$ указывает на наличие устойчивой взаимосвязи между истинными и предсказанными значениями, а коэффициент детерминации $R^2 = 0,55$ отражает удовлетворительное объяснение дисперсии целевого признака в условиях ограниченного количества априорных наблюдений.

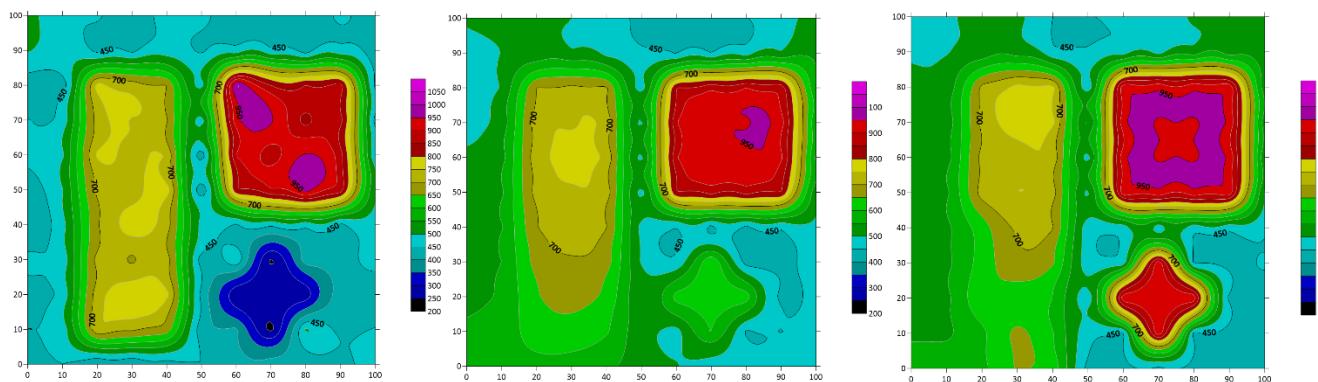


Рис. 12. Интерполяция параметра $Vs30$ при 15 обучающих точках:
исходная карта и прогнозы моделей SVR, k-NN.

В свою очередь, модель **k-NN** оказалась значительно менее надёжной. Хотя кросс-валидационная ошибка ($MSE = 3319,87$) осталась сопоставимой, метрики на независимой выборке указывают на деградацию обобщающей способности: $MAE = 93,92$, $RMSE = 216,68$, $\rho = 0,32$, а $R^2 = -0,52$, что свидетельствует о систематических отклонениях предсказаний от наблюдаемых значений и неспособности модели захватывать структурную сложность поля.

Таким образом, в условиях умеренного объёма обучающих данных **SVR** сохраняет лидерство по точности и устойчивости, демонстрируя способность извлекать релевантные зависимости даже в случае частичного или разреженного покрытия области. Метод ближайших соседей, напротив, оказывается подверженным локальным флюктуациям и демонстрирует чрезмерную чувствительность к конфигурации синтетических точек.

При экстремальном снижении объёма обучающих данных до 7 априорных точек, дополненных до 1000 синтетических наблюдений посредством аугментации на основе случайного леса (RF-bootstrap), были исследованы предельные возможности трёх моделей машинного обучения: **SVR**, **k-NN** и **XGBoost**. Полученные результаты демонстрируют резкое снижение качества аппроксимации и устойчивости моделей, что подчёркивает ограничения использования машинного обучения в условиях крайней информационной скудости (рис. 13).

SVR при столь малом обучающем объёме продемонстрировал наихудшую обобщающую способность среди трёх моделей: Cross-Validation MSE достиг 10 990,30, а на независимой выборке наблюдается значительное отклонение предсказаний ($MAE = 153,89$, $RMSE = 182,78$). Коэффициент корреляции составил $\rho = 0,33$, что указывает на слабую линейную связь, а отрицательное значение $R^2 = -0,08$ свидетельствует о неспособности модели объяснять дисперсию целевого признака.

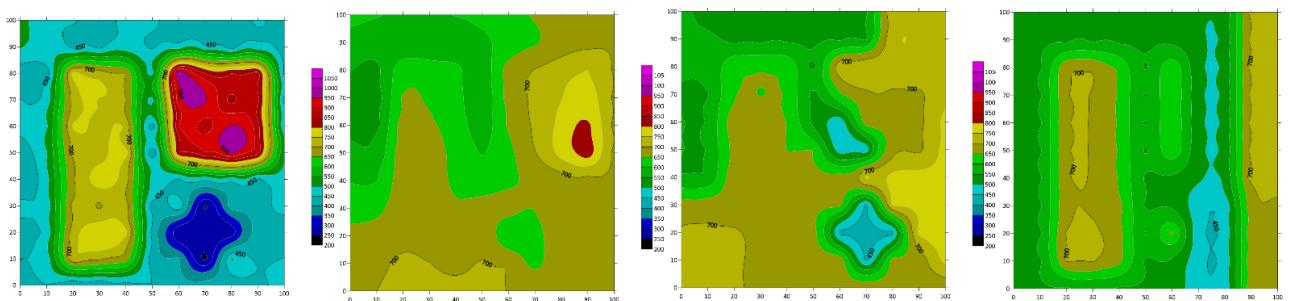


Рис. 13. Интерполяция параметра Vs30 при 7 обучающих точках: исходная карта и прогнозы моделей SVR, k-NN, XGBoost.

Алгоритм **k-NN** при сопоставимой ошибке ($CV\ MSE = 6840,64$) показал несколько лучшие метрики на выколотых точках ($MAE = 147,33$, $RMSE = 175,57$), при этом коэффициент корреляции оказался выше ($\rho = 0,44$), а $R^2 = 0,01$ указывает на предельно низкую, но положительную объяснённую дисперсию. Это позволяет говорить о частичной способности модели улавливать локальные закономерности в структуре синтетических данных, несмотря на её высокую чувствительность к распределению точек.

На фоне остальных, **XGBoost** продемонстрировал наименьшую кросс-валидационную ошибку ($MSE = 5589,97$) и наименьшее значение MAE (124,34), однако $RMSE$ (186,83) оказался самым высоким, что указывает на нестабильные предсказания с редкими, но выраженным отклонениями. Коэффициент корреляции был низким ($\rho = 0,17$), а $R^2 = -0,13$ вновь указывает на переобучение и плохое соответствие модели реальной структуре поля вне обучающей выборки.

Таким образом, при 7 исходных точках все модели демонстрируют значительное ухудшение прогностической способности. Даже при использовании синтетических данных, ни одна из моделей не достигает удовлетворительного уровня обобщения, а значения R^2 варьируют от близких к нулю до отрицательных. Это подчёркивает фундаментальное ограничение в применении даже продвинутых ML-алгоритмов в условиях предельного дефицита информации и усиливает аргумент в пользу осторожного использования аугментации без достаточной эмпирической поддержки.

Заключение

В работе рассмотрен подход к планированию размещения наблюдательных точек для интерполяции параметра Vs30 с использованием алгоритма пуассоновского дискового семплирования. Применение данного метода продемонстрировало значительные преимущества по сравнению с классическими схемами размещения – случайной и регулярной сеткой – особенно в условиях ограниченного количества наблюдений и наличия зон с затруднённым доступом.

Алгоритм обеспечивает равномерное покрытие исследуемой области при сохранении заданного минимального расстояния между точками, что позволяет избежать кластеризации и улучшает стабильность интерполяционных оценок. Важным преимуществом данного подхода является его адаптивность: за счёт введения радиуса действия каждой точки измерение может быть выполнено в пределах допустимой зоны, что позволяет обходить охраняемые или физически недоступные участки без потери качества пространственного моделирования.

Результаты моделирования на тестовой геологической карте с четырьмя литологическими зонами показали, что пуассоновское распределение точек обеспечивает более точное восстановление Vs30- поля даже при малом количестве наблюдений (15 и 7 точек). Это подтвердили как геостатистические методы интерполяции (Kriging), так и алгоритмы машинного обучения (Random Forest с RF-bootstrap, SVR, XGBoost и k-NN). При этом в условиях дефицита априорной информации модели SVR и XGBoost в сочетании с пуассоновским распределением точек показали наилучшие метрики точности и устойчивости.

Таким образом, алгоритм пуассоновского дискового семплирования может рассматриваться как эффективный инструмент для проектирования схем заложения наблюдательных точек при сейморазведочных работах, особенно на участках с плотной

застройкой, ограниченным доступом и необходимостью строгого соблюдения требований по равномерности охвата. Его применение способствует повышению точности построения карт Vs30, оптимизации логистики полевых работ и может быть рекомендовано в качестве основы для автоматизированных систем планирования инженерно-геофизических исследований

ЛИТЕРАТУРА

1. Bridson R. Fast Poisson disk sampling in arbitrary dimensions // SIGGRAPH Technical Sketches. - 2007.
2. Lagae A., Dutré P. A comparison of methods for generating Poisson disk distributions // Computer Graphics Forum. - 2008. - 27 (1). - 114-129.
3. Ebeida M.S., Mitchell S.A., Patney A., Davidson A.A., Owens J.D. A simple algorithm for maximal Poisson-disk sampling in high dimensions // Computer Graphics Forum. - 2012. - 31 (2pt4). - 785-794.
4. Юсупов Д.Д., Халбаев С.Б., Кодиров Ж.З., Закирова О.Ф., Мамарозиков Т.У. Интерполяция Vs30 в условиях дефицита данных: инженерно-геологическое моделирование и перспективы развития // Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз; Филиал РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина в г. Ташкенте.
5. Создание карт сейсмического микрорайонирования городов Андижан, Наманган и Фергана масштаба 1:25000: Отчет о научно-исследовательской работе (Раздел: Сейсмическое микрорайонирование г. Ферганы). - Т.: Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, 2022. - 200 с.
6. Allen T.I., Wald D.J. Topographic Slope as a Proxy for seismic site-conditions (Vs30) and amplification around the globe // U.S. Geological Survey Open-File Report. - 2007-1357. - 69 p.
7. Matsuok M. Amplification Capability and Geomorphologic Classification // Presentation materials and report. - Tokyo Institute of Technology, 2012.

Vs30 parametrini Poisson disk namuna olish usuli bilan interpolatsiya qilish uchun kuzatuv nuqtalarini joylashtirishni rejulashtirish

D.D. Yusupov, I.M. Alimuxamedov, S.B. Xalbayev, J.Z. Kodirov, O.F. Zakirova, T.U. Mamarozikov

Annotatsiya. Maqlada Vs30 parametrini interpolatsiya qilish uchun kuzatuv nuqtalarini joylashtirishni rejulashtirishga Poisson disk semplingi (Poisson Disk Sampling) asosida yondashuv tavsiflanadi. Sinov maydoni sifatida 100×100 katakdan iborat, to'rtta litologik zonali model geologik xarita qo'llanilgan; unda 7 va 15 ta nuqta zinchliklari uchun uchta joylashtirish sxemasi – tasodifiy, muntazam to'r va Poisson disk semplingi – solishtiriladi. Interpolyatsiya klassik kriging usuli va Random Forest bootstrap (RF-bootstrap) asosidagi augmentatsiya, shuningdek juda kam hajmdagi aprior ma'lumotlar sharoitida ML modellari (SVR, XGBoost, k-NN) yordamida bajarilgan. Natijalar Poisson disk semplingi kuzatuv nuqtalarining eng bir tekis taqsimlanishini ta'minlashini, Vs30 xaritalaridagi «bo'shliqlar» va artefaktlarni kamaytirishini hamda MAE, RMSE va korrelyatsiya koeffitsientlari bo'yicha klassik joylashtirish sxemalariga nisbatan yanada yuqori barqarorlik va tiklash aniqligini namoyish etishini ko'rsatadi.

Kalitli so'zlar. Vs30, seysmik mikrorayonlashtirish, Poisson Disk Sampling, ML-interpolyatsiya, augmentatsiya, Random Forest, XGBoost, SVM, k-NN.

Planning the placement of observation points for interpolation of the Vs30 parameter by the Poisson disc sampling method

D.D. Yusupov, I.M. Alimukhamedov, S.B. Khalbaev, Zh.Z. Kodirov, O.F. Zakirova, T.U. Mamarozikov

Abstract. This paper presents an approach to planning the placement of observation points for interpolation of the Vs30 parameter based on Poisson disk sampling. As a test site, we use a synthetic geological map of size 100×100 cells with four lithological zones, on which, for sampling densities of 7 and 15 points, three placement schemes are compared: random, regular grid, and Poisson disk sampling. Interpolation is performed using classical kriging with RF-bootstrap augmentation, as well as ML models (SVR, XGBoost, k-NN) under an extremely small amount of prior data. The results show that Poisson disk sampling provides the most uniform spatial coverage, reduces gaps and artefacts in Vs30 maps, and at the same time demonstrates higher robustness and reconstruction accuracy in terms of MAE, RMSE and correlation coefficients compared with classical placement schemes.

Key words. Vs30, seismic microzonation, Poisson Disk Sampling, ML interpolation, augmentation, Random Forest, XGBoost, SVM, k-NN.

SEYSMIK XAVFSIZLIK

УДК 550.34

МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В УЗБЕКИСТАНЕ: ОПЫТ МАССОВЫХ ПОСТРОЕНИЙ 2021-2024 гг.

Б. Алимов, А.М. Якубов, К.И. Кучкаров, Р.С. Ибрагимов

Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан

Аннотация. Представлен сравнительный анализ методов построения механизмов очагов землетрясений, применяемых в сейсмологических исследованиях на территории Узбекистана. Основное внимание уделено использованию программных средств NewMech и FOKAL, а также оценке качества полученных решений за период 2021-2024 гг. на основе каталога из 586 землетрясений. Рассмотрены критерии надёжности очаговых решений: минимальное количество станций, азимутальный охват, наличие обоих типов первых вступлений и степень согласованности данных. Проведена классификация решений на достоверные, сомнительные и недостоверные, в результате чего 500 механизмов (85% от общего количества) признаны пригодными для сейсмотектонических интерпретаций. Показано, что метод первых вступлений обеспечивает удовлетворительную точность только при достаточном количестве наблюдений и хорошем охвате сети, тогда как ограниченное количество данных часто приводит к искажённым результатам. Отмечена необходимость перехода к инверсии волновых форм, позволяющей существенно повысить достоверность и информативность определяемых механизмов при меньшем количестве используемых станций. Полученные результаты демонстрируют текущее состояние исследований в республике и формируют рекомендации по совершенствованию методик и расширению базы данных для последующего анализа напряжённо-деформированного состояния земной коры.

Ключевые слова: механизм очага землетрясения; нодальные плоскости; оси главных напряжений; магнитуда; азимутальный охват; первые вступления; волновые формы; метод СМТ; инверсия волновых форм.

Введение. Механизм очага землетрясений является одной из ключевых характеристик, позволяющих понять природу происходящих тектонических процессов и динамику напряжённого состояния земной коры. Он показывает, какой тип разрыва (брос, надвиг, сдвиг или их комбинация) реализуется при сейсмическом событии. Для сейсмологии это имеет не только теоретическое, но и практическое значение: уточнение геодинамической обстановки региона; построение моделей напряжённо-деформированного состояния; оценка сейсмической опасности.

В настоящее время механизмы очагов землетрясений определяются либо по знакам первых вступлений вертикальной компоненты записи, либо по волновым формам. В Институте сейсмологии АН РУз построение механизмов очагов традиционно осуществлялось в рамках первого подхода (А.И. Захарова, Л.М. Матасова, Е.М. Безродный, Х. Туйчиев, А.А. Абдукадыров и др.). Первоначально эти построения осуществлялись вручную на сетке Вульфа только для сильных землетрясений. В монографии Е.М. Безродного [1984] приведены построения механизмов очага для 44 сильных (с магнитудой $M \geq 5$) землетрясений, произошедших на территории Узбекистана и прилегающих областей в период с 1946 по 1984 гг. Для определения механизма им привлекались сейсмограммы как минимум с 40 сейсмических станций. В монографии помимо полученных решений приведены полные таблицы знаков по ближним и дальним станциям, что обеспечивает воспроизводимость полученных им результатов.

С конца 70-х годов прошлого столетия на территории Средней Азии началось массовое определение механизмов очагов землетрясений с энергетическим классом $K \geq 10$ ($M \geq 3,3$). Решения публиковались в сборниках [Землетрясения Средней Азии и Казахстана, 1979-1988]. Хотя эти построения базировались на меньшем количестве станций, чем использовал

Е.М.Безродный для сильных землетрясений, совокупный набор решений для большого числа механизмов слабых и умеренных толчков позволял выявлять статистические закономерности в площадном распределении осей главных напряжений, их временные флуктуации, осуществлять реконструкцию современного напряженно-деформированного состояния земной коры методами Ю.В.Ризниченко и С.Л.Юнга [Ризниченко, 1985; Юнга, 1990].

К сожалению, по ряду объективных и субъективных причин, с конца 2000-х годов массовое определение механизмов очагов прекратилось, что нанесло значительный урон качеству сейсмологических и сейсмотектонических исследований, проводимых в республике, исчезновению специалистов в области построения и интерпретации механизмов землетрясений, практически полной утрате тектонофизического направления в Институте.

Возрождение данного научного направления в Институте во многом связано с именем заведующего лаборатории «Тектонофизики» ИФЗ РАН Ю.Л.Ребецкого. По его инициативе и при непосредственном участии для территории Узбекистана был сформирован сводный каталог механизмов очагов землетрясений, проведен ряд реконструкций современного напряженного состояния земной коры методами катастического анализа разрывных смещений [Ибрагимова и др., 2021; Ребецкий и др., 2020 и др.].

Начиная с 2021 г. в Республиканском Центре сейсмопрогностического мониторинга (РЦСМ), относящегося в данное время к МЧС РУз, возобновились работы по массовому определению механизмов очагов землетрясений. За 2021-2024 гг. сделано построение около 600 механизмов очагов землетрясений, произошедших на территории Узбекистана и в прилегающих к нему областях. Цель настоящей статьи – критический анализ программных средств, используемых в республике, для построения механизмов очагов землетрясений, оценка качества полученных за этот промежуток времени решений механизмов и доработка спорных построений, а также выработка рекомендаций по улучшению массового определения механизмов в республике.

Используемые в республике программные средства для определения механизмов очагов землетрясений. В РЦСМ в настоящее время используется программа NewMech. К ее достоинствам следует отнести возможность исследователям, проводящим построение механизма очага, оценивать по пятибалльной системе надежность установленных знаков первых вступлений на цифровой записи Z-компоненты каждой станции, участвующей в обработке. Вместе с тем, данная программа имеет ряд ограничений, влияющих на качество каталога. В частности, значения параметра (slip) программа задаёт не в градусах, как принято в международной практике, а в виде дискретных направлений (*North*, *North-East*, *East*, *South-East* и др.). Такой подход снижает точность интерпретации, поскольку между соседними направлениями сохраняется неопределенность порядка $22,5^\circ$. Еще одной особенностью данной программы является задание углов погружения осей главных напряжений относительно вертикали, а не от горизонтали, что было установлено нами специальными построениями вручную на сетке Вульфа. Это привело к необходимости введения поправки 90° -а для углов погружения осей Р и Т для соответствия с международными стандартами.

В Институте сейсмологии АН РУз для определения механизмов очагов по знакам первых вступлений используется японская программа FOKAL. Она проста в обращении, выдает результат в международном формате, указывает количество согласованных и несогласованных станций, участвующих в определении, допускает «ручное» разделение знаков первых вступлений путем построения I нодальной плоскости (нодальная плоскость II достраивается автоматически). Интересно то, что «ручное» разделение нодальных плоскостей в отдельных случаях дает лучший процент соответствия, чем это делается автоматически, что свидетельствует об ограничении алгоритма, заложенного в данный программный продукт. Для иллюстрации данного факта мы приводим построение Байсунского (Чиланзарского) землетрясения с магнитудой $M = 5,7$, которое произошло 12 мая 2022 г. на территории Южного Узбекистана. На рис. 1 показан механизм очага этого землетрясения, рассчитанный автоматически программой FOKAL, по данным о первых вступлениях на 24 сейсмических станциях РЦСМ. Параметры (Str, Dip, Slip) для каждой из нодальных плоскостей, а также азимуты и углы погружения (Az, Plunge) осей сжатия Р и растяжения Т приведены на рис. 1. Из 24 зарегистрированных знаков первых вступлений 18 согласованных и 6 несогласованных при данном выборе нодальных плоскостей (процент соответствия 75).

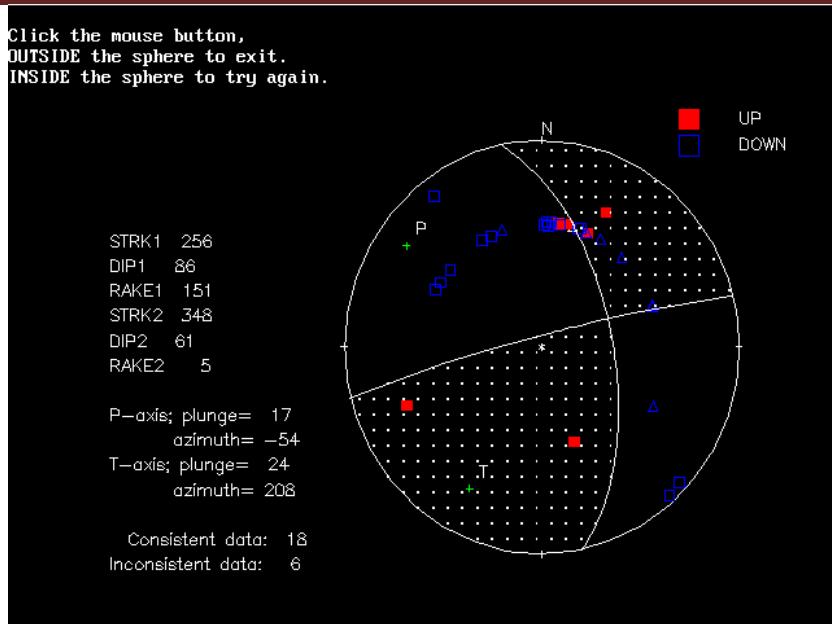


Рис. 1. Механизм очага Байсунского (Чиланзарского) землетрясения 12 мая 2022 г., по данным о первых вступлениях 24 сейсмических станций РЦСМ.

Figure 1. Focal mechanism of the Baisun (Chilanzar) earthquake of May 12, 2022, based on first-arrival data from 24 RCSR seismic stations.

Решения механизма этого же землетрясения, по данным Гарвардского агентства симт [Eksrom, nettles, 2014] и института GFZ (Германия), отражены на рис. 2. Они основаны на инверсии волновых форм и на сегодняшний день считаются наиболее обоснованными. Как это видно из рисунков, различия в решениях РЦСМ и упомянутых агентств весьма существенны.

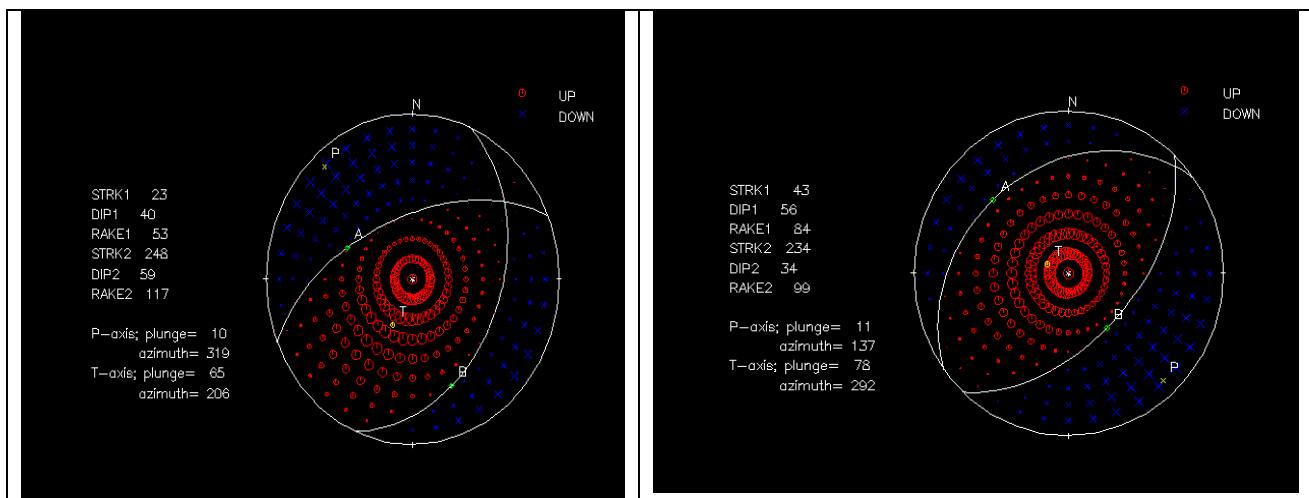


Рис. 2. Решения механизма Байсунского (Чиланзарского) землетрясения 12 мая 2022 г., по данным СМТ, Гарвард (слева) и Института GFZ (Потсдам, Германия) (справа).
[\[https://isc.ac.uk/cgi-bin/web-db-run?event_id=624312624&out_format=ISF2&request=COMPREHENSIVE\]](https://isc.ac.uk/cgi-bin/web-db-run?event_id=624312624&out_format=ISF2&request=COMPREHENSIVE).

Figure 2. Focal mechanism solutions of the Baisun (Chilanzar) earthquake of May 12, 2022, based on CMT data: Harvard (left) and GFZ Institute, Potsdam, Germany (right).

На рис. 3 приведено наше решение механизма Байсунского (Чиланзарского) землетрясения 12 мая 2022 г., с использованием той же программы **FOKAL** при «ручном» разделении нодальных плоскостей с применением знаков первых вступлений станций РЦСМ, с добавлением знаков

вступлений нескольких станций локальных сетей мониторинга площадки АЭС в районе Арнасая и объекта «Лукойл» в Западном Узбекистане. Полученное в результате решение несколько ближе к решениям СМТ и Института GFZ, процент согласованности знаков 84. Безусловно, в данном примере есть элемент подгонки. Мы заранее знали решения авторитетных агентств и стремились добиться наилучшего соответствия с ними. Единственной целью его демонстрации является желание подчеркнуть несовершенство используемых программных средств и, что критически важно, необходимость привлечения как можно большего количества сейсмических станций с полным окружением очага землетрясения.

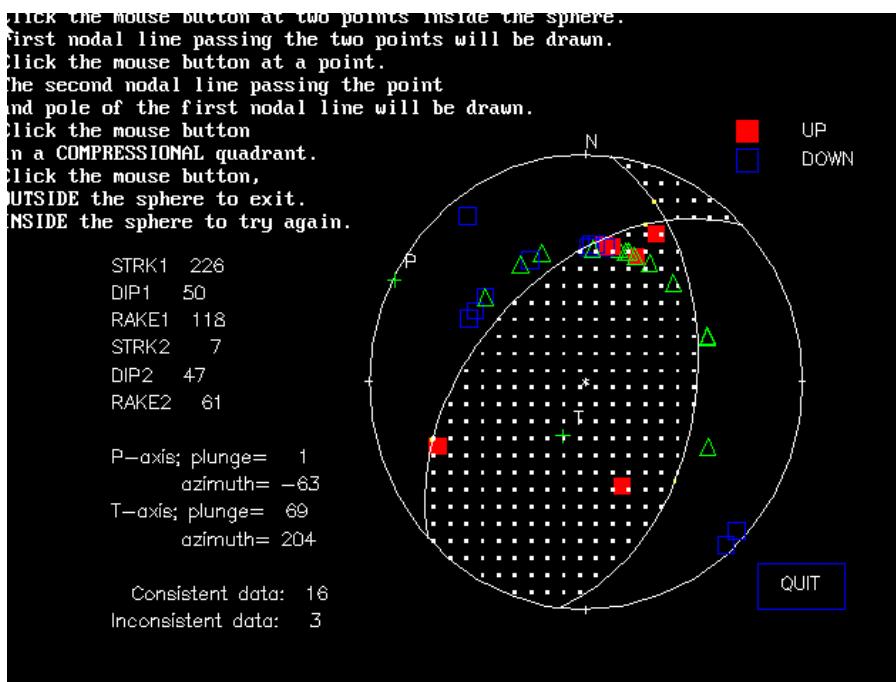
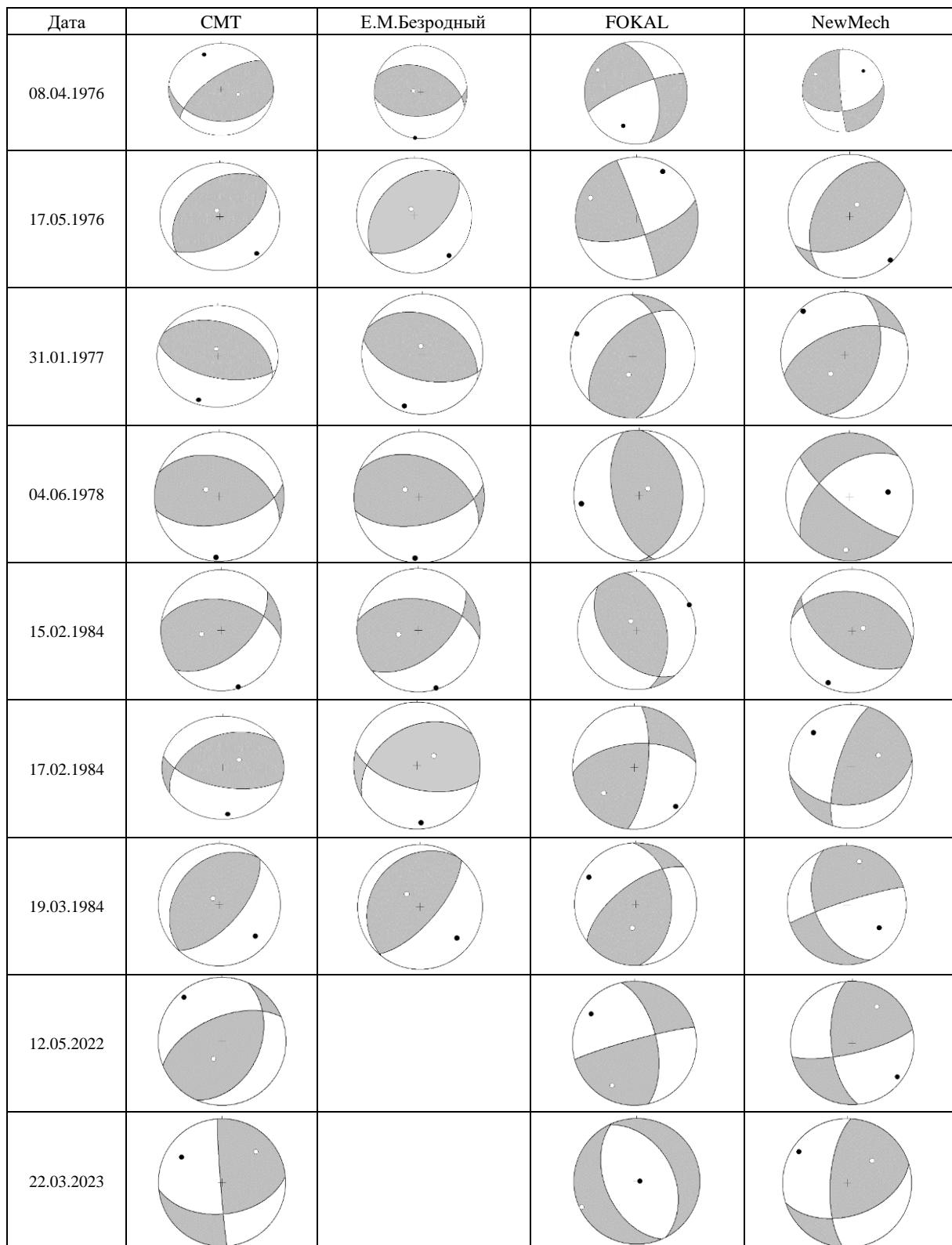


Рис. 3. Решения механизма Байсунского (Чиланзарского) землетрясения 12 мая 2022 г. с использованием знаков первых вступлений станций РЦСМ с добавлением знаков вступлений нескольких станций локальных сетей мониторинга площадки АЭС в районе Арнасая и объекта «Лукойл» в Западном Узбекистане.

Figure 3. Focal mechanism solutions of the Baisun (Chilanzar) earthquake of May 12, 2022, using first-arrival polarities from RCSM stations with the addition of arrivals from several stations of the local monitoring networks near the Arnasay NPP site and the Lukoil facility in western Uzbekistan.

Для подтверждения сказанного мы сопоставили решения механизмов для 10 сильных землетрясений, полученные агентством СМТ, с построениями Е.М.Безродного и расчетами механизмов этих же землетрясений по программам FOKAL и NewMech. Для землетрясений, произошедших в период с 1976 по 1984 гг., знаки первых вступлений для реализации каждой программой брались из монографии Е.М.Безродного. Если в оригинальном построении [Безродный, 1984], как упоминалось выше, использовалось не менее 40 знаков первых вступлений, то при программном определении механизмов этих же событий мы ограничились 15-20 знаками. Для землетрясений 2022-2023 гг. мы брали станции и знаки вступлений, которые были использованы РЦСМ при расчете программой NewMech. Таким образом, условия эксперимента моделируют типичную региональную ситуацию, когда приходится работать с ограниченным количеством информации.

Как видно на рис. 4, при большом количестве наблюдений (построения Безродного) метод первых вступлений даёт решения, сопоставимые с механизмами, полученными инверсией волновых форм. При ограниченных данных программы FOKAL и NewMech часто давали искажённые механизмы, не совпадающие с опубликованными.



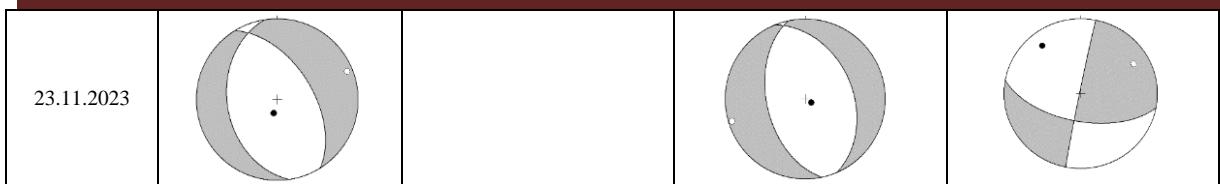


Рис. 4. Сопоставление решений механизмов, полученных агентством СМТ, с построениями Е.М.Безродного и определениями по программам FOKAL и NewMech.

Figure 4. Comparison of focal mechanism solutions obtained from the CMT catalog with those constructed by E.M.Bezrodny and determined using the FOKAL and NewMech programs.

Анализ качества построений механизмов очагов землетрясений за 2021-2024 гг.

Анализировались построения механизмов очагов землетрясений, выполненных Республиканским Центром сейсмопрогностического мониторинга (РЦСМ), за период с 2021 по 2024 г. Каталог охватывает сейсмические события территории Узбекистана и прилегающих областей, и включает решения механизмов 586 землетрясений различной магнитуды. Для каждого решения РЦСМ предоставил информацию о станциях, участвующих в построении механизма, знаках первых вступлений на этих станциях и графическое изображение механизма с указанием выхода осей сжатия и растяжения, а также положением нодальных плоскостей. Как отмечалось выше, в РЦСМ определение механизмов выполнялось с использованием программы **NewMech**. Результаты автоматизированной обработки в условиях ограниченного количества станций, зарегистрировавших знаки первых вступлений, не всегда обладают достаточной достоверностью. В этой связи был проведен анализ полученных решений механизмов с целью выявления их надёжности, устранения возможных ошибок и уточнения параметров очага. Такой подход позволил не только повысить качество исходного каталога, но и наметить направления дальнейших исследований для совершенствования определения очаговых механизмов землетрясений в регионе.

Для оценки качества решений очаговых механизмов за 2021-2024 гг. мы опирались на следующие критерии.

♦ **Минимальное количество станций для землетрясений различных магнитуд.** Как отмечено выше, при малом количестве станций решение оказывается нестабильным и может содержать значительные погрешности. Поэтому был поставлен нижний порог по количеству используемых знаков первых вступлений. При этом для землетрясений больших магнитуд мы требовали большее количество станций, задействованных для построения механизма.

♦ **Азимутальный охват сети.** Надёжность механизма также определяется геометрией расположения станций. Если станции сгруппированы в узком секторе, то параметры очага могут определяться с большой неопределённостью. Поэтому важным критерием является минимальный азимутальный охват – угол, под которым регистрируются волны разными станциями. Считается, что для получения устойчивого решения необходим охват не менее 135° . Это условие обеспечивает более равномерное покрытие с разных направлений и снижает систематические ошибки.

♦ **Наличие обоих типов первых вступлений («плюсов» и «минусов»).** Очаговое решение строится на основе распределения областей сжатия и разрежения в волновом поле. С физической точки зрения землетрясение всегда сопровождается формированием противоположных квадрантов, поэтому в реальных данных должны присутствовать как положительные, так и отрицательные первые вступления. Если механизм построен только на одном типе сигналов (например, только по «плюсам»), такое решение не отражает реальную структуру источника и считается недостоверным.

♦ **Степень согласованности данных.** В программе **NewMech** предусмотрен параметр, отражающий количество станций, полярности которых не совпадают с рассчитанной моделью очага. Этот показатель позволяет количественно оценить степень надёжности решения. Например, если из 11 станций две демонстрируют несогласованность, то это указывает на возможные локальные ошибки в определении полярности. Но, если из 11 станций несогласованность показывают пять станций, то такое решение вряд ли следует считать надежным.

Классификация решений по степени достоверности

После проверки по указанным критериям все решения очаговых механизмов разделены на несколько категорий по степени их надёжности:

Достоверные решения (Green) – механизмы, удовлетворяющие всем критериям: достаточному количеству станций (в зависимости от магнитуды), азимутальному охвату не менее 135°, наличию как положительных, так и отрицательных первых вступлений, а также приемлемому уровню согласованности по программе **NewMech**. Такие решения считались надёжными и использовались для дальнейших сейсмотектонических интерпретаций без дополнительных корректировок.

Сомнительные решения (Yellow) – механизмы, у которых часть критерииев выполнялась не полностью (например, недостаточный азимутальный охват, малое количество станций или наличие незначительной несогласованности по полярностям). Эти решения не исключались автоматически, а проходили дополнительную проверку. Для уточнения использовались записи как локальных станций Республики Узбекистан, так и международных станций, расположенныхных вблизи территории исследований. Такой подход позволял доопределить параметры и в ряде случаев повысить категорию механизма до «достоверного».

Недостоверные решения (Red) – механизмы, не удовлетворяющие ключевым требованиям (например, построенные только на одном типе первых вступлений или при слишком малом количестве станций). Подобные решения считались физически ненадёжными и исключались из дальнейшего анализа.

Так, весь исходный каталог был разделён на три группы по степени достоверности полученных решений:

1. Надёжные решения (Green). К данной категории отнесены **423 события**, параметры которых изначально удовлетворяли всем критериям качества. Для них характерен достаточный объём используемых данных, хороший азимутальный охват станций и устойчивая инверсия механизма очага.

2. Переработанные решения (Yellow → Green). **77 событий**, первоначально отнесённых к промежуточной категории (Yellow), подвергнуты дополнительной проверке и повторной обработке. Местоположение эпицентров этих землетрясений и решения механизмов, полученные для них РЦСМ, приведены на рис. 5.

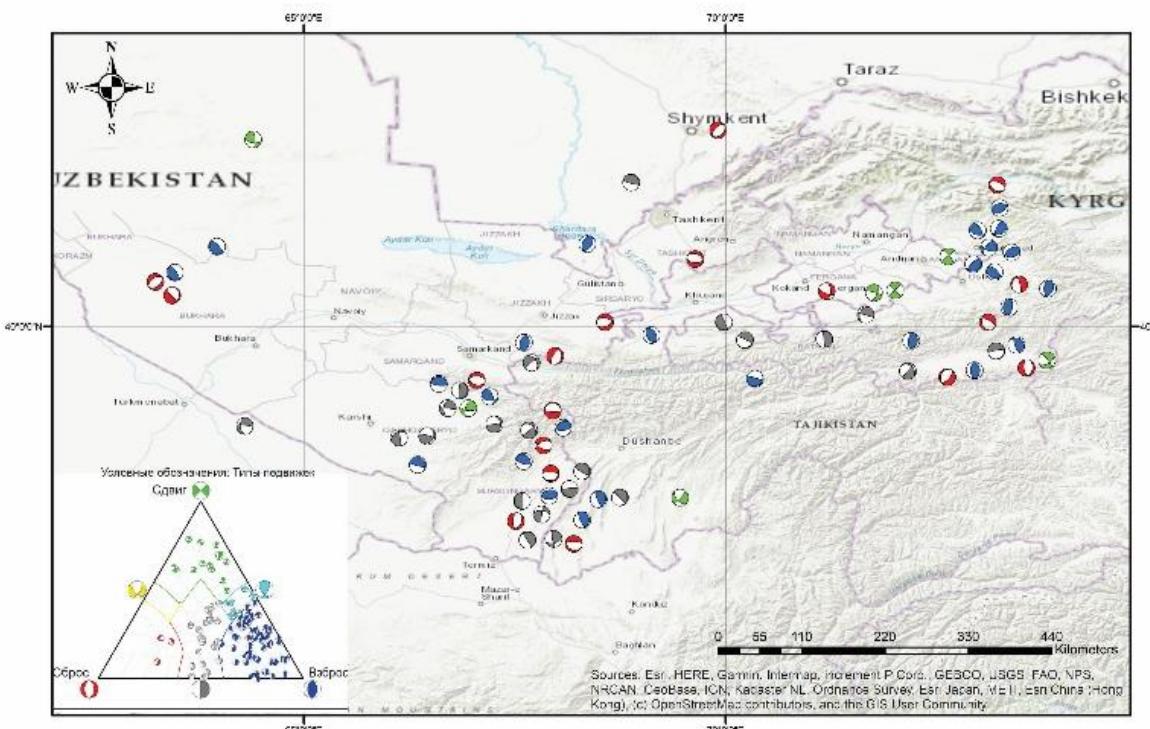


Рис. 5. Механизмы землетрясений, попавшие в группу «Yellow».
Figure 5. Focal mechanisms of earthquakes classified as «Yellow».

В ходе работы часть событий, первоначально классифицированных как «Yellow», была пересмотрена. Это стало возможным благодаря привлечению дополнительных данных от локальных и ближайших международных сейсмических станций. В результате для 77 событий классификация была изменена на «Green», поскольку увеличившееся количество фазовых наблюдений обеспечило более устойчивое решение. Скорректированные для этих событий решения механизмов приведены на рис. 6.

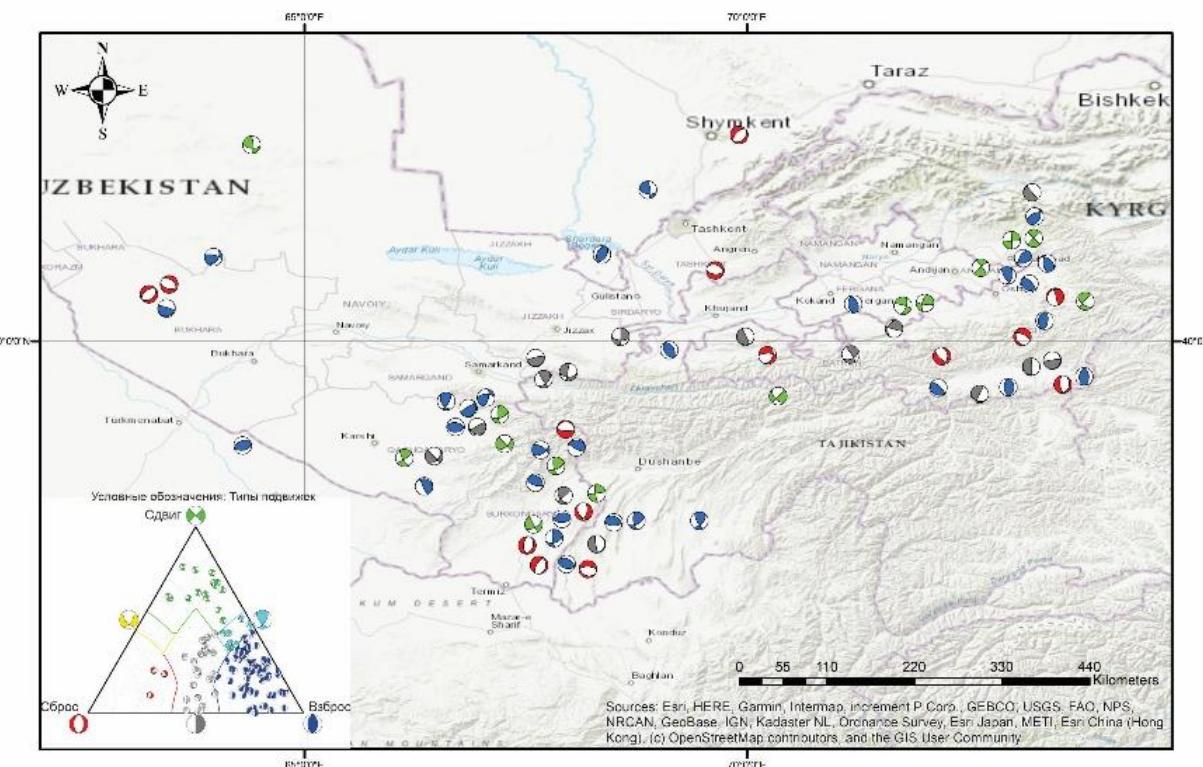


Рис. 6. Пересмотренные и доработанные механизмы очагов землетрясений, попавших в группу «Yellow».

Figure 6. Revised and refined focal mechanisms of earthquakes classified as «Yellow».

3. Отбракованные решения (Red). В категорию ненадёжных решений отнесены 86 событий. Главные причины исключения – недостаточное количество регистрирующих станций, слабый азимутальный охват, малая магнитуда или сильные шумовые искажения. Эти события признаны непригодными для дальнейшего использования в статистическом и тектоническом анализе.

Таким образом, итоговая рабочая база составила **500 достоверных решений** (423 исходные Green + 77 переработанных из Yellow), что соответствует примерно **85% от исходного объёма**. Механизмы этих землетрясений показаны на рис. 7. Оставшиеся 15% (86 событий) исключены как ненадёжные. Включение переработанных событий из категории Yellow позволило существенно укрепить статистическую основу исследования и сделать выборку более репрезентативной для анализа сейсмотектонических закономерностей.

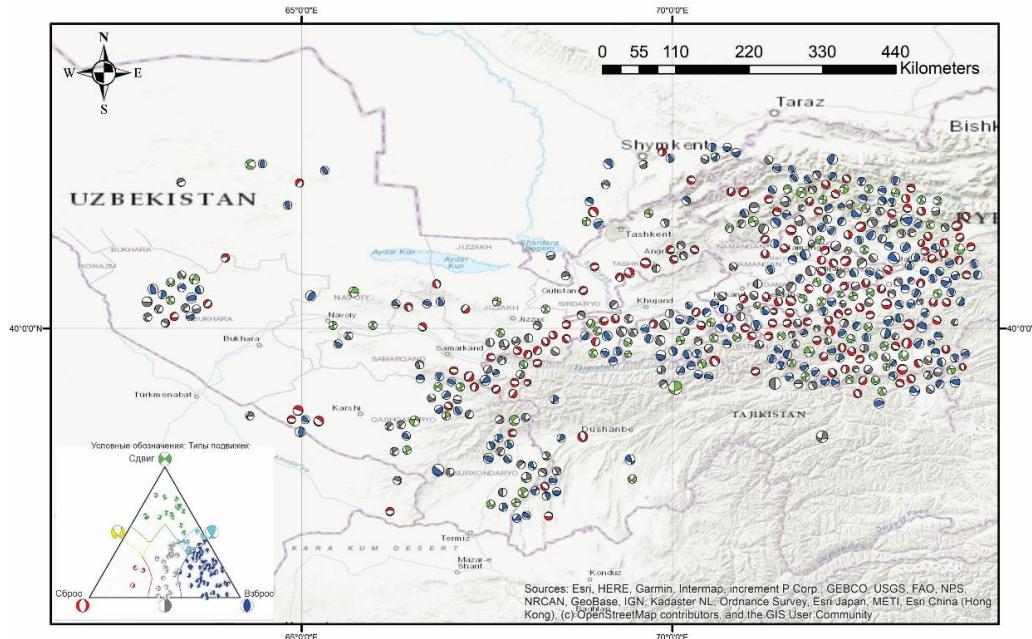


Рис. 7. Механизмы очагов землетрясений территории Узбекистана за период с 2021 по 2024 гг.
Figure 7. Focal mechanisms of earthquakes in the territory of Uzbekistan for the period 2021-2024.

Выводы. В Узбекистане массовое определение механизмов очагов землетрясений традиционно осуществляется по полярностям первых вступлений. Сравнительный анализ показал, что независимо от используемых программных средств данный метод обладает ограниченной надёжностью при использовании малых выборок, что типично для массового определения механизмов очагов землетрясений в нашей республике. Несмотря на это, метод первых вступлений сохраняет свою практическую значимость в случаях, когда обеспечивается достаточный азимутальный охват и количество достоверных наблюдений превышает 15-20. В таких ситуациях решения по знакам первых вступлений показывают удовлетворительную сходимость с результатами определения механизмов по инверсии волновых форм. Переход к определению механизмов очагов землетрясений методами инверсии волновых форм, где достаточно 4-5 трёхкомпонентных записей, видится на сегодняшний день весьма актуальной и перспективной задачей. Данный метод анализа обладает более широкими возможностями, позволяя извлекать дополнительную информацию о физике очага и является перспективным направлением для дальнейшего развития сейсмологических и геодинамических исследований в Узбекистане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Атабеков И.У., Мирзаев М.А. Сейсмическое течение горных масс территории Узбекистана // Проблемы сейсмологии. - 2020. - № 1. - Т. 2. - С. 3-12.
2. Бездонный Е.М., Туйчиев Х.А. Механизмы очагов сильных землетрясений Узбекистана. - Т.: Фан, 1987. - 144 с.
3. Захарова А.И., Матасова Л.М., Соболева О.В. Очаг Ташкентского землетрясения. Механизм очага основного толчка по инструментальным данным // Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года. - Т.: Фан, 1971. - С. 53-67.
4. Землетрясения Средней Азии и Казахстана. - Душанбе: Дониш, 1979-1988 гг.
5. Ибрагимова Т.Л., Ибрагимов Р.С., Мирзаев М.А., Ребецкий Ю.Л. Современное напряженное состояние
- Земной коры территории Узбекистана, по данным сборного каталога механизмов очагов землетрясений// Геодинамика и тектонофизика. - 2021. - Т. 12. - № 3. - С. 435-454. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0532>
6. 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>
7. Ризниченко Ю.В. Избранные труды. Проблемы сейсмологии. - М.: Изд-во АН СССР, 1985. - 408 с.
8. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. - М.: Наука, 1990. - 190 с.
9. Eksrom G., Nettles M. Global CMT web page. <http://www.globalcmt.org/> (accessed April 17, 2014).

**O'zbekiston hududida zilzila o'choqlari mexanizmlari: 2021-2024 yillardagi
ommaviy aniqlash tajribasi**
B. Alimov, A.M. Yoqubov, K.I. Kuchkarov, R.S. Ibragimov

Annotatsiya. Ushbu maqolada O'zbekiston hududida seysmologik tadqiqotlarda qo'llanilayotgan zilzila o'choqlari mexanizmlarini aniqlash usullarining taqqoslovchi tahlili keltirilgan. Asosiy e'tibor **NewMech** va **FOKAL** dasturiy vositalardan foydalanishga, shuningdek, 2021-2024 yillar oraliq'ida 586 ta zilzilaga oid katalog asosida olingan yechimlarning sifatini baholashga qaratilgan. O'choq mexanizmlarining ishonchhliligini belgilovchi mezonlar ko'rib chiqildi: minimal stansiyalar soni, azimuthal qamrov, birinchi to'lqinlarning ikki xil qutblanishining mavjudligi va ma'lumotlarning muvofiqlik darajasi. Qarorlar ishonchli, shubhali va ishonchsiz toifalarga ajratildi; natijada 500 ta mexanizm (umumiy sonning 85 foizi) seysmogedinamik talqinlar uchun yaroqli deb topildi. Tadqiqot shuni ko'rsatdiki, birinchi to'lqinlar usuli faqat yetarli kuzatuvlar soni va yaxshi azimuthal qamrov sharoitida qoniqarli aniqlik beradi, ammo cheklangan ma'lumotlar natijalarini sezilarli darajada buzadi. Shuningdek, aniqlangan mexanizmlarning ishonchhliligi va informativligini oshirish imkonini beruvchi to'lqin shakllarini inversiyalash usuliga o'tish zarurligi ta'kidlandi. Olingan natijalar Respublikadagi tadqiqotlarning hozirgi holatini aks ettirib, metodikalarni takomillashtirish va ma'lumotlar bazasini kengaytirish bo'yicha tavsiyalar beradi.

Kalit so'zlar: zilzila o'choq mexanizmi; nodal tekisliklar; asosiy kuchlanish o'qlari; birinchi to'lqinlar; to'lqin shakllari; CMT usuli; inversiya; seysmogedinamika; magnituda; azimuthal qamrov; mintaqaviy seysmiklik

Earthquake Focal Mechanisms in Uzbekistan: Experience of Mass Determinations, 2021-2024

B. Alimov, A.M. Yakubov, K.I. Kuchkarov, R.S. Ibragimov

Abstract. This paper presents a comparative analysis of methods for determining earthquake focal mechanisms applied in seismological studies across Uzbekistan. Particular attention is given to the use of **NewMech** and **FOKAL** software, as well as to the evaluation of solution quality for 586 earthquakes recorded between 2021 and 2024. Reliability criteria for focal mechanism solutions were considered, including the minimum number of stations, azimuthal coverage, the presence of both polarities of first arrivals, and the degree of data consistency. Solutions were classified as reliable, questionable, or unreliable; as a result, 500 mechanisms (85% of the total) were deemed suitable for seismotectonic interpretations. The study shows that the first-arrival polarity method provides satisfactory accuracy only when a sufficient number of observations and good azimuthal coverage are available, while limited datasets often lead to distorted results. The necessity of applying waveform inversion methods was highlighted, as they significantly improve the reliability and informativeness of focal mechanism determinations. The findings reflect the current state of seismological research in Uzbekistan and provide recommendations for improving methodologies and expanding databases for further analysis of the crustal stress-strain state.

Key words: earthquake focal mechanism; nodal planes; principal stress axes; first arrivals; waveform analysis; CMT method; inversion; seismotectonics; magnitude; azimuthal coverage; regional seismicity.

УЎК 550.34

**ЖИЗЗАХ ВИЛОЯТИНИНГ ФОРИШ ТУМАНИДАГИ ҚУРИЛИШИ
РЕЖАЛАШТИРИЛАЁТГАН НОЁБ ОБЪЕКТ ХУДУДИДА СЕЙСМИК КУЗАТУВ**

Э.Ш. Юлдашев, И.М. Алимухамедов

Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси F.O. Мавлонов номидаги Сейсмология институти
E-mail: eyuldashev2212@gmail.com, ilhom75@mail.ru

Аннотация. Мақолада Жиззах вилоятининг Фориш тумани худудида қурилиши режалаштирилаётган Ноёб обьект учун локал сейсмик тармоқни яратиш ва унинг маълумотлари орқали бир неча масалаларга ечим топиш мақсад қилинган. Улар, сейсмик режимни баҳолаш, ўрнатилган рақамли станцияларнинг магнитуда сезгириллиги имконияларини ошириш, ўрганилаётган обьект ва унга яқин худудларда содир бўлаётган зилзилаларни тахлил қилган ҳолда обьект майдонига таъсирини баҳолаш хисобланади. Сейсмик кузатув ишлари халқаро талаблар асосида қурилган ва жихозланган локал сейсмик тармоқни яратган ҳолда олиб борилган. Сейсмологик маълумотларни тахлил қилишда юқори аниқликни таъминловчи замонавий компьютер дастурларидан фойдаланилган.

Калит сўзлар: сейсмик кузатув тизими, микросейсма, чўққи тезланиш, сейсмоген зона, сейсмик таъсир, жадаллик.

Кириш. Ўзбекистон Республикаси Президентининг бир қатор қарорларида геология, нефть-газ, кимё ва энергетика соҳаларини янада жадал ривожлантиришга ётибор қаратилган бўлиб, уларда янги конларни очиш, сув омборларини қуриш, ахолини узлуксиз электр энергияси билан таъминлаш мақсад қилиб белгиланган. Ушбу муҳим иншоотларни табиий ва техноген оқибатлардан ҳимоя қилиш учун замонавий, узлуксиз сейсмик кузатув тизимини жорий қилиш долзарб масала ҳисобланади. Бугунги тезкор ривожланаётган ва рақобатлашиш даврида замонавий, қулай, аниқлиги юқори бўлган сейсмик қурилмалар кундан-кунга янгиланиб бормоқда.

Хавфлилк омили юқори бўлган обьектларда, шу жумладан АЭС, гидротехник иншоотлар, нефт ва газ конлари атрофида сейсмологик кузатувларни олиб бориш ҳамда мониторинг натижаларини илмий таҳлил қилиш танланган обьектларнинг хавфсизлигини таъминлаш, табиий ва техноген сейсмик хавфни баҳолаш, шунингдек, уларнинг фаолияти ва атроф-муҳитга таъсирини назорат қилиш учун муҳимдир.

Тадқиқот олиб борилаётган ҳудуднинг геологик тузилиши жихатидан юзага чиқиб қолган асосли тоф жинслари ва чўкинди қатлам ётқизиқларидан иборат. Яратилган сейсмик кузатувларни олиб бориш тизими Писталитоф, Эгарберлитоф, Хонбандитоф ва Шимолий Нурота тоф тизмалари яқинида бўлганлиги боис сейсмик кузатувлар олиб борилаётган тизим таркибидаги сейсмометрлар техноген шовқинлардан қочиш ва сифатли сигналларни қайд қилиш максадида тоф ён бағриларига, асосли тоф жинсларига ўрнатилган (1-расм).



1-расм. Локал сейсмик тармоқ.

Халқаро хужжат ва муҳим обьектларга бўлган талаблар асосида, барча сейсмик станциялар қурилаётган Ноёб объект майдондан 30-40 км радиусдаги узоқликда жойлаштирилган. Автоном равишда ишлайдиган сейсмик кузатув асбобларининг номлари, тури ва жойлашув координаталарини қуидаги 1-жадвалда кўришимиз мумкин.

1-жадвал

Сейсмик кузатув станцияларининг номи	Сейсмометр тури	Координата	
		φ	λ
Lolazor	LOL	Guralp CMG-40TD	40,40
Egizbuloq	EGZ	Guralp CMG-40TD	40,31
Osmonsoy	OSM	Guralp CMG-40TD	40,36
Deriston	DER	Guralp CMG 6TD ва Fortimus	40,41

Safarota	SFO	Guralp CMG-40TD	40,50	66,97
Eski Forisht	ESF	Guralp CMG 6TD	40,55	66,90
Uchquloch	UCHK	Guralp CMG-40TD	40,51	67,34
Meteo	MET	Guralp CMG-5TDE ва Fortimus	40,57	67,34
Maydon 1	MAY1	Guralp CMG-40TD	40,56	67,33
Maydon 1	MAY1	Fortimus	40,56	67,33

Ноёб объект худуди атрофида ўрнатилган 10 та сейсмик станциялар орқали сейсмик режимни баҳолаш.

Локал тармоқ кузатуви асосан кенг қамровли сейсмометрлар (CMG-40TD, CMG-6TD, Fortimus) ёрдамида амалга оширилади. Улар муқобил энергия манбалари ва GPS антенна билан жихозланган бўлиб, станциянинг узлуксиз ишлаши ва аниқ вақтни таъминлайди (2-расм).



2-расм. Майдон ва Лолазор сейсмик станцияларининг умумий кўриниши.

Тадқиқотнинг услуби

Худудларда сейсмик станцияларни жойлаштириш ва узлуксиз кузатувларни ўтказишдан аввал қўйидаги бирламчи ишларни амалга ошириш тавсия қилинади:

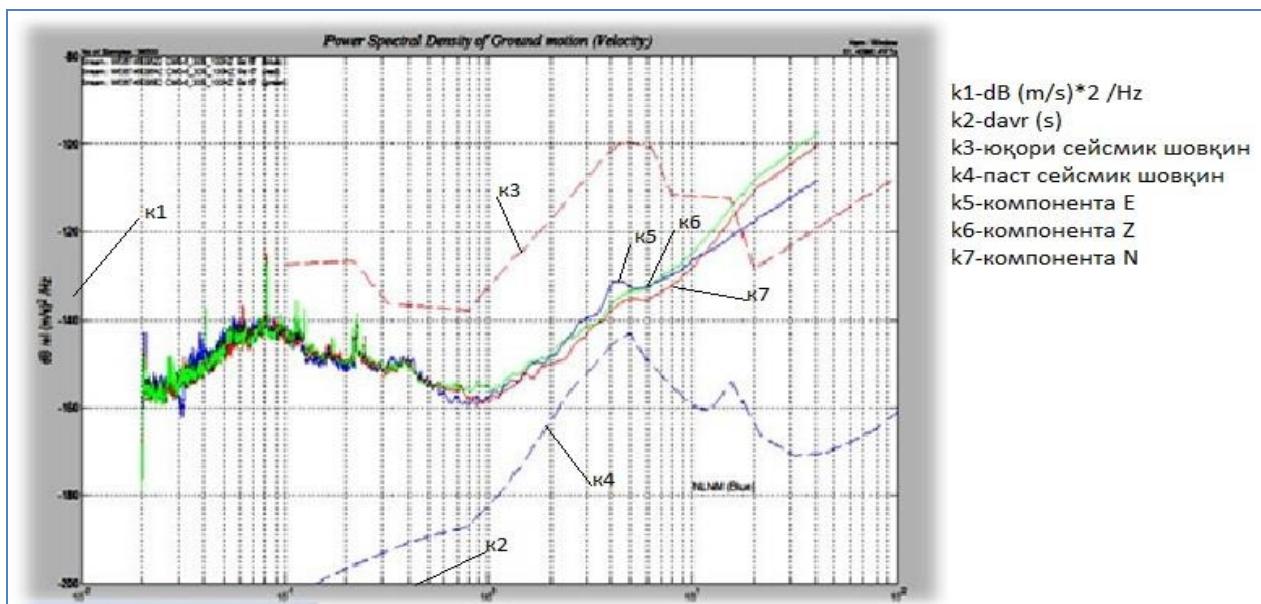
- танланган худуднинг геологик шароитларини ўрганиш;
- халал берувчи омиллардан узоқлашиш (насос, вибратор, катта йўл... в.х.к.);
- маълумот узатиш (алоқа) тармоғи имкониятларини текшириш;
- станцияларни ўрнатиш учун танланган жойларда шовқинлар даражасини баҳолаш учун инструментал сейсмометрик ўлчовларни ўтказиш (3-расм).



3-расм. Guralp CMG 6TD сейсмометри (велосиметр) ёрдамида шовқин (микротремор) даражасини ўлчаш жараёни.

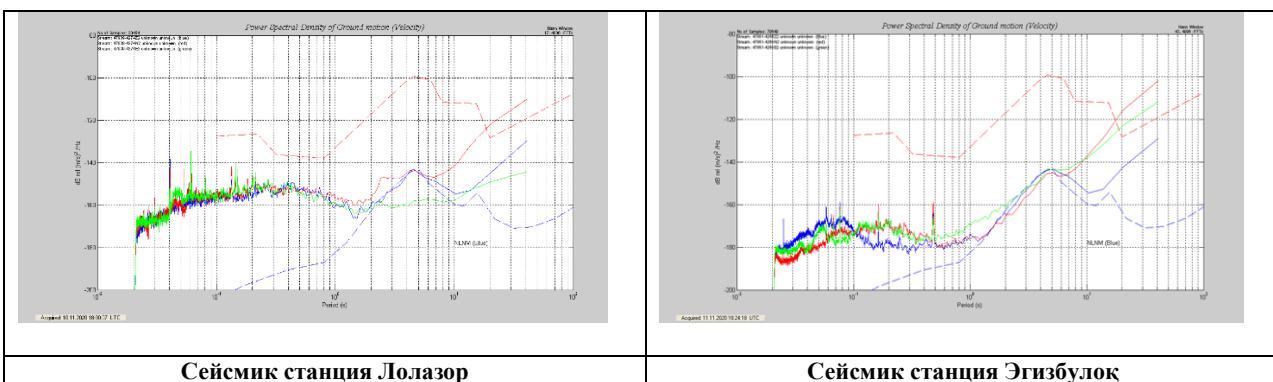
Сейсмик шовқинларнинг спектрал зичлиги, бу сейсмик шовқин кучини турли частоталар бўйича қандай тақсимланишининг ўлчовидир. Бу маълумот сейсмологлар учун сейсмик шовқин генезисини аниқлаш, табиий (океан тўлқинлари) ва техноген (инсон фаолияти) манбаларини фарқлаш ва Ер қобигининг ички тузилишини ўрганиши имконини беради. Сейсмик шовқинлардаги ўзгаришларни вақт ўтиши билан кузатиб бориш орқали олимлар атроф-муҳитдаги ўзгаришларни ёки сейсмик фаолликни кузатишилари мумкин.

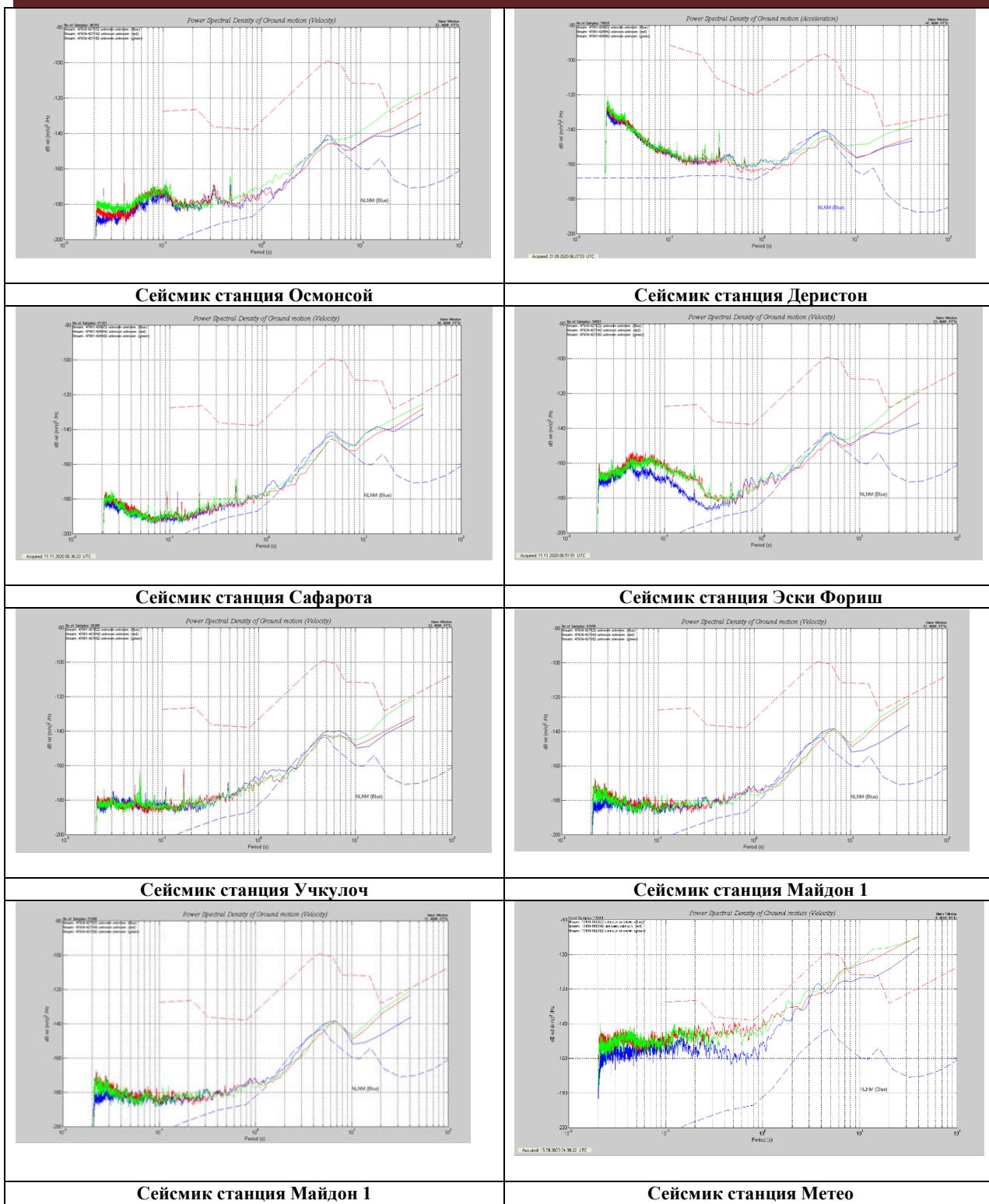
Кўп йиллик тадқиқотлар асосида сейсмик шовқинларнинг юқори ва пастки чегаралари аниқланган. Бу ёндашув асосида тадқиқод худудида микросейсмик ўлчовлардан олинган сейсмик маълумотларнинг таҳлили орқали нуқталардаги грунт тебранишларининг спектрал зичлик миқдорлари аниқланади. 4-расмда шовқин даражаси нормал бўлган ҳолат учун спектрал зичлик миқдори келтирилган.



4-расм. Шовқин даражаси нормал бўлган ҳолат учун спектрал зичлик миқдори графиги.

Бизнинг ҳолатимизда, ўрганилаётган майдон атрофида сейсмик шовқинларни таҳлил қилиш натижасида худудда шовқин даражаси кам бўлган жойлар танлаб олинган ва бу нуқталарда 10 та сейсмик станциялар ўрнатилган. Куйида уларнинг спектрал зичлик миқдорлари келтирилади. Барча сейсмометрлар зичлиги юқори бўлган тоғ жинсларига ўрнатилганлиги боис ёзиб олинган маълумотларининг спектр қийматлари юқори ва пастки чегаралар оралиғида намоён бўлган. Бундай шароитларда ўрнатилган сейсмик станцияларнинг кичик зилзила ходисаларини ҳам қайд қилиш имконияти юқори бўлади (5-расм).





5-расм. Сейсмик станциялар маълумотидан олинган спектрал зичлик миқдори.

Сейсмик таъсирлар интенсивлигининг ўзгариши тегишли зилзила маълумотлари асосида ҳисобланади. Ушбу сейсмик таъсирларнинг ўзгариши қуйидаги формула орқали ҳисобланди:

$$\Delta I = 3,3 * \text{Lg}(A_i / A_n),$$

бу ерда, A_i – ўрганилаётган нүктадаги сигналнинг амплитуда миқдори; A_n – таянч нүктадаги сигналнинг амплитуда миқдори.

Маълумки, Ер тортишиш кучи (гравитация) таъсирида барча эркин тушаётган жисмларнинг тезланиши (**g**) билан белгиланади ва унинг қиймати $9,80665 \text{ м/с}^2$ га тенг. Бу кўрсаткич орқали зилзила вактида ер юзаси тебранишининг энг чўққи тезланиши (PGA) ўлчанади. Тезланиш қийматлари келтирилган қуйидаги жадвалда турли PGA қийматларининг обьектларга қандай таъсир қилиши келтирилган. Мисол учун тезланиш қийматлари $0,04 \text{ g}$ бўлганда мўрт тузилмаларга зарар етиши мумкин, $0,1 \text{ g}$ дан юқори PGA кўрсаткичидан эса биноларга жиддий зарар етказилади. Бундай ҳолларда қурилиш худуди грунтини мустаҳкамлаш учун маҳсус чоралар талааб қилинади. Жадвалда грунтлардаги чўққи тезланишлари (PGA) билан бир қаторда мумкин бўлган сейсмик таъсирнинг солиштируванин кўришимиз мумкин (2-жадвал).

2-жадвал

Сейсмик таъсир категорияси	PGA (g) диапазони	Тезланиш (см/с^2)	Сейсмик таъсирнинг тавсифи
Жуда заиф	$< 0,001$	< 1	Амалда сезилмайди; фақат асбоблар билан рўйхатга олинади
Заиф	$0,001-0,01$	$1-10$	Кучсиз тебраниш; биноларга зарари йўқ
Ўртача	$0,01-0,05$	$10-50$	Одамлар хис киласди; курилишга хавфсиз
Кучли	$0,05-0,10$	$50-100$	Сейсмик мустаҳкамланмаган бинолар зарар кўриши мумкин
Жуда кучли	$0,10-0,20$	$100-200$	Сейсмик мустаҳкам биноларда шикастланиш; эски бинолар учун хавфли
Бузувчи	$0,20-0,40$	$200-400$	Жиддий зарарлар, енгил биноларнинг қисман ёки тўлиқ бузилиши
Фалокатли	$> 0,40$	> 400	Кўплаб биноларнинг қулаши, инфратузилма бузилиши

Сейсмик маълумотларни таҳлил қилиш учун Waves-v4.8 компьютер дастуридан фойдаланилди. Бу дастур Австралиянинг Мельбурн шаҳрида жойлашган Сейсмология тадқиқотлар маркази (SRC) томонидан ишлаб чиқилган бўлиб, хар йили янги имкониятлар билан тақомиллаштирилиб борилади. Унинг афзалиги, зилзила ходисалари ва конлардаги съонаат портлатишларининг аниқ жойи ва вақтини юқори аниқликда тўғри белгилаш имкониятига эга.

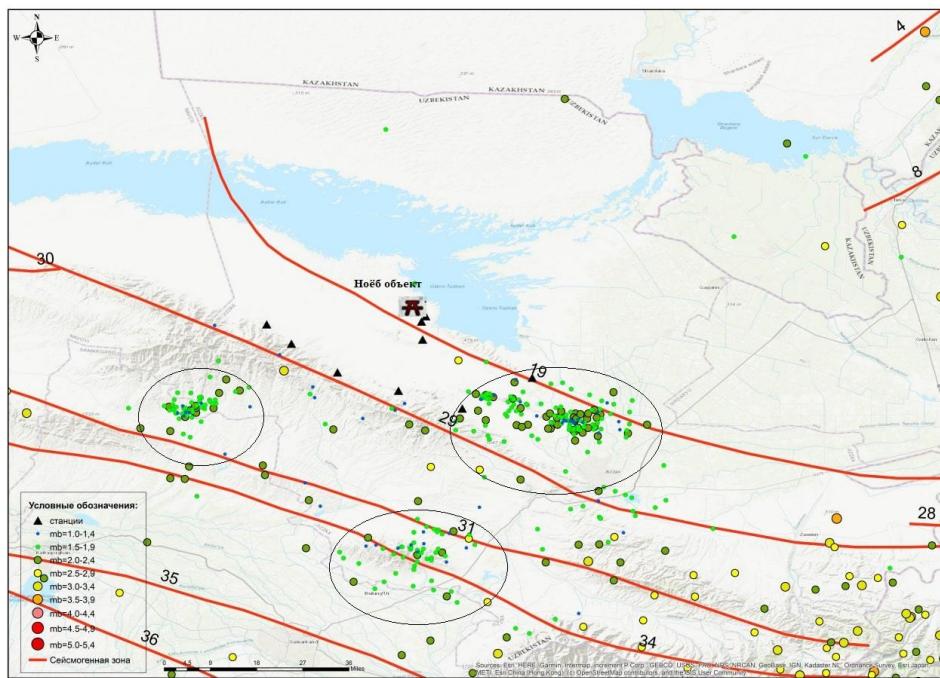
Тадқиқотдан олинган натижалар

Тадқиқот натижаларининг таҳлили бўйича сейсмик кузатув тизими орқали 2024 йил мобайнида ўрганилаётган худуддага Ноёб обьектга нисбатан 100 км радиусда турли магнитудали ($0,8 \leq M \leq 3,1$) 1000 га яқин зилзилалар қайд этилган. Уларнинг асосий қисми сейсмоген зоналарда, чукурлиги 4-20 км бўлган оралиқда содир бўлганлиги аниқланди (6-расм).

Зилзила эпимарказлари ва ер ёриклири туширилган харитада 3 та асосий сейсмик фаол худудлар айланалар ичida ажратиб кўрсатилган. Бу худудларда магнитудаси катта бўлмаган ($1,5 \leq M \leq 2,5$) зилзила ходисаларини айрим майдонларга жамланганлигини кузатишимиз мумкин.

2024 йил давомида Жиззах вилояти Фориш туманига ўрнатилган 10 та сейсмик станциялар қайд қилган зилзила ходисаларини таҳлил қилиш натижаси Ноёб обьект худудидаги грунт тезланиш амплитуда миқдори (**g**) юқори бўлган сейсмик ходисалар 3-жадвалда келтирилган.

Жадвалда 2024 йил давомида Ноёб объект худудига таъсир этувчи зилзила ходисалари кузатилмаганлигини кўришимиз мумкин.



6-расм. Сейсмик кузатув тизими орқали 2024 йилда ёзигб олинган $M \geq 0,8$ зилзилалар эпимаркази харитаси (радиус 100 км) (А.Х. Ибрагимов, Б.Г. Алимов).

3-жадвал

Сана	Вақт	Тезланиш, см/с ²	Эркин тушиш тезланиш (g)
20.01.2024	04:03:38	0,56	0,00057
05.02.2024	12:57:22	0,003	0,000003
05.02.2024	16:21:22	0,035	0,000035
06.03.2024	19:33:02	0,136	0,000138
14.03.2024	16:56:29	0,008	0,000008
25.03.2024	17:20:13	0,047	0,000047
10.04.2024	22:26:36	0,02	0,000020
13.04.2024	21:08:53	0,42	0,000428
14.04.2024	00:08:38	0,18	0,000183
28.05.2024	05:40:21	1,45	0,001478
30.05.2024	22:25:44	0,24	0,00024
24.06.2024	01:06:34	0,01	0,000010
08.07.2024	13:04:37	0,02	0,000020
20.07.2024	16:07:33	0,03	0,000030
10.09.2024	13:50:37	0,01	0,000010
22.09.2024	02:49:41	0,20	0,00020
26.09.2024	22:25:59	1,79	0,001825
18.10.2024	20:32:44	0,776	0,000791
23.10.2024	16:34:09	0,031	0,000031
08.11.2024	11:53:04	0,062	0,000063
19.11.2024	22:53:17	0,582	0,00059
20.11.2024	15:46:42	1,046	0,00106
10.12.2024	4:36:43	0,038	0,000038

Хулоса

Кузатув тадқиқотлари натижасида яратилган локал сейсмик тармоқ томонидан 2024 йил мобайнида Ноёб объект худудидан 100 км радиусдаги худудда 1000 га яқин майда зилзила ва 140 га яқин саноат портлатышлари; 320 км радиусда эса 4500 га яқин зилзилалардан ҳосил бўлган Ер тебранишлари қайд қилинган. Буларга, тадқиқот худудида МШК-64 шкаласи бўйича жадаллиги I = 2-3 балл билан сезилган Қирғизистон Республикасида 2024 йил 19 ноябр куни соат 22:53:17 да содир бўлган $ML = 5,3$ магнитудали зилзилни мисол қилиш мумкин. Айнан Ноёб объект худуди яқинида эса 2024 йил 26 сентябрь куни содир бўлган $ML = 1,1$ магнитудали маҳаллий зилзила тахлили асосида майдондаги грунтлар учун энг юқори чўкки тебраниши $1,79 \text{ см}/\text{с}^2$ ($g = 0,001825$) бўлганлигини кўришимиз мумкин. Умуман олганда, 2024 йил мобайнида олиб боирилган изланишлар давомида доимий сейсмик кузатув ишлари жорий этилган майдондаги грунт тезланишлари Ноёб объект учун сезиларли даражада таъсир этмаганлиги аниқланди.

АДАБИЁТЛАР

1. Borman P., Baumbach M., Bock G., Grosser H., Choy G.L. Seismic sources and source parameters // NMSOP. - Potsdam, 2009. - P. 1-98.
2. Ибрагимов А.Х., Хамидов Х.Л., Юлдашев Э.Ш., Мажидов Ж.Р. Оценка кинематических элементов сейсмических волн при динамических воздействиях промышленными взрывами // Сейсмология муаммолари. - 2019. - № 2.
3. Borman P. Concept for a new "Manual o Seismological Observatory Pactice" // European Seismological Commission Proceedings and Activity Report 1992-1994 published by University of Athens faculty of Science. - 1994.
4. Nakamura Y. A Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quarterly Report of RTRI. - 1989. - Vol. 30. - № 1. - P. 25-33.
5. Nakamura Y. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications // Proc. of the 12th World Congress on Earthquake Engineering, Auckland. -New Zealand, 2000.
6. Горшков Г.А. Нормативный хаос в Российском микрорайонировании Geoinfo.ru. - 2017.
7. Тұрдуколов А.Т., Камчыбеков М.П., Егембердиева К.А., Камчыбеков Ы.П. Теоретические основы сейсмического микрорайонирования на примере проведённых работ в Кыргызстане. - 2013. - № 2 (2).
8. Юлдашев.Э.Ш. Сув омборларида узлуксиз сейсмик кузатув олиб боришнинг замонавий усуслари. 2021.
9. Шебалин Н.В. О предельной магнитуде и предельной балльности землетрясений // Физика Земли. - 1971. - № 6. - С. 12-20.
10. Раутиан Т.Г. Проблема определения энергии землетрясений // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. - М.: ИФЗ АН СССР, 1974. - С. 107-112.

Сейсмический мониторинг в районе планируемого к строительству уникального объекта в Фаришском районе Джизакской области

Э.Ш. Юлдашев, И.М. Алимухамедов

Аннотация. Цель статьи – создание локальной сейсмической сети для уникального объекта, планируемого к строительству в Фаришском районе Джизакской области, и решение ряда задач с использованием её данных. К ним относятся: оценка сейсмического режима, повышение магнитудной чувствительности установленных цифровых станций и оценка воздействия на территорию объекта путём анализа землетрясений, происходящих на исследуемом объекте и в его окрестностях. Сейсмический мониторинг осуществлялся путём создания локальной сейсмической сети, построенной и оснащённой в соответствии с международными требованиями. При анализе сейсмологических данных использовались современные компьютерные программы, обеспечивающие высокую точность.

Ключевые слова: система сейсмического мониторинга, микросейсмы, пиковые ускорения, сейсмогенная зона, сейсмическое воздействие, интенсивность.

**Seismic monitoring in the area of a unique facility planned for construction
in the Farish district of the Jizzakh region**

E.Sh.Yuldashev, I.M. Alimukhamedov

Abstract. The objective of this article is to create a local seismic network for a unique facility planned for construction in the Farish District of the Jizzakh Region and to address a number of issues using its data. These include assessing the seismicity, increasing the magnitude representativeness of installed digital stations, and assessing the impact on the facility's territory by analyzing earthquakes occurring at the facility and in its vicinity. Seismic monitoring was carried out by creating a local seismic network, constructed and equipped in accordance with international requirements. Modern computer programs ensuring high accuracy were used to analyze the seismological data.

Key words: seismic monitoring network, microseisms, peak ground acceleration, seismogenic zone, seismic impact, intensity.

M u n d a r i j a	sah.
Ismoilov V.A., Bozorov J.Sh., Yodgarov E.M., Rahmatov A.R., Xusomiddinov A.S., Mamarozikov T.U., Qodirboyev A.K. Seysmik mikrorayonlashtirishda raqamli xaritalarini ishlab chiqish va qo'llash (Chust shahri misolida)	5
Ibragimova T.L. Mazari-Sharif-Herat temir yo'li (Shimoliy Afg'oniston) uchun zilzila xavfini baholash maqsadida zilzilalar katalogini shakllantirish	13
Abdullabekov K.N. Markaziy Osiyo va uning atrofida kuchli zilzilalarning makon va zamonda namoyon bo'l shining ba'zi xususiyatlari	25
Ibragimova T.L. Zilzilalarni prognozlashda gidrogeokimiyoviy monitoring uchun quduqlarni tanlash	29
Nurmatov U.A., Sodiqov Yu.M., Yusupjanova U.A. Janubiy O'zbekistonning seismotektonik xususiyatlari va seysmogen zonalari	35
Atabaev D.X., Krahmal K.A., Majidova Sh.M. Farg'ona mintaqasining arxeoseysmologik yodgorliklari materiallari bo'yicha tabiatning evolyutsion rivojlanishining xronostratigrafik bosqichlarini o'rganishga	46
Mamarozikov T.U., Xamidov L.A., Alimov B.G., Qurbanov T.S., Ortikov F.R., Xalboev S.B. O'zbekiston janubidagi seysmik xavfli segmentdagi zilzila chastotasining o'zgarishi bilan bog'liq seysmik entropiya	56
Yusupov D.D., Alimuxamedov I.M., Xalbaev S.B., Qodirov J.Z., Zakirova O.F., Mamarozikov T.U. Vs30 ning muhandislik-geologik interpolatsiyasi: ma'lumotlar tanqisligi sharoitida sintetik augmentatsiya va mashinaviy o'rganish	63
Yusupov D.D., Alimuxamedov I.M., Xalbayev S.B., Kodirov J.Z., Zakirova O.F., Mamarozikov T.U. Vs30 parametrini Poisson disk namuna olish usuli bilan interpolatsiya qilish uchun kuzatuv nuqtalarini joylashtirishni rejalaشتirish	83
Alimov B., Yoqubov A.M., Kuchkarov K.I., Ibragimov R.S. O'zbekiston hududida zilzila o'choqlari mexanizmlari: 2021-2024 yillardagi ommaviy aniqlash tajribasi	95
Алимухамедов И.М., Юлдашев Э.Ш. Жиззах вилояти фориш туманида курилиши режалаштирилаётган ноёб объект худудида сейсмик кузатув натижалари	104

С о д е р ж а н и е	стр.
Исмаилов В.А., Бозоров Ж.Ш., Ядигаров Э.М., Рахматов А.Р., Хусомиддинов А.С., Мамарозиков Т.У., Кадирбоев А.К. Разработка и применение цифровых карт сейсмического микрорайонирования (на примере города Чуст)	5
Ибрагимова Т.Л. Формирование каталога землетрясений для оценки сейсмической опасности железнодорожной трассы Мазари-Шариф-Герат (Северный Афганистан)	13
Абдуллабеков К.Н. Некоторые особенности проявления сильных землетрясений во времени и пространстве в Центральной Азии и прилегающих территориях	25
Ибрагимова Т.Л. К выбору объектов гидрогоеохимического мониторинга для прогноза землетрясений	29
Нурматов У.А., Садыков Ю.М., Юсупджанова У.А. Сейсмотектонические особенности и сейсмогенные зоны Южного Узбекистана	35
Атабаев Д.Х., Крахмаль К.А., Мажидова Ш.М. К изучению хроностратиграфических этапов эволюционного развития природы по материалам археосейсмологических памятников Ферганского региона	46
Мамарозиков Т.У., Хамидов Л.А., Алимов Б.Г., Курбанов Т.С., Артиков Ф.Р., Халбаев С.Б. Сейсмическая энтропия как индикатор вариаций частоты землетрясений в сейсмоактивных зонах Южного Узбекистана	56
Юсупов Д.Д., Алимухамедов И.М., Халбаев С.Б., Кодиров Ж.З., Закирова О.Ф., Мамарозиков Т.У. Инженерно-геологическая интерполяция Vs30: синтетическая аугментация и машинное обучение в условиях дефицита данных	63
Юсупов Д.Д., Алимухамедов И.М., Халбаев С.Б., Кодиров Ж.З., Закирова О.Ф., Мамарозиков Т.У. Планирование размещения наблюдательных точек для интерполяции параметра Vs30 методом дискового семплирования Пуассона	83
Алимов Б., Якубов А.М., Кучкаров К.И., Ибрагимов Р.С. Механизмы очагов землетрясений в Узбекистане: опыт массовых построений 2021-2024 гг.	95
Алимухамедов И.М., Юлдашев Э.Ш. Сейсмические наблюдения в районе строительства уникального объекта в Фаришском районе Джизакской области	104

C o n t e n t	page
Ismailov V.A., Bozorov J.Sh., Yadgarov E.M., Rakhmatov A.R., Khusomiddinov A.S., Mamarozikov T.U., Khodirboyev A.K. Development and Application of Digital Maps for Seismic Microzonation (A Case Study of Chust City)	5
Ibragimova T.L. Formation of an Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment of the Mazar-i-Sharif–Herat Railway (Northern Afghanistan)	13
Abdullabekov K.N. Some features of the manifestation of strong earthquakes in time and space in Central Asia and adjacent territories	25
Ibragimova L.T. Towards the selection of wells for hydrogeochemical monitoring in earthquake forecasting	29
Nurmatov U.A., Sadykov Yu.M., Yusupdzhanova U.A. Seismotectonic features and seismogenic zones of Southern Uzbekistan	35
Atabayev D.X., Kraxmal K.A., Majidova Sh.M. To study the chronostratigraphic stages of the evolutionary development of nature, based on the materials of the archeoseismological monuments of the Ferghana region	46
Mamarazikov T.U., Khamidov L.A., Alimov B.G., Kurbanov T.S., Artikov F.R., Khalbaev S.B. Seismic Entropy Associated with Earthquake Frequency Variations in a Seismically Hazardous Segment of Southern Uzbekistan	56
Yusupov D.D., Alimukhamedov I.M., Khalbaev S.B., Kodirov Zh.Z., Zakirova O.F., Mamarozikov T.U. Vs30 engineering and geological interpolation: synthetic augmentation and machine learning in conditions of data scarcity	63
Yusupov D.D., Alimukhamedov I.M., Khalbaev S.B., Kodirov Zh.Z., Zakirova O.F., Mamarozikov T.U. Planning the placement of observation points for interpolation of the Vs30 parameter by the Poisson disc sampling method	83
Alimov B., Yakubov A.M., Kuchkarov K.I., Ibragimov R.S. Earthquake Focal Mechanisms in Uzbekistan: Experience of Mass Determinations, 2021-2024	95
Alimuxamedov I.M., Yuldashev E.Sh. Seismic observations in the construction area of a unique facility in Farish District, Jizzakh Region	104

Коллектив авторов

SEYSMOLOGIYA MUAMMOLARI

ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОЛОГИИ

SEISMOLOGY PROBLEMS

2025, № 2, том 7

*Утверждено к печати Ученым советом
Института сейсмологии им. Г.А.Мавлянова (04.09.2025 г. № 8)*

Редактор **Т.Г.Кочергина** (рус.)

Компьютерная верстка **В.Р.Юсупов**

Формат 80×64_{1,8}. Усл. печ. л. 14,5. Уч.-изд. л. 16. Тираж 100 экз.
Отпечатано в Бизнес Полиграф.
Ташкент, Чиланзар, ул. Козиробот, 65.

Обуна индекси (подписной индекс) 1351.