

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI**

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN**

**SEISMOLOGIYA  
MUAMMOLARI**

**ПРОБЛЕМЫ  
СЕЙСМОЛОГИИ**

**PROBLEMS  
SEISMOLOGY**

**№ 1**

**ТОМ 7**

---

**2025**

*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

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Bosh muharrir:</b>  | <b>Bosh muharrir o'rinbosari:</b>                       | <b>Mas'ul kotib:</b>                              |
| <b>Ismailov Vaxitxan<br/>Alixanovich</b><br>g.-m.f.d., prof. | <b>Alimuhamedov Ilxom<br/>Mizratovich,</b><br>g.-m.f.n. | <b>Nurmatov Ulfat<br/>Amanovich,</b><br>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 Baxtiev 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); **Tuychiev 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); **Mirzaev Murodjon Abduraximjanovich**, f.-m.f.f.d. (PhD) (O'zbekiston);

Jurnalda chop etilgan materiallardan foydalanilganda «Seismologiya 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.

«Seismologiya 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 Seismologiya 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 Кахарбой Носирбекович**, д. ф.-м. н., *акад.* (Узбекистан); **Абдрахматов Канатбек Ермакович**, д. г.-м. н., *акад.* (Киргизия); **Пулод Аминзода**, д. т. н. (Таджикистан); **Атабаев Дилшод Хусаинбаевич**, д. г.-м. н., проф. (Узбекистан); **Етирмишли Гурбан Джалал ўгли**, 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 Бахтиер 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 Кахрамон 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, Шайхантахурский район, ул. Зулфияханум, 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 ogli**, *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 BAHOLASH VA SEYSMIK RAYONLASHTIRISH

УДК.550.34

## ОЦЕНКИ ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ОЧАГОВЫХ ЗОНАХ УЗБЕКИСТАНА

Т.Л. Ибрагимова

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

E-mail: tam.anay@yahoo.com

**Аннотация.** Для сейсмоактивных зон и очаговых областей, расположенных на территории Узбекистана, построены графики повторяемости землетрясений и определены коэффициенты в зависимости Гутенберга-Рихтера. Установлено, что для ряда сейсмоактивных зон и очаговых областей графики повторяемости землетрясений в области больших магнитуд имеют загиб вверх, свидетельствующий о том, что периоды повторения землетрясений, близких к максимально возможным, в 2-4 раза меньше по сравнению с прогнозами, основанными на прямолинейной части графиков повторяемости. На основе прямолинейных участков графиков оценены периоды повторения землетрясений с магнитудой  $M \geq 5,0$  в очаговых зонах сильных землетрясений Узбекистана. Учитывая дату последнего сильного события, произошедшего в зоне, рассчитана вероятность возникновения аналогичных землетрясений в текущий момент времени.

**Ключевые слова:** повторяемость землетрясений, зависимость Гутенберга-Рихтера, характеристическое землетрясение, сейсмическое затишье, прогноз сейсмической активизации.

**Введение.** Оценка долговременного среднего уровня сейсмичности – одна из ключевых задач при изучении сейсмической опасности и прогнозировании землетрясений. Исторически первым и одним из основных методов количественной оценки повторяемости сейсмических событий является закон Гутенберга-Рихтера (Gutenberg, Richter, 1944), установленный при анализе сейсмичности Земли. График повторяемости землетрясений представляет зависимость числа землетрясений от магнитуды. Обычно он строится в логарифмическом масштабе и имеет вид:  $\lg N = a - bM$ , где  $N$  – количество землетрясений магнитуды  $M$  или больше в единицу времени;  $a$  и  $b$  – постоянные величины, зависящие от конкретного района. Для Земного шара в целом и для большинства изученных районов наблюдается экспоненциальное уменьшение числа землетрясений примерно в 8-10 раз при увеличении магнитуды на единицу.

Так, если оценка повторяемости для того магнитудного уровня, который обеспечен наблюдениями, решается унификацией различных шкал магнитуд, декластеризацией каталогов землетрясений, оценкой представительности и т. д., то экстраполяция наблюденной повторяемости на предельно большие магнитуды вызывает множество вопросов.

Различные подходы к оценке повторяемости крупных землетрясений включают временной кластерный анализ (Poisson, Weibull) (Wu et al., 2019; Bereta et al., 2011), статистические модели (Омори, ETAS) (Nishikawa, Nishimura, 2023) и Байесовский метод, позволяющий учитывать априорные данные о сейсмическом режиме региона. Теория экстремальных значений также применяется для оценки вероятности редких событий высокой магнитуды (Pisarenko et al., 2014).

Ряд исследований (Гусев, Шумилиа, 2004) показывает, что автоматическое применение закона Гутенберга-Рихтера для сильных землетрясений может приводить к заниженным оценкам их повторяемости, причем степень занижения может достигать 2-5 раз. В работе (Rodkin et al., 2014) аргументировано, что неограниченная экстраполяция закона Гутенберга-Рихтера дает нереалистичные прогнозы с бесконечными значениями выделенной сейсмической энергии. Таким

образом, начиная с определённого порога магнитуд, данный закон перестаёт быть справедливым, и графики повторяемости демонстрируют нелинейные отклонения.

Существуют различные модели, описывающие такие отклонения. В частности, в модели (Kagan, 1994, 1999) вводится экспоненциальный множитель, корректирующий закон Гутенберга-Рихтера. В других моделях (Laherrere, Sornette, 1998) распределение аппроксимируется степенной функцией с дробным показателем. Модель (Pacheco et al., 1992) предполагает изменение наклона графика повторяемости с  $b < 1$  для слабых землетрясений до  $b > 1$  для сильных. Однако выбор наилучшей модели затруднен из-за ограниченности эмпирических данных о редких крупных землетрясениях.

Особый интерес представляет феномен характеристических землетрясений (Wessnousky et al., 1983), когда в регионе наблюдается аномально высокая повторяемость событий определенной магнитуды, что приводит к отклонению графика повторяемости от экспоненциального закона. Хотя статистическая обоснованность модели характеристических землетрясений остается дискуссионной (Kagan, 1993), она широко применяется для оценки долгосрочной сейсмической опасности.

В исследовании (Sherman et al., 2017) выполнена классификация типов графиков повторяемости сильных землетрясений Центральной Азии, построенных для областей динамического влияния крупных сейсмоактивных разломов по данным за последние сто лет, на основе их формы. Разные типы хвостов интерпретируются как соответствующие случаям возникновения/не возникновения в очагах землетрясений нелинейных положительных и отрицательных обратных связей, ответственных за реализацию событий различной магнитуды.

Настоящая работа направлена на исследование применимости классического закона Гутенберга-Рихтера для оценки повторяемости сильных землетрясений в сейсмоактивных зонах и очаговых областях сильных землетрясений Узбекистана.

### Объект и предмет исследования, исходные данные

На основе сейсмологических и сеймотектонических данных на территории Узбекистана выделены десять сейсмоактивных зон, в пределах которых реализуются сильные (с магнитудой  $M \geq 5,0$ ) землетрясения (Ибрагимов и др., 2002; Уломов, 1974; Artikov et al., 2018) (рис. 1).

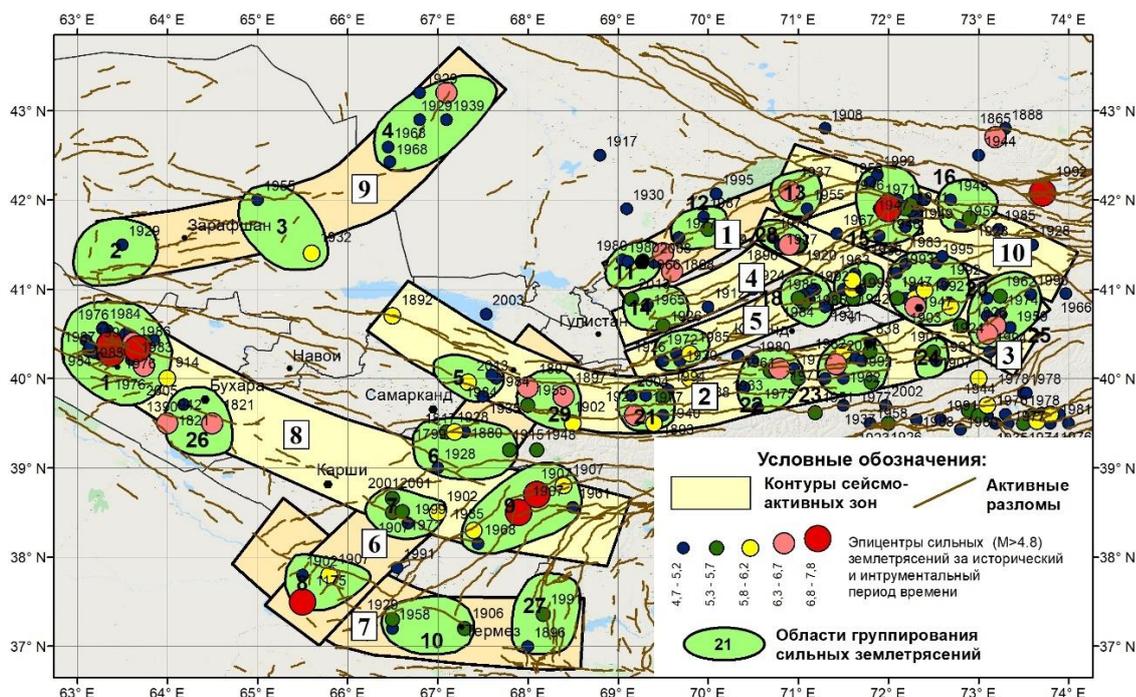
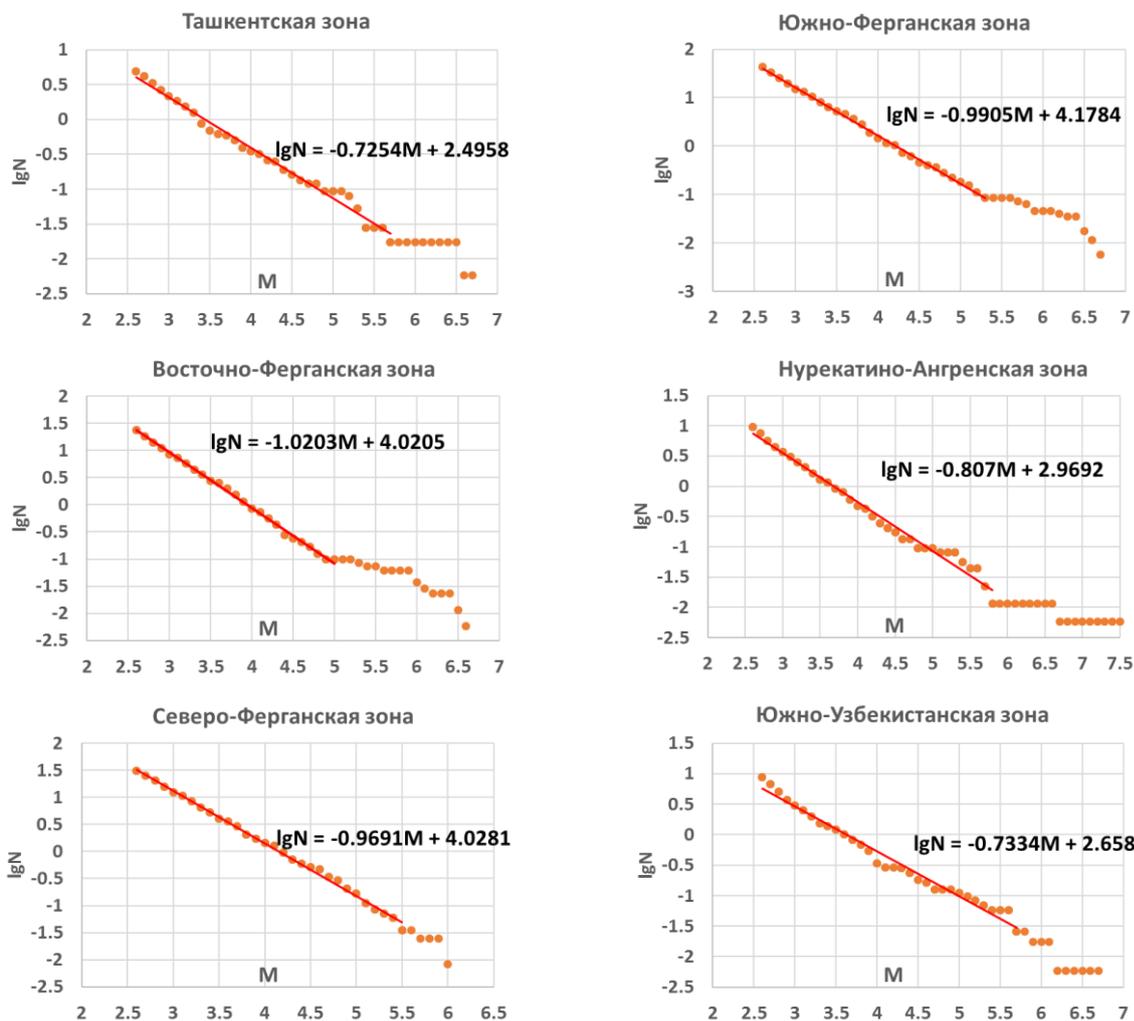


Рис. 1. Сейсмоактивные зоны территории Узбекистана и эпицентры сильных ( $M \geq 4,7$ ) землетрясений с исторических времен.

Fig. 1. Seismic active zones of Uzbekistan's territory and epicenters of strong ( $M \geq 4,7$ ) earthquakes since historical times.

К ним относятся: Ташкентская (1), Южно-Ферганская (2), Восточно-Ферганская (3), Нурекатино-Ангренская (4), Северо-Ферганская (5), Южно-Узбекистанская (6), Амударьинская (7), Газли-Каратагский фрагмент Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны (8), Северо-Тамдынская (9) и Таласо-Ферганская зоны (10). Эти зоны и эпицентры землетрясений с магнитудой  $M \geq 4,7$ , зафиксированных в их пределах за исторический и инструментальный период наблюдений, отражены на рис. 1. Для оценки повторяемости землетрясений использовался региональный каталог землетрясений Узбекистана (Мирзаев, 2023; Catalog of Earthquakes..., 2024). При построении зависимостей  $\lg N = f(M)$  (рис. 2) учитывались сроки представительной регистрации землетрясений каждой магнитуды (Якубов, Соколов, 1990; Кучкаров, 2016). Уравнения регрессии рассчитывались в двух вариантах – по всему диапазону магнитуд (до значения  $M_{max}^{набл}$ ) и отдельно только по прямолинейной части графика повторяемости. Коэффициенты  $a$  и  $b$  кумулятивного графика повторяемости (зависимость Гутенберга-Рихтера) определялись методом наименьших квадратов. Как видно на рис. 2, практически для всех сейсмоактивных зон наблюдается загиб хвостовой части графика повторяемости вверх. Это свидетельствует о том, что землетрясения с магнитудой, близкой к  $M_{max}^{набл}$ , происходят чаще, чем предсказывается экстраполяцией периодов их возникновения по слабым и умеренным событиям. В табл. 1 приведены зависимости Гутенберга-Рихтера для выделенных сейсмоактивных зон и полученные из уравнения регрессии средние периоды повторения землетрясений с магнитудой  $M \geq 5,0$  ( $T_{M \geq 5}$ ) и  $M_{max}^{набл}$  ( $T_{M=Mmax}$ ). И, если различием в оценках периодов повторения землетрясений с магнитудой  $M = 5,0$  можно пренебречь, то различия в периодах повторения землетрясений близких к значению  $M_{max}$  весьма существенны. Это обстоятельство необходимо учитывать при оценке сейсмической опасности территории.



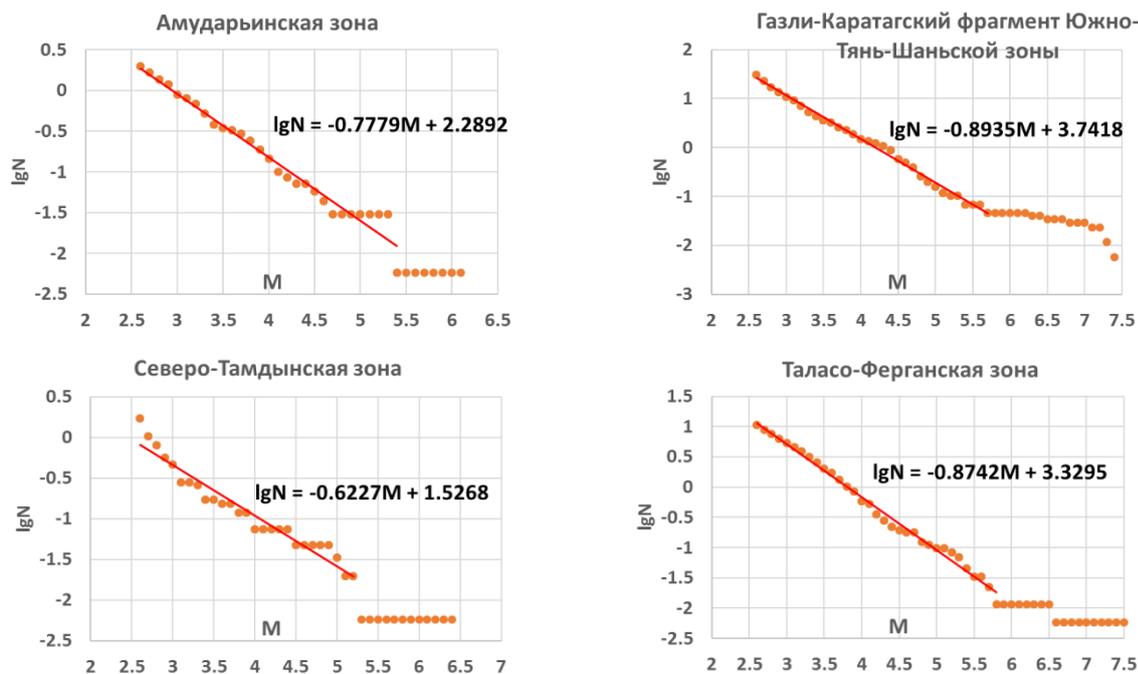


Рис. 2. Графики повторяемости сейсмоактивных зон Узбекистана.

Fig. 2. Recurrence graphs of Uzbekistan's seismic active zones.

Параметры повторяемости землетрясений в сейсмоактивных зонах Узбекистана

Таблица 1

Earthquake recurrence parameters in Uzbekistan's seismically active zones

Table 1

| Номер зоны | Зависимость Гутенберга-Рихтера для |                           | $T_{M \geq 5}$ (годы) | $T_{Mmax}$ (годы) |
|------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|
|            | всего диапазона магнитуд           | прямолинейной части       |                       |                   |
| 1          | $lgN = -0,6748M + 2,3034$          | $lgN = -0,7254M + 2,4958$ | 12/14                 | 165/231           |
| 2          | $lgN = -0,8554M + 3,6831$          | $lgN = -0,9905M + 4,1784$ | 4/6                   | 112/287           |
| 3          | $lgN = -0,8064M + 3,2547$          | $lgN = -1,0203M + 4,0205$ | 6/12                  | 117/517           |
| 4          | $lgN = -0,6938M + 2,5136$          | $lgN = -0,807M + 2,9692$  | 9/12                  | 490/1211          |
| 5          | $lgN = -0,9868M + 4,0926$          | $lgN = -0,9691M + 4,0281$ | 7/7                   | 67/61             |
| 6          | $lgN = -0,7612M + 2,7622$          | $lgN = -0,7334M + 2,658$  | 11/10                 | 218/180           |
| 7          | $lgN = -0,7763M + 2,2793$          | $lgN = -0,7779M + 2,2892$ | 40/40                 | 286/286           |
| 8          | $lgN = -0,6977M + 2,982$           | $lgN = -0,8935M + 3,7418$ | 3/5                   | 152/741           |
| 9          | $lgN = -0,6447M + 1,5884$          | $lgN = -0,6227M + 1,5268$ | 43/39                 | 345/287           |
| 10         | $lgN = -0,7386M + 2,7853$          | $lgN = -0,8742M + 3,3295$ | 8/11                  | 568/1687          |

Сильные землетрясения располагаются неравномерно по сейсмоактивной зоне, а концентрируются в виде групп в областях с линейными размерами 50-80 км. На рис. 1 места таких скоплений показаны эллипсами различных размеров. Сопоставляя карты эпицентров, построенные за различные временные интервалы (до 1900 г. и начиная с инструментального периода), можно отметить, что выделенные области с высокой концентрацией сильных землетрясений достаточно устойчиво сохраняют свою конфигурацию, что свидетельствует о том, что в этих областях

реализованы наиболее благоприятные условия для крупномасштабного разрушения. Учитывая, что тектонический режим сейсмоактивных территорий меняется очень медленно, с высокой степенью вероятности именно эти области проявят себя высокой сейсмической активностью и в ближайшие десятилетия. Поэтому в (Artikov et al., 2021) данные области рассматриваются как области долгосрочного прогноза.

### Результаты и обсуждение

В ходе исследования построены и проанализированы графики повторяемости землетрясений в выделенных очаговых зонах. Параметры повторяемости областей 2, 3, 4, 8, 10, 26, 27 и 28 мы посчитали недостаточно надежными, поскольку в их пределах было зафиксировано менее 100 представительных землетрясений. Практически все эти очаговые зоны расположены в Западном Узбекистане: три – в пределах Северо-Тамдынской области, три – в Амударьинской области и одна – в районе Бухары. Графики повторяемости для остальных очаговых зон представлены на рис. 3.

Анализ показал, что практически для каждой очаговой области в диапазоне магнитуд ( $2,5 \leq M \leq 5,0$ ) прослеживается четкая линейная зависимость. Полученная в этом магнитудном диапазоне линейная зависимость экстраполировалась в область более высоких магнитуд до значения  $M_{max}^{набл}$ . В зависимости от того, каким образом была расположена хвостовая часть графика повторяемости, мы провели дифференциацию построенных графиков на три типа:

1) в которых линейная зависимость выдерживается во всем магнитудном диапазоне (до  $M_{max}^{набл}$ );

2) в которых хвостовая часть имеет загиб вверх (т. е. сильные, близкие к  $M_{max}$ , землетрясения повторяются чаще, чем это прогнозируется по слабым и умеренным землетрясениям);

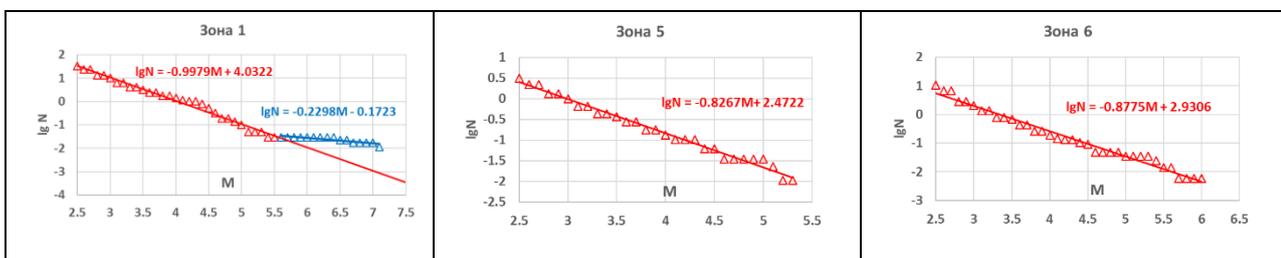
3) в которых хвостовая часть имеет загиб вниз (т. е. сильные, близкие к  $M_{max}$ , землетрясения происходят реже, чем это прогнозируется левой частью графика повторяемости).

График повторяемости третьего типа отмечен только в одной очаговой зоне 18. Это очаговая область Папского роя землетрясений 1984-1985 гг., в которой последние 40 лет сильных землетрясений не зафиксировано. Загиб хвостовой части вниз характеризует дефицит сильных землетрясений в очаговой области.

Графики повторяемости первого и второго типа распределились примерно поровну и расположены мозаично по территории.

В.И. Уломов (Уломов, 1974) изучал динамику изменения графиков повторяемости в период афтершоковой деятельности Ташкентского землетрясения 1966 г. Он построил поэтапные графики повторяемости отдельно для младших ( $K = 6-9$ ) и старших ( $K = 9-12$ ) энергетических классов. Оказалось, что на ранних стадиях афтершокового процесса график повторяемости во всем энергетическом диапазоне энергетических классов ( $K = 6-12$ ) существенно отличался от прямолинейного, а по мере приближения афтершоковой деятельности к своему завершению этот график выпрямлялся (рис. 4).

Переноса эту аналогию на рассматриваемые нами очаговые зоны, можно сделать предположение, что области, в которых наблюдается излом графиков повторяемости вверх (графики повторяемости второго типа), характеризуются незавершенностью продолжающегося длительное время процесса сейсмической активизации, в то время как для областей, в которых график повторяемости имеет прямолинейный вид (графики первого типа), этот процесс близок к своему завершению.



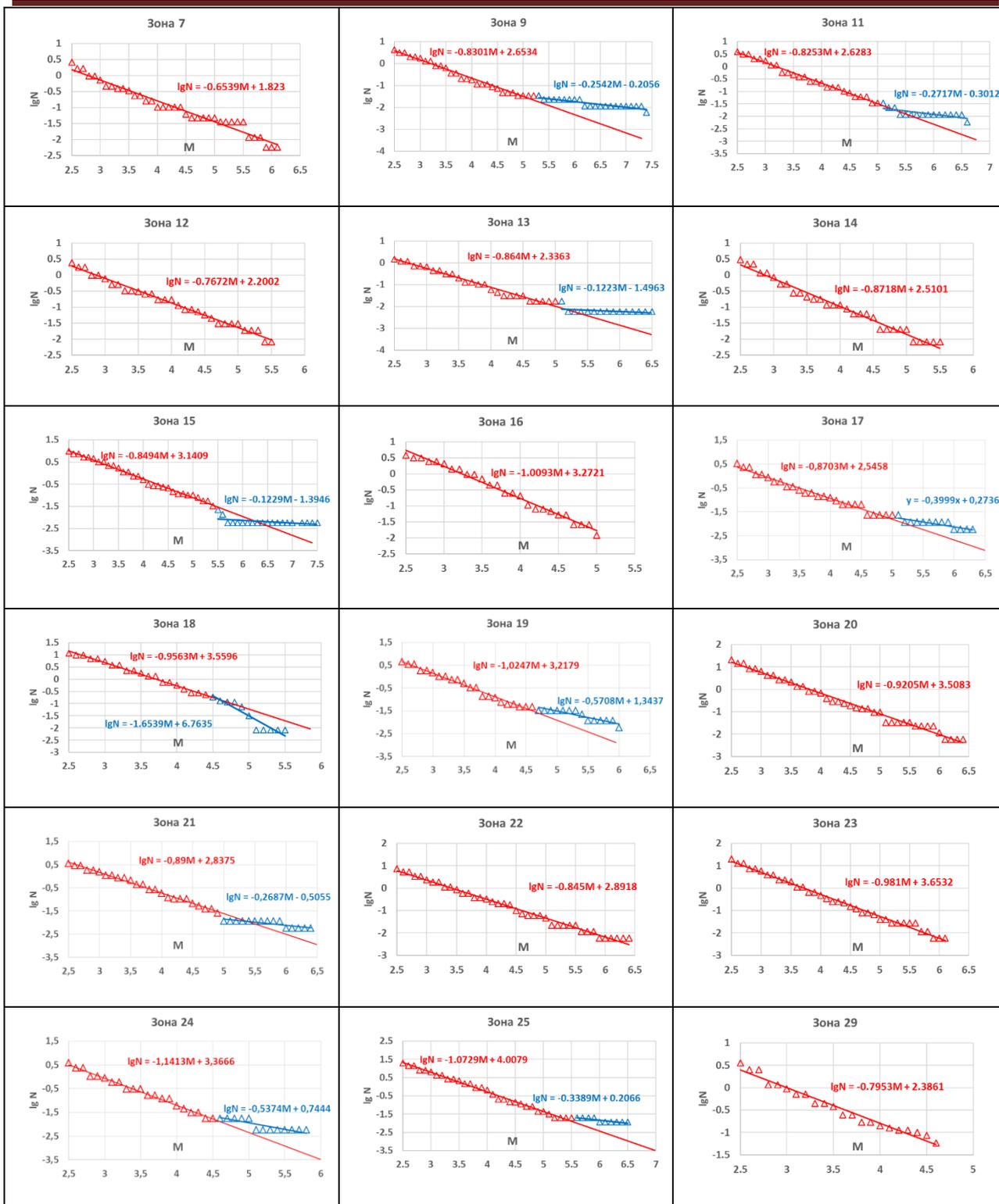
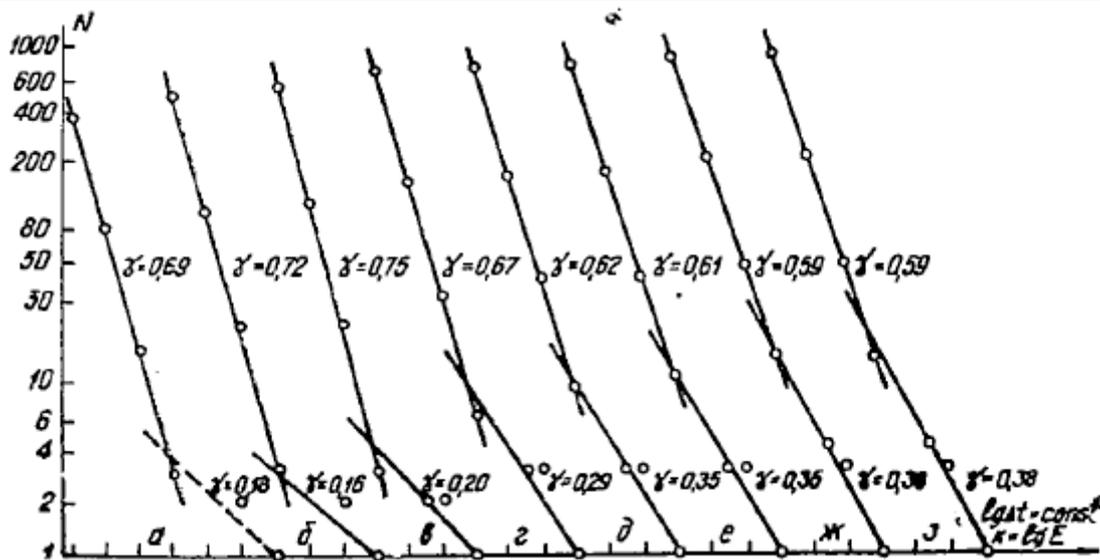


Рис. 3. Графики повторяемости очаговых зон Узбекистана.

Fig. 3. Recurrence graphs of Uzbekistan's focal zones.



**Рис. 4. Трансформация во времени графиков повторяемости повторных толчков.** Интервалы времени (а, б, в ... з) логарифмически равны и соответствуют: 17,8; 32,0; 56,2 ... 1000 суткам. Разные энергетические классы  $K = \lg E$ , начиная с  $K = 6$  до  $K = 12$ , соответствуют толчкам по порядку сверху вниз на крайнем правом графике (Уломов, 1974).

**Fig. 4. Transformation of the aftershocks recurrence graphs in time.** Time intervals (a, b, c ... z) are logarithmically equal and correspond to: 17,8; 32,0; 56,2 ... 1000 days. Different energy classes  $K = \lg E$ , starting from  $K = 6$  to  $K = 12$ , correspond to the aftershocks in order from top to bottom on the far right graph (Ulomov, 1974).

Альтернативным объяснением изгиба хвостовой части графика повторяемости вверх может быть гипотеза существования так называемых «характеристических» землетрясений. Модель характеристического землетрясения (characteristic earthquake model) основана на предположении, что в пределах сейсмоактивной зоны разломы или их сегменты генерируют землетрясения с примерно одинаковыми параметрами (магнитудой, механизмом подвижки и зоной разрыва). Под одинаковыми понимаются землетрясения с различием в пределах половины магнитудной единицы. Т. е., например, если характеристическим для разлома является землетрясение с магнитудой  $M = 6,5$ , то вероятность, а, следовательно, и частота, возникновения землетрясений в магнитудном диапазоне от  $M = 6,0$  до  $M = 7,0$  примерно одинакова. Такое распределение землетрясений обеспечивает существование горизонтального плато в хвостовой части графика повторяемости (Schwartz, Coppersmith, 1984).

Фактологической основой для модели характеристического землетрясения служат как геологические данные, так и данные о сейсмичности. Геологические исследования вдоль разломов Уосатч (Wasatch) и Сан-Андреас указывают на повторяющиеся смещения одного размера, связанные с палеоземлетрясениями вдоль одних и тех же сегментов разломов (Schwartz, Coppersmith, 1984). Примеров проявления характеристических землетрясений на сегодняшний день достаточно много. Они включают зоны субдукции на Аляске и в Мексике, коровые землетрясения в Турции, Греции и Японии (Wesnousky et al., 1983) и т. п. Постоянство в размерах смещений Аки (Аки, 1984) связал с результатом сохранения барьеров на пути разрывов в течение повторяющихся сейсмических циклов. Родкин (Rodkin et al., 2014) возникновение характеристических землетрясений объясняет повышенной активностью флюидного режима в зонах субдукции.

Для подавляющего большинства рассматриваемых нами очаговых зон землетрясения с магнитудой  $M = 5,0$  попадают в линейную часть графика повторяемости. Сопоставляя периоды повторения землетрясений с магнитудой  $M \geq 5,0$ , рассчитанные по линейной части графика повторяемости, с интервалом времени, прошедшим с момента последней сейсмической активизации на уровне землетрясений такого уровня, мы попытались в каждой очаговой области оценить вероятность возникновения землетрясений такого же магнитудного уровня в течение ближайших лет. При этом предполагалось, что землетрясения образуют Пуассоновский поток

событий. Длительность сейсмической паузы, или же глубина сейсмического затишья, в нашем случае определяется отношением времени, прошедшего с момента последнего землетрясения с магнитудой с  $M \geq 5,0$  в очаговой зоне, к периоду повторяемости землетрясений данной магнитуды в этой зоне.

В зонах 19 и 24 землетрясения с магнитудой  $M = 5,0$  ложатся правее прямолинейной ветви графика повторяемости. Для них повторяемость землетрясений с  $M = 5,0$  принималась такой же, как и для максимальной магнитуды, попадающей в прямолинейную часть. Такая экстраполяция основана на идеологии модели характеристического землетрясения. Входные данные и результаты расчетов представлены в табл. 2, а ранжирование сейсмоактивных областей по вероятности возникновения сильных землетрясений по данному прогностическому признаку – на рис. 5.

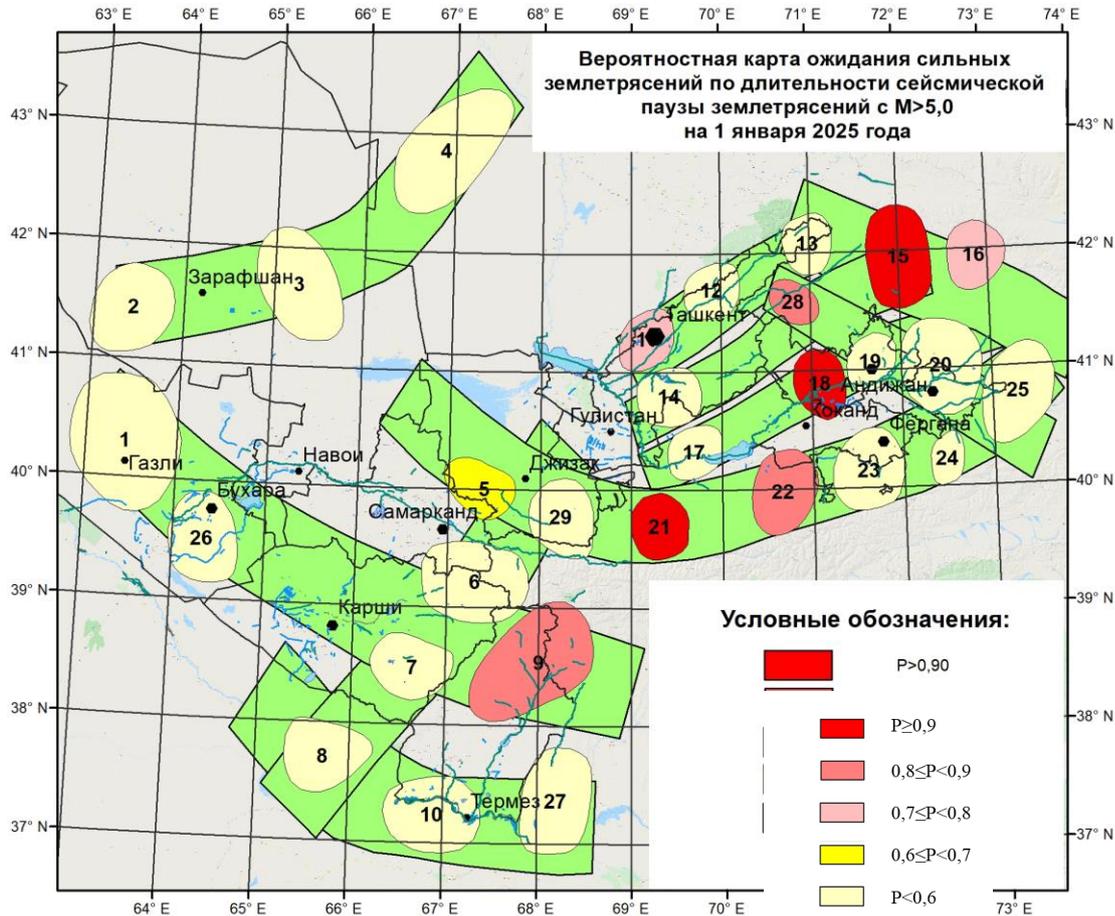
Таблица 2

**Периоды повторения землетрясений с магнитудой  $M \geq 5,0$  в очаговых зонах Узбекистана и вероятность их возникновения на текущий момент времени**

Table 2

**Recurrence periods of earthquakes with magnitude  $M \geq 5,0$  in focal zones of Uzbekistan and the probability of their occurrence at the current time moment**

| Номер зоны | $T_{M \geq 5}$ | Год последнего землетрясения с $M \geq 5,0$ | Глубина сейсмического затишья | $P_{2025}$ |
|------------|----------------|---|-------------------------------|------------|
| 1          | 9              | 2021  | 0,44                          | 0,42       |
| 3          | 135            | 1935  | 0,67                          | 0,5        |
| 5          | 46             | 1984  | 0,89                          | 0,6        |
| 6          | 30             | 2013  | 0,40                          | 0,36       |
| 7          | 28             | 2001  | 0,86                          | 0,59       |
| 9          | 31             | 1961  | 2,06                          | 0,87       |
| 10         | 87             | 1958  | 0,77                          | 0,54       |
| 11         | 31             | 1980  | 1,45                          | 0,77       |
| 12         | 43             | 1987  | 0,88                          | 0,59       |
| 13         | 96             | 1955  | 0,73                          | 0,52       |
| 14         | 71             | 2013  | 0,17                          | 0,17       |
| 15         | 13             | 1992  | 2,54                          | 0,93       |
| 16         | 60             | 1949  | 1,27                          | 0,73       |
| 17         | 64             | 1985  | 0,63                          | 0,47       |
| 18         | 17             | 1985  | 2,35                          | 0,91       |
| 19         | 40             | 1995  | 0,75                          | 0,54       |
| 20         | 12             | 2021  | 0,33                          | 0,33       |
| 21         | 41             | 1923  | 2,49                          | 0,92       |
| 22         | 22             | 1980  | 2,05                          | 0,88       |
| 23         | 18             | 2020  | 0,28                          | 0,29       |
| 24         | 59             | 1991  | 0,58                          | 0,45       |
| 25         | 23             | 2015  | 0,43                          | 0,38       |
| 28         | 41             | 1955  | 1,71                          | 0,82       |
| 29         | 39             | 2017  | 0,21                          | 0,21       |



**Рис. 5. Ранжирование очаговых зон сильных землетрясений по длительности сейсмической паузы в возникновении землетрясений с  $M \geq 5,0$ .**

**Fig. 5. Ranking of focal zones of strong earthquakes by the duration of the seismic pause in the occurrence of earthquakes with  $M \geq 5,0$ .**

Как это видно из рис. 5, на текущий момент времени наибольшей глубиной сейсмического затишья характеризуются зоны 9, 11, 15, 18, 21, 22 и 28. Высокотенциальные зоны 9 и 15 – это очаговые области Каратагских землетрясений 1907 г. и Чаткальского землетрясения 1946 г. Зона 11 – это очаговая область Ташкентского землетрясения 1966 г. Зона 18 – очаговая область, охватывающая рой Папских землетрясений 1984-1985 гг. Очаговые области 21 и 22 расположены в центральной части Южно-Ферганской зоны. Наиболее сильными землетрясениями в их пределах являются историческое землетрясение 1923 г. с  $M = 6,4$  и Исфара-Баткентское землетрясение 1977 г. В очаговой области 28, расположенной в северо-восточной части Ангренской зоны, наиболее сильное из известных – историческое землетрясение 1896 г. с магнитудой  $M = 6,6$ .

Длительность сейсмической паузы в возникновении сильных землетрясений является всего лишь одним из прогностических признаков, основанном на статистическом распределении частот возникновения землетрясений различных магнитуд. Для принятия решения о возможности сейсмической активизации в той или иной зоне необходимо рассмотреть дополнительные признаки, отражающие кинетику процесса трещинообразования и степень близости геоматериала к разрушению.

## ВЫВОДЫ

С учетом сроков представительной регистрации землетрясений различных магнитуд построены графики повторяемости землетрясений и определены коэффициенты в зависимости Гутенберга-Рихтера для сейсмоактивных зон и очаговых областей, расположенных на территории Узбекистана. Установлено, что в ряде зон в области больших магнитуд графики повторяемости имеют загиб вверх, что свидетельствует о повышенной частоте сильных землетрясений по сравнению с прогнозом на основе слабых и умеренных событий.

Данное обстоятельство необходимо учитывать при оценке сейсмической опасности сейсмоактивных территорий. По-видимому, для таких областей вместо традиционно используемой модели Гутенберга-Рихтера целесообразнее применять модель характеристического землетрясения, которая в настоящее время широко используется в практике сейсмической опасности.

Для очаговых зон сильных землетрясений территории Узбекистана по прямолинейной части графиков повторяемости определены периоды повторения землетрясений с магнитудой  $M \geq 5,0$  и, с учетом даты последнего сильного землетрясения, произошедшего в зоне, рассчитана вероятность возникновения таких землетрясений на текущий момент времени.

Длительность сейсмической паузы – важный, но не единственный прогностический критерий. Для уточнения прогноза необходимо учитывать кинетические параметры трещинообразования, степень приближения геоматериала к разрушению, влияние порового давления флюидов и процессы медленного проскальзывания.

Работа выполнена за счет средств государственного бюджета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Aki K. Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction // J. Geophys. Res. - 1984. - 89. - P. 5867-5872.
2. Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Identification of expected seismic activity areas by forecasting complex seismic-mode parameters in Uzbekistan // Geodesy and Geodynamics. - 2018. - 9(2). - P. 121-130. DOI: 10.1016/j.geog.2017.11.005.
3. Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Rebetsky Y.L. Methods and results of long-term strong earthquakes forecast in the Uzbekistan territory // Geodynamics and Geoecology IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. - 2021. 929, 012029, 1-7. DOI: 10.1088/1755-1315/929/1/012028.
4. Bereta E., Louzada F., Franco M. The Poisson-Weibull distribution // Advances and Applications in Statistics. - 2011. - 22(2). - P. 107-118. <http://pphmj.com/journals/adas.htm>.
5. Catalog of Earthquakes in Uzbekistan and Adjacent Territories. <http://smrm.uz/jamlanma> (Accessed May 1, 2024).
6. Gutenberg B., Richter C. F. Frequency of earthquakes in California // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1944. - 34(4). - P. 185-188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>.
7. Kagan Y.Y. Statistics of characteristic earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1993. - 83(1). - P. 7-24.
8. Kagan Y.Y. Observational evidence for earthquakes as a nonlinear dynamic process // Physica D: Nonlinear Phenomena. - 1994. - 77(1). - P. 160-192. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-2789\(94\)90132-5](http://dx.doi.org/10.1016/0167-2789(94)90132-5).
9. Kagan Y.Y. Universality of the seismic moment-frequency relation // In: Seismicity Patterns, their Statistical Significance and Physical Meaning. - 1999. - Pageoph Topical Volume. - P. 537-573. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-0348-8677-216>.
10. Laherrere J., Sornette D. Stretched exponential distributions in nature and economy: «fat-tails» with characteristic scales // The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems. - 1998. - 2(4). - P. 525-539. <http://dx.doi.org/10.1007/s100510050276>.
11. Nishikawa T., Nishimura T. Development of an Epidemic-Type Aftershock-Sequence Model Explicitly Incorporating the Seismicity-Triggering Effects of Slow Slip Events // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. - 2023. - 128(5). <https://doi.org/10.1029/2023JB026457>.
12. Pacheco J.F., Scholz C., Sykes L. Changes in frequency-size relationship from small to large

- earthquakes // \*Nature\*. - 1992. - 355(6355). - P. 71-73. <http://dx.doi.org/10.1038/355071a0>.
13. *Pisarenko V.F., Rodkin M.V., Rukavishnikova T.A.* Estimation of the probability of strongest seismic disasters based on the extreme value theory // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. - 2014. - 50(3). - P. 311-324. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351314030070>.
14. *Rodkin M.V., Pisarenko V.F., Ngo Thi Lu, Rukavishnikova T.A.* On potential representations of the distribution law of rare strongest earthquakes // *Geodynamics & Tectonophysics*. - 2014. - 5(4). - P. 893-904. doi:10.5800/GT-2014-5-4-0161.
15. *Schwartz D.P., Coppersmith K.J.* Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas faults // *J. Geophys. Res.* - 1984. - 89. - P. 5681-5698.
16. *Sherman S.I., Rodkin M.V., Gorbunova E.A.* A tectonophysical analysis of earthquake frequency-size relationship types for catastrophic earthquakes in Central Asia // *Journal of Volcanology and Seismology*. - 2017. - 11(6). - P. 434-446.
17. *Wesnowsky S.G., Scholz C.H., Shimazaki K., Matsuda T.* Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting // *Journal Geophysical Research*. - 1983. - 88(B11). - P. 9331-9340. <http://dx.doi.org/10.1029/JB088iB11p09331>.
18. *Wu M., Wang J.P., Ku K.* Earthquake, Poisson and Weibull distributions // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. - 2019. 526, 121001. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.237>.
19. *Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // *Физика Земли*. - 2004. - № 3. - С. 34-42.
20. *Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.А., Ибрагимов О.Р.* Сейсмоструктурный метод оценки сейсмической опасности и вопросы сейсмического районирования // *Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане*. - Т.: ГИДРОИНГЕО, 2002. - С. 59-74.
21. *Кучкаров К.И.* Спектральные характеристики сейсмического шума сейсмических станций Узбекистана // *Проблемы сейсмологии в Узбекистане*. - 2016. - № 11. - С. 47-52.
22. *Мирзаев М.А.* Современное состояние каталога землетрясений в Узбекистане и Центральной Азии // *Проблемы сейсмологии*. - 2023. - № 5(2). - С. 11-18.
23. *Уломов В.И.* Динамика земной коры Средней Азии и прогноз землетрясений. - Т.: Фан, 1974. - 218 с.
24. *Якубов М.С., Соколов М.В.* Анализ эффективности сети сейсмических станций Узбекистана на основных этапах ее развития // *Сейсмичность территории Узбекистана / Под ред. К.Н. Абдуллабекова*. - Т.: Фан, 1990. - С. 19-28.

### O'zbekistondagi o'choq zonalarida zilzilalarning takrorlanish bahosi T.L. Ibragimova

**Аннотасија.** O'zbekiston hududida joylashgan seysmik faolligi yuqori bo'lgan zonalar va o'choq oblastlari uchun zilzilalarning takrorlanish grafigi qurildi hamda Gutenberg-Rikhter bog'lanishidagi koeffitsiyentlar aniqlandi. Aniqlanishicha, bir qator seysmik faolligi yuqori bo'lgan zonalar va o'choq oblastlari uchun katta magnitudali zilzilalarning takrorlanish grafigida yuqoriga burilish kuzatiladi. Bu esa maksimal mumkin bo'lgan zilzilalarga yaqin bo'lgan zilzilalarning takrorlanish davrlari to'g'ri chiziqli qismga asoslangan prognozlariga nisbatan 2-4 baravar qisqarishini ko'rsatadi. Grafigining to'g'ri chiziqli qismlariga asoslanib, O'zbekistondagi kuchli zilzilalar o'choq zonalarida  $M \geq 5,0$  magnitudali zilzilalarning takrorlanish davrlari baholandi. Hududda sodir bo'lgan so'nggi kuchli zilzila sanasi hisobga olingan holda, hozirgi vaqtda shunga o'xshash zilzilalarning yuzaga kelish ehtimoli hisoblab chiqildi.

**Калит со'злар:** zilzilalarning takrorlanishi, Gutenberg-Rixter bog'lanishi, xos zilzila, seysmik sokinlik, seysmik faollik bashorati.

### Estimates of earthquake recurrence in focal zones in Uzbekistan T.L. Ibragimova

**Annotation.** Earthquake recurrence graphs were constructed, and the coefficients of the Gutenberg-Richter relationship were determined for seismically active zones and focal areas located in the Uzbekistan's territory. It has been established that for several seismically active zones and focal areas, the recurrence graphs for large magnitudes show an upward bend, indicating that the recurrence periods of earthquakes close to the maximum possible magnitude are 2-4 times shorter compared to predictions based on the linear part of the recurrence graphs. Based on the linear sections of the graphs, the recurrence periods of earthquakes with a magnitude of  $M \geq 5,0$  in the focal zones of strong earthquakes in Uzbekistan were estimated. Taking into account the date of the last strong event that occurred in the zone, the probability of similar earthquakes occurring at the present time was calculated.

**Key words:** earthquake recurrence, Gutenberg-Richter relationship, characteristic earthquake, seismic quiescence, seismic activation forecast.

УДК 550.34.016

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОЦЕНКИ VS ПО ДАННЫМ MASW: ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДА И ПОДХОДЫ К ИХ ПРЕОДОЛЕНИЮ

Д.Д. Юсупов, Т.У. Мамарозиков

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

E-mail: diyorbek.yusupov@gmail.com

**Аннотация.** Рассмотрены методологические ограничения метода многоканального анализа поверхностных волн (MASW), широко применяемого в инженерной сейсмологии для оценки параметра  $V_{s30}$ . Проведён анализ причин неустойчивости инверсии, влияния пространственного аляйсинга, ограниченной глубинности и чувствительности к выбору дисперсионной кривой. В целях повышения достоверности  $V_s$ -моделирования предложены четыре практических решения: использование SH-волн (волны Лява), совместная инверсия с методами объёмных волн (МПВ/МОВ), реализация методики сейсмического волнового зондирования (СВЗ) и объединение MASW с данными HVRS. Результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность каждого из подходов и демонстрируют их применимость в условиях реальных инженерно-геологических объектов.

**Ключевые слова:** MASW, поперечные волны,  $V_{s30}$ , инверсия дисперсионной кривой, волны Лява, HVRS, объёмные волны, пространственный аляйсинг, сейсмическое волновое зондирование, инженерная сейсмология.

**Введение.** Сейсмическое микрорайонирование (СМР) – обязательный этап инженерно-сейсмических изысканий, направленный на уточнение характеристик грунтов и снижение риска сейсмических воздействий на проектируемые и существующие сооружения. Основной целью СМР является дифференцированная оценка сейсмической опасности с учётом местных геологических и геофизических условий, что критически важно при градостроительном проектировании, строительстве особо ответственных объектов (АЭС, ГЭС, химических комплексов), а также при трассировании линейных инженерных сооружений (автомагистралей, тоннелей, трубопроводов) [1, 2].

Один из ключевых параметров, определяющих сейсмические свойства грунта, –  $V_{s30}$  – средняя скорость распространения поперечных волн в верхних 30 м инженерно-геологического разреза. Этот параметр широко используется при расчёте сейсмического воздействия и входит в национальные и международные нормативные документы как классификационный критерий типов грунтовых оснований [3, 4]. В современных условиях получение достоверных  $V_{s30}$  требует применения специализированных геофизических методов, обладающих высокой информативностью и помехоустойчивостью при работе в условиях городской застройки.

Среди применяемых методов сейсморазведки особое место занимает метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW), который успешно зарекомендовал себя как основной инструмент при выполнении СМР в городских условиях. Его преимущества – относительная простота проведения, устойчивость к техногенным шумам, невысокая стоимость и способность регистрировать важные геофизические эффекты, такие как инверсия скоростей, без необходимости применения сложной аппаратуры (например, поперечных приёмников), – делают его незаменимым в практике инженерных изысканий [5, 6].

Однако, несмотря на очевидные преимущества, метод MASW обладает рядом существенных ограничений: чувствительность к рельефу, пространственный аляйсинг, ограниченность глубинного зондирования, а также неустойчивость инверсии при слабом априорном обеспечении. Особенно актуальной остаётся проблема устойчивого и объективного выделения дисперсионных кривых, от которых напрямую зависит достоверность  $V_s$ -моделей.

В статье представлен критический анализ метода MASW с позиции его применения при сейсмическом микрорайонировании в условиях городских территорий. Авторы предлагают ряд практических решений, направленных на повышение достоверности расчётов  $V_s$ : использование SH-волн, методики сейсмического волнового зондирования, совместная инверсия с данными HVRS и комбинация MASW с другими методами сейсморазведки. Рассмотрены ограничения, особенности реализации, а также приведены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность предложенных подходов.

### **Классификация объектов СМР и подходы к сейсмическим исследованиям**

В современной практике сейсмического микрорайонирования объекты изысканий значительно различаются по своим функциональным, конструктивным и географическим характеристикам. В связи с этим подход к проведению сейсморазведочных работ должен учитывать особенности каждого типа объекта. На основе анализа нормативных документов [1, 2] и практического опыта целесообразно выделить три ключевые категории объектов:

- **городская застройка и населённые пункты** – компактные или протяжённые урбанизированные территории с высокой плотностью застройки;
- **особо ответственные объекты** – технически и социально критичная инфраструктура (атомные и гидроэлектростанции, химические комбинаты и т. п.);
- **линейные инженерные сооружения** – транспортные и коммуникационные системы (автодороги, железные дороги, трубопроводы, тоннели и др.).

Каждая из указанных категорий предъявляет собственные требования к выбору методов сейсморазведки и постановке полевых работ.

#### ***Городская застройка***

Главная особенность сейсмических изысканий в городской среде – высокая плотность инженерной инфраструктуры, ограниченное пространство для размещения оборудования, а также выраженное техногенное зашумление сигнала. Здесь критичны такие параметры, как **компактность метода, его устойчивость к шумам, и возможность применения на участках со сложным доступом**. В таких условиях наиболее приемлемы методы:

- метод поверхностных волн (MASW);
- метод преломлённых волн (МПВ);
- в отдельных случаях – вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП).

MASW становится основным инструментом благодаря своей помехоустойчивости, относительной дешевизне и способности оценивать  $V_{s30}$  без необходимости глубокой скважинной привязки. Однако ограничения метода, рассмотренные далее, требуют точной адаптации методики под городскую среду.

#### ***Особо ответственные объекты***

Для объектов повышенного уровня ответственности, таких как атомные станции и гидросооружения, сейсмическое районирование проводится с максимально возможной точностью. Основное требование – обеспечение высокой надёжности построения инженерно-сейсмической модели. В таких условиях, как правило, применяются **разнопрофильные методы сейсморазведки** с обязательным бурением скважин:

- комбинированное применение МПВ, МОВ, ВСП;
- применение более сложных методов сейсмической томографии и инверсии;
- применение более сложных методов поверхностных волн, таких как MASW-СМРСС, MASW Roll Along и т. д.

#### ***Линейные объекты***

При проектировании и обследовании линейных объектов акцент смещается на протяжённость трассы, равномерность покрытия, и высокую горизонтальную разрешающую способность. Методика проведения в данном случае существенно отличается от точечной съёмки в городах.

Классификация представлена на рис. 1.

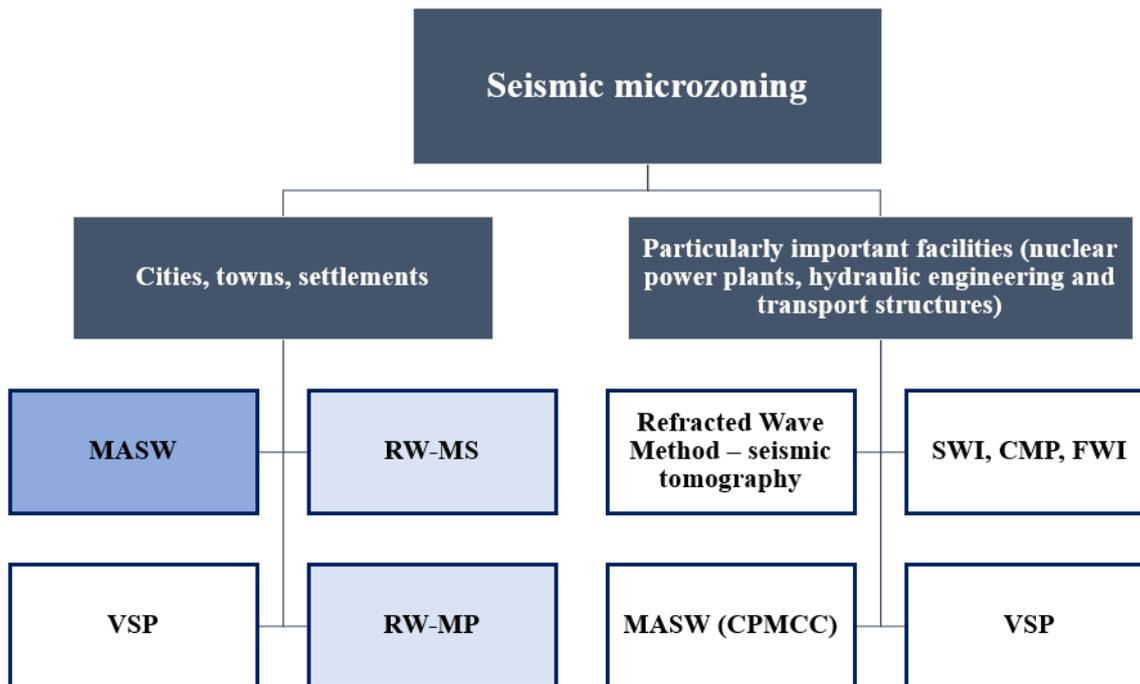


Рис. 1. Классификация методов сейсморазведки по типам исследования сейсмического микрорайонирования.

### Обзор сейсмических методов и выделение MASW

В практике инженерно-сейсмических изысканий существует несколько распространённых методов определения скоростей упругих волн, каждый из которых обладает своими преимуществами и ограничениями в зависимости от условий применения, задач исследования и доступных технических ресурсов. Наиболее часто используемые методы для оценки параметра  $V_s$  (в частности,  $V_{s30}$ ):

- ◆ МПВ (метод преломлённых волн),
- ◆ МОВ (метод отражённых волн),
- ◆ ВСП (вертикальное сейсмическое профилирование),
- ◆ MASW (многоканальный анализ поверхностных волн).

### Сравнительный анализ методов

Обобщённый сравнительный анализ указанных методов, основанный на практическом опыте применения, литературных источниках [5, 6], а также результатах авторского сравнительного исследования [7] отражен в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ сейсморазведочных методов в контексте решаемой задачи CMP

| Метод       | Преимущества   | Недостатки   |
|-------------|--|--|
| <b>МОВ</b>  | Геометризация, расчёт скоростей, устойчивость моделей                    | Сложность возбуждения волн, чувствительность к шумам, ресурсоёмкость       |
| <b>МПВ</b>  | Простота обработки, устойчивое решение, геометризация, СН                | Большие выносы, неоднозначность решения при инверсии скоростей             |
| <b>MASW</b> | Простота реализации, устойчивость к шуму, быстрая обработка, доступность | Неустойчивость инверсии, ограниченная глубинность, чувствительность к шагу |

|            |                                   |  |
|------------|-----------------------------------|--|
| <b>ВСП</b> | Прямая регистрация Vs в скважинах | Требует бурения, ограничено точками, высокая стоимость |
|------------|-----------------------------------|--|

MASW выгодно отличается тем, что сочетает в себе **высокую помехоустойчивость**, относительную **оперативность** и **низкие затраты**. Метод активно используется в условиях плотной городской застройки, где классические методы (МОВ, ВСП) затруднены или вообще неприменимы из-за ограничений по площадке, шумов, отсутствия скважин и т. д.

**Почему MASW – оптимальный метод для городских условий.** Метод MASW основан на анализе дисперсии поверхностных волн (обычно волн Рэлея), регистрируемых в широком диапазоне частот. Это позволяет восстанавливать скоростной профиль грунтовой толщи без необходимости бурения. Его преимущества особенно ярко проявляются при работах в городах:

- ✓ **компактная расстановка** оборудования позволяет проводить исследования на ограниченных участках;
- ✓ **устойчивость к техногенному фону** позволяет работать вблизи автодорог и зданий;
- ✓ **не требует бурения или глубокой инженерной подготовки**;
- ✓ **обнаруживает инверсии Vs**, которые могут быть пропущены при других подходах (в частности, при МПВ);
- ✓ **работает с вертикальными приёмниками**, без необходимости в сложных компонентах.

Также необходимо отметить, что данный метод – основной при проведении сейсморазведочных работ для СМР в Институте сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз.

**Ограничения MASW и необходимость адаптации.** Несмотря на очевидные преимущества, метод MASW не универсальный. При нарушении условий съёмки (некорректно подобранная геометрия съёмки, рельеф, сложная геология) он может выдавать неустойчивые или ошибочные решения. Особенно уязвимыми остаются:

- ❖ **этап выделения дисперсионной кривой** – чувствителен к шумам, шагу, опыту обработчика (весомая часть субъективной составляющей);
- ❖ **этап инверсии** – математически неустойчив при отсутствии априорных данных;
- ❖ **ограниченная глубинность** – связана с длинами регистрируемых волн;
- ❖ **низкая латеральная разрешающая способность** – особенно на больших выносах;
- ❖ **пространственный аляйсинг** – вносит шумы и ложные моды при неправильно выбранном шаге.

Таким образом, для расширения области применения MASW и повышения точности Vs-моделей необходимо совершенствование методики. В следующем разделе рассматриваются ключевые проблемы метода и предлагаются решения, основанные на экспериментальных исследованиях и адаптации классического MASW под реальные условия инженерных изысканий.

### Ограничения метода MASW и проблемы интерпретации

Несмотря на ряд практических преимуществ, метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) обладает рядом серьёзных ограничений, особенно критичных в условиях высокой геологической неоднородности и ограниченного априорного сопровождения. Понимание этих ограничений необходимо для корректного применения метода и для дальнейшего совершенствования как методики съёмки, так и алгоритмов обработки [8, 9].

**Неустойчивость инверсии.** Инверсия дисперсионной кривой для восстановления скоростного разреза – это математически неустойчивая задача, особенно при ограниченном числе наблюдений и слабой априорной информации. Малейшие изменения в выделенной кривой могут приводить к резким отклонениям в итоговой модели Vs. Это обусловлено тем, что решение сильно зависит от начальных предположений – без хорошей стартовой модели или априорных ограничений результат может оказаться физически недостоверным.

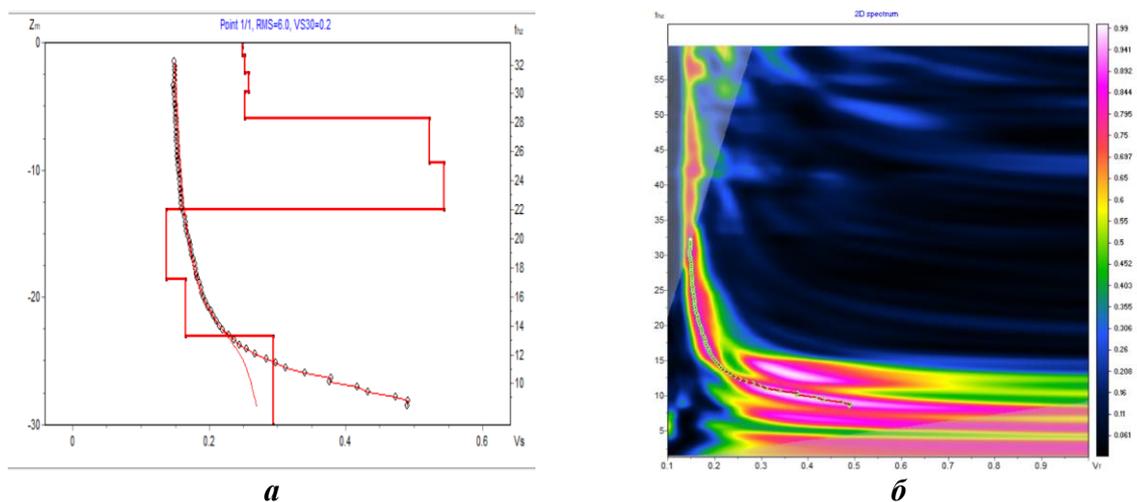
*Чувствительность к выделению дисперсионной кривой.* Один из наиболее критичных этапов обработки MASW – корректное выделение дисперсионной кривой на спектре. Даже при ручной интерпретации возможны значительные вариации в зависимости от оператора. При этом спектральная область часто содержит шумы, множественные моды и аляйсинг, что ещё более осложняет выделение основной (первой) моды. Несовпадения в выделенной кривой непосредственно отражаются на итоговой модели  $V_s$  и  $V_{s30}$ .

*Пространственный аляйсинг.* При несоблюдении условий по шагу между приёмными каналами (обычно рекомендуемый шаг – не более  $1/4$  минимальной длины волны) в спектральной области появляются артефакты, связанные с наложением частот. Это приводит к затруднениям в интерпретации, снижению точности инверсии и искажению формы дисперсионной кривой. Особенно выраженный эффект аляйсинга наблюдается при шаге более 2 м, что критично в условиях городской застройки с ограниченным пространством для размещения оборудования.

*Ограниченная глубинность зондирования.* Метод MASW опирается на регистрацию поверхностных волн, глубина зондирования которых определяется длиной волны. Таким образом, при фиксированной длине профиля и ограниченном частотном диапазоне регистрируемых волн глубинность метода зачастую оказывается ниже ожидаемой. В условиях, где требуется достоверное определение  $V_{s30}$  (до глубины 30 м), стандартные расстановки могут не обеспечивать достаточной глубины проникновения волн Рэлея.

*Влияние рельефа и неоднородностей.* Хотя MASW считается устойчивым к помехам, наличие уклонов, локальных преград и резко меняющихся грунтов может существенно исказить форму дисперсионной кривой. Особенно это критично при применении метода на протяжённых или криволинейных участках, либо в районах со сложным микрорельефом.

Пример некоторых ошибок в расчетах в процессе работы с методом MASW отражен на рис. 2.



**Рис. 2. Проблемы при расчете метода MASW.** а – некорректный расчет инверсии, б – неявное выделение дисперсионной кривой.

Все указанные ограничения приводят к необходимости адаптации стандартной схемы MASW к реальным условиям съёмки, а также разработке новых подходов, повышающих устойчивость инверсии и глубинность зондирования. В следующем разделе рассматриваются практические решения, исследованными авторами и апробированные на экспериментальных данных, включая:

- ✓ применение MASW на SH-волнах;
- ✓ комбинированную инверсию с использованием данных МПВ и HVRS;
- ✓ методику сейсмического волнового зондирования;

- ✓ анализ влияния геометрических параметров на аляйсинг и латеральную разрешающую способность.

### Практические решения по совершенствованию MASW

С учётом ограничений классического MASW, описанных выше, авторы разработали и апробировали несколько подходов, направленных на повышение устойчивости и точности метода. Эти решения направлены на устранение ключевых слабых мест: неустойчивости инверсии, глубинности, пространственного аляйсинга и чувствительности к геометрии.

#### 1. Использование волн SH в MASW: переход к волнам Лява

Одним из подходов к повышению устойчивости метода MASW является переход от классического анализа волн Рэлея к использованию волн Лява, возбуждаемых в среде при горизонтально-поперечном возбуждении (волны типа SH). Эта модификация метода, условно обозначаемая как SH-MASW, опирается на регистрацию и анализ дисперсионных свойств волн Лява, которые, в отличие от волн Рэлея, распространяются исключительно в горизонтально-ориентированных слоях и характеризуются более выраженной модальной структурой [10, 11].

Волны Лява представляют тип поверхностных волн, распространяющихся в моделируемой среде со скоростями, зависящими исключительно от поперечной жесткости ( $V_s$ ). При этом дисперсионные свойства этих волн формируются аналогично волнам Рэлея, но при регистрации горизонтальной компоненты сигнала и возбуждении поперечной (SH) моды, спектральная характеристика оказывается **более чистой и устойчивой**, особенно в верхних слоях грунта [12]. Это связано с тем, что волны Лява формируются в условиях, где вертикальные градиенты скорости  $V_s$  не столь резко выражены, а регистрация ограничивается одной компонентой, исключая паразитные моды, характерные для волн Рэлея. В результате, **дисперсионная кривая для волн Лява, как правило, содержит лишь основную моду**, что существенно упрощает её выделение и снижает неопределённость инверсии.

**Практические преимущества.** SH-MASW обладает рядом значимых преимуществ по сравнению с классическим вариантом:

- ✓ **устойчивое выделение дисперсионной кривой:** отсутствие модального наложения, меньшая чувствительность к пространственному аляйсингу и шумам в спектральной области;
- ✓ **более надёжная инверсия:** упрощённая форма кривой обеспечивает меньшую неоднозначность при обратном расчёте скоростного профиля;
- ✓ **фокусировка на поперечных скоростях:** в отличие от волн Рэлея, зависящих также от плотности и продольной жесткости среды, волны Лява чувствительны преимущественно к параметру  $V_s$ , что делает их особенно ценными в задачах оценки  $V_{s30}$ .

**Экспериментальная реализация.** Был проведён эксперимент по апробированию применения волн Лява в контексте задачи MASW. Обработаны данные сейсмического наблюдения методами продольных волн (МПВ), классическим методом MASW и методом MASW по SH волнам (по волнам Лява). Шаг между ПП составлял 2 м, количество каналов 48. Причем отметим, что возбуждения генерировались технологией правого и левого удара. Выделение дисперсионной кривой было более стабильным и уверенным на данных по поперечным волнам, что видно на рис. 3. На рис. 4 представлено изображение глубинно-скоростных моделей по всем трём методам, где заметно слабое расхождение скоростей, что свидетельствует о корректности дальнейшей обработки полученных данных и возможности применения к последующим расчетам.

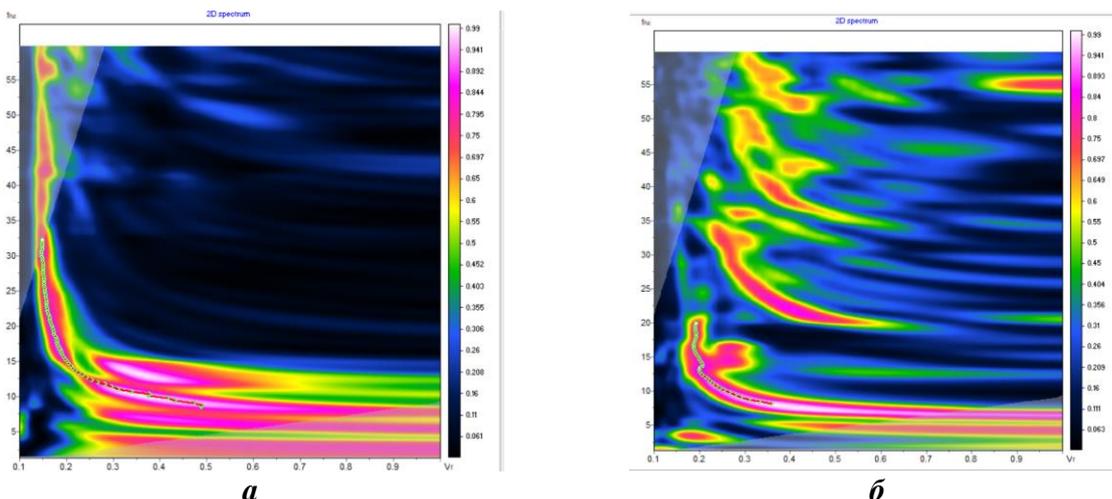


Рис. 3. Выделение дисперсионной кривой MASW: а – по данным Р-волн. б – по данным SH-волн.

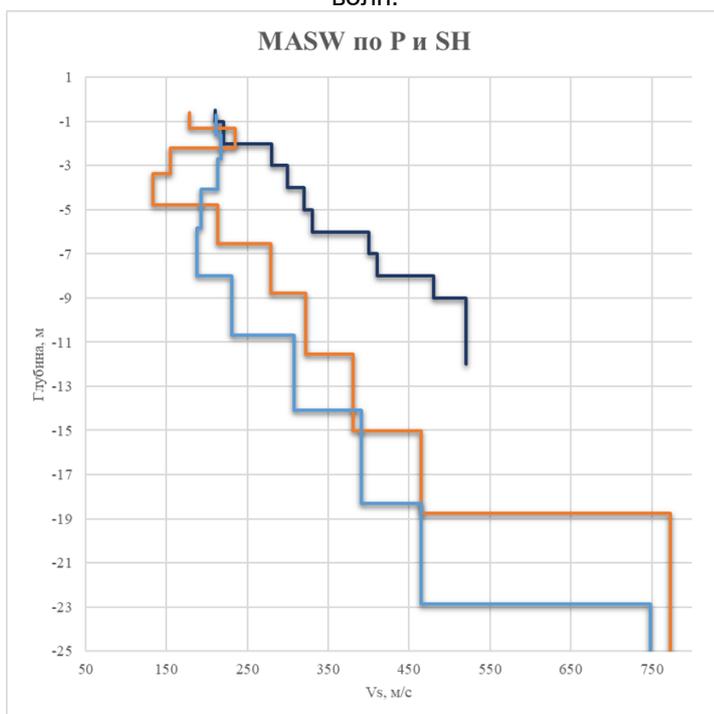


Рис. 4. Глубинно-скоростные модели по MASW-P (красная кривая), MASW-SH (голубая кривая), МПВ (синяя кривая).

Стоит оговорить ряд ограничений данного подхода – применение SH-MASW требует:

- специального возбуждения (горизонтальные удары – технология правого и левого удара);
- чувствительных к горизонтальным компонентам приёмников;
- обработки с учётом особенностей моды распространения.

Однако, как показала практика, внедрение данного подхода в стандартную схему MASW позволяет значительно повысить устойчивость метода при работе в условиях слабовыраженного сигнала, неоднородной среды и низкой плотности наблюдений.

## 2. Совместная инверсия MASW и методов объёмных волн (МПВ, МОВ)

Один из наиболее эффективных путей повышения устойчивости MASW – **комбинированное использование данных**, полученных как от поверхностных, так и от объёмных волн. Данная реализация возможна или в рамках применения совместной инверсии, или в качестве пошагового графа, в котором стартовая модель будет строиться по данным объёмных волн, а затем уже подаваться для расчета инверсии. Совместная инверсия (joint inversion) предполагает одновременное или последовательное использование информации, полученной по данным MASW, и скоростей распространения волн по методу преломлённых (МПВ) или отражённых волн (МОВ), что позволяет значительно улучшить устойчивость обратной задачи и снизить многозначность получаемой модели. Пошаговая реализация подразумевает построение более устойчивой стартовой модели, основываясь на логике дальнейшего усложнения модели посредством имеющейся информации по поверхностным волнам.

Метод MASW, базирующийся на дисперсионной кривой, характеризуется высоким уровнем неопределённости при инверсии, особенно при ограниченном частотном диапазоне или плохо выделенных модах. В то же время, методы МПВ и МОВ, несмотря на более жёсткие требования к геометрии и условиям возбуждения, обеспечивают прямую геометризацию разреза и высокую устойчивость к вариациям начальных условий инверсии [13, 14].

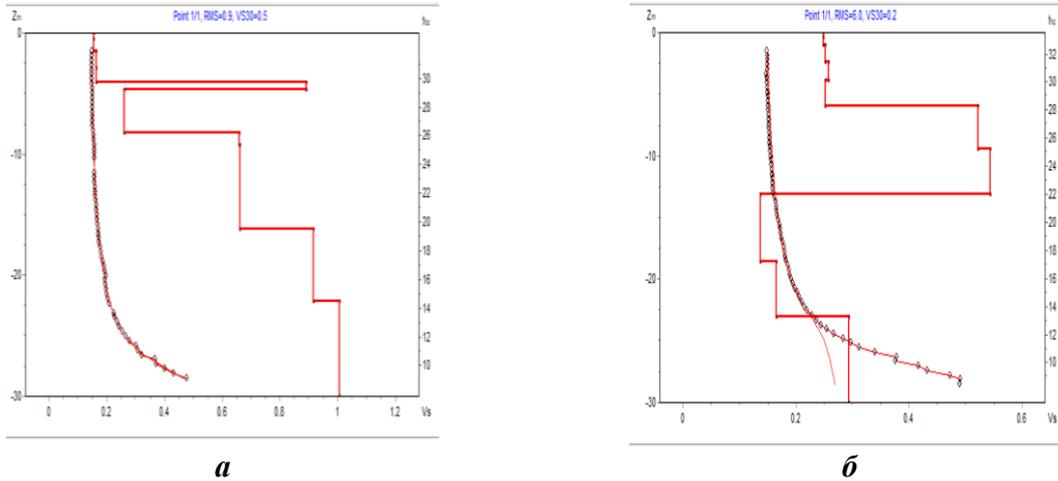
Совмещение этих методов позволяет:

- ✓ использовать **результаты МПВ/МОВ как априорную модель** или стартовые значения для MASW-инверсии;
- ✓ вводить **жёсткие ограничения на интервальные скорости** в ключевых зонах разреза;
- ✓ улучшать качество оценки слоистой структуры в верхней части разреза;
- ✓ обеспечивать **более точное определение  $V_{s30}$**  за счёт сочетания глубинной информации и детального спектрального анализа.

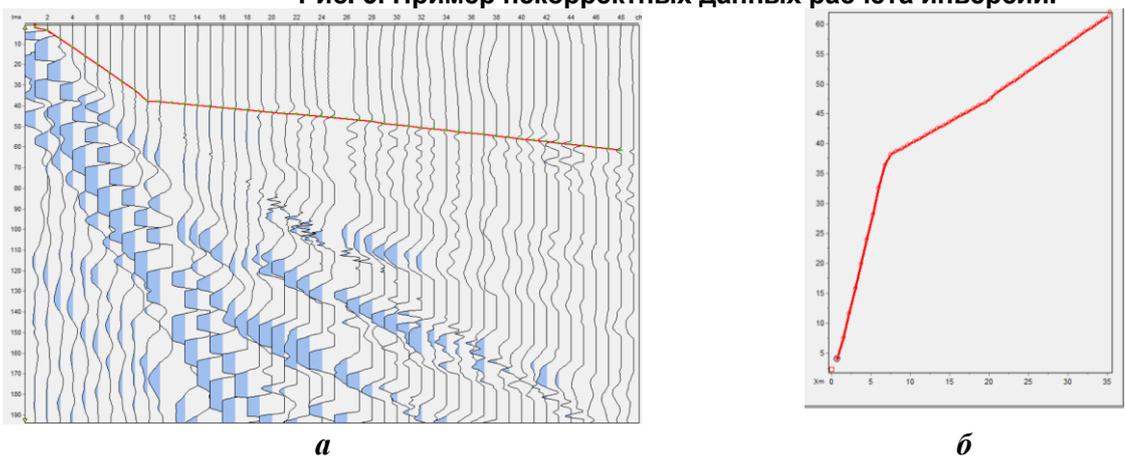
### Практическая реализация

В рамках экспериментальной части исследования реализована схема последовательной инверсии, при которой модель скоростей Р-волн, полученная методом МПВ, использовалась в качестве априорного приближения для расчёта профиля  $V_s$  по MASW. Применение такой стратегии позволило повысить устойчивость инверсии, сократить расчётное время и обеспечить сходимость решения даже при слабовыраженной дисперсии.

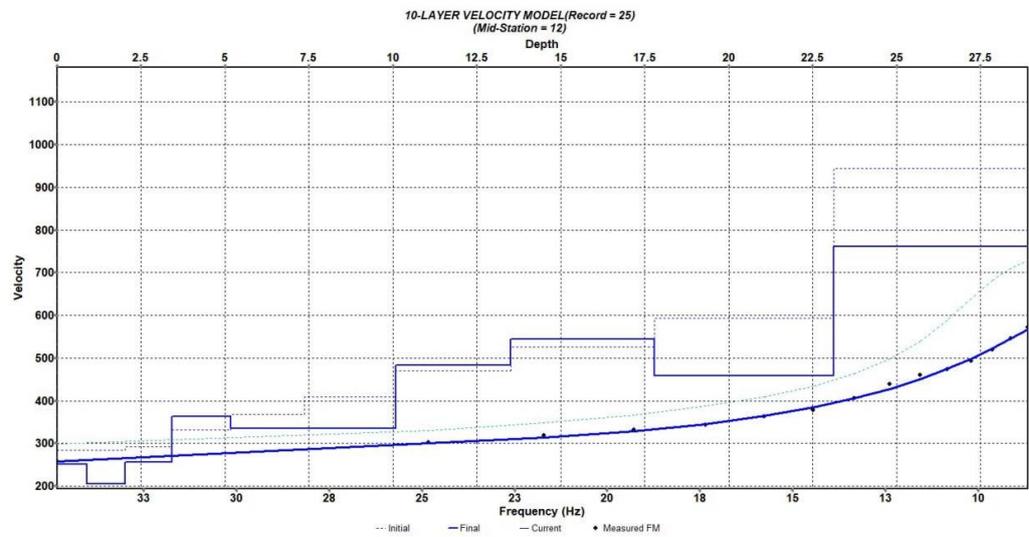
На рис. 5 представлена модель, рассчитанная без априорной информации, демонстрирующая высокую чувствительность инверсии к начальному приближению и распад  $V_s$ -профиля. Рис. 6 иллюстрирует построение годографа по данным Р-волн, а рис. 7 – результат инверсии MASW с использованием модели, полученной по МПВ:  $V_s$ -профиль, в данном случае, характеризуется устойчивой структурой и физически обоснованным распределением скоростей.



**Рис. 5. Пример некорректных данных расчета инверсии.**



**Рис. 6. Пикирование прямых и преломленных волн. а – процесс пикирования первых вступлений; б – годограф прямой и преломленной волны.**



**Рис. 7. Расчет MASW с учетом входных априорий.**

Совместная инверсия обладает высокой потенциальной точностью, однако требует:

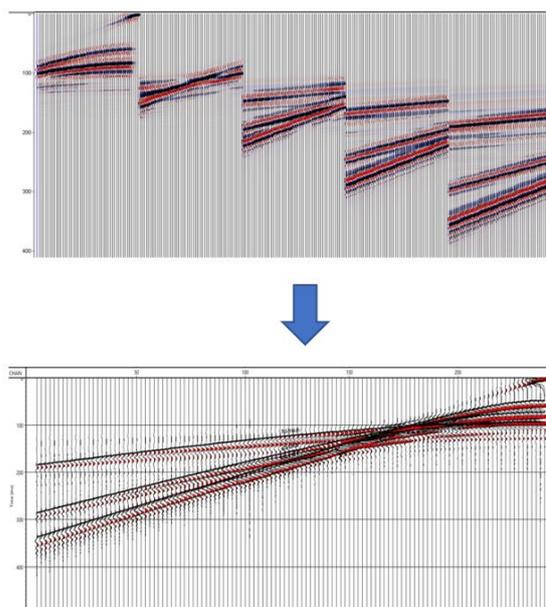
- согласования координат и геометрии профилей;
- корректной трансформации  $V_p$  в  $V_s$ , желательно с локальной калибровкой;

- устойчивой интерпретации первичных Р-волн (что не всегда возможно в условиях городской среды).

Тем не менее, методика уже сейчас активно применяется в инженерной сейсмологии, включая исследования в зонах повышенного риска (например, при обследовании существующих зданий и сооружений) [15].

### **3. Сейсмическое волновое зондирование (СВЗ): увеличение разрешающей способности и подавление пространственного аляйсинга**

Одним из путей увеличения глубинности метода MASW и повышения латеральной разрешающей способности является реализация методики, условно обозначаемой как **сейсмическое волновое зондирование (СВЗ)**. Под СВЗ в контексте настоящего исследования понимается съёмка с геометрией такой системой расстановки типа, что при стационарном положении приёмной линии и смещении лишь пунктов возбуждения имеется возможность наращивания длины расстановки. Таким образом, осуществляется последовательная «переходящая» регистрация сигналов, аналогичная эффекту удлинённого профиля с высокой дискретизацией возбуждения. Методика классически применялась в нефтегазовой сейсморазведке при ограниченном количестве приёмной линии. На рис. 8 представлена схема экспресс-скоростного анализа отраженных волн по данной методике. Причем существуют две вариации СВЗ – где стационарной остаётся приёмная линия, перемещаются источники, и наоборот, где стационарное положение сохраняет источник, а перемещается приёмная линия. Причем последняя обоснована неизменностью условий возбуждения сигнала. В настоящее время данная методика применяется в морской сейсморазведке, также существует применение в рамках инженерной сейсморазведки с целью экспресс-оценки скоростных характеристик, однако, как правило, применяется вторая вариация СВЗ.



**Рис. 8. Экспресс-оценка скоростей отраженных волн методикой СВЗ.**

Классический MASW в ряде случаев из-за большого шага между пунктами приёма ограничен по разрешающей способности за счёт фиксированной длины приёмной линии и ограниченного частотного диапазона. При этом пространственный аляйсинг, возникающий

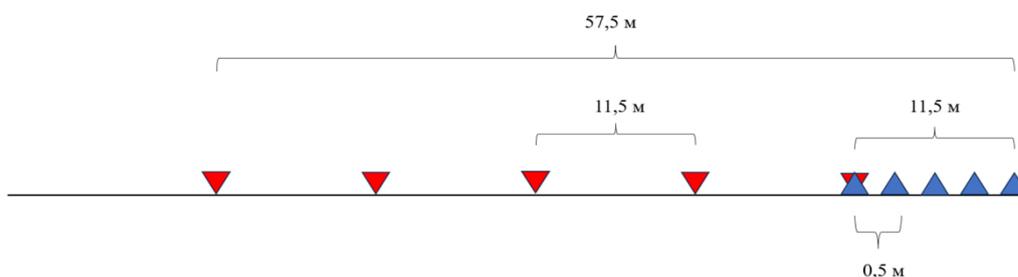
при большом шаге между приёмниками, приводит к появлению высокочастотных артефактов в спектре. Методика СВЗ направлена на решение обеих проблем:

- за счёт перемещения источника достигается **меньший шаг между пунктами приёма**, позволяющий нарастить большое количество каналов (увеличение разрешающей способности);
- также сохранение малого шага между приёмниками позволяет **существенно уменьшить эффект аляйсинга** и улучшить спектральную читаемость.

### *Практическая реализация*

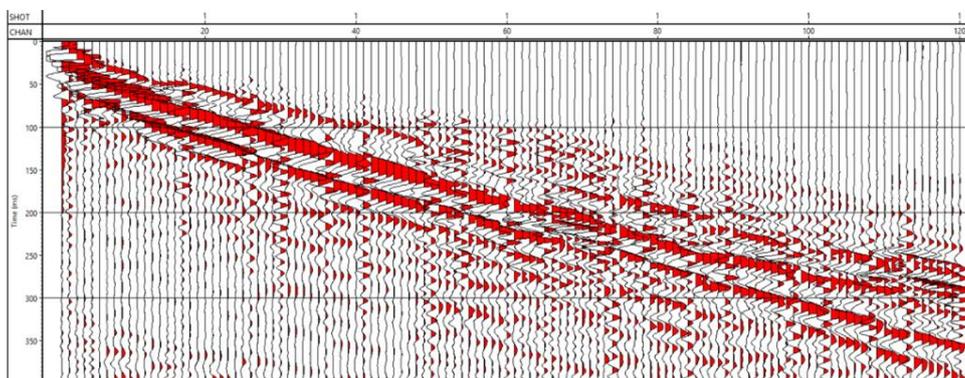
В рамках полевого эксперимента реализована следующая схема:

- ✓ использовалась 24-канальная система регистрации с шагом 0,5 м между приёмниками (общая длина профиля – 11,5 м) (рис. 9);
- ✓ выполнены 5 возбуждений (P, SV, SH), каждое – с переносом источника на длину всей линии регистрации;
- ✓ в результате формировалась совокупность записей, позволяющих трактовать полученные сигналы как аналог длинного профиля (57,5 м) при сохранении малого шага между приёмниками.



**Рис. 9. Система расстановки методики СВЗ.**

Записи были объединены (сшиты) в единую дисперсионную диаграмму, по которой проводился анализ  $V_s$  методом MASW (в т. ч. на SH-компоненте) – рис. 10.



**Рис. 10. Сейсмограмма СВЗ (SH) – общее количество трасс – 120.**

Обработка данных показала:

- **увеличение глубинности зондирования** при сохранении точности определения  $V_s$  в верхних слоях;
- **значительное снижение уровня спектрального шума на фоне;**
- **устойчивое и хорошо различимое выделение дисперсионных кривых.**

Также дополнительно проведены исследования по оценке влияния пространственного алейсинга на качество данных. Для этого на сейсмограмме по SH волнам были разряжены трассы таким образом, чтобы получить набор сейсмограмм с разными шагами между пунктами приёма: 0,5 м, 1 м, 4 м, 6 м. На рис. 11 представлены сравнения спектров при различных шагах между приёмниками (0,5 м, 1 м, 4 м, 6 м). Чётко видно, что при увеличении шага возрастает количество фонового шума, возрастает количество паразитных мод.

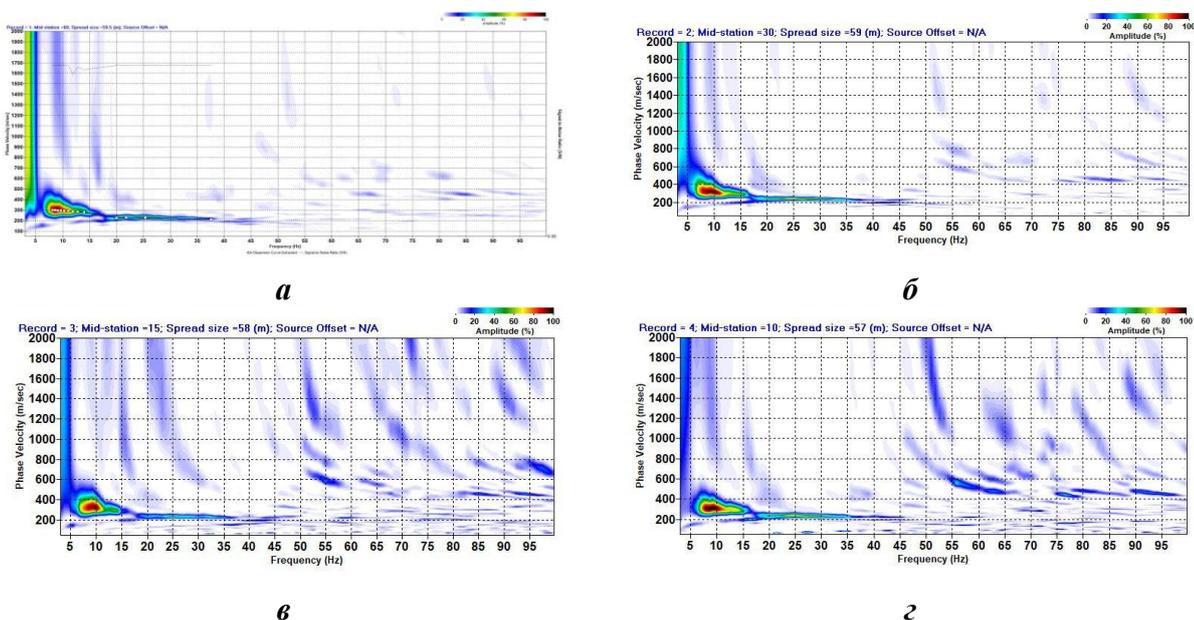


Рис. 11. Изображения дисперсионных кривых при разных шагах между трассами: а – 0,5 м; б – 1 м; в – 4 м; г – 6 м.

Методика сейсмического волнового зондирования (СВЗ) позволяет существенно расширить возможности MASW при минимальных затратах. За счёт последовательного перемещения источника и фиксированной приёмной линии удаётся получить данные, эквивалентные по качеству MASW-съёмкам на длинных профилях. Это особенно ценно в условиях городской застройки и при обследовании линейных объектов, где классическая геометрия расстановки невозможна. Метод обеспечивает улучшенную латеральную разрешающую способность, снижает уровень спектрального шума и позволяет расширить рабочий частотный диапазон, необходимый для расчёта параметра  $V_{s30}$ . Таким образом, СВЗ – это эффективное и технологически доступное решение для повышения информативности MASW в сложных условиях.

### Совместная инверсия MASW и HVRS: комплексный подход к восстановлению $V_s$ -профиля

Методика HVRS (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio), или метод отношения горизонтальной и вертикальной компонент микросейсмического шума, активно применяется для оценки резонансной частоты грунта и построения  $V_s$ -профиля через интерпретацию эллиптической кривой волн Рэля. При этом метод отличается высокой чувствительностью к контрастам в скоростной структуре [16].

В сочетании с методом MASW, HVRS может применяться как самостоятельный или вспомогательный источник информации о структуре верхних слоёв. **Совместная инверсия** позволяет объединить спектральные данные от волн Рэлея (MASW) и амплитудно-частотные характеристики, полученные из HVRS, что существенно расширяет чувствительность к различным аспектам Vs-профиля.

MASW и HVRS опираются на фундаментально разные типы данных:

- MASW регистрирует **фазовую скорость** поверхностных волн (дисперсионная кривая);
- HVRS анализирует **амплитудное поведение** горизонтальной и вертикальной компонент микросейсмических колебаний (H/V-спектр).

Волны Рэлея, будучи основными носителями энергии в обоих методах, обладают эллиптической формой движения частиц, параметры которой зависят от распределения Vs в толще. HVRS отражает поведение эллиптической амплитуды, а MASW – фазовую дисперсию, что делает их **взаимодополняющими источниками информации**. Совместная инверсия позволяет объединить оба критерия в едином функционале, минимизируя ошибку между наблюдаемыми и синтетическими кривыми как по фазе, так и по амплитуде [17].

### *Практическая реализация*

В рамках исследования апробирована методика совместной инверсии данных MASW и HVRS, включающая объединение фазовой (дисперсионной) и амплитудной (H/V) информации в едином инверсном функционале (рис. 12). Съёмка проводилась в одной точке, что обеспечило согласованность данных, а результат инверсии продемонстрировал более глубокое и устойчивое решение по сравнению с использованием MASW отдельно. Совмещение двух методов позволило устранить противоречия между скоростными моделями, повысить достоверность Vs-профиля и увеличить глубинность интерпретации – в ряде случаев до 50 м, что выходит за пределы стандартной чувствительности MASW. Полученный результат подтверждает эффективность подхода в условиях ограниченного профиля и слабовыраженного спектра.

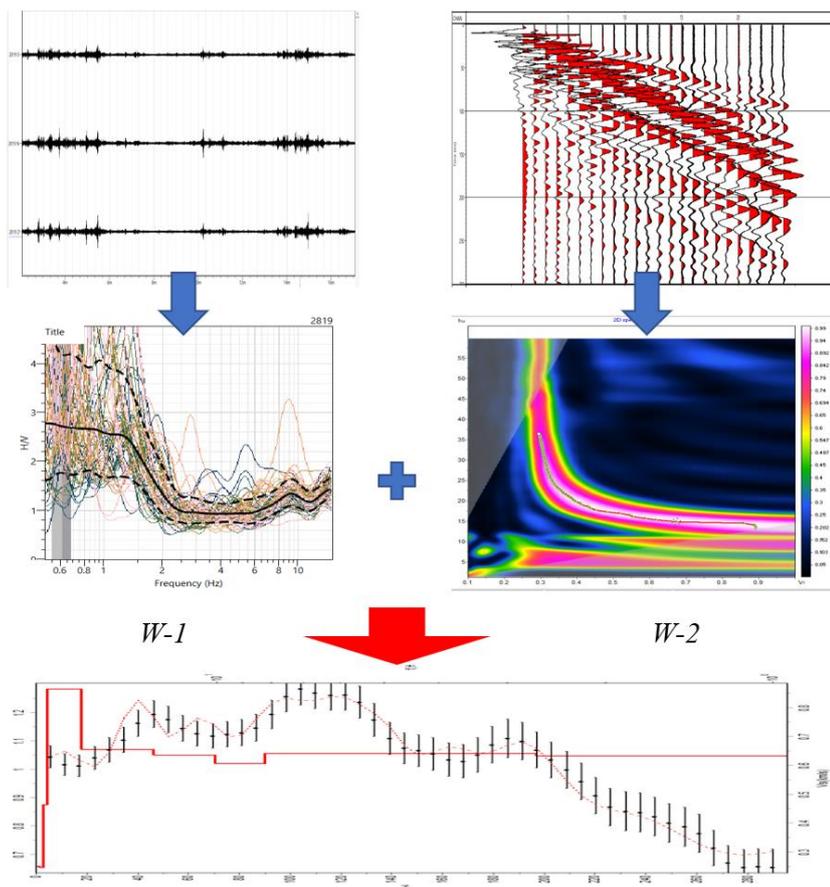


Рис. 12. Схема совместной инверсии: объединение данных MASW и HVRS для одновременного восстановления скоростного профиля.

*Однако стоит оговорить ряд ограничений и условий применимости:*

- ✓ HVRS сам по себе не обладает однозначной чувствительностью к глубине – его максимумы связаны с контрастами  $V_s$ , но не дают единственного решения без априорной информации;
- ✓ объединённый метод требует предварительного согласования условий съёмки и частотного диапазона;
- ✓ для надёжного результата желательно использовать HVRS в сочетании с независимыми измерениями толщин или скорости в контрольных точках.

Совместная инверсия MASW + HVRS – перспективное направление в инженерной сейсмологии, особенно в городских условиях, где доступ к длинным профилям ограничен. Методика активно развивается в международной практике, а также используется в автоматизированных системах построения  $V_s30$  на больших территориях [18, 19].

## Заключение и выводы

В данной работе проведён всесторонний анализ метода многоканального анализа поверхностных волн (MASW) с позиции его применения в инженерно-сейсмических исследованиях, направленных на восстановление скоростей поперечных волн и оценку параметра  $V_s30$ . Выявлены ключевые ограничения метода, включая неустойчивость инверсии, чувствительность к выделению дисперсионной кривой, пространственный аляйсинг и ограниченность глубинного зондирования.

Для преодоления указанных недостатков предложены и апробированы четыре практических подхода:

- ✓ использование волн SH (волны Лява) позволило повысить устойчивость дисперсионного анализа;
- ✓ совместная инверсия MASW и данных объёмных волн (МПВ/МОВ) обеспечила снижение неоднозначности Vs-моделей;
- ✓ методика сейсмического волнового зондирования (СВЗ) способствовала увеличению глубинности зондирования и улучшению латерального разрешения;
- ✓ объединение MASW и HVRS в едином инверсном алгоритме позволило получить более устойчивое решение даже при ограниченном частотном диапазоне.

Результаты проведённых экспериментов подтверждают эффективность каждого из предложенных решений и демонстрируют возможность адаптации MASW к сложным инженерно-геологическим условиям. Представленные методики могут быть внедрены в практику инженерных изысканий и использоваться как в городских, так и в пригородных районах, где традиционные методы сейсморазведки затруднены.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исмаилов В.А. и др. Методическое руководство по детальному сейсмическому районированию и микрорайонированию для градостроительного планирования. – Т.: Umid Design, 2023. - 154 с.
2. РСН 60-86. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. - М.: Стройиздат, 1986. - 24 с.
3. Building Seismic Safety Council (BSSC). NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. FEMA 450, 2003.
4. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from Western North American Earthquakes. // *Earthquake Spectra*, 1997.
5. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*, 1999. - 64(3). - P. 800-808.
6. Foti S. et al. Guidelines for the Good Practice of Surface Wave Analysis: A Product of the InterPACIFIC Project // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2018. - 16(6). - P. 2367-2420.
7. Yusupov D.D., Mamarozikov T.U., Otajonova Sh.Kh. Comparative analysis of seismic exploration methods RW-MS, RW-MP, MASW for calculating velocity characteristics in engineering geophysical surveys // Тез. Междунар. науч. конф. «Геология в пространстве и времени», посвящ. 270-летию МГУ им. М.В.Ломоносова, 75-летию Геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова и 15-летию Филиала МГУ им. М.В.Ломоносова в г. Душанбе: [электронное издание сетевого распространения]. - М.: «КДУ», «Добросвет», МГУ им. М.В.Ломоносова, 2024. - С. 141-143.
8. Yilmaz Ö. (2015). Engineering seismology with applications to geotechnical engineering // *Investigations in Geophysics* No. 17. Society of Exploration Geophysicists.
9. Foti S., Lai C.G., Rix G.J., Strobbia C. Surface wave methods for near-surface site characterization // CRC Press. - 2014.
10. Foti S., Lai C.G., Rix G.J., Strobbia C. Surface wave methods for near-surface site characterization // CRC Press. - 2018.
11. Xia J., Miller R.D., Park C.B., Ivanov J. Advantages of analyzing surface-wave data using the fundamental mode and higher modes // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. - 2012.
12. Tokimatsu K., Tamura S. Evaluation of Vs profiles using surface waves generated by microtremors // *Proceedings of the 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. - 1995.
13. Foti S., Parolai S., Albarello D. et al. Surface wave methods for seismic site characterization // *Deliverable Report, InterPACIFIC Project*. - 2009.
14. Socco L.V., Comina C., Foti S., Boiero D. Joint analysis of surface wave and P-wave refraction data for soil characterization // *Near Surface Geophysics*. - 2010. - 8(3). - P. 203-214.
15. Boaga J., Cassiani G., Strobbia C., Vignoli G. Mode misidentification in Rayleigh waves: Role of inversion parameters and geological conditions // *Geophysical Prospecting*. - 2013. - 61(4). - P. 931-948.
16. Konno K., Ohmachi T. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor // *Bull. Seismol. Soc. Am.* - 1998. - 88(1). - P. 228-241.
17. Scherbaum F., Hinzen K.G., Ohrnberger M. Determination of shallow shear wave velocity profiles in the Cologne/Germany area using ambient vibrations // *Geophys. J. Int.* - 2003. - 152(3). - P. 597-612.
18. Herak M. Model HVSR – A Matlab tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise //

Computers & Geosciences. - 2008. - 34(11). - P. 1514-1526.

19. Foti S. *et al.* Integration of surface-wave and H/V methods for improved Vs profiling // Near Surface Geophysics. - 2017. - 15(6). - P. 593-606.

**D.D. Yusupov, T.U. Mamarozikov**

**MASW ma'lumotlari bo'yicha VS baholash usullarini takomillashtirish: usulning kamchiliklari va ularni bartaraf etish yo'llari**

**Annotasiya.** Mazkur maqolada yer osti qatlamlarini baholashda keng qo'llaniladigan ko'pkanalli sirt to'lqinlari tahlili (MASW) usulining metodologik cheklovlari ko'rib chiqiladi. Inversiya barqarorligining pasayishi, fazoviy aliasing, zondlash chuqurligining cheklanganligi va dispersiya egri chizig'ini tanlashga bo'lgan sezuvchanlik sabablari tahlil qilinadi. Vs modellashuvining ishonchliligini oshirish maqsadida to'rtta amaliy yechim taklif qilinadi: SH-to'lqinlaridan (Love to'lqinlari) foydalanish, hajmiy to'lqinlar usullari bilan qo'shma inversiya (MIB/MOB), seysmik to'lqinli zondlash (STZ) metodikasini joriy etish va MASWni HVRS ma'lumotlari bilan birlashtirish. Eksperimental tadqiqotlar har bir yondashuvning samaradorligini tasdiqlaydi va ularning real muhandislik-geologik sharoitlarda qo'llanishini ko'rsatadi.

**Kalit so'zlar:** MASW, kesuvchi to'lqinlar, Vs30, dispersiya egri chizig'i inversiyasi, Love to'lqinlari, HVRS, hajmiy to'lqinlar, fazoviy aliasing, seysmik to'lqinli zondlash, muhandislik seysmologiyasi.

**D.D. Yusupov, T.U. Mamarozikov**

**Improving the evaluation of VS based on MASW data: limitations of the method and approaches to overcome them**

**Abstract.** This article addresses the methodological limitations of the Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) method, widely used in engineering seismology for evaluating the Vs30 parameter. The study analyzes the causes of inversion instability, the effects of spatial aliasing, limited investigation depth, and the sensitivity to dispersion curve selection. To improve the reliability of Vs modeling, four practical solutions are proposed: the use of SH-waves (Love waves), joint inversion with body wave methods (refraction/reflection), implementation of Seismic Wave Sounding (SWS), and integration of MASW with HVRS data. Experimental results confirm the effectiveness of each approach and demonstrate their applicability under real engineering and geological conditions.

**Key words:** MASW, shear waves, Vs30, dispersion curve inversion, Love waves, HVRS, body waves, spatial aliasing, seismic wave sounding, engineering seismology.

# ZILZILALARNI PROGNOZLASH

УДК. 550.343

## TOSHKENTOLDI HUDUDIDA KUCHLI ZILZILALAR JOYLARINI MASHINAVIY O'RGANISH ALGORITMLARI ASOSIDA ANIQLASH

**J.Q. Mamarahimov**

*O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi G'.O.Mavlonov nomidagi Seysmologiya instituti*

**Annotatsiya.** Zilzilalarni oldindan prognoz qilish masalasi geologik-tektonik jarayonlarning murakkabligi va ularga ta'sir etuvchi omillarning ko'p qirraliligi sababli hamon to'liq hal etilmagan. Bugungi kunda katta hajmdagi ma'lumotlarni umumlashtirish va ular o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni aniqlashda sun'iy intellekt algoritmlari keng qo'llanilmoqda. Sun'iy intellekt algoritmlari uchun morfologik, tektonik, geofizik (yer qa'ri kuchlanganlik holatining matematik modelidan foydalangan holda) va seysmologik ma'lumotlar asosida ma'lumotlar to'plami yaratildi. Kora 4, Random Forest, Decision Tree va yana bir qancha mashinaviy o'rganish algoritmlaridan foydalanib Toshkentoldi hududida zilzilalar joyi prognoz qilindi hamda algoritmlar baholandi.

**Kalit so'zlar:** zilzilani prognoz qilish, Toshkentoldi hududi, sun'iy intellekt, mashinaviy o'rganish, Kora 3 algoritmi.

**Kirish.** Dastlabki zilzilalarni prognoz qilish asosan empirik kuzatuvlarga asoslangan. Qadimdan zilzilalar oldidan hayvonlarning g'ayritabiyy xatti-harakati, yer osti suvlari sathining o'zgarishi va atmosferadagi o'zgarishlarni qayd etishgan. XX asrda instrumental seysmologiyaning rivojlanishi natijasida olimlar zilzila to'liqlarining tebranishlarini, kuchlanish to'planishini va yoriqlar bo'ylab sirpanish tezligini o'rganish imkoniyatiga ega bo'lishdi. Biroq bular yer tuzilishi hamda uning tabiatini, xususan zilzilalarni o'rganishga qo'yilgan dastlabki va muhim qadamlar edi. Shu tariqa zilzilalarni o'rganish va ularni oldindan prognoz qilish bo'yicha keng ko'lamli ishlar boshlanib ketdi. Zilzilalarni prognoz qilishda mashhur hamda ushbu tendensiyalarini yanada oldinga siljitgan bir qancha tarixiy jarayonlar bo'lib, ular quyidagilardir:

1. **Xaychen zilzilasi prognozi (Xitoy, 1975-yil,  $M = 7,3$ ).** Bu zilzila tarixda **rivojlanayotgan mamlakatda** birinchi (va deyarli yagona) **rasmiy ravishda evakuatsiya asosida oldindan prognoz qilingan** kuchli zilziladir [1].

2. **VAN metodi – (Varotsos, Aleksopoulos, Nomikos – Gretsiya, 1980-yillar).** VAN guruhi zilzila oldidan yer qatlamida hosil bo'ladigan seysmik elektr signallarni qayd etishga asoslangan tizim yaratdi [2].

3. Obrazlarni tanib olish va mashinaviy o'rganish usullari bo'yicha CN (Circulation Number) va M8 algoritmlari AQSh, Italiya va Rossiyada qo'llanilgan bo'lib, 1985-yildan buyon kuchli zilzilalarni o'rta va uzoq muddatli prognoz qilib kelmoqda [3]. Statistika va obrazlarni tanib olish tamoyillariga asoslangan bir qancha algoritmlar ishlab chiqilgan bo'lib, ular asosan ayrim hududlarga va o'rta va uzoq muddatli prognozlashga moslashgan [4-7].

Bugungi kunda zilzilalarni prognoz qilish imkoniyatlari sezilarli darajada rivojlangan, ammo hali ham bu sohada to'liq aniqlik bilan natijalarga erishish qiyin. Zamonaviy texnologiyalar, sun'iy intellekt va mashinaviy o'rganish algoritmlari zilzila prognozini aniqroq qilish imkoniyatini beradi. AQSh, Yaponiya, Xitoy va boshqa mamlakatlarda olib borilgan ilmiy izlanishlar, shuningdek ayrim tashkilotlarning tadqiqotlari zilzilalarni prognoz qilish texnologiyalarini yanada rivojlantirishga hissa qo'shmoqda [1-9]. Shu bilan birga, olimlar tomonidan kiritilayotgan yondashuvlar va texnologiyalar yordamida seysmik jarayonlarning murakkabligi yanada tushunarli bo'lib bormoqda. Shunga qaramasdan zilzilalarni aniq prognoz qilish hamon dolzarb vazifalardan birilgicha qolmoqda.

O'zbekistonning katta qismi **Yevroosiyo** va **Hindiston plitalar** to'qnashuvi hududiga yaqin joylashganligi sababli, mamlakatimiz hududi geologik va tektonik jihatdan **Markaziy Osiyoning eng faol seysmik hududlaridan biri** hisoblanadi. O'zbekiston va uning yaqin atrofida so'ngi 70 yillikda magnitudasi  $M \geq 5,0$  bo'lgan 70 dan ortiq zilzilalar sodir bo'lgan. Bu mamlakatimizda seysmik xavfni baholash va zilzilalarni prognoz qilishga bo'lgan talab yuqoriligini anglatadi. Shu asnodan mashinaviy o'rganish orqali Toshkentoldi hududida zilzilalar prognoz qilinadi va bu keyinchalik sun'iy intellekt modellarini qo'llab prognoz qilishga asos bo'ladi.

Kora 3 va Random Forest algoritmlarining ishlash prinsipi:

**Kora 3 algoritmi** ikki xil toifadagi (klasterdagi) ob'ektlarni ajratish uchun ishlatiladi. Ob'ektlar 0 va 1 bilan ifodalangan xususiyatlar orqali beriladi. Algoritm barcha xususiyatlardan har qanday uchtaliklar(troykalar)ning barcha mumkin bo'lgan kombinatsiyalarini ko'rib chiqadi. So'ngra birinchi toifadagi ob'ektlarda ikkinchi toifada uchramaydigan holatlarni izlaydi. Xuddi shunday, ikkinchi toifada ham birinchi toifada uchramaydigan holatlar aniqlanadi. Keyin yangi berilgan ob'ekt uchun qaysi toifaga mos kelish ehtimoli ko'proq ekanini hisoblab, u shu toifaga tegishli deb qabul qiladi. Kora 3 algoritmi kichik ma'lumotlar uchun yuqori aniqlikka ega bo'lib, tushunish oson bo'lgan algoritmdir.

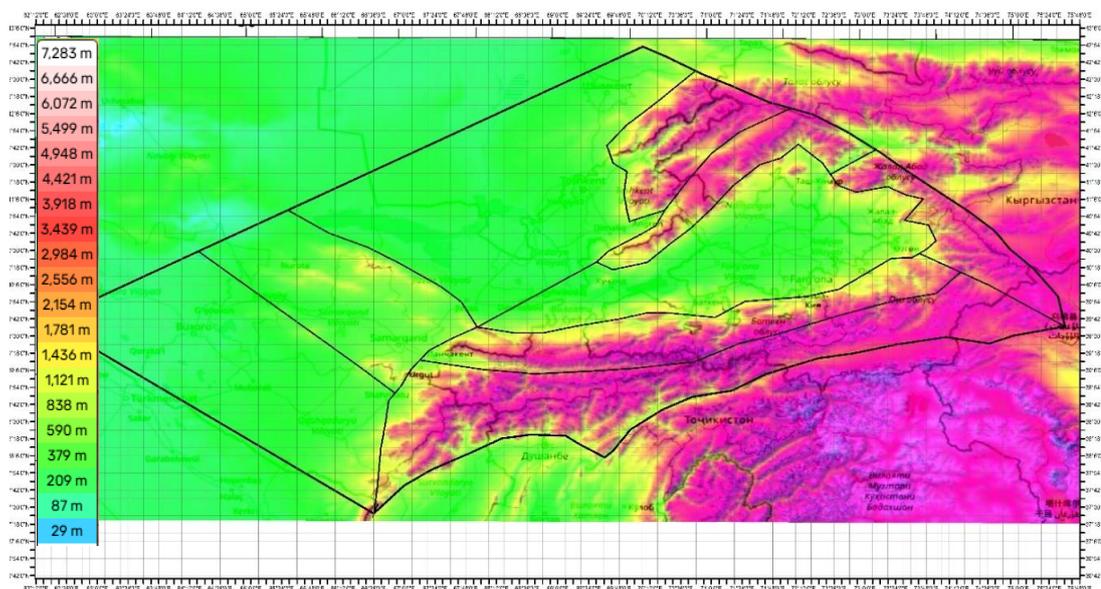
Kora 3 algoritmi kompyuter inqilobi boshida, energiya sarfi kam bo'lgan kompyuterlar uchun yaratilgan. Hozirgi zamon imkoniyatlarini hisobga olib yechim biroz o'zgartirildi: endilikda barcha xususiyatlardan har qanday uchtaliklar(troykalar)ning emas, balki to'rttaliklarning barcha mumkin bo'lgan kombinatsiyalarini ko'rib chiqadi va u Kora 4 algoritmi deb nomlandi.

**Random Forest algoritmi** ko'plab Decision Tree (qaror daraxtlari) asosida ishlaydi. Har bir daraxt ma'lum bir qism ma'lumotlarda o'rgatiladi. Yangi ma'lumot kelganda, har bir daraxt o'zicha taxmin (prognoz) beradi. Keyin ularning aksariyat qismi qaysi toifani aytsa, shu toifa tanlanadi. Bu usul natijani barqaror va aniq qiladi, chunki bir necha daraxt xatoni kamaytiradi.

Random Forest algoritmi, shuningdek, belgilarning ahamiyatini aniqlash uchun samarali mezonni taqdim yetadi. U katta hajmdagi kirish belgilari, shu jumladan kategoriyali va raqamli belgilar bilan yuqori aniqlikda va tezkor ishlay oladi. Biroq, bu algoritm "qora quti" modelidir, ya'ni u qanday qilib aniq prognoz berganini tushuntirish qiyin bo'ladi. Qolgan algoritmlar ham "qora quti" xususiyatiga ega.

### Algoritm uchun ma'lumotlar to'plamini shakllantirish

Ma'lumotlar to'plamini shakllantirishda G'arbiy Tyon-Shon qamrab olindi (1-rasm). Ushbu hudud yer qa'ri kuchlanganlik holatining matematik modeli talabidan kelib chiqib 1394 ta uchburchak shaklidagi kichik zonalarga bo'lindi (2-rasm) va Toshkentoldi hududi uchun 34 ta zonalar ajratib olindi. Model talabiga ko'ra noregulyar maydonlarni to'ldirishda eng yaxshi usul uchburchaklar bilan to'ldirishdir va shu sababi uchburchaklar ham turli o'lchamga ega. Har bir uchburchak aniq nuqtalarga ega va ularning geografik koordinatalari mavjud.



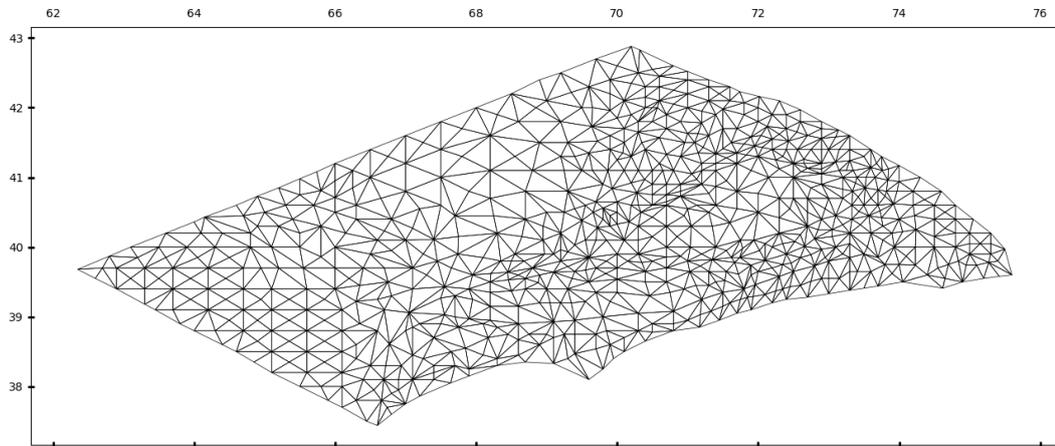
1-rasm. Ma'lumotlar to'plamini shakllantirish uchun qaralayotgan G'arbiy Tyon-Shon hududi.

Рис. 1. Рассматриваемый район Западного Тянь-Шаня для формирования набора данных.

Fig. 1. The Western Tien Shan region considered for dataset formation.

So'ngra har bir zona uchun mashinaviy o'rganishga mo'ljallangan ma'lumotlar to'plami quyidagi parametrlar asosida ikkilik sanoq sistemasida shakllantirildi:

1. Yaqin tog'liklargacha bo'lgan masofa  $R \leq 30$  km;
2. Yaqin tog'liklargacha bo'lgan masofa  $30 < R \leq 70$ ;
3. Yaqin tog'liklargacha bo'lgan masofa  $R > 70$ ;
4. Tog' bag'rida joylashgan tog' tuzilmalari;
5. O'rta balandlikdagi tog'lar ( $>3000$  m);



2-rasm. Hududning yer qa'ri kuchlanganlik holatining matematik modeli sxemasi.

Рис. 2. Схема региона для математической модели напряжённого состояния земной коры.

Fig. 2. Regional scheme for the mathematical model of the Earth's crust stress state.

6. Baland tog'lar ( $>4500$  m);
7. Tog' yetaklaridagi bosim ta'sirida shakllangan yer tuzilmalari;
8. Relef balandligi  $h \leq 1$  km;
9. Relef balandligi  $1 < h \leq 2$  km;
10. Relef balandligi  $h > 2$  km;
11. Balandlik farqi  $dh \leq 1,5$  km;
12. Balandlik farqi  $1,5 < dh \leq 2,5$  km;
13. Balandlik farqi  $dh > 2,5$  km;
14. Yer yoriqlari soni  $1 \leq n \leq 2$ ;
15. Yer yoriqlari soni  $n > 2$ ;
16. Yer yoriqlari kesishmasi;
17. 1-klass yer yorig'i;
18. 2-klass yer yorig'i;
19. 3-klass yer yorig'i;
20. 4-klass yer yorig'i;
21. Tangensial kuchlanish;
22. Zamonaviy harakatlar: vertikal tezliklar;
23. Kuchlanish holatining xarakteri: mintaqaviy siqilish;
24. Kuchlanish holatining xarakteri: mintaqaviy cho'zilish;
25. Zilzila xarakteri: haqiqiy surilma (сдвиг);
26. Zilzila xarakteri: tashlama-uzilma (сброс);
27. Zilzila xarakteri: ko'tarilma-uzilma (взброс);
28. Zilzila xarakteri: surilma (сдвиг);
29. Rixter-Gutenberg koeffitsientining o'rta qiymatdan farqi  $\Delta b$ ;
30. Magnitudasi  $M_0$  dan yuqori zilzilalar mavjudligi  $M \geq M_0$

Bu yerda 1-13 parametrlar topografik ma'lumotlar asosida [11], 14-20 parametrlar yer yoriqlarining joylashuv xaritalaridan foydalangan holda [12], 21-28 parametrlar yer qa'ri

kuchlanganlik holatining matematik modeli natijalaridan foydalangan holda [10], 29 va 30 parametrlar seysmik ma'lumotlar bazasi(seysmik katalog)dan [13] foydalanib (29 parametrda 1-rasmda keltirilgan bloklarga nisbatan har bir zona qiyoslandi) shakllantirildi.

Natijada ikkilik sanoq sistemasida (1 – ha yoki bor, 0 – yo‘q yoki mavjud emasni anglatadi) 1-jadvaldagi ko‘rinishda mashinaviy o‘rganish uchun ma'lumotlar to‘plami hosil bo‘ldi.

1-jadvalning 1-ustunida Toshkentoldi hududi uchun tanlab olingan zonalar raqamlari keltirilgan bo‘lib, bu zonalar 2-jadvaldagi geografik koordinatlarga ega.

1-jadval

**Toshkentoldi hududi uchun mashinaviy o‘rganishga tayorlangan ma'lumotlar to‘plami**

Таблица 1

**Набор данных, подготовленный для модели машинного обучения по Приташкентскому региону**

| Zona raqami | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | .. | .. | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | M≥5,0 |
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|
| 52          | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | .. | .. | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0     |
| 53          | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | .. | .. | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1     |
| 77          | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | .. | .. | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0     |
| ..          | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | ..    |
| ..          | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | ..    |
| 165         | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | .. | .. | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0     |
| 166         | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | .. | .. | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1     |
| 167         | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | .. | .. | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0     |
| 168         | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | .. | .. | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0     |

2-jadval

**Toshkentoldi hududi uchun tanlab olingan zonalarining geografik koordinatalari**

Таблица 2

**Географические координаты выбранных зон для Приташкентского региона**

| Zona | Zonaning 1-nuqtasi (shim.k.; shar.u.) | Zonaning 2-nuqtasi (shim.k.; shar.u.) | Zonaning 3-nuqtasi (shim.k.; shar.u.) |
|------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 52   | 41,96; 69,90                          | 41,73; 69,64                          | 41,85; 70,00                          |
| 53   | 41,70; 70,10                          | 41,85; 70,00                          | 41,73; 69,64                          |
| 77   | 41,70; 70,10                          | 41,60; 69,90                          | 41,50; 70,10                          |
| ..   | ..                                    | ..                                    | ..                                    |
| 152  | 41,30; 69,20                          | 41,10; 68,80                          | 41,10; 69,25                          |
| ..   | ..                                    | ..                                    | ..                                    |
| 167  | 41,10; 69,50                          | 41,10; 69,25                          | 40,80; 69,30                          |
| 168  | 41,10; 69,25                          | 41,10; 68,80                          | 40,80; 69,30                          |

Mashinaviy o‘rganish algoritmlari sifatida Kora 4, Logistic Regression (LR), Decision Tree (DT), Random Forest (RF), Gradient Boosting (GB), Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbors (KNN) va Neural Network (NN) algoritmlari tanlab olindi hamda ularga ma'lumotlar to‘plami o‘qitildi.

Dastlab Toshkentoldi hududi zonalarida joylashgan, 2025-yilgacha bo‘lib o‘tgan, magnitudasi M ≥ 5,0 bo‘lgan zilzilalar ajratib olindi (3-jadval).

3-jadval

**Toshkentoldi hududida 2025-yilgacha ro‘y bergan M ≥ 5,0 magnitudali zilzilalar**

Таблица 3

**Землетрясения с магнитудой M ≥ 5,0, произошедших в Приташкентском регионе до 2025 г.**

| Sana       | Shim.k. | Shar.u. | Chuqurlik | Magnituda | Zona |
|------------|---------|---------|-----------|-----------|------|
| 1868       | 41,20   | 69,60   | 20        | 6.7       | 162  |
| 1886       | 41,40   | 69,50   | 20        | 7.0       | 157  |
| 24.10.1959 | 41,67   | 70,00   | 13        | 5.6       | 78   |
| 17.03.1965 | 40,83   | 69,33   | 12        | 5.0       | 166  |
| 25.04.1966 | 41,33   | 69,28   | 8         | 5.2       | 153  |
| 06.12.1977 | 41,58   | 69,68   | 15        | 5.3       | 130  |

|            |       |       |    |     |     |
|------------|-------|-------|----|-----|-----|
| 11.12.1980 | 41,33 | 69,05 | 12 | 5.3 | 150 |
| 26.03.1987 | 41,81 | 69,95 | 5  | 5.1 | 53  |
| 24.05.2013 | 40,93 | 69,25 | 13 | 5.4 | 168 |

**Mashinaviy o'rganish algoritmlari natijalari va ularni baholash**

Mashinaviy o'rganishdan olingan natijalarni baholash quyidagi maxsus usullaridan foydalanib bajarildi:

1. Accuracy – bu o'rganish algoritmlarining qanchalik to'g'ri prognoz qilganligini baholash usuli.

$$Accuracy = \frac{\text{To'g'ri bashoratlar soni}}{\text{Umumiy bashoratlar soni}}$$

2. Precision – Model tomonidan **kuchli zilzila deb prognoz qilingan voqealarning nechtasi aslida ham kuchli zilzila bo'lganligini** ko'rsatadi.

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}$$

TP – to'g'ri aniqlangan kuchli zilzilalar soni.

FP – kuchli deb noto'g'ri aniqlangan (aslida kuchsiz) zilzilalar soni.

3. Recall – Model barcha **haqiqiy kuchli zilzilalarning nechtasini** aniqlay olganini ko'rsatadi.

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN}$$

FN – model noto'g'ri ravishda kuchsiz deb baholagan zilzilalar soni.

4. F1-score – Precision va Recall o'rtasidagi balansni ko'rsatadi.

$$F1 = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

Yuqorida ko'rib chiqilgan algoritmlarning natijalari baholandi (4-jadval) va ular eng yaxshi algoritmni tanlab olishga asos bo'ldi.

4-jadval

**Mashinaviy o'rganish algoritmlaridan olingan natijalar**

Таблица 4

**Результаты алгоритмов машинного обучения**

| Baholash usuli | Kora 4 | LR   | DT   | RF   | GB   | SVM  | KNN  | NN   |
|----------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| Accuracy       | 0.85   | 0.71 | 0.74 | 0.82 | 0.74 | 0.74 | 0.65 | 0.65 |
| Prec 0         | 0.81   | 0.74 | 0.81 | 0.83 | 0.81 | 0.74 | 0.71 | 0.76 |
| Recall 0       | 0.96   | 0.92 | 0.84 | 0.96 | 0.84 | 1.00 | 0.88 | 0.76 |
| F1 0           | 0.88   | 0.82 | 0.82 | 0.89 | 0.82 | 0.85 | 0.79 | 0.76 |
| Prec 1         | 0.86   | 0.33 | 0.50 | 0.80 | 0.50 | 0    | 0    | 0.33 |
| Recall 1       | 0.55   | 0.11 | 0.44 | 0.44 | 0.44 | 0    | 0    | 0.33 |
| F1 1           | 0.67   | 0.17 | 0.47 | 0.57 | 0.47 | 0    | 0    | 0.33 |

Algoritmlarni baholash natijalariga ko'ra eng yaxshi model Kora 4 algoritmi, keyingi o'rinlarda esa Random Forest, Decision Tree, Gradient Boosting va boshqa mashinaviy o'rganish modellari (5-jadval).

5-jadval

**Toshkentoldi hududi uchun, M ≥ 5,0 magnitudali zilzilalarning Kora 4, Random Forest va Decision Tree algoritmlari tomonidan prognozi**

Таблица 5

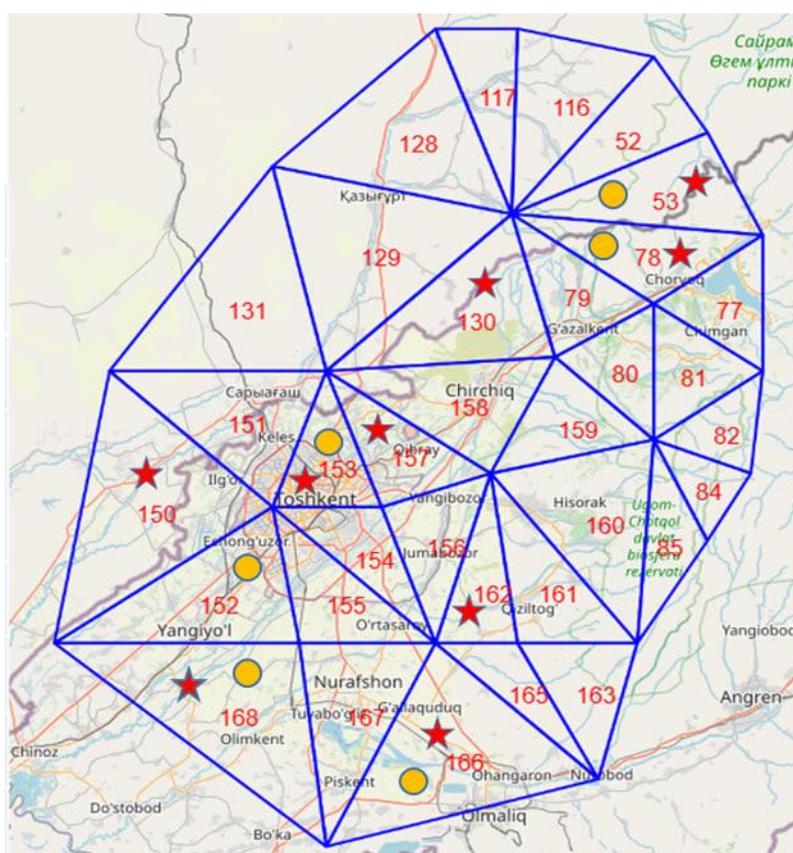
**Прогноз землетрясений с магнитудой M ≥ 5,0 для Приташкентского региона с использованием алгоритмов Kora 4, Random Forest и Decision Tree**

| Zona raqami | Kora 4  |          | Random Forest |          | Decision Tree |          |
|-------------|---------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
|             | haqiqiy | bashorat | haqiqiy       | bashorat | haqiqiy       | bashorat |
| 52          | 0       | 0        | 0             | 0        | 0             | 0        |
| 53          | 1       | 1        | 1             | 0        | 1             | 0        |
| 77          | 0       | 0        | 0             | 0        | 0             | 0        |
| 78          | 1       | 1        | 1             | 1        | 1             | 1        |
| ..          | ..      | ..       | ..            | ..       | ..            | ..       |
| 150         | 1       | 0        | 1             | 0        | 1             | 0        |

|     |    |    |    |    |    |    |
|-----|----|----|----|----|----|----|
| 151 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 152 | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  |
| 153 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| ..  | .. | .. | .. | .. | .. | .. |
| 166 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 167 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 168 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |

**Eng yaxshi algoritmlarning prognozlash natijalari**

Kora 4 algoritmi prognoziga ko'ra (5-jadval) 85% aniqlik bilan 53, 78, 152, 153, 166 va 168 zonalarda  $M \geq 5,0$  magnitudali zilzilalar bo'lishi mumkinligi aniqlandi (3-rasm). Bu zonalardan 152-zonada shu vaqtga qadar  $M \geq 5$  magnitudali zilzilalar sodir bo'lganligi haqida ma'lumot mavjud emas. Kora 4 algoritmi esa 152-zonani  $M \geq 5,0$  magnitudali zilzilalar sodir bo'lishi mumkin bo'lgan zonalar qatoriga qo'shdi va buni boshqa algoritmlar ham tasdiqladi. Kelajakda mavjud seysmik faol zonalar bilan bir qatorda 152-zonada ham  $M \geq 5,0$  magnitudali zilzilalar bo'lish ehtimoli yuqori.



3-rasm. 2-jadvalda keltirilgan va Kora 4 algoritmi tomonidan prognoz qilingan  $M \geq 5,0$  magnitudali zilzilalarning Toshkentoldi hududidagi zonalarda joylashuvi. ★ – haqiqatda zilzila sodir bo'lgan zona. ● – Kora 4 algoritmi tomonidan prognoz qilingan zona.

Рис. 3. Расположение зон в Приташкентском регионе, в которых произошли землетрясения с магнитудой  $M \geq 5,0$ , согласно фактическим данным и прогнозу алгоритма Кора 4, приведённым в табл. 2. ★ – зона, в которой фактически произошло землетрясение. ● – зона, прогнозированная алгоритмом Кора 4.

**XULOSA**

1. G'arbiy Tyon-Shon yer qobig'ini seysmologik, tektonik, morfologik va boshqa geologik-geofizik xususiyatlari asosida ma'lumotlar to'plandi va mashinaviy o'rganishga tayyorlandi.

2. Kuchli zilzilalar joylarini aniqlash uchun Kora 4 mashinaviy o'rganish algoritmi yaratildi va olingan natijalar Random Forest, Decision Tree kabi boshqa algoritmlar natijalari bilan solishtirildi.

Algoritmning klassifikatsiya natijalarini baholash orqali Kora 4 algoritmi eng yuqori aniqlikka ega ekanligi aniqlandi. Bu algoritm  $M \geq 5,0$  magnitudali zilzilalarni 85% aniqlik bilan, shu vaqtgacha zilzilalar sodir bo'lgan joylardan tashqari boshqa joylarda ham bo'lishi mumkinligi aniqlandi.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Kelin Wang, Qi-Fu Chen, Shihong Sun, Andong Wang.* Predicting the 1975 Haicheng Earthquake. // Bulletin of the Seismological Society of America. July 2006. 96(3): 757-795. DOI:10.1785/0120050191
2. *Varotsos P., Alexopoulos K., Nomicos K., Lazaridou M.,* Official earthquake prediction procedure in Greece // Tectonophysics. - 1988. - 152. - 193-196. doi:10.1016/0040-1951(88)90045-5
3. *Кособоков В.Г., Щепалина П.Д.* Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // Физика Земли. - № 1. - С. 43-52. DOI: 10.31857/S0002333720010068
4. *Кособоков В.Г., Соловьев А.А.* Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности // Чебышевский сборник. - 2018. - Т. 19. - Вып. 4. - С. 53-88. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-4-55-90>
5. *Vladimir Keilis-Borok.* Earthquake prediction: state-of-the-art and emerging possibilities // Annu Rev Earth Planet. Sci. - 2002. - № 30. - P. 1-33. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.30.100301.083856>
6. *Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзобоев Б.А.* Проблема распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли. - 2000. - № 1. - С. 5-29. DOI: 10.31857/S0002333720010044
7. *Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений по комплексу признаков: основы, методика, реализация: Автореф. дисс... докт. физ.-мат. наук. - М., 2003.
8. *Ikrām Atabekov, Aziz Atabekov, Rustam Lutfullaev, Azizbek Biimbetov, Jasur Mamarakhimov.* Earthquake prediction using artificial intelligence in the Ferghana depression (Uzbekistan) // Earthquake. - 2024. - Vol. 2. - Issue 1. doi: 10.59429/ear.v2i1.1879
9. *Ikrām Atabekov, Jasur Mamarakhimov.* Possible locations of strong earthquakes in Western Tan Shan // Earthquake. - 2024. - Vol. 2. - Issue 2. doi: 10.59429/ear.v2i2.6731
10. *Атабеков И.У.* Опыт моделирования сеймотектонического течения земной коры Центральной Азии // Физика Земли. - 2021. - № 1. - С. 122-132. DOI: 10.31857/S0002333721010014
11. Космический снимок. <https://en-gb.topographic-map.com> (Accessed January, 2025).
12. 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.
13. *Zelenin E., Bachmanov D., Garipova S., Trifonov V., Kozhurin A.* The active faults of Eurasia database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth Syst. Sci. Data. - 2022. - № 14. - P. 4489-4503. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>

#### Определение мест сильных землетрясений в Приташкентском регионе на основе алгоритмов машинного обучения

**Ж.К. Мамарахимов**

**Аннотация.** Задача прогнозирования землетрясений до сих пор до конца не решена из-за сложности геофизических процессов и множества влияющих на них факторов. В настоящее время алгоритмы искусственного интеллекта широко применяются для обобщения больших объемов данных и выявления взаимосвязей между ними. Для алгоритмов искусственного интеллекта был создан набор данных на основе морфологических, тектонических, геофизических (на основе математической модели напряжённого состояния земной коры) и сейсмологических каталогов. С использованием алгоритмов Кора 4, Рандом Форест, Десисион Трее и ряда других методов машинного обучения определены потенциальные места землетрясений в Приташкентском регионе, а также оценена эффективность применённых алгоритмов.

**Ключевые слова:** прогнозирование землетрясений, Приташкентский регион, искусственный интеллект, машинное обучение, алгоритм Кора 3.

#### Identifying potential strong earthquake locations in the Tashkent region using machine learning algorithms

**J.K. Mamarakhimov**

**Annotation.** The problem of predicting earthquakes remains unsolved due to the complexity of geophysical processes and the multifaceted nature of the influencing factors. Today, artificial intelligence algorithms are widely used to generalize large volumes of data and identify interrelationships among them. For artificial intelligence algorithms, a dataset was created based on morphological, tectonic, geophysical (using a mathematical model of crustal stress state), and seismological catalog data. Using Kora 4, Random Forest, Decision Tree and several other machine learning algorithms, the potential locations of earthquakes in the Tashkent region were identified, and the performance of the algorithms was evaluated.

**Key words:** earthquake prediction, Tashkent region, artificial intelligence, machine learning, algorithm Kora 3.

UO'K 550.38.550.385

## GEOMAGNIT MAYDONNING KUCHLI BO'RONLARI VA ULARNING LOKAL SEYSMIKLIKKA TA'SIRI

S.A. Egamberdiev, S.S. Xusomiddinov, A.M. Azimov, N.R. Nuriddinov

*O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi G.A. Mavlonov nomidagi Seysmologiya instituti*

**Annotasiya.** Quyosh faolligi 25-siklining 2020-2024 yillarida Yangibozor observatoriyasida kuzatilgan kuchli (G4) va ekstremal (G5) geomagnit bo'ronlarining O'zbekiston hududi seysmik holatiga ta'sirini baholash uchun bo'ron boshlangan vaqtga nisbatan  $\pm 2$ ,  $\pm 10$  va  $\pm 30$  sutkalik vaqt oraliqlarida har bir hududda bo'rondan oldin va keyin ro'y bergan zilzilalar soni taqqoslandi. Natijada 2024 yil 10-11 mayda sodir bo'lgan ekstremal bo'ron va 2024 yil 12 avgustda qayd etilgan kuchli (G4) magnit bo'roni ayrim mintaqalarning seysmikligiga ta'sir etganligi aniqlandi.

**Kalit so'zlar:** quyosh faolligi, magnit maydon bo'ronlari, maydon tashkil etuvchilari, Dst indeks, seysmiklik, zilzila.

**Kirish.** Magnit bo'ronlari - bir necha soatdan bir necha sutkagacha davom etadigan geomagnit maydonning kuchli o'zgarishidir. Ular Quyoshdagi chaqnashlar natijasida ajralib chiqadigan zaryadlangan zarrachalar oqimining Yer magnitosferasiga ta'siri natijasida sodir bo'ladi va er magnit maydonining normal holatini o'zgartirib yuboradi. Ma'lumki, Quyosh faolligi avj olgan yillarda turli intensivlikdagi magnit bo'ronlari sodir bo'lgan kunlar sonining ortib borishiga olib keladi.

Quyosh faolligining navbatdagi 25-sikli 2019 yil dekabr oyidan boshlandi va 2030 yilgacha davom etishi mumkin [1]. Soha mutaxassislarining fikriga ko'ra, faollikning eng yuqori cho'qqisi 2024-2025 yillarga to'g'ri keladi.

Ko'pchilik tadqiqotlarning natijasiga ko'ra, Quyosh chaqnashlari va kuchli magnit bo'ronlari o'zgarishiga, seysmiklikka va boshqalarga ta'sir qiladi. Kuchli magnit bo'ronlarining zilzilalar bilan bog'liqligiga bag'ishlangan juda ko'p tadqiqotlar mavjud, quyida shulardan ayrimlarining natijalari bilan tanishib chiqamiz.

N.A.Zakrjevskaya va boshqalar tomonidan Alyaska, Shimoliy va Janubiy Kaliforniya kabi seysmik faol xududlarda to'satdan boshlangan magnit bo'ronlaridan (SSC) oldingi va keyingi davrlardagi seysmiklik variatsiyalari o'rganildi. Tahlil uchun kataloglardan yuqori energetik klassli zilzilalar tanlab olindi va ularni ikki guruhga bo'lishdi: biriga bo'ronlardan oldingi va ikkinchisiga bo'rondan keyingi intervallarda sodir bo'lgan zilzilalar kiritildi. O'rganilayotgan seysmik faol xududlarning ba'zilarida magnit bo'ronlaridan keyin zilzilalar soni ortganligi (ijobiy effekt), ba'zilarida esa kamayganligi (salbiy effekt) aniqlandi. Ba'zi joylarda bu effekt aniq ifodalangan bo'lsa, ba'zi joylarda zaif yoki umuman namoyon bo'lmaydi. Mualliflar seysmik faol hududlarda magnit bo'ronlaridan so'ng zilzilalar sonining o'zgarishi tendensiyasi mavjudligini va bu ta'sir hududlarning geologik-geofizik xususiyatlari bilan bog'liq bo'lishini aniqladilar [2].

G.A.Sobolev Yer sharida  $M \geq 6,5$  magnitudali sodir bo'lgan zilzilalar va planetar Kp indeksleri 7 dan yuqori bo'lgan eng kuchli magnit bo'ronlarining sodir bo'lish vaqtlari solishtirdi. Muallif 1994-2017 yillar oralig'ida 50 ta magnit bo'ronidan keyingi 2 kun oralig'ida 17 ta zilzila sodir bo'lganligi, bu hodisalar tasodifan ro'y bermaganligini va ularning sodir bo'lishi ehtimoli 95% dan yuqori deb baholaydi. Bunday zilzilalar sharqiy yarim sharda – Yaponiya, Indoneziya, Filippinlarda sodir bo'lgan bo'lib, g'arbiy yarim shar (Amerika)da sodir bo'lmagan. Buni u sharqiy yarim shar litosferasining past darajadagi seysmik barqarorligi bilan izohlaydi [3].

A.V.Gulelmi va boshqalar to'satdan boshlangan (SSC) magnit bo'ronlaridan oldin va keyingi  $\pm 60$  daqiqa vaqt oralig'ida global seysmiklikdagi farqni aniqlash uchun 1973 yildan 2010 yilgacha sodir bo'lgan jami 405 ta  $M > 5$  magnitudali zilzilalar ajratib olishdi. Ushbu davr mobaynida 1113 ta magnit bo'ronlari – SSC qayd qilingan. Ularning sodir bo'lish vaqtlari statistik tahlil qilish uchun reper sifatida foydalanildi. Ularning aniqlashicha, repera bo'lgan zilzilalar soni undan keyingiga qaraganda ancha ko'p yoki boshqacha qilib aytganda, to'satdan ro'y beradigan (SSC) magnit bo'ronlaridan keyin global seysmiklikning pasayishini aniqlashga muvaffaq bo'lishdi. Ushbu xulosa G.A.Sobolev va

N.A.Zakrjevskayalarning ishlari [2] natijalariga to'liq mos kelmaydi. Bu nomuvofiqlikni mualliflar kuzatish materialini tanlash va qayta ishlash usullaridagi farqlar natijasida kelib chiqqanligi bilan izohlaydilar [4].

N.T.Tarasov ham to'satdan ro'y bergan magnit bo'ronlarining (SSC) Yerning global seysmikligiga ta'sirini o'rganish maqsadida 1973-1981 yillar oralig'ida ro'y bergan va magnitudasi  $M > 4,4$  bo'lgan 130 ming zilzilalarni o'rgandi. Natijada SSC dan so'ng zilzilalar sonining statistik jihatdan sezilarli darajada 2% ga kamayishi va 5-6 kundan keyin ularning soni yana ortishi kuzatildi. Qizig'i shundaki, seysmiklikning kuzatilgan pasayishi SSCdan kamida 2-3 kun oldin boshlanganligi uchun magnit bo'ronlari bunga sabab bo'lishi mumkin emas deb hisobladi. Uning fikricha, elektromagnit impulslarning kuchli chaqnashi halokatli zilzilalar ehtimolini deyarli ikki baravar kamaytiradi, magnit bo'ronlari esa, aksincha, bunday ehtimolni deyarli uchdan bir qismga oshiradi [5].

A.S.Zakupin va boshqalar G'arbiy va Markaziy Saxalinning ba'zi er yoriqlarida o'tkazgan tadqiqotlar natijasida ba'zi seysmik hodisalar ( $M > 2,7$ ) va yuqori indeksli (G1 va undan yuqori) magnit bo'ronlari vaqtlarining mos kelishini, ammo bu faqat nisbatan kichik seysmik faol hudud uchun amal qilishini aniqladilar [6].

**Tadqiqot uslubi.** Geomagnit maydon kuchlanganligi to'liq vektorini (T) uzluksiz kuzatish rasadxonada o'rnatilgan GSM-19 magnetometrda, H gorizont tashkil etuvchisini variatsiyalari esa GI-MTS-1 kompleksiga kiruvchi magnetometrlarda o'tkazildi. Tahlil qilishda barcha magnetometrlarning bir daqiqalik ma'lumotlaridan foydalanildi. Geomagnit maydon tashkil etuvchilarining o'zgarishlarini tadqiq qilishda Q.N.Abdullabekov va boshqalar tomonidan ishlab chiqilgan [7] va keyinchalik takomillashtirilgan [8] uslubdan foydalanildi. Geomagnit faollik ko'rsatkichi (Dst) indeksning soatlik qiymatlari Kioto xalqaro ma'lumotlar markazi (Yaponiya) saytidan olindi [9]. Dst indeksi magnit bo'ronlari davrida maydon buzilishining rivojlanishini tavsiflaydi [10].

**Tadqiqot natijalari.** Kuchli magnit bo'ronlarining O'zbekiston xududi seysmikligiga ta'sirini aniqlashdan avval 2020-2024 yillarda Quyosh faolligining Yangibozor observatoriyasida kuzatilgan geomagnit buzilishlar va turli darajali magnit bo'ronlarining ayrim xususiyatlari o'rganildi. 1-jadvalda geomagnit buzilishlar va bo'ronlar qayd etilgan kunlar soni va ularning intensivligi keltirilgan. Magnit bo'ronlarining intensivligi to'g'risidagi ma'lumotlar IZMIRAN geofizik ma'lumotlar bazasidan va internet saytlaridan olindi [11].

1-jadval

#### Geomagnit buzilishlar va magnit bo'ronlari kuzatilgan kunlar soni

Table 1

#### Number of days with observed geomagnetic disturbances and magnetic storms

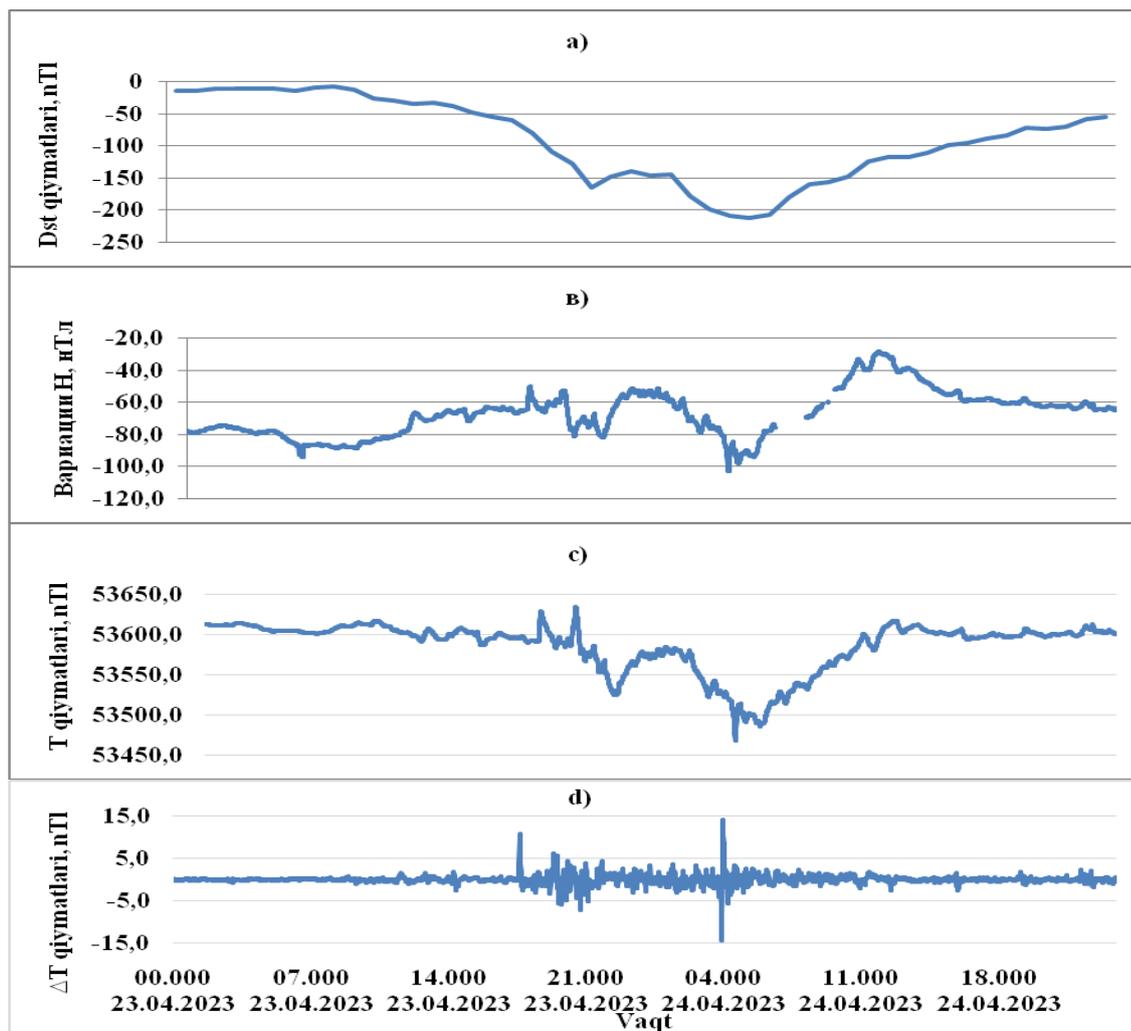
| Yillar | Geomagnit buzilishli kunlar soni | Turli intensivlikdagi magnit bo'ronli kunlar soni |    |    |    |    |
|--------|----------------------------------|---|----|----|----|----|
|        |                                  | G1  | G2 | G3 | G4 | G5 |
| 2020   | 41                               | 8   | 1  | -  | -  | -  |
| 2021   | 64                               | 27  | 3  | 2  | -  | -  |
| 2022   | 79                               | 56  | 6  | 1  | -  | -  |
| 2023   | 73                               | 26  | 10 | 5  | 2  | -  |
| 2024   | 48                               | 21  | 13 | 7  | 6  | 2  |

Jadval ma'lumotlari magnit bo'ronlari bo'lgan kunlar soni yildan-yilga ortib borishini ko'rsatmoqda. Masalan, 2020 yil boshida faqat bitta o'rtacha bo'ron (G2) sodir bo'lgan bo'lsa, 2024 yilda ularning soni 13 taga etgan. Kuchli magnit bo'ronlari (G4) 2023 yil 23 aprel, 23 mart, 12 avgust, 10 va 11 oktabr va ekstremal bo'ron (G5) 2024 yil 10, 11 may kunlari kuzatildi. Ta'kidlash joizki, 2024 yilning may oyida magnit bo'ronlarning barcha toifalari (G1-G5) qayd etilgan (1-jadval).

Quyida ba'zi kuchli (G4) va ekstremal (G) magnit bo'ronlari paytida geomagnit maydon kuchlanganligi va uning gorizont tashkil etuvchisining o'zgarishlarini ko'rib chiqamiz. 1-5 rasmlarda Dst qiymatlarining, H gorizont tashkil etuvchining o'zgarishi, to'liq vektorning sutkalik yurishi va  $\Delta T$  farqlarning o'zgarishi grafiklari tasvirlangan.

2023 yil 23 va 24 aprel kunlari Erni kuchli magnit bo'roni qopladi va uning intensivligi G4 darajagacha ko'tarildi. Bo'ron 23 aprel kuni soat 17:37 da to'satdan boshlanib 24 aprel kuni soat 13:00 gacha davom etdi. Bo'ronning umumiy davomiyligi 20 soatni tashkil etadi. Soat 18:00 - 22:00 oralig'ida o'z cho'qqisiga erishdi va bu 24 aprel kuni soat 13:00 gacha saqlanib qolindi. Bo'ron davrida

indeksning Dst qiymati 23 aprel kuni -8 dan -165 gacha pasayadi, 24 aprel kuni esa -56 va -213 oralig'ida o'zgaradi (1-a rasm).



1-rasm. Yangibozor observatoriyasida 2023 yil 23 va 24 aprelda Dst indeks qiymatlarining o'zgarishi (a), gorizontol tashkil etuvchi (H)ning (b), to'liq vektor (T)ning (c) va  $\Delta T$  farqning (d) variatsiyalari.

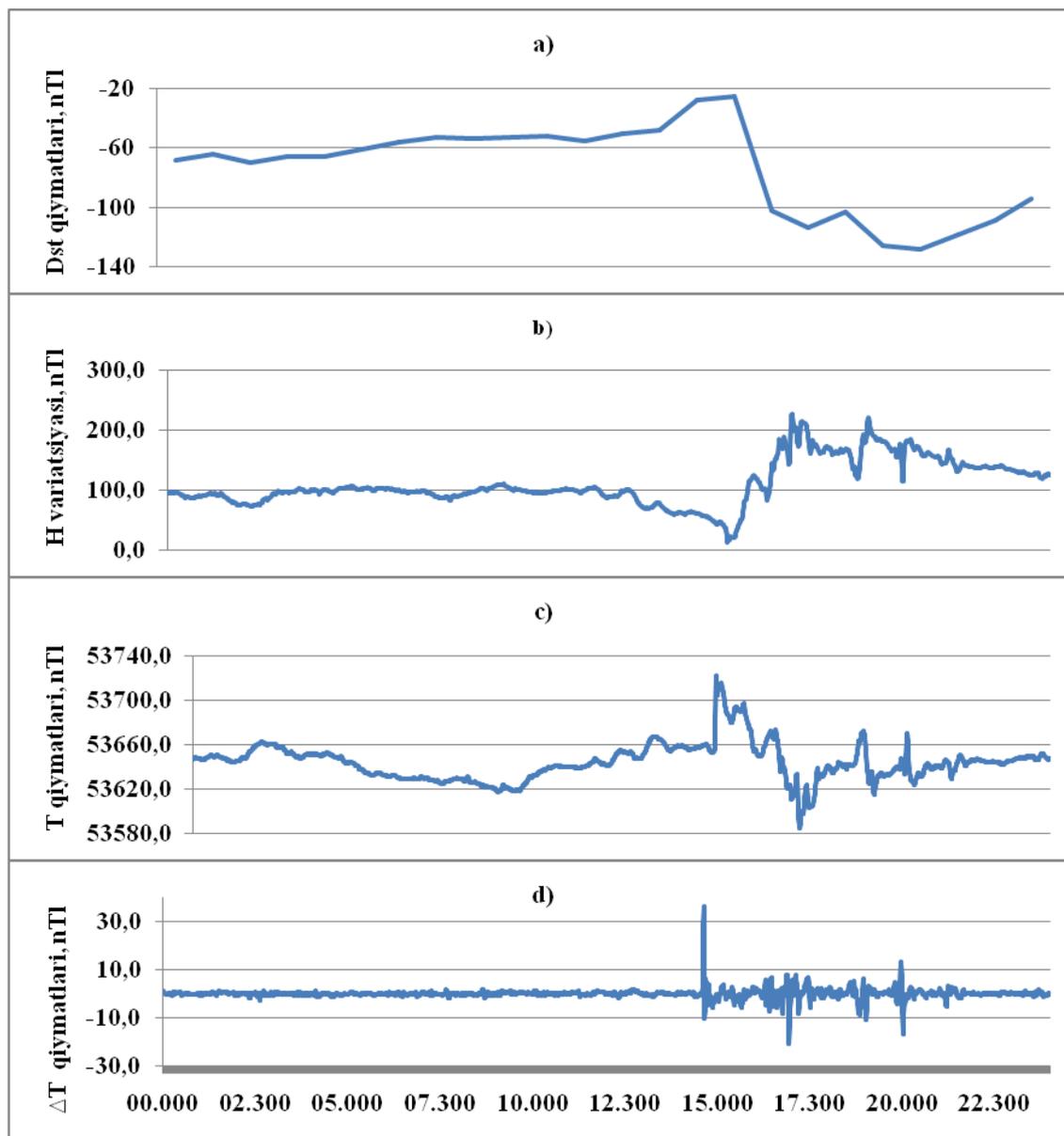
Fig. 1. Changes in the values of the Dst index (a), the horizontal component H (b), the total vector T (c) and  $\Delta T$  variation of the difference (d) April 23 and 24, 2023 on the Yangibazar observatory.

Magnit bo'roni boshlanishida H gorizontol tashkil etuvchi variatsiyasining kamayishi va keyinchalik ortishi va bu jarayonni bir necha marta takrorlanishi kuzatiladi. H ning magnit bo'roni paytidagi variatsiyasi amplitudasi 288 nTl ni tashkil etdi (1-b rasm). Magnit maydon kuchlanganligining to'liq vektorining variatsiyasi amplitudasi 23-aprelda 111,0 nTl va 24-aprelda 148,7 nTl ni tashkil etdi (1-c rasm).  $\Delta T$  farqlari grafigidan magnit bo'roning boshlanish va tugash vaqtlarini aniqlash mumkin.  $\Delta T$  farqlarining o'zgarishlari amplitudasi 28,3 nTl ni tashkil etdi (1-d rasm).

Ta'kidlash joizki, 2023 yilning 2, 18, 19, 27-29 aprel kunlari, bo'ron darajasigacha ko'tarilmagan, Kr indeksi bo'yicha 4 ballgacha geomagnit buzilishlar kuzatilgan.

2024 yilda 24 mart kuni Grinvich vaqti bilan soat 14:30 da intensivligi G4 darajada bo'lgan to'satdan boshlanuvchi toifasidagi magnit bo'roni boshlandi va deyarli soat 22:00 gacha davom etdi. Bo'roning davomiyligi 7,5 soat bo'lib oxiriga kelib intensivlik G1 darajasiga pasaydi. Bo'ron boshlanishidan oldin Dst indeksi -25 nTl qiymatda bo'lsa, bo'ron kuchaygan paytda (20:00) -128 nTl qiymatga erishadi (2-a rasm).

Gorizontal tashkil etuvchi H ning variatsiyasi bo'ron boshlanishidan oldin 70 - 110 nTl atrofida o'zgarib turadi va bu holat bo'ron boshlanishida ham davom etadi. Bo'ron kuchaygan paytda H variatsiyasi keskin ortadi – soat 16:57 da uning qiymati 225 nTl ga teng bo'ladi. O'zgarishlar bo'ron kuchsizlanguncha davom etadi (2-b rasm). To'liq vektor T ning qiymatlari bo'ron paytida 53584,8 dan 53722,1 nTl gacha o'zgaradi va amplitudasi 137,5 nTl ga teng (2- c rasm),  $\Delta T$  ning o'zgarishlari -20,8 dan 36,2 nTl oralig'ida bo'lib, uning amplitudasi 57,0 nTl ni tashkil etadi (2-d rasm).

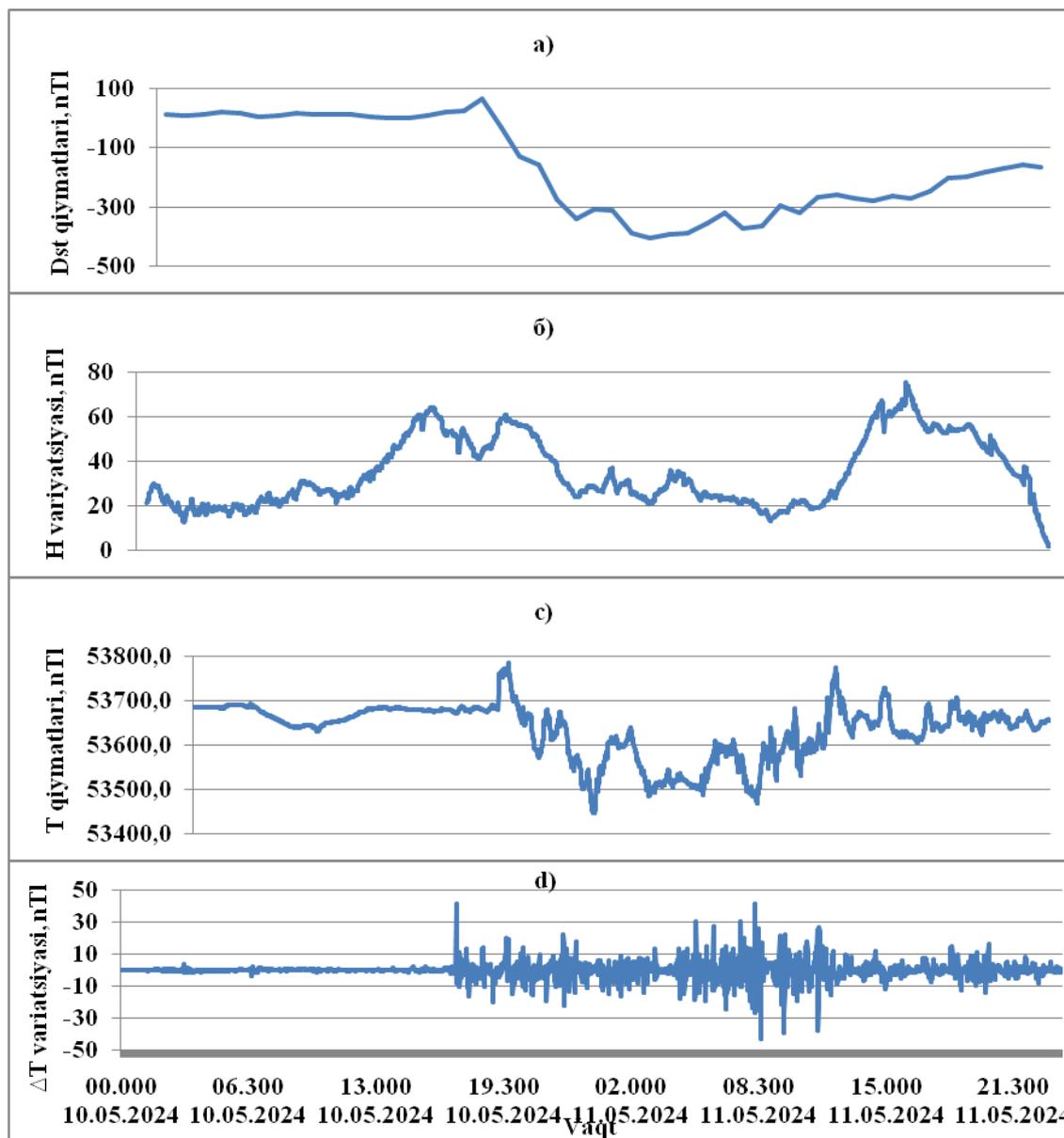


2-rasm. Yangibozor observatoriyasida 2024 yil 24 martda Dst indeks qiymatlarining o'zgarishi (a), gorizontal tashkil etuvchi H ning (b), to'liq vektor T ning (c) va  $\Delta T$  farqning (d) variatsiyalari.

Fig. 2. Changes in the values of the Dst index (a), the horizontal component H (b), the total vector T (c) and  $\Delta T$  variation of the difference (d) March 24, 2024 on the Yangibazar observatory.

G5 darajasiga ega ekstremal va uzoq davom etgan magnit bo'roni 2024 yil 10-11 mayda sodir bo'ldi. Bo'ron 10 may kuni soat 17:07 da to'satdan boshlandi va 13 may kuni ertalab soat 6:00 gacha davom etdi. 12 va 13 may kunlari bo'ron intensivligi G2 darajasiga tushdi. Bo'ron boshida Dst indeksi 62 nTl qiymatga ega bo'lgan bo'lsa, bo'ron boshlangandan keyin – 351 nTl manfiy qiymatga ega bo'ldi. 11 may kuni uning qiymatlari manfiy bo'lib, -169 va -412 nTl oralig'ida o'zgardi (3-a rasm). Gorizontal tashkil etuvchining variatsiyasi amplitudasining bo'ron boshlanishidan oldin ortishi va kamayishi

holatlari kuzatildi. Bo‘ron boshlangandan keyin keskin ortdi va kamaya boshladi, bu oraliqda H ning variatsiyasi amplitudasi 61 nTl dan 23,8 nTl gacha kamaydi.

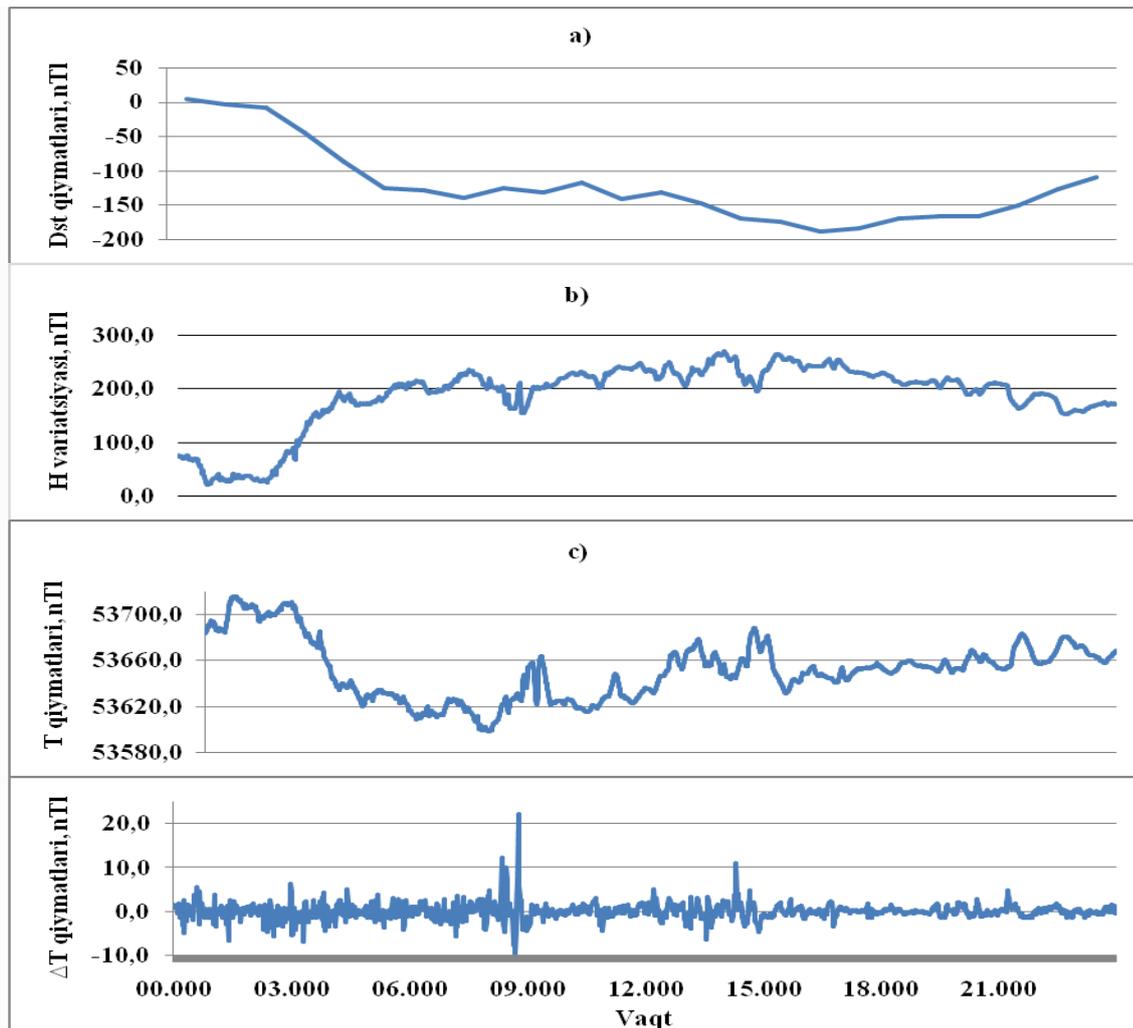


3-rasm. Yangibozor observatoriyasida 2024 yil 10 va 11 may kunlari Dst indeks qiymatlarining o‘zgarishi (a), gorizontal tashkil etuvchi H ning (b), to‘liq vektor T ning (c) va  $\Delta T$  farqing (d) variatsiyalari.

Fig. 3. Changes in the values of the Dst index (a), the horizontal component H (b), the total vector T (c) and  $\Delta T$  variation of the difference (d) May 10 and 11 2024 on the Yangibazar observatory.

11 may kuni soat 11:27 qadar H ning variatsiyasi amplitudasi 18.5-36.7 nTl oralig‘ida o‘zgarib turdi, keyin keskin ortdi. Bu vaqtda variatsiya amplitudasi maksimal qiymatga – 75,4 nTl ga erishadi. Undan keyin esa ba‘zan keskin, ba‘zan asta-sekinlik bilan kamayib bordi (3-b rasm). Yuqoridagi holat to‘liq vektor (T)ning o‘zgarishlarida ham kuzatildi. Bo‘ron boshlangan vaqtda (T) ning qiymati keskin 105 nTl ga ortdi. Ikki bo‘ronli kun davomida uning qiymatlari 53446,1 dan 53784,9 nTl gacha o‘zgaradi va variatsiyasi amplitudasi 338,8 nTlni tashkil etdi (3-c rasm). Bo‘ron paytida  $\Delta T$ ning grafigi «arrasimon» ko‘rinishga ega bo‘lib,  $\Delta T$  ning qiymatlari -42,8 dan 41,7 nTl gacha o‘zgardi. Variatsiya amplitudasi 84,5 nTl ga teng (3-d rasm).

Geomagnit maydonning to‘satdan boshlangan navbatdagi kuchli bo‘roni 2024 yil 12 avgustda sodir bo‘ldi. Bo‘ron boshlanishidan oldin geomagnit maydon buzilgan holatda edi, bo‘ron soat 00:30 atrofida boshlandi va soat 16:00 gacha davom etdi va bundan keyin maydon tinch holatga qaytmadi. Bo‘ron paytida Dst indeksning minimal qiymati -14 dan -203 nTl gacha o‘zgardi (4-a rasm). Gorizontol tashkil etuvchisi (H) ning variatsiyasi qiymatlari bo‘ron boshlanishi bilan orta bordi va bu jarayon soat 15:20 largacha davom etdi, keyin yana pasaydi. Bu oraliqlarda variatsiya qiymatlarininig bir necha bor ortishi va kamayishi holatlari kuzatildi. Bo‘ron paytida (H)ning variatsiyasi  $20,0 \div 271,1$  nTl oralig‘ida o‘zgardi (4-b rasm). To‘liq vektorning (T) qiymatlari esa bo‘ron boshlanganda kamayib bordi va u kuchsizlanishi bilan asta-sekin tinchlandi, lekin avvalgi holatiga qaytmadi. Uning qiymatlari bo‘ron vaqtida  $53597,9 \div 53716,2$  nTl oralig‘ida o‘zgardi va amplitudasi 118,3 nTl ni tashkil etdi (4-c rasm).  $\Delta T$  farqning o‘zgarishlar amplitudasi 31,8 nTl ni tashkil etdi (4-d rasm).

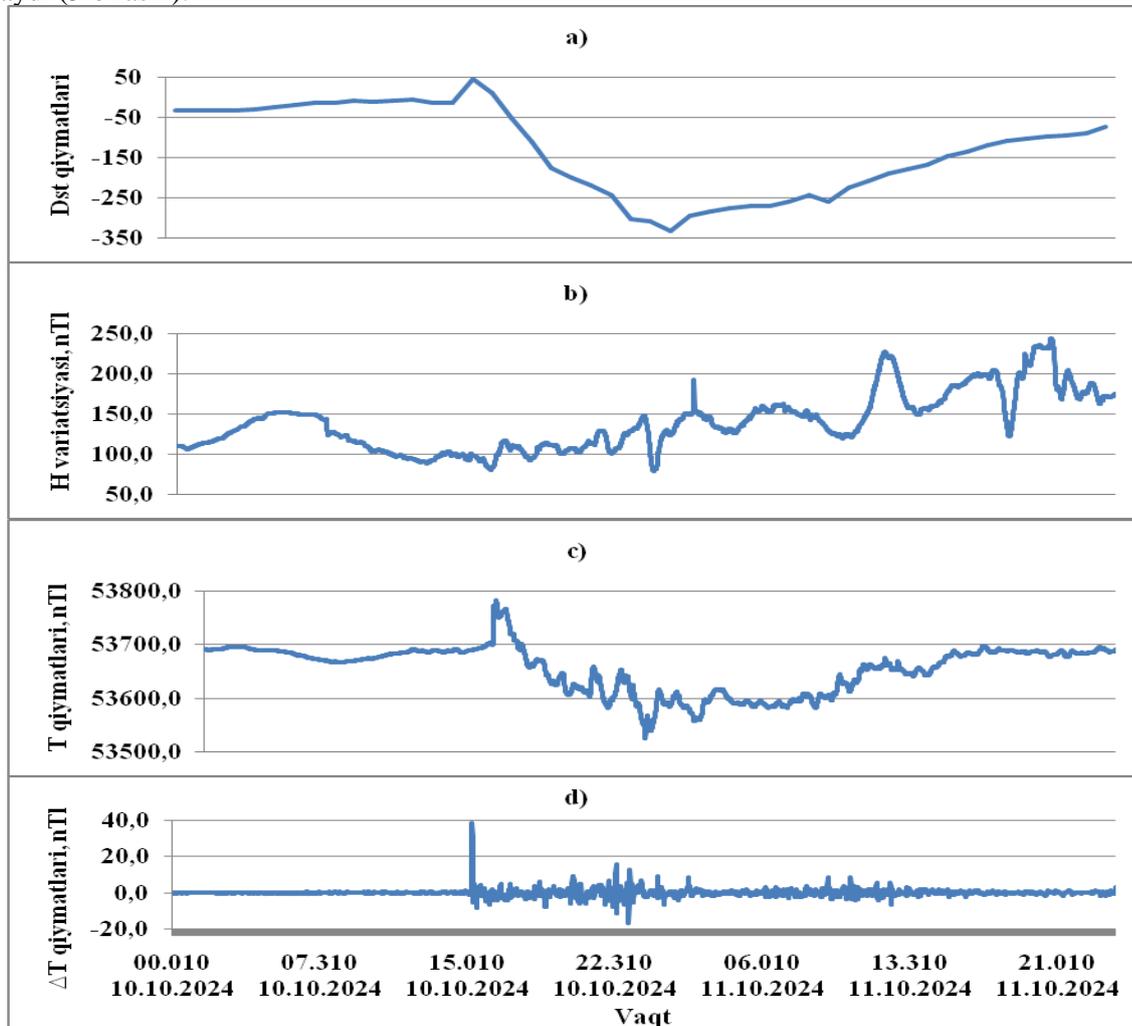


4-rasm. Yangibozor observatoriyasida 2024 yil 12 avgustda Dst indeks qiymatlarining o‘zgarishi (a), gorizontol tashkil etuvchi Hning (b), to‘liq vektor Tning (c) va  $\Delta T$  farqning (d) variatsiyalari.

Fig. 4. Changes in the values of the Dst index (a), the horizontal component H (b), the total vector T (c) and  $\Delta T$  variation of the difference (d) August 12, 2024 on the Yangibazar observatory.

2024 yil 10-oktabrda Grinвич vaqti bilan soat 15:16 da kuchli (G4) magnit bo‘roni boshlanib, 11-oktabr kuni kechqurun soat 18:00 gacha davom etdi. Bo‘ronning davomiyligi – 27 soat. Ushbu bo‘ronning geomagnit maydon parametrlariga ta‘siri natijalari 5-rasmda keltirilgan. Bo‘rondan avval Dst indeksi qiymatlari  $-6 \div 47$  nTl oralig‘ida o‘zgargan bo‘lsa, bo‘ron kuchaygan paytda -333 nTl gacha keskin kamaydi (5-a rasm).

Gorizontal tashkil etuvchi (H) ning variatsiyasi 10 oktabr soat 5:15 gacha asta-sekin ortdi va keyin xuddi shunday holatda kamayib bordi, bu oraliqda variatsiya unchalik katta bo'lmadi. Bo'ron boshlangandan keyin ham unda keskin o'zgarishlar kuzatilmadi. Ma'lumot uchun grafikdan ba'zi holatlarni ajratib ko'rsatish mumkin; 10 oktabr soat 23:53 dan 11 oktabr soat 00:22 gacha H ning variatsiyasi qiymati 68,8 nTl ga kamaydi, soat 10:29 dan 12:10 gacha 106,5 nTlga ortdi va 13:49 ga kelib 78,1 nTl ga kamaydi. Soat 17:47÷18:33 va 20:42÷21:13 oraliqlarida esa mos ravishda 79,8 va 76,3 nTlga kamaydi (5-b rasm).



5-rasm. Yangibozor observatoriyasida 2024 yil 10-11 oktyabrda Dst indeks qiymatlarining o'zgarishi (a), gorizontal tashkil etuvchi Hning (b), to'liq vektor Tning (c) va  $\Delta T$  farqning (d) variatsiyalari.

Fig. 5. Changes in the values of the Dst index (a), the horizontal component H (b), the total vector T (c) and  $\Delta T$  variation of the difference (d) October 10 and 11, 2024 on the Yangibazar observatory.

Bo'ron boshlanish bilan to'liq vektor T ning qiymatlari keskin ortdi va keyin ayrim kamayish holatlari ham kuzatildi. 11 oktabr soat 14:07 dan Tnig ortishi va bo'rondan oldingi holatga deyarli qaytishi kuzatildi. Ikki bo'ronli kun davomida T ning qiymatlari 53524,4 dan 53782,5 nTl ga o'zgardi va uning variatsiyasi 258,1 nTl ni tashkil etdi (5-c rasm).  $\Delta T$  ning o'zgarishi grafigidan uning variatsiyasi 55,2 nTl ni tashkil etganini ko'rish mumkin (5-d rasm).

2020-2024 yillar mobaynida sodir bo'lgan magnit bo'ronlarining O'zbekiston viloyatlari hududlarining seysmik holatiga ta'sirini baholash uchun shu davrda har bir viloyat hududida ro'y bergan zilzilalar tahlil qilindi. Zilzilalar to'g'risidagi ma'lumotlar O'zR FVV Seysmoprognostik monitoring Respublika markazi saytidan olindi [10]. Olingan natijalar 2-jadvalda berilgan.

2023-2024 yillarda sodir bo'lgan kuchli (G4) va ekstremal (G5) magnit bo'ronlaridan  $\pm 2$ ,  $\pm 10$  va  $\pm 30$  sutka vaqt oralig'ida viloyatlarda sodir bo'lgan zilzilalar sonining o'zgarishi

2 table

**ChanGES in the number of earthquakes in various regions within  $\pm 2$ ,  $\pm 10$ , and  $\pm 30$  days of strong (G4) and extreme (G5) magnetic storms during 2023-2024**

| Magnit bo'ronlari sanasi             | Viloyatlar  | 2 sutka |       | 10 sutka |       | 30 sutka |       |
|--------------------------------------|-------------|---------|-------|----------|-------|----------|-------|
|                                      |             | oldin   | keyin | oldin    | keyin | oldin    | keyin |
| 2023 yil 23-24 aprel                 | Toshkent    | 1       | 3     | 10       | 3     | 19       | 9     |
|                                      | Buxoro      | 1       | 3     | 5        | 3     | 16       | 15    |
|                                      | Navoiy      | 5       | 5     | 25       | 32    | 125      | 98    |
|                                      | Qashqadaryo | 0       | 2     | 1        | 7     | 9        | 12    |
| 2024 yil 24 mart                     | Toshkent    | 1       | 2     | 4        | 6     | 18       | 16    |
|                                      | Buxoro      | 1       | 3     | 4        | 5     | 21       | 14    |
|                                      | Navoiy      | 5       | 4     | 17       | 22    | 55       | 60    |
|                                      | Qashqadaryo | 0       | 1     | 9        | 5     | 19       | 19    |
| 2024 yil 10-11 may – ekstremal (G5)  | Buxoro      | 0       | 0     | 5        | 2     | 12       | 13    |
|                                      | Navoiy      | 9       | 1     | 28       | 17    | 65       | 52    |
|                                      | Qashqadaryo | 0       | 2     | 9        | 4     | 22       | 14    |
|                                      | Surxondaryo | 2       | 0     | 3        | 0     | 9        | 7     |
| 2024 yil 12 avgust – kuchli (G4)     | Toshkent    | 1       | 0     | 3        | 11    | 8        | 19    |
|                                      | Buxoro      | 0       | 2     | 2        | 2     | 12       | 9     |
|                                      | Navoiy      | 4       | 6     | 20       | 22    | 55       | 76    |
|                                      | Qashqadaryo | 0       | 3     | 6        | 6     | 19       | 17    |
|                                      | Surxondaryo | 1       | 3     | 4        | 7     | 10       | 18    |
| 2024 yil 10-11 oktyabr – kuchli (G4) | Toshkent    | 0       | 2     | 4        | 6     | 18       | 18    |
|                                      | Navoiy      | 9       | 10    | 44       | 40    | 109      | 107   |
|                                      | Samarqand   | 5       | 2     | 10       | 6     | 14       | 16    |
|                                      | Qashqadaryo | 3       | 2     | 13       | 10    | 29       | 25    |

2-jadval ma'lumotlariga asosan 2023 yil 23-24 aprelda kuzatilgan kuchli (G4) magnit bo'ronidan  $\pm 2$  sutka vaqt oralig'ida deyarli hamma viloyatlarda sodir bo'lgan zilzilalar sonida deyarli farq yo'q.  $\pm 10$  sutka vaqt oralig'ida faqat Toshkent viloyatida bo'rondan oldin sodir bo'lgan zilzilalar soni ko'proq, qolgan viloyatlarda esa aksincha, kamroq.  $\pm 30$  sutka vaqt oralig'ida Toshkent, Buxoro va Navoiy viloyatlarida bo'rondan oldin ko'proq, qolgan viloyatlarda esa kamroq zilzilalar sodir bo'lgan, lekin ular orasidagi farq unchalik katta emas.

2024 yil 24 martdagi kuchli (G4) magnit bo'ronidan  $\pm 2$ ,  $\pm 10$  va  $\pm 30$  sutka vaqt oraliqlaridagi zilzilalar soni orasidagi farq barcha viloyatlarda sezilarsiz darajada kichik. 2024 yil 10-11 maydagi ekstremal (G5) magnit bo'ronidan  $\pm 2$  sutka vaqt oralig'ida Navoiy viloyatida bo'rondan oldin ko'proq,  $\pm 10$  va  $\pm 30$  sutka oralig'ida hamma viloyatlarda bo'rondan oldin ko'p zilzila qayd etilgan. Buxoro viloyatida esa hamma vaqtlar oralig'idagi farqlar sezilarsiz darajada (2-jadval). 2024 yil 12 avgustdagi kuchli (G4) magnit bo'ronidan  $\pm 2$ ,  $\pm 10$  sutka vaqt oralig'ida hamma viloyatlarda sodir bo'lgan zilzilalar sonida sezilarsiz farqlar mavjud.  $\pm 30$  sutka vaqt oralig'ida Buxoro va Qashqadaryo viloyatlarida sodir bo'lgan zilzilalar sonida kichik farq kuzatiladi. Qolgan viloyatlarda bo'rondan keyingi zilzilalar soni ancha ko'p (2-jadval). 2024 yil 10-11 oktyabrdagi kuchli (G4) magnit bo'roni vaqtida barcha vaqt oraliqlaridagi zilzilalar soni farqlari katta emas. Masalan, eng ko'p zilzilalar sodir bo'lgan Navoiy viloyatida  $\pm 2$  sutka vaqt oralig'ida 9 va 10 ta,  $\pm 10$  vaqt oralig'ida 44 va 40 ta va  $\pm 30$  sutka vaqt oralig'ida esa 109 va 107 ta zilzilalar sodir bo'lgan.

## XULOSA

Kuchli magnit bo'ronlari vaqtida maydon to'liq vektorining (T) variatsiyasi 111,0-338,8 nTl oralig'ida, gorizontal tashkil etuvchisining (N) variatsiyasi 75,4-288,0 nTl oralig'ida o'zgaradi. Kuchli magnit bo'ronlarining hammasi ham lokal seysmiklikka sezilarli ta'sir etmagan, 2023 yil 23-24 aprelda, 2024 yilning 24 martida va 10-11 oktyabrida qayd etilgan kuchli (G4) magnit bo'ronlari shular jumlasiga kiradi. 2025 yil 1 yanvarda G4 intensivlikdagi magnit bo'ronidan 10 kun keyin Farg'ona viloyatida sodir bo'layotgan zilzilalar soni orta borgan. 10 yanvardan 14 aprelgacha Qo'qon shahri va uning atrofidagi

4 tuman hududida 86 ta kuchsiz zilzilalar sodir bo'lgan, bu Farg'ona viloyatida shu oraliqda sodir bo'lgan (103 ta) zilzilalarning 88,58% ini tashkil etadi. Bu erdagi holatga ham bo'ronning aloqasi yo'q deb hisoblash mumkin. 2024 yil 10-13 mayda kuzatilgan ekstremal magnit bo'ronidan keyin kamroq zilzilalar sodir bo'lgan, bu seysmiklikni biroz susaytirgan bo'lishi mumkin. 2024 yil 12 avgustdagi magnit bo'ronidan keyin esa Buxoro va Qashqadaryodan tashqari boshqa viloyatlarda zilzilalar soni sezilarli darajada ortgan, ya'ni bu bo'ron seysmiklikni oz bo'lsa-da kuchaytirgan. Magnit bo'ronlarining seysmiklikka ta'siri hududning geologo-geofizik xususiyatlariga bog'liqligi sababli turlichadir.

#### ADABIYOTLAR

1. *Odenwald Sten.* Waiting for the next Sunspot Cycle: 2019-2030. Huff Post.
2. *Закржевская Н.А., Соболев Г.А.* Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // Вулканология и сейсмология. - 2004. - № 3. - С. 63-75.
3. *Соболев Г.А.* Влияние больших магнитных бурь на возникновение больших землетрясений // Физика Земли. - 2021. - № 1. - С. 24-40. DOI: 10.31857/S0002333721010087
4. *Гулелми А.В., Лавров И.П., Собисевич А.Л.* Внезапные начала магнитных бурь и землетрясения // Солнечно-земная физика. - 2015. - Т. 1. - № 1. - С. 98-103.
5. *Тарасов Н.Т.* О влиянии солнечной активности на сейсмичность Земли // Мат-лы ИВ Всеросс. конф. с междунар. участием «Триггерные эффекты в геосистемах». - М.: ГЕОС, 2017. - С. 356-365.
6. *Закупин А.С., Казаков А.И., Стовбун Н.С., Гуляков С.А., Андреева М.Ю., Жердева О.А.* О возможной связи между магнитными бурями и землетрясениями в определенных тектонических условиях (на примере о. Сахалин) // Геосистемы переходных зон. - 2024. - № 8(3). - С. 1-14.
7. *Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х.* Вариации геомагнитного поля сейсмоактивных районов. - Т.: Фан, 1975. - 127 с.
8. *Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х., Туйчиев А.И.* Инструкция по прогнозированию землетрясений магнитометрическим методом. - Т.: Минитипография АН РУз, 2019. - 16 с.
9. [wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp)
10. *Мочалов В.А., Мочалова А.В.* Анализ возможности использования российских геомагнитных станций для вычисления аналога Dst-индекса // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. - 2021. - Т. 34. - № 1. - С. 80-87. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-80-87
11. [forecast.izmiran.ru](http://forecast.izmiran.ru)
12. <http://smrm.uz/> Seismoprognoztik monitoring Respublika markazi.

#### **Сильные бури геомагнитного поля и их влияние на локальную сейсмичность С.А. Эгамбердиев, С.С. Хусомиддинов, А.М. Азимов, Н.Р. Нуриддинов**

**Аннотация.** Для оценки влияния сильных (G4) и экстремальных (G5) геомагнитных бурь, наблюдавшихся в обсерватории Янгибазар в 25-м цикле солнечной активности в 2020-2024 гг., на сейсмическое состояние территории Узбекистана проведено сравнение количества землетрясений, произошедших в каждом регионе до и после бури, на временных интервалах  $\pm 2$ ,  $\pm 10$  и  $\pm 30$  суток относительно времени начала бури. В результате установлено, что экстремальный шторм, произошедший 10-11 мая 2024 г., и сильная (G4) магнитная буря, зафиксированная 12 августа 2024 г., оказали влияние на сейсмичность некоторых регионов.

**Ключевые слова:** солнечная активность, магнитные бури, составляющие магнитного поля, индекс Dst, сейсмичность, землетрясение.

#### **Strong geomagnetic field storms and their impact on local seismicity S.A. Egamberdiev, S.S. Xusomiddinov, A.M. Azimov, N.R. Nuriddinov**

**Abstract.** To assess the impact of strong (G4) and extreme (G5) geomagnetic storms observed at the Yangibazar observatory in the 25th solar activity cycle of 2020-2024 on the seismic state of the territory of Uzbekistan, a comparison was made of the number of earthquakes that occurred in each region before and after the storm, at time intervals of  $\pm 2$ ,  $\pm 10$  and  $\pm 30$  days relative to the storm onset time. As a result, it was found that the extreme storm that occurred on May 10-11, 2024, and the strong (G4) magnetic storm recorded on August 12, 2024, influenced the seismicity of some regions.

**Key words:** solar activity, magnetic storms, field components, Dst index, seismicity, earthquake.

## SEYSMOTEKTONIKA VA GEODINAMIKA

УДК 550.35:550.380

### ОБЗОР МЕТОДИКИ ЦИКЛИЧЕСКОГО РАСЧЛЕНЕНИЯ РАЗРЕЗОВ СКВАЖИН ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧАРДЖОУСКОЙ СТУПЕНИ БУХАРО-ХИВИНСКОГО РЕГИОНА, ПО ДАННЫМ ПРОМЫСЛОВОЙ ГЕОФИЗИКИ

Н. Абдуллаев, Д. Атабаев, Ш. Раджабов

*Национальный Университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека*

**Аннотация.** Рассматривается методика циклического расчленения разрезов скважин в юго-западной части Чарджоуской ступени Бухаро-Хивинского региона на основе данных промысловой геофизики. Применение метода скользящего окна с перекрытием позволяет выявлять региональные цикло-комплексы (РЦК) и анализировать цикличность осадконакопления. Изучены основные типы циклитов, их литологические характеристики и критерии выделения. Полученные результаты способствуют уточнению стратиграфической модели и позволяют более точно прогнозировать коллекторские свойства пород.

**Ключевые слова:** цикличность, разрез, скважина, осадконакопление, геофизика, каротаж, песчаник, глинистость, циклиты, РЦК (региональные цикло-комплексы), пористость, стратиграфия.

С 70-80-х годов XX в. ведутся активные исследования, направленные на разработку методов комплексной интерпретации геолого-геофизических данных с целью детального анализа строения разрезов нефтегазоперспективных территорий. Существенный вклад в этот процесс внесли научные труды Н.Я. Кунина, Е.В. Кучерука, Г.Н. Гогоненкова, В.А. Бабадаглы, И.А. Мушина, Ю.Н. Карогодина, Л.Ю. Бродова, Е.А. Козлова, А.В. Ежова, Ф.И. Хатьянова, Б.Б. Таль-Вирского и др. исследователей. В настоящее время их научные разработки и методологические подходы активно применяются и совершенствуются в рамках деятельности кафедры «Геофизические методы исследований» Национального университета Узбекистана.

Одним из важнейших направлений геологических исследований продолжает оставаться детальный анализ разрезов скважин. Основной задачей в этом процессе является разделение границ осадочных слоев, сформированных в пределах единого седиментационного цикла [1, 2].

Седиментационная цикличность обусловлена закономерной сменой условий осадконакопления, которые периодически повторяются в различных вариациях в процессе формирования водоема или территории. В ходе седиментации формируются осадочные породы, представляющие геологические тела с определенными характеристиками.

Основная единица седиментации – породный слой (пласт) – преимущественно однородное трехмерное тело, ограниченное сверху и снизу субпараллельными границами. Его два линейных размера, расположенные в перпендикулярных направлениях, значительно превышают третий. Ключевые характеристики слоя – это его мощность (толщина) и протяженность.

В своих работах Ю.Н. Карогодина отмечает, что породные слои объединяются в следующие определенные слоевые ассоциации: литмит – сочетание слоев по любым свойствам и признакам; циклит – слоевая ассоциация, главным свойством которой является связь элементов во времени и пространстве – вещественное отражение седиментационного цикла как целостной во времени слоевой системы; номиналит – комплекс слоев, для которого связь во времени не является существенной (свиты, серии, формации).

Поскольку седиментационный цикл – это целостная динамическая система с непрерывным течением процесса во времени, в разрезе выделяются циклиты различного ранга.

Классификация циклитов основана на таких принципах, как направленность и непрерывность изменений вещественного состава от одного слоя к другому. В терригенных разрезах этот критерий может проявляться, например, в изменении гранулометрического состава [3, 4].

Циклиты классифицируются на однонаправленные (А) и разнонаправленные (Б), при этом в каждой группе выделяются два типа слоевых ассоциаций.

В *группе А* различают:

Первый тип – циклиты с исключительно «прямой» прогрессивной направленностью. В терригенных отложениях это выражается в уменьшении размеров зерен вверх по разрезу. Такие разрезы называют прогрессивными, или проциклитами.

Второй тип – циклиты с обратной тенденцией изменения данного признака, т. е. с увеличением размеров зерен вверх по разрезу. Они именуются регрессивными, или рециклитами.

В *группе Б* выделяют два типа слоевой композиции:

Первый тип – в нижней части слоя наблюдается «прямая» прогрессивная направленность изменения признака, а в верхней части – обратная, регрессивная. При этом нижние и верхние слои представлены более грубозернистыми породами по сравнению с внутренними, а границы между слоями остаются постепенными и нерезкими. Такие циклиты называются прогрессивно-регрессивными, или прорециклитами.

Второй тип – циклиты с обратным строением: нижние слои характеризуются регрессивной последовательностью, а верхние – прогрессивной, с плавным переходом между ними. Эти циклиты называются регрессивно-прогрессивными, или репроциклитами.

Таким образом, согласно предложенной Ю.Н. Карогодиным классификации, все многообразие породных слоев и их сочетаний сведено к четырем основным типам (рис. 1).

По многочисленным исследованиям, из вышеперечисленных классификаций, терригенные отложения юрского разреза территории Бухаро-Хивинского региона (БХР) в основном относятся к типу однонаправленных циклитов [5].

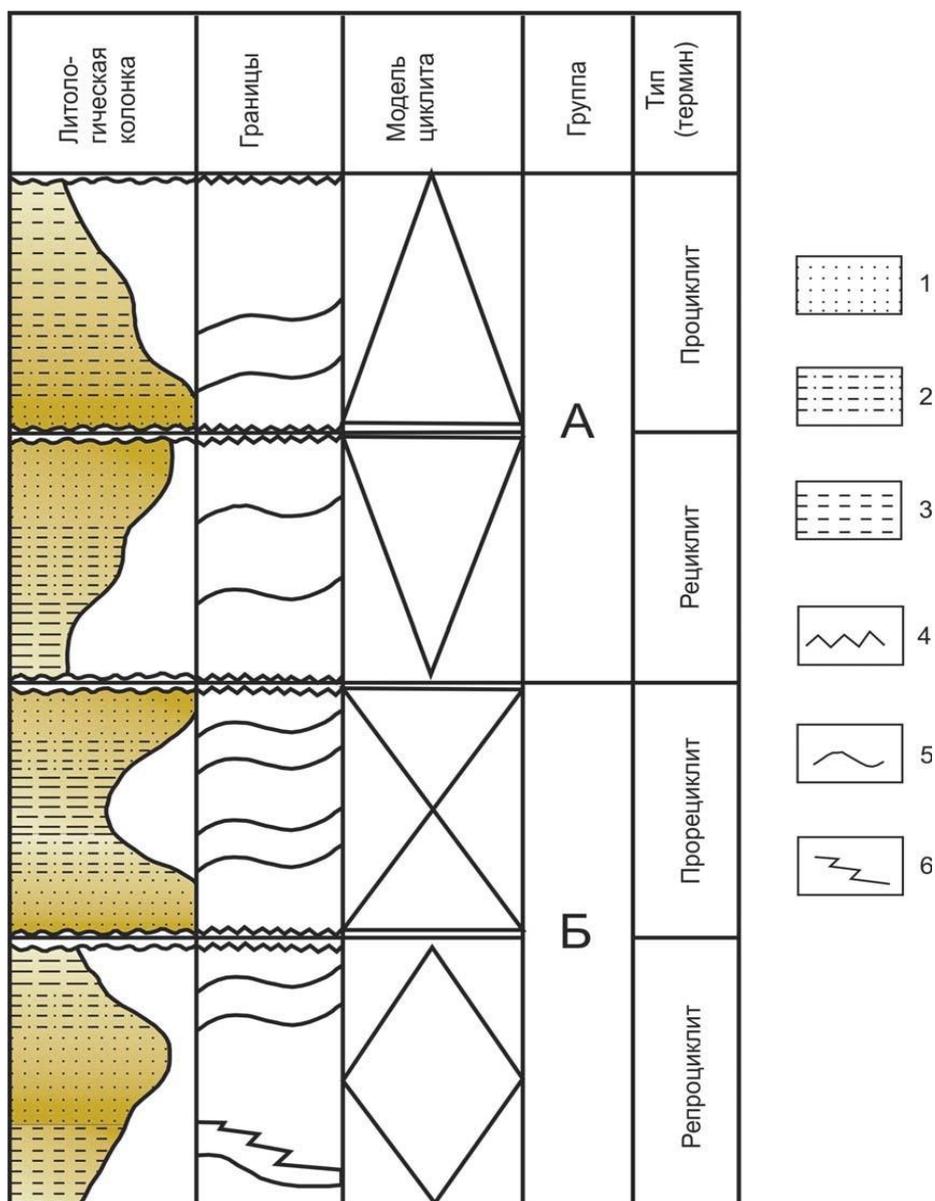
Ассоциации элементарных циклитов формируют три уровня породно-слоевых систем: локальные, зональные и региональные циклиты. Разделение между ними определяется такими структурными признаками, как резкие границы, возникающие вследствие перерывов в осадконакоплении, размывов ранее сформировавшихся отложений и структурных несогласий. В основании циклитов, как правило, залегают базальные слои, представленные песчаниками, гравелитами и конгломератами.

Системно-литологические исследования базируются на детальном послойном описании разреза, поэтому при использовании ГИС породный слой рассматривается как тело с относительно однородными промыслово-геофизическими характеристиками. Выделение слоев с различным литологическим составом на основе ГИС осуществляется путем анализа связи физических свойств с составом пород и их отражения на различных каротажных диаграммах.

Известно, что закономерное чередование литологических слоев обусловлено процессами осадочной дифференциации вещества. Для терригенных разрезов оно определяется, в частности, действием законов гравитации и динамики среды.

Результаты анализа керна и шлама по территории исследования показывают, что в составе юрских терригенных образований БХР, в частности, выделяется следующий литологический ряд пород и их основные разновидности: песчаники крупно- и среднезернистые; песчаники мелкозернистые глинистые; песчаники известковистые; алевролиты; алевролиты глинистые; тонкое чередование песчаников, алевролитов и глин; глины и аргиллиты без примеси песчано-алевритового материала; аргиллиты битуминозные.

В рамках настоящего исследования последовательность выделенных седиментационных циклов рассматривается как региональные цикло-комплексы (РЦК).



**Рис. 1. Основные типы циклитов (по Ю.Н. Карогодину).** Породы: 1 – песчаники, 2 – алевролиты, 3 – глины. Граница: 4 – резкая, 5 – постепенная, 6 – постепенная через переслаивание.

**Fig. 1. The main types of cyclites (according to Y.N. Karogodin).** Rocks: 1 – sandstones, 2 – siltstones, 3 – clays. Boundaries: 4 – sharp, 5 – gradual, 6 – gradual through interlayering.

Региональные цикло-комплексы отражают изменения условий осадконакопления и позволяют реконструировать палеогеографические обстановки.

Разрез юрской терригенной формации БХР и ЮЗОГХ представлен 5 свитами: кимирекская, гурудская, дегибадамская, тангидувальская и байсунская, которые характеризуются свойственными для них условиями осадконакопления.

При изучении разрезов юрского комплекса БХР, особенно терригенной формации, возникают определённые трудности. Во-первых, традиционное стратиграфическое расчленение юрских отложений БХР, выполненное ранее (М.Э. Эгамбердыев, В.И. Троицкий, В.П. Алексеев и др.), основывалось на данных, полученных по обнажениям Юго-Западных отрогов Гиссара (ЮЗОГ), с последующим их сопоставлением и корреляцией. В 2011 г. Г.С. Абдуллаев и Х.Х. Миркамалов представили унифицированную стратиграфическую схему терригенной формации юрского разреза для БХР и ЮЗОГ. Однако согласование этой схемы с

данными по скважинам сталкивается с определенными трудностями, особенно в районах, удалённых на десятки и сотни километров. Отметим, что такие стратиграфические схемы не могут быть без корректировок применены к удалённым территориям БХР. Даже в пределах отдельных участков, таких как Кушабский прогиб, Денгизкульское и Култакское поднятия, межплощадная корреляция юрских отложений, особенно нижних частей разреза, представляет значительные сложности, и различные исследователи проводят расчленение и корреляцию этих отложений по-разному.

Во-вторых, ограниченное количество кернового материала, полученного из изучаемых интервалов разрезов скважин, не позволяет сформировать надёжную стратиграфическую основу для расчленения и корреляции разрезов.

В-третьих, вскрытие терригенных юрских отложений в исследуемом районе, особенно в его юго-восточной части, выполнено на полную мощность лишь ограниченным числом скважин, что существенно снижает информативность геолого-геофизических данных, таких как материалы ГИС и керновые выборки.

Для литологического расчленения, характеристики и корреляции мезозойского разреза БХР используется достаточно большой комплекс геофизических исследований скважин (ГИС). Он включает: стандартный каротаж (КС и ПС), электрический каротаж (БК), индукционный каротаж (ИК), ядерные методы каротажа (ГК и НГК), кавернометрию (КВ), акустический каротаж (АК) и др.

В частности, при изучении и анализе этих материалов используются детальные диаграммы масштаба 1:200. Но для достижения поставленной цели в рамках данного исследования нами выполнено расчленение формационно-однотипных и литологически-однородных разрезов на основе анализа цикличности осадконакопления методом скользящего окна с перекрытием данных для выделения соответствующих РЦК.

### Методика исследования

Метод скользящего окна с перекрытием представляет алгоритм, используемый для обработки данных ГИС. Этот метод позволяет выделять крупномасштабные структурные элементы осадочных разрезов, включая РЦК в терригенных отложениях юры, путём осреднения данных и анализа циклических изменений литолого-фациальных характеристик (рис. 2).

Для решения этой задачи выбраны методы гамма-каротажа (ГК) и, как вспомогательный метод, боковой каротажа (БК). Гамма-каротаж позволяет оценить естественную радиоактивность пород, что связано с их литологическим составом и содержанием глинистых минералов, что в свою очередь влияет на условия осадконакопления. Боковой каротаж характеризует электрические свойства пород, что позволяет судить об их пористости и насыщенности. Необходимо учесть, что на результаты исследований могут влиять технические факторы (изменение диаметра скважины, инвазия бурового раствора) и геологические факторы (неоднородность пластов, наличие трещин). Выбранные методы ГИС с большой вероятностью не поддаются влиянию посторонних факторов.

Технически данная задача может быть решена на основе использования стандартного математического обрабатывающего программного комплекса MS Excel, Polaris Office, Calligra Sheets и др.

Рассмотрим каждый этап обработки выделения РЦК по отдельности.

1. *Сбор данных:* проводится сбор и анализ информативности диаграмм гамма-каротажа и бокового каротажа исследуемых скважин.

2. *Построение графиков:* полученные данные представляются в виде графиков зависимости измеренных параметров от глубины в укрупненном масштабе.

3. *Выбор параметров окна осреднения и процент перекрытия:* выбирается размер окна (длина интервала по вертикали), исходя из предполагаемой мощности региональных циклитов (например, 4 м), и шаг скольжения окна. Используется 50% или 75% перекрытие, что обеспечивает частичное дублирование данных между соседними окнами.

4. *Осреднение данных:* внутри каждого окна рассчитываются средние значения данных ГК и БК.

5. *Сдвиг окна:* окно последовательно сдвигается вниз по стволу скважины на заданный шаг. На каждом шаге вычисляются новые усреднённые значения ГК и БК. Чтобы повысить точность данных, в работе не был установлен интервал между скользящими окнами.

6. *Построение трендов:* по осреднённым значениям параметров строятся тренды, которые демонстрируют общие закономерности в разрезе, минимизируя влияние локальных аномалий.

7. *Интерпретация результатов:* на основе анализа отклонения линии тренда, характеризующие сходные закономерности изменения параметров, проводится корреляция с другими геолого-геофизическими данными и выделяется последовательность РЦК.

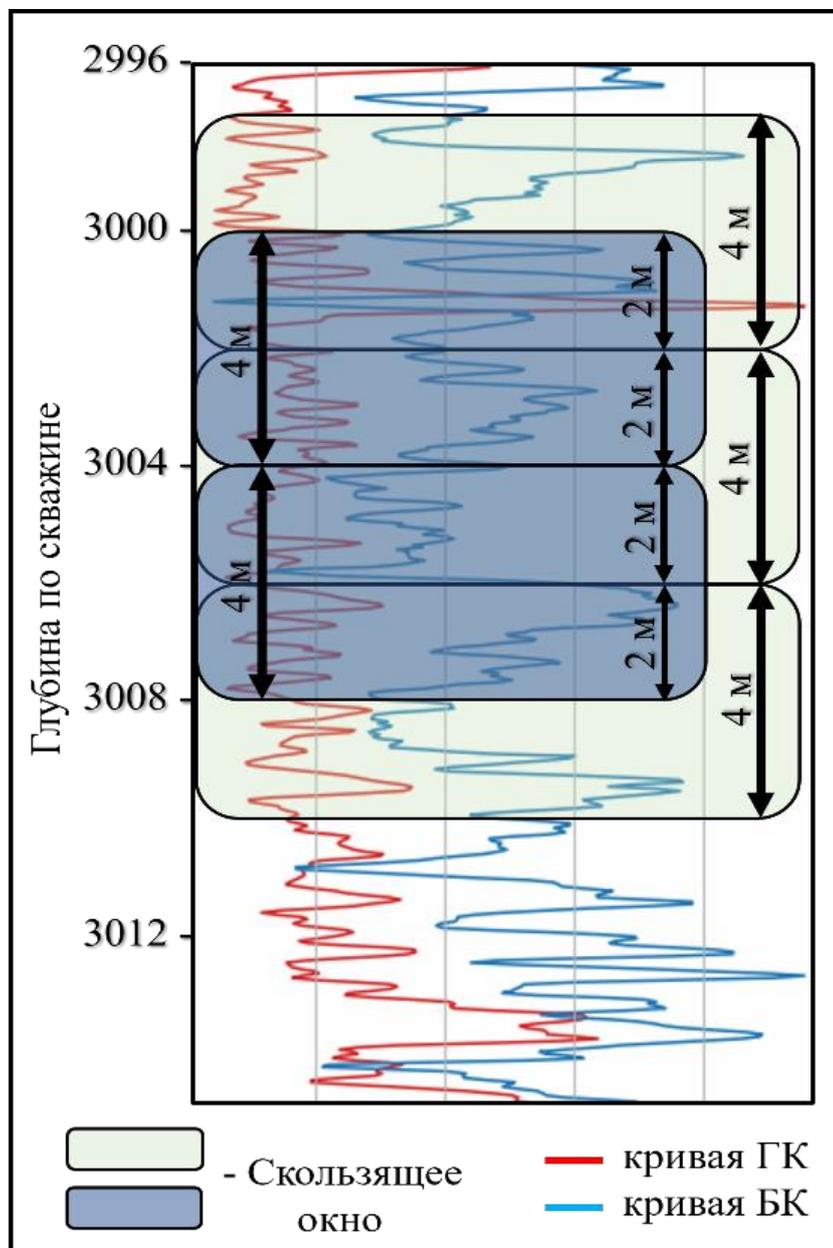


Рис. 2. Образец каротажной диаграммы с элементами перекрывающегося скользящего окна.

Fig. 2. Sample well log with overlay sliding window elements.

### Результаты исследования

В анализ вовлечены каротажные диаграммы материалов ГИС и результаты анализа керна по 15 скважинам, вскрывшие не менее 200 м терригенной юрской формации в исследуемом регионе. Оцифровка и послойная интерпретация каротажных диаграмм произведена по скважинам, расположенных на 15 площадях в пределах Чарджоуской ступени. График тренда скользящего окна данных ГК и БК демонстрирует динамику петрофизических характеристик разреза, разделенного на четыре региональных цикло-комплекса (РЦК-V,

РЦК-VI, РЦК-III, РЦК-II). При этом осадконакопление РЦК-I в пределах исследуемой не происходило.

В скв. № 1 Куйи Памук выделены четыре РЦК (рис. 3). Мощность в разрезе РЦК-V 253 м. Наблюдаются стабильные значения гамма-каротажа и незначительно возрастающие сопротивления, что подтверждает тенденцию к уменьшению глинистости в нижней части разреза. В нижней части разреза наблюдается резкое понижение значений ГК в интервале 3451-3471 м, что может свидетельствовать о преимущественно песчаном составе пород. По характеру тренда данных ГК и БК выделенный комплекс отчетливо выражает проциклитовый тип осадконакопления. В частности, линии тренда РЦК-V показывают идентичную дифференцию с другими выделенными РЦК-V.



Рис. 3. График трендов скользящего окна скв. № 1 Куйи Памук с элементами разбивок на РЦК.

Fig. 3. Graph of trends of the moving window of well № 1 Kuyi Pamuk with elements of breakdowns into the RCC.

РЦК-IV характеризуется чередованием повышенных и пониженных значений ГК и БК, что указывает на выраженную цикличность осадконакопления. В разрезе прослеживаются локальные пики гамма-активности, свидетельствующие о присутствии глинистых прослоев. В то же время, боковой каротаж показывает переменное сопротивление (5-300 Ом·м), что указывает на смену пористых песчаных горизонтов и менее проницаемых алевроито-глинистых прослоев.

Гамма-каротаж в интервале РЦК-III характеризуется стабильными значениями естественной радиоактивности в верхней части разреза и постепенно уменьшается в нижней части разреза, что может свидетельствовать о преимущественно песчаном составе пород. Боковой каротаж в этом интервале фиксирует наибольшие значения сопротивления, что при комплексном анализе с данными ГК указывает на наличие относительно хороших коллекторных свойств. Мощность разреза 198 м.

В РЦК-II проявляется чередование зон повышенной и пониженной гамма-активности, что может быть связано с ритмичностью осадконакопления. Линии тренда ГК и БК показывают чередование высоких и низких значений, что соответствует изменению пористости и проницаемости пород. Мощность разреза 181 м

В скв. № 1 Бердикудук выделены два РЦК, которые тоже характеризуются различными физическими свойствами (рис. 4). В интервале РЦК-V также наблюдается слабое колебание трендов. Мощность разреза 277 м.

В РЦК-IV прослеживаются относительно высокие значения БК и низкие значения ГК, что может свидетельствовать о наличии коллекторных отложений. Мощность разреза 175 м.



Рис. 4. График трендов скользящего окна скв. № 1 Бердикудук с элементами разбивок на РЦК.

Fig. 4. Graph of trends of the moving window of well № 1 Berdikuduk with elements of breakdowns into the RCC.

В скв. № 102 Уртабулак вскрыт полный комплекс юрской терригенной формации (рис. 5). В частности, выделены три разреза. В интервале РЦК-V наблюдается слабое колебание трендов. Мощность разреза 235 м.

РЦК-IV характеризуется чередованием повышенных и пониженных значений БК, что указывает на выраженную цикличность осадконакопления. В нижней части комплекса прослеживаются локальные минимумы гамма-активности, свидетельствующие о присутствии песчаных прослоев. Боковой каротаж показывает резкую переменность сопротивления. Мощность разреза 219 м.

РЦК-III демонстрирует плавное снижение уровня гамма-активности, что может указывать на увеличение песчаности пород в нижней части разреза. Одновременно боковой каротаж фиксирует стабильные или незначительно возрастающие сопротивления, что подтверждает тенденцию к уменьшению глинистого цемента. Мощность разреза 111 м.



Рис. 5. График трендов скользящего окна скв. № 102 Уртабулак с элементами разбивок на РЦК.

Fig. 5. Graph of trends of the moving window of well № 102 Urtabulak with elements of breakdowns into the RCC.



Рис. 6. График трендов скользящего окна скв. № 3 Янги Тегермен с элементами разбивок на РЦК.

Fig.6. Graph of trends of the moving window of well № 3 Yangi Tegermen with elements of breakdowns into the RCC.

## ВЫВОДЫ

Разрез юрской терригенной толщи на исследуемой площади состоит из осадков четырёх комплексов, предположительно соответствующих свитам: РЦК-II – гурудской, РЦК-III – дегибадамской, РЦК-VI – тангидувальской, РЦК-V – байсунской.

Каротажные диаграммы основных методов ГИС, таких как методы сопротивлений (БК) и гамма-каротаж (ГК), оцифрованы и в последующем обработаны с применением математических средств на основе анализа циклического расчленения.

В результате анализа обработки данных ГИС по различным скважинам БХР в интервале юрской терригенной формации отметим, что в случае сложной геологической обстановки (тектонические нарушения, неоднородность осадконакопления) интерпретация результатов с позиции определения РЦК может быть затруднена. Однако, необходимо заметить, что метод уменьшает искажения, вызванные аномалиями, и делает тренды более устойчивыми. Вместе с этим данный метод основан на анализе количественной информации, тем самым минимизируя субъективность интерпретации. Процесс обработки данных может быть автоматизирован, что повышает эффективность исследований. Отметим, что за счёт учёта структурных закономерностей разреза и сглаживания локальных аномалий метод скользящего окна с перекрытием данных обеспечивает высокую эффективность при выделении РЦК. Так, совместный анализ данных промысловой геофизики, обработанных с использованием метода скользящего окна с перекрытием, позволил глубже понять процессы осадконакопления и выделить крупные циклические элементы в интервале юрской терригенной формации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Атабаева Ф.Р., Абдуллаев Н.К., Атабаев Д.Х., Раджабов Ш.С. Связь нефтегазоносности с современными эндогенными режимами на примере Денгизкульского поднятия // International scientific conference of young scientists «Science and Innovation». - Т., 2024, 15 ноября. - С. 236-238.
2. Abdullaev N.K., Atabayeva F.R. Geological and geophysical characterization of jurassic sediments of the central part of the Dengizkul uplift // International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences. - India. 2024. - Vol. 14. - P. 71-75.
3. Бабаев А.Г., Габрильян Р.А. и др. Терригенная формация юрского возраста Бухаро-Хивинского региона и Юго-Западного Гиссара и её нефтегазоносность. - М.: Недра, 1977. - 137 с.
4. Карогодин Ю.Н. Седиментационная цикличность. - М.: Недра, 1980. - 242 с.
5. Раджабов Ш.С. Строение и латеральные неоднородности юрского разреза Бухаро-Хивинского региона. - Т.: Университет, 2021. - 224 с.
6. Устинова В.Н., Вылцан И.А., Жилина Е.Н., Устинов В.Г. Цикличность осадконакопления и её роль при изучении нефтегазоносности платформенных отложений // Циклы и ритмы природы и общества. - 2001.

#### **Sanoat geofizikasi ma'lumotlari bo'yicha Buxoro-Xiva regionini Chorjou pog'onasi janubi-g'arbiy qismi quduqlari kesmalarini davriy bo'lish uslubiyati sharhi** N. Abdullaev, D. Atabaev, Sh. Radjabov

**Аннотация.** Buxoro-Xiva mintaqasining Chordjou pog'onasining Janubi-G'arbiy qismida joylashgan quduqlarning kesimlarini siklik ajratish metodikasi tahlil qilinadi. Kon geofizikasi ma'lumotlari asosida amalga oshirilgan tadqiqotda ma'lumotlarni qamrab oluvchi siljувchi oyna usuli qo'llanilgan bo'lib, natijada regional siklo-komplekslar (RSK) aniqlangan va cho'kindi yotqizqlarining siklikligi tahlil qilingan. Asosiy siklit turlari, ularning litologik xususiyatlari va ajratish mezonlari ko'rib chiqilgan. Olingan natijalar stratigrafik modelni aniqlashtirishga yordam berib, kollektor jinslarning xususiyatlarini aniqroq bashorat qilish imkonini beradi.

**Калит so'zlar:** sikliklik, kesim, quduq, cho'kindi yotqizqlar, geofizika, karotaj, qum toshi, gil tarkibi, siklitlar, RSK (regional siklo-komplekslar), g'ovaklik, stratigrafiya.

#### **Overview of the methodology of cyclic division of wells of the south-western part of the Chardzhou step of the Bukhara-Khiva region based on industrial geophysics data** N. Abdullaev, D. Atabaev, Sh. Radjabov

**Abstract.** The article examines the methodology of cyclic stratification of well sections in the South-Western part of the Chardzhou step of the Bukhara-Khiva region based on field geophysics data. The application of the moving window method with overlap allows for the identification of regional cycle complexes (RCC) and the analysis of sedimentation cyclicity. The main types of cyclites, their lithological characteristics, and selection criteria are considered. The obtained results contribute to refining the stratigraphic model and enable more accurate prediction of reservoir rock properties.

**Key words:** cyclicity, section, well, sedimentation, geophysics, logging, sandstone, clay content, cyclites, RCC (regional cycle complexes), porosity, stratigraphy.

УДК 550.34

## К ВОПРОСУ УТОЧНЕНИЯ АКТИВНОСТИ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО УЗБЕКИСТАНА

У.А. Нурматов, У.А. Юсупджанова

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

**Аннотация.** Рассмотрены результаты исследований по уточнению пространственного положения и активности Южно-Тянь-Шаньского разлома и ряда разломов более меньшего масштабного уровня Центральной части Узбекистана. Анализированы особенности проявления современных движений земной коры в пределах разломных зон по заложенным профилям, пересекающих разломные зоны. Изучены особенности проявления радиационного поля и современного рельефа. Установлено, что во всех пунктах, которые приурочены к зонам разломов и линеаментов, в поведении гамма-поля наблюдается значимое уменьшения его значения. Характерно то, что в современную активизацию вовлечены разломы и линеаменты как субширотного, так и меридионального направления.

**Ключевые слова:** разлом, геодинамический блок, современное движение, гамма-поля, линеамент.

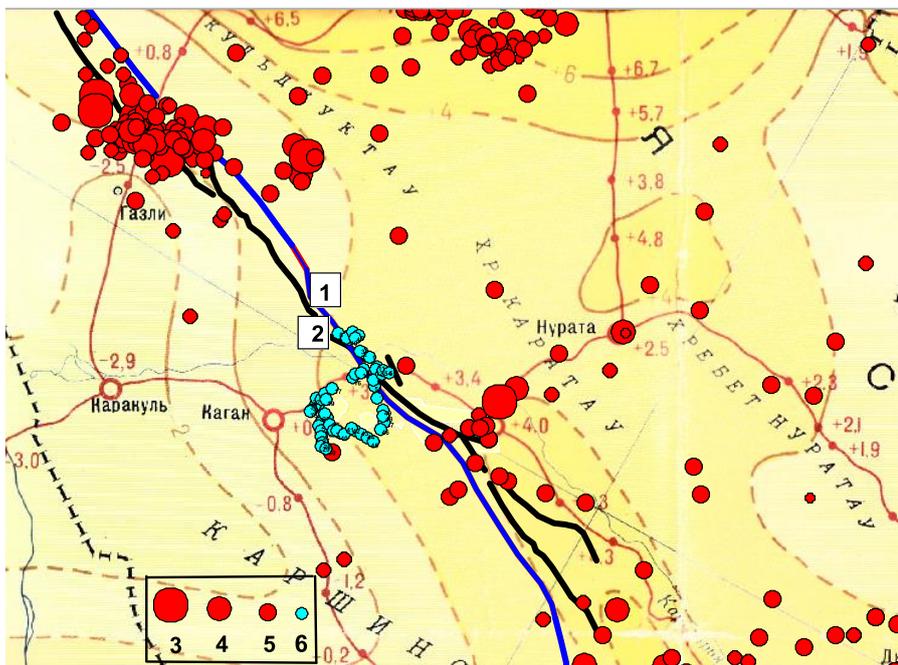
**Введение.** По современным представлениям, источник сейсмических колебаний – активные разломы земной коры, являющиеся пространственной основой сейсмогенных зон. От точности картирования пространственного положения активных разломов, оценки их характеристик (морфология, длина, протяженность, ширина зоны динамического влияния, сейсмический потенциал и др.) зависят достоверность и надежность как сейсмопрогнозных исследований, так и решения практических вопросов оценки сейсмической опасности. Исходя из этого, при сейсмическом районировании, строительстве особо ответственных объектов экономики (АЭС, ВЭС, гидротехнические сооружения и др.) особое внимание уделяется вопросам наличия или отсутствия в пределах таких объектов активных разломов земной коры. В настоящее время существуют различные картографические материалы по разломам, но по масштабу и конденционности они не всегда соответствуют предъявляемым требованиям. Из-за сложности выделения разломов, особенно в пределах закрытых современными отложениями территорий, степень достоверности существующих карт не одинакова. Много вопросов возникает относительно пространственного положения разломов.

В пределах Западного Узбекистана исследователями (Якубов и др., 1976; Абдуллабеков и др., 2002; Садыков и др., 2020) выделены системы разломов, активные в новейшее и современное время. Они, как правило, состоят из серии кулисообразно расположенных разрывов меньшего порядка. Отдельные участки большинства из них образуют крутые уступы в рельефе и, в основном, сопровождаются дроблением и трещиноватостью. В закрытой части территории большинство разломов выделены на основе геофизических материалов. В этой связи пространственное положение отдельных разломов на картах различных авторов значимо не совпадает между собой. Особенно это касается территории Центрального и Западного Узбекистана, где большинство выделенных разломов установлено условно (Садыков и др., 2020; Ибрагимов и др., 2002). К ним относится западная часть Южно-Тянь-Шаньского разлома (Якубов и др., 1976). В связи с интенсивным освоением территории Западного Узбекистана, строительством различных объектов экономики, выбором площадки для строительства особо ответственных сооружений и оценки их сейсмической опасности возникла необходимость сбора, систематизации информации о существующих активных разломах земной коры.

**Объект и предмет исследования.** Настоящая работа посвящена вопросу уточнения пространственного положения Южно-Тянь-Шаньского разлома в районе оз. Тудакуль, который был выбран в качестве альтернативной площадки для строительства АЭС. Обычно разлом земной коры определяется геолого-геоморфологическими и инструментальными геофизическими методами. Основными признаками наличия разломов являются его выход на поверхность, уступы на рельефе, проявления родников по линии разлома, аномальные проявления магнитного, радиометрического, гравитационного и др. геофизических полей. Показатель современной

активности разломов – сейсмичность, интенсивные вертикальные и горизонтальные движения земной коры, аномальные наклоны земной поверхности и др.

Современная активность Южно-Тянь-Шаньского разлома не вызывает сомнения. В его зоне в 1976 и 1984 г. произошли три сильнейшие Газлийские землетрясения с  $M > 7,0$  (Новый каталог., 1976), которые подтвердили её наличие. Очаговая зона Газлийских землетрясений находится в состоянии повышенной активности и в настоящее время, о чем свидетельствуют многочисленные землетрясения слабой и умеренной силы, возникшие до настоящего времени (рис. 1). Зона разлома прослеживается и по данным современных вертикальных движений земной коры. На рис. 1 приведен фрагмент карты современных вертикальных движений земной коры Средней Азии изучаемой территории, составленная под редакцией Н.А.Корешкова и др. (1982). В основу карты заложены результаты повторного нивелирования по заложенной сети, проведенного подразделением Геодезического управления геодезии и картографии при СМ СССР. Интервал между первым и вторым циклом измерений – от 7 до 42 лет. Скорости современных вертикальных движений земной коры вычислены по формуле  $V = (H_2 - H_1) / (T_2 - T_1)$  мм/год. Как видно из рис. 1, зона Южно-Тянь-Шаньского разлома приурочена к области перехода от контрастных современных опусканий к области умеренных поднятий. Максимальная скорость вертикальных движений в период наблюдения в зоне разлома доходила до 4,0 мм/год и более. На рисунке также приведено пространственное положение разлома, по данным Ибрагимов и др. (2002) и Бачманова и др. (2017), а также эпицентры землетрясений, происшедшие за период 2010-2018 гг. и пункты радиометрических наблюдений. Так, характер проявления вертикальных движений и их направленность – наглядное свидетельство наличия данного разлома. Однако из рис. 1 видно, что наряду с общим подтверждением наличия разлома и его направления, пространственное положение его, по данным двух групп авторов, в отдельных участках значительно не совпадает между собой и порой это несовпадение доходит до 8-10 км, а в центральной части (в районе оз. Тудакуль) они пересекаются.

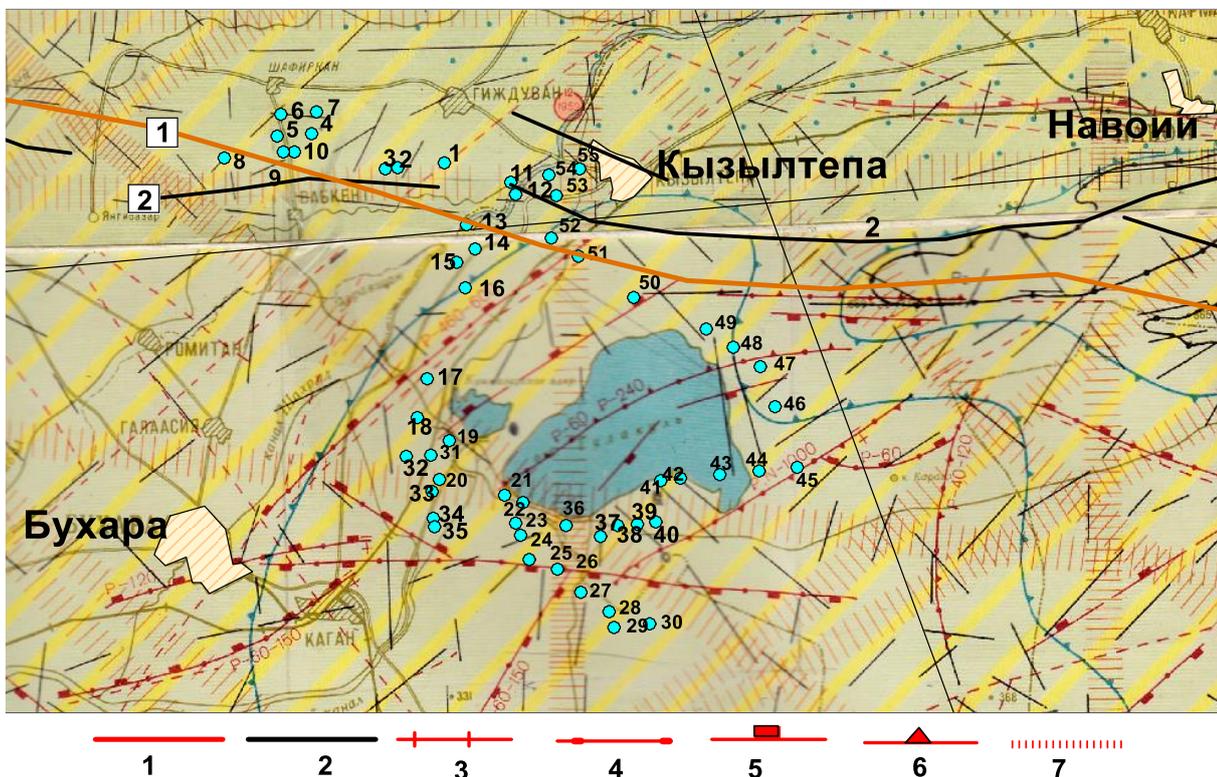


**Рис. 1. Фрагмент карты современных вертикальных движений земной коры района оз. Тудакуль и сопредельных территорий (Корешков и др., 1982) и пространственное положение Южно-Тянь-Шаньского разлома. Положение разлома: 1 – по Ибрагимов и др., 2002; 2 – по Бачманов и др., 2017. Эпицентры землетрясений с: 3 –  $M \leq 4,5$ ; 4 –  $M \leq 3,9$ ; 5 –  $M \leq 3,2$ ; 6 – пункты радиометрических наблюдений.**

**Fig. 1. Fragment of a map of modern vertical movements of the earth's crust in the area of Lake Tudakul and adjacent territories (Koreshkov et al., 1982) and the spatial position of the South Tien Shan fault. Fault position: 1 – according to Ibragimov et al., 2002; 2 – according to Bachmanov et al., 2017. Earthquake epicenters with: 3 –  $M \leq 4,5$ ; 4 –  $M \leq 3,9$ ; 5 –  $M \leq 3,2$ ; 6 – radiometric observation points.**

С целью получения ответа на вопрос «Где на самом деле проходит Южно-Тянь-Шанский разлом?» проведены сеймотектонические и инструментальные радиометрические исследования. Сеймотектоническое обследование района и прилегающих территорий не позволило выделить каких-либо признаков существования и современной активности имеющихся в районе разломных зон. Наблюдалось наличие слабого уступа северо-восточного простирания на западе оз. Тудакуль. Других признаков существования регионального разлома не выявлено. Характерным моментом является то, что данный разлом отсутствует и на карте Сеймотектоники Узбекистана, составленной Государственным научно-исследовательским и производственным центром «Природа» [Карта сеймотектоники, 1986] при научном редакторстве Р.Н.Ибрагимова.

**Результаты и обсуждение полученных результатов.** С целью выявления пространственного положения данного разлома на следующем этапе исследований были проведены маршрутные радиометрические наблюдения и сопоставительный анализ полученных результатов с собранными материалами. Радиометрические наблюдения проводились по выбранным маршрутам, которые заложены таким образом, чтобы они по возможности пересекали все существующие разломные зоны и зоны линеаментов. В общей сложности заложены 55 пунктов, которые пересекали не только разломы второй категории вокруг выбранных площадок, но и зону предполагаемого Южно-Тянь-Шанского разлома (рис. 2). Одновременно с радиометрическим наблюдением определялся уровень современного рельефа каждого пункта, по данным GPS наблюдений. По результатам наблюдений, построены графики изменения радиационного поля по заложенным профилям, сопоставленные со схемой разломных и линеаментных зон, приведенных на Карте сеймотектоники Узбекистана.



**Рис. 2. Фрагмент карты сеймотектоники Узбекистана и схема пунктов полевых радиометрических наблюдений.** Южно-Тянь-Шанский разлом: 1 – по Ибрагимову и др., 2002; 2 – по Бачманову и др., 2017. Главнейшие разрывные нарушения, активизированные в новейшее время: 3 – региональные; 4 – локальные; 5 – сбросы; 6 – взбросы; 7 – региональные линеаменты.

**Fig. 2. Fragment of the seismotectonic map of Uzbekistan and a diagram of field radiometric observation points.**

Fault: 1 – South Tien Shan according to Ibragimov et al., 2002; 2 – according to Bachmanov et al., 2017. Major faults activated in recent times: 3 – regional; 4 – local; 5 – normal faults; 6 – reverse faults; 7 – regional lineaments.

На карте в пределах района исследования приводится ряд разломов северо-восточного простирания небольшой протяженности, линеаменты и предполагаемые разломы, выделенные на основе космических снимков. Проанализирован характер проявления радиационного поля в зонах этих разломов и линеаментов. Графики распределения наблюдаемого поля по профилям приведены на рис. 3-6.

Схема пунктов радиометрических наблюдений, приведенные на рис. 2, в основном приурочены к скрытой (или невыраженной) части зоны Южно-Тянь-Шаньского глубинного разлома. График проявления радиационного поля и современного рельефа в 1-11 пунктах отражены на рис. 3. Как видно из графика, только лишь в районе пунктов 1-3 зарегистрировано значимое уменьшение гамма-поля, что соответствует зонам линеамента и предполагаемого второстепенного разлома северо-восточного простирания. Данный разлом на карте сеймотектоники Узбекистана относится к категории предполагаемых, но полученный результат свидетельствует о его существовании и относительной современной активности. Значимых изменений в современном рельефе не отмечено (см. рис. 3).



Рис. 3. График изменения радиационного поля в зоне Южно-Тянь-Шаньского разлома.

Fig. 3. Graph of changes in the radiation field in the South Tien Shan fault zone.

Аналогичные аномальные изменения гамма-поля в зонах разломов и линеаментов наблюдаются и по другим профилям. На рис. 4 приведены результаты изменения гамма-поля в пунктах, расположенных в западной части района исследований. По всей протяженности между пунктами 16-17, 19-20, 22-23, 31-32 и 33-34 разломы и линеаменты пересекает заложенный профиль. Из них только один разлом, проходящий между 16 и 17 пунктами, имеет северо-восточное простирание, а остальные разломы и линеаменты направлены субширотно. Характерно,

что во всех пунктах, которые пересекаются разломами или линеаментами, наблюдается значимое изменение гамма-поля.

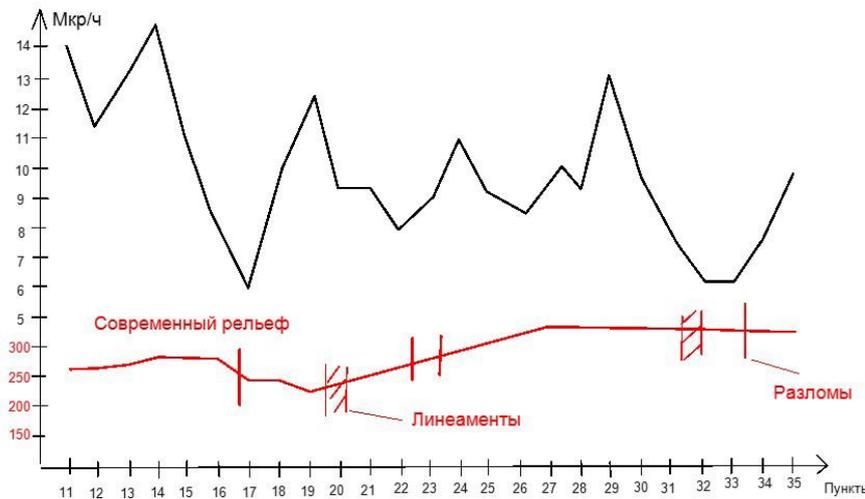


Рис. 4. Графики изменения гамма-поля в западной части оз.Тудакуль.

Fig. 4. Graphs of gamma field changes in the western part of Lake Tudakul.

Следующий профиль наблюдений имеет субширотное простирание. Включает пункты 22, 23 и далее по простиранию от пункта 33 до 46. По всей протяженности профиль пересекает три линеамента меридионального, субширотного и северо-западного простирания (рис. 5). Профиль в районе пунктов 36, 41 и 42 пересекает существующие зоны линеаментов. Характерно, что все три линеамента пересекаются в районе между пунктами 41-42. Как видно из рис. 5, в обоих случаях в характере гамма-поля наблюдаются значимые минимумы.

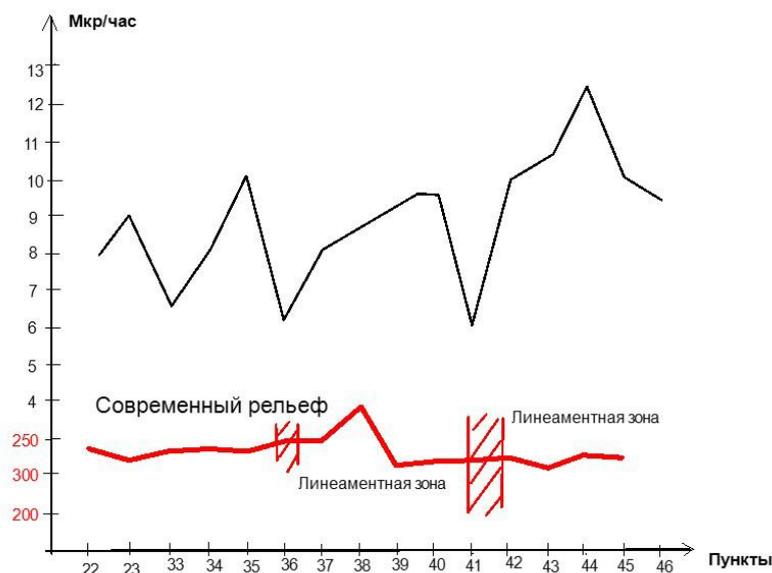


Рис. 5. Графики изменения радиационного поля в южной части оз.Тудакуль.

Fig. 5. Graphs of changes in the radiation field in the southern part of Lake Tudakul.

Следующий профиль, в отличие от остальных, северным окончанием пересекает выраженную часть Южно-Тянь-Шаньского разлома (см. рис. 2). Полученные результаты приведены на рис. 6. Так, начиная с пункта 48, профиль проходит по зоне динамического влияния Южно-Тянь-Шаньского разлома. С этого пункта наблюдается значимое уменьшение гамма-поля. Наблюдается и повышение высоты современного рельефа. Далее во внутренних пунктах изменения поля незначительные.

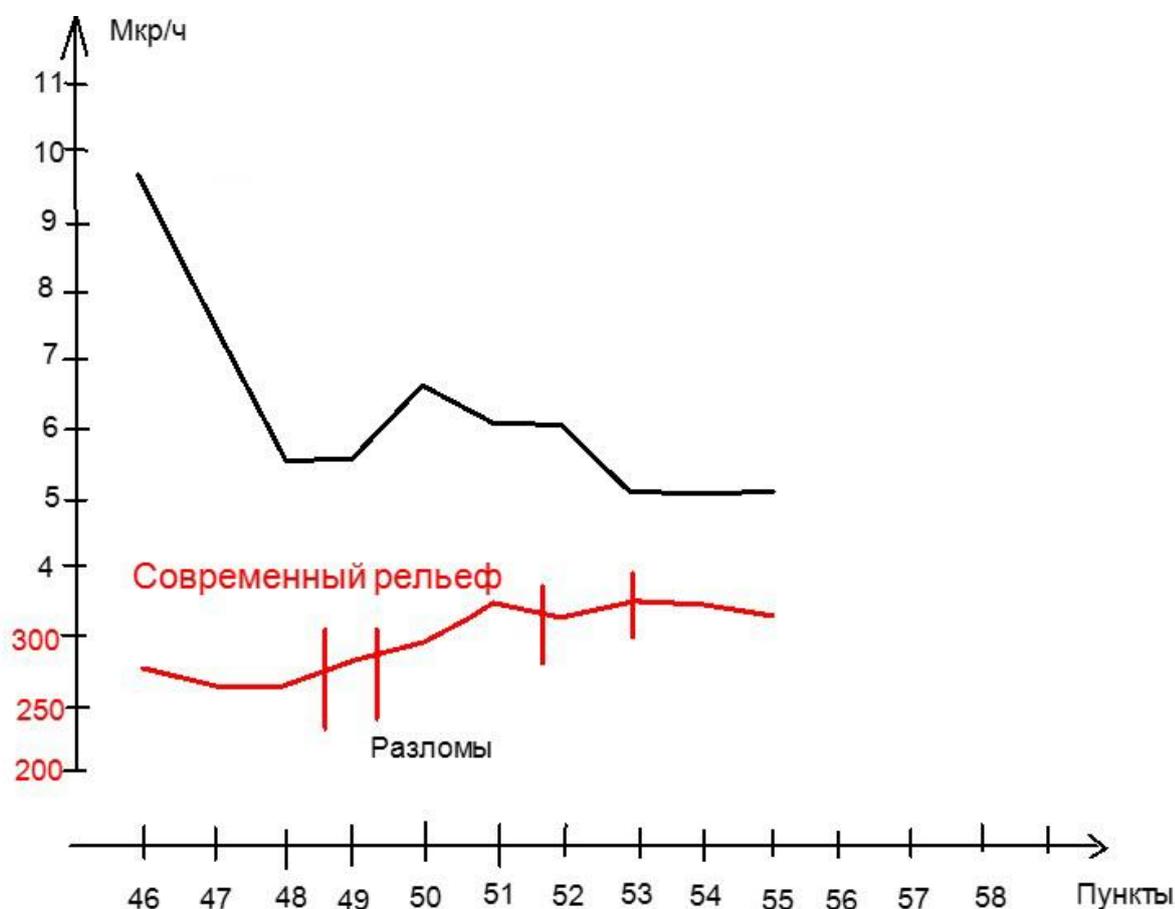


Рис. 6. Графики изменения радиационного поля восточной части оз.Тудакул.

Fig. 6. Graphs of changes in the radiation field of the eastern part of Lake Tudakul.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что во всех пунктах, которые приурочены к зонам разломов и линеаментов, в поведении гамма-поля наблюдается значимое уменьшение его значения. Объяснить причины наблюдаемых минимумов достаточно трудно. Зависимость аномального проявления гамма поля от рельефа местности и других особенностей земной коры не установлена. Можно предположить, что, по всей вероятности, они связаны с процессами, происходящими в разломной зоне. Характерно, что в современную активизацию вовлечены разломы и линеаменты как субширотного, так и меридионального направления. Современная активизация разнонаправленных разломов второго порядка и линеаментов, особенно северо-восточного простирания, в сочетании с Южно-Тянь-Шаньским глубинным разломом, в будущем может создавать благоприятные условия для образования зацепа и накопления больших напряжений, и в дальнейшем – реализации разломом

своего максимального сейсмического потенциала. Это создает реальную угрозу для объектов экономики, расположенных в зоне динамического влияния Южно-Тянь-Шаньского разлома.

Работа выполнена за счет средств государственного бюджета.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллабеков К.Н., Ибрагимов Р.Н. и др. Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане. - Т.: ГИДРОИНГЕО, 2002. - 132 с.
2. Ибрагимов Р.Н. и др. Сейсмотектонические условия возникновения Газлийских землетрясений // Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. - Т.: Фан, 1986. - С. 18-28.
3. Карта современных вертикальных движений земной коры Средней Азии. - М.: Гл. управление геодезии и картографии СМ СССР, 1982.
4. Карты сейсмотектоники Узбекистана 1:500000 масштаба / Науч. ред. Р.Н.Ибрагимов. - М.: Гл. управление геодезии и картографии СМ СССР, 1986.
5. Новый Каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. Часть II. III. Средняя Азия и Казахстан / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. - М.: Наука. - С. 198-296.
6. Садьков Ю.М., Нурматов У.А., Юсупджанова У.А. Сейсмотектоническая модель центральной части Узбекистана // Проблемы сейсмологии. - 2020. - № 1. - С. 32-39.
7. Якубов Д.Х., Ахмеджанов М.А., Борисов О.М. Региональные разломы Среднего и Южного Тянь-Шаня. - Т.: Фан, 1976. - 146 с.

#### Markaziy O'zbekiston faol yoriqlarining faolligi va makondagi holatini aniqlash masalasiga doir

U.A. Nurmatov, U.A. Yusupdjanova

**Annotatsiya.** Maqolada Janubiy Tyan-Shan yer yorig'i va O'zbekistonning markaziy qismidagi bir qator kichik o'lchamdagi yoriqlarning fazoviy holati va faolligini aniqlash bo'yicha o'tqazilgan tadqiqotlar natijalari keltirilgan. Yoriq zonalari doirasida yer qobig'ining zamonaviy harakatlarining namoyon bo'lish xususiyatlari tahlil qilinadi, yoriqlar zonalari kesib o'tgan profillar bo'ylab, radioaktiv maydoning namoyon bo'lish xususiyatlari va zamonaviy relyef va lineamentlar bilan solishtirib o'rganiladi. O'lchash natijalari profillarining yer yoriqlari va lineamentlar bilan kesishgan nuqtalarda radioaktiv maydonning anomal o'zgarishlari mavjudligi, faollik xar ikkala yo'nalishdagi yer yoriqlari zonalari birdek namoyon bo'lishi kuzatildi.

**Kalit so'zlar:** yer yorig'i, geodinamik blok, zamonaviy xarakatlar, gammag'maydon, lineament.

#### On the issue of clearing the activity and spatial position of active failures of Central Uzbekistan

U.A. Nurmatov, U.A. Yusupdjanova

**Annotation.** The article presents the results of studies to clarify the spatial position and activity of the South Tien Shan fault and a number of smaller-scale faults in the Central part of Uzbekistan. The features of the manifestation of modern movements of the earth's crust within fault zones are analyzed, along the laid profiles intersecting fault zones, the features of the manifestation of the radiation field and modern relief are studied. It has been established that in all points that are confined to fault and lineament zones, a significant decrease in the gamma field value is observed in its behavior. It is characteristic that faults and lineaments of both sublatitudinal and meridional directions are involved in modern activation.

**Key words:** fault, geodynamic block, modern movement, gamma fields, lineament.

УДК 550.34.4

**РАЗЛОМНО-БЛОКОВЫЕ НЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ  
ЗАПАДНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ****Ю.М. Садыков***Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан*

**Аннотация.** Разломно-блоковые неотектонические структуры (РБНС) разных рангов в земной коре Западного Тянь-Шаня, где накапливаются тектонические напряжения и ограничивающие их разломы, определяют сеймотектонический процесс в регионе и ответственны за генерацию землетрясений. Неотектонически обоснованные РБНС способствуют проведению детальных сейсмогеодинамических исследований в их пределах для повышения качества и достоверности проводимых анализов.

**Ключевые слова:** неотектоника, разломно-блоковые неотектонические структуры, активные разломы.

**Введение.** В настоящее время в тектонике в целом и в неотектонике в частности однозначно превалирует концепция о разломно-блоковом строении земной коры. Универсальность блокового строения литосферы отмечали многие выдающиеся геологи и геофизики. Например, А.В. Пейве [1] отмечал, что главной чертой земной коры и верхней мантии является ее дискретность, блоковость, мозаичность. Л.И. Красный [2] выделял геоблоки (1-5 км<sup>2</sup>), мегаблоки (сотни тысяч км<sup>2</sup>), сложные блоки (десятки тысяч, реже, сотни тысяч км<sup>2</sup>), простые блоки (тысячи км<sup>2</sup>), локальные блоки (до первых сотен км<sup>2</sup>). Первые две группы ограничены над региональными и региональными разломами, достигающих верхнюю мантию, а остальные коровые. О.М. Борисов и др. по комплексу геолого-геофизических и космогеологических данных выделяли принципиально различные типы блоков континентов [3]. Основными критериями при выделении типов блоков послужили разрывные нарушения, однотипность геологического строения, тектонический режим. Д.Х. Якубов для территории Узбекистана выделил различные блоки по степени проявления молодых и современных тектонических движений [4]. Проведенный нами анализ показал, что разломы и неотектонические движения выступают решающим динамическим фактором в формировании структурного плана современных тектонических движений, разделяя территорию Западного Тянь-Шаня (ЗТШ) на разломно-блоковые неотектонические структуры (РБНС) 3-го ранга [11, 20].

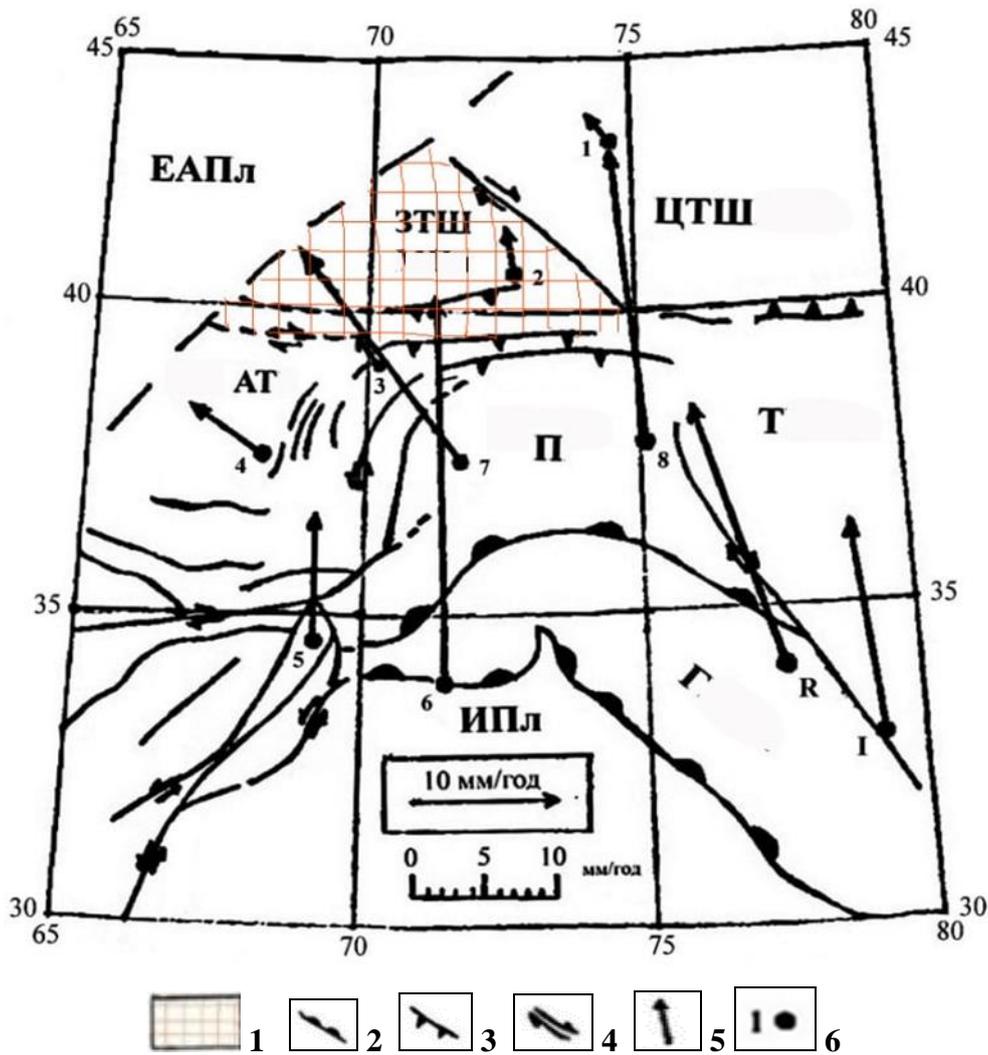
**Методика исследования.** Неотектонический картографический анализ – один из основных методов неотектонических исследований, это универсальный метод. Он включает картографический и графоаналитический способы анализа карт разного содержания и масштаба для построения совмещенных карт. Неотектонические движения отражают разломно-блоковый характер строения земной коры и реконструируются по деформациям реперных поверхностей, анализу мощностей, выраженности в современном рельефе. Совместный анализ сейсмичности и РБНС разного ранга позволит определить особенности взаимосвязи между ними и выявить закономерности развития сейсмического процесса. Он производится изучением блоковых и разрывных неотектонических структур, а также количественной характеристикой движений, сформировавших эти структуры. Разломы и блоки, развитые в коре ЗТШ, рассматриваются как взаимосвязанные и взаимообусловленные структурные формы. Активный разлом реагирует движением на изменение поля напряжений и в этом ключе является источником сейсмической опасности. Каждый разлом характеризуется комплексом геолого-геофизических и геоморфологических параметров, удостоверяющих их тектоническую активность. Они также четко дешифрируются на аэрокосмофотоматериалах и топокартах разного масштаба. К настоящему времени в зависимости от конечной цели разработаны различные классификации разрывных нарушений. В сейсмогеодинамике используется классификация разломов, учитывающая геометрические, морфологические и пространственные характеристики. К последней относят зону динамического влияния разломов, где выделяются остаточные деформации в современном рельефе, возникшие в результате сильных и катастрофических землетрясений. К важным параметрам разломов также относится генезис, возраст заложения,

амплитуда смещений (до орогенных, орогенных, новейших, четвертичная и современная), отношение к РБНС разного ранга, пространственно-временные особенности проявления сейсмичности (включая палеосейсмодислокации), данные геофизики, гидрогеологии (гидросеть), космической геодезии и материалы аэрокосмической фотосъемки.

**Новейшая структура и особенности новейшей деформации земной коры ЗТШ.** РБНС земной коры и её геологические границы определяются и уточняются с привлечением комплекса геолого-геофизических данных. Это позволяет провести детальный анализ связи РБНС разного ранга и сейсмичности. Территория ЗТШ сформировалась в результате внутриконтинентального коллизионного горообразования в условиях взаимодействия Евразийской, Индийской и Аравийской плит. Современные кинематические модели геодинамики отражают варианты вовлечения в коллизию неотектонических блоков 1-го ранга Средней Азии [5-8]. Перемещение блоков консолидированной коры проходило вдоль разделяющих их сутур и глубинных разломов. Надо отметить, что эти модели, хотя и отличаются как количеством, так и конфигурацией блоков, но близки по кинематике, так как все модели используют данные космической геодезии (GPS). С учетом этих моделей нами построена схема геодинамики Среднеазиатской части Альпийско-Гималайского горного пояса (рис. 1). Современное напряженное состояние в ЗТШ во многом определяется взаимоотношением близ расположенных блоков 1-го ранга: Таримского, Центрально-Тянь-Шаньского, Восточно-Тянь-Шаньского, Афганского, Таджикского. Подобная латеральная неоднородность земной коры Средней Азии по-разному реагирует на давление Индостанской и Африкано-Аравийских плит. В структурообразовании участвовали различные горизонты коры, т. е. процессы развивались в полном согласии с двухъярусной тектоникой плит. Дополнительным подтверждением этого является положение многочисленных очагов землетрясений, не выходящих за пределы верхней коры (не ниже 30-35 км). И только вдоль глубинных сдвигов, нарушающих сплошность литосферы, отмечаются очаги сильных глубоководных землетрясений. Схема, показанная на рис. 1, отражает кинематику блоков 1-го ранга. Для блоков, расположенных южнее ЗТШ, подвижки имеют северо-западное и северное направления, что в конечном счете определяет характер кинематики блоков 2-го ранга, расположенных внутри ЗТШ. На схеме (см. рис. 1) определены внешние границы (активные разломы), направления движений сопредельных блоков, которые являются внешним фактором формирования поля внутренних механических напряжений и деформаций ЗТШ на современном этапе.

**Разломно-блоковые неотектонические структуры ЗТШ.** Необходимый анализ с целью выделения РБНС разного ранга проведен на основе карты новейших тектонических движений Узбекистана, выполненной А.Ю. Плотницким, Р.Н. Ибрагимовым и Ю.М. Садыковым в 1991 г. [11, 12]. В последующие годы неоднократно вносились уточнения и коррективы, согласно новым фактическим данным. Были также учтены публикации тектонистов Узбекистана [10, 13]. К настоящему времени разработаны различные модели формирования неотектонических структур как с позиции классической «фиксистской» тектоники, так и с позиций «новой глобальной теории тектоники плит». Геодинамические модели неотектонических движений на основе принципов тектоники плит дают хорошую согласованность с материалами космической геодезии.

Карта неотектонических движений ЗТШ составлена в масштабе 1:1 000 000 методом изолиний, отражающих величину (в метрах) и морфологию деформаций. На карте (рис. 2) выражены подвижные и устойчивые РБНС, а в их пределах – отдельные структурные формы (морфоструктуры). Отображая суммарную величину поднятий и опусканий принятой исходной уровенной поверхности, изолинии очерчивают на карте и форму неотектонической структуры. За начало отсчета (репер) неотектонических движений, вслед за [13], принята стратиграфическая кровля верхнего эоцена. Она фиксирует повсеместно палеографическую смену условий осадконакопления с морского (монотонная толща зеленых глин) на континентальный (песчано-глинистые и пестроцветные осадки). В Ферганской РБНС, в общей толще эоцен-олигоценых глинистых отложений, этот рубеж «чувствуется» по слабому погрублению, известковости олигоценовой части разреза и насыщенности его специфическим (смешанным) комплексом микрофауны (фораминиферы). Совместный анализ построенной карты с графическими материалами, отображающими различные аспекты геолого-геофизического (в т. ч. глубинного) строения, разрывной тектоники и сейсмичности, позволяют выделить неотектонические РБНС, отличающиеся рисунком изолиний, амплитудами неотектонических движений, ориентацией и морфологией разрывных нарушений.

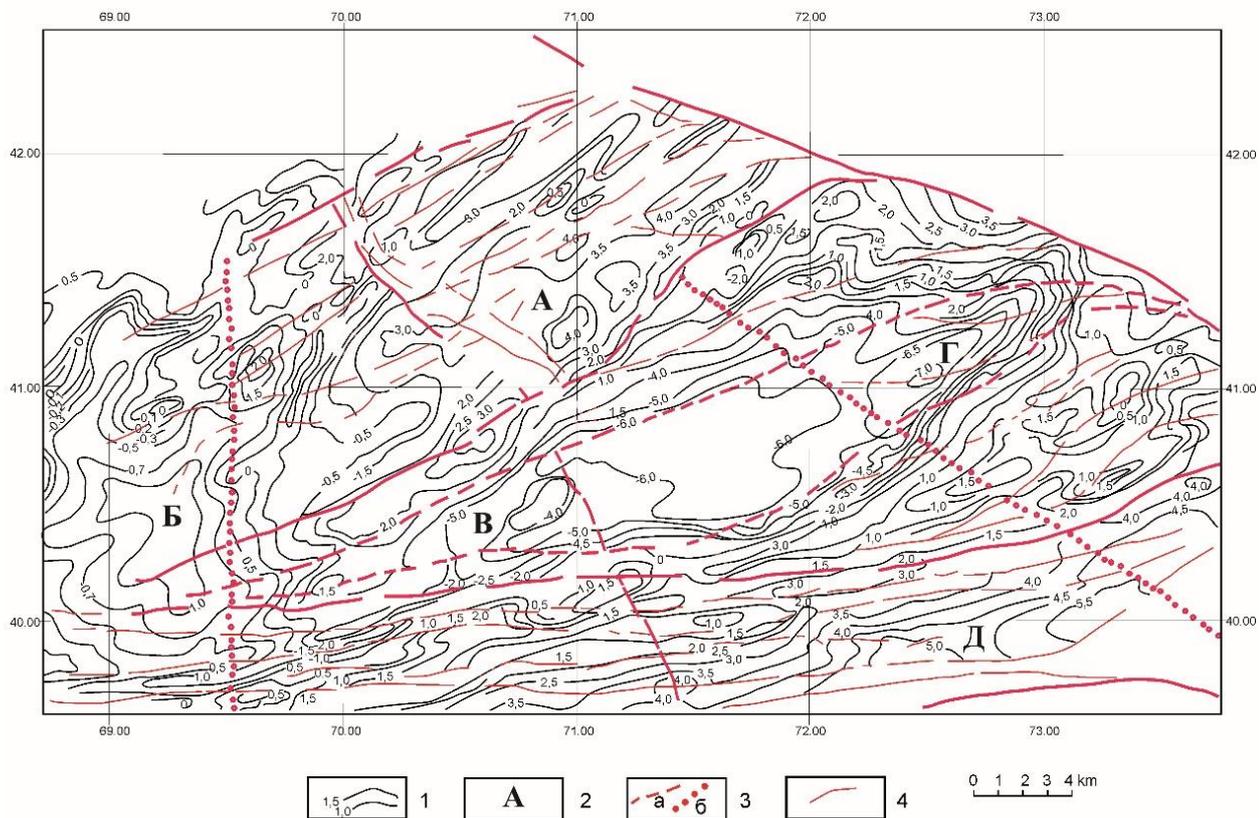


**Рис. 1. Схема геодинамики Среднеазиатской части Альпийско-Гималайского горного пояса.** 1 – район исследований; 2 – надвиги; 3 – взбросы; 4 – сдвиги; 5 – векторы движений пунктов GPS, по [9]; 6 – пункты GPS-измерений: 1 – Бишкек ( $2,1 \pm 0,8$ ;  $1,8 \pm 1,6$ ); 2 – Ош ( $4,0 \pm 1,3$ ;  $0,6 \pm 1,3$ ); 3 – Гарм ( $2,4 \pm 1,2$ ;  $1,2 \pm 1,2$ ); 4 – Шаартуз ( $3,9 \pm 1,1$ ;  $5,5 \pm 1,1$ ); 5 – Кабул ( $10,0 \pm 1,1$ ;  $0,1 \pm 1,1$ ); 6 – Пешавар ( $29,0 \pm 0,9$ ;  $0,8 \pm 0,9$ ); 7 – Хорог ( $15,8 \pm 1,1$ ;  $10,7 \pm 1,1$ ); 8 – Ташкурган ( $22,5 \pm 1,7$ ;  $1,9 \pm 1,8$ ); 9 – R ( $20,3 \pm 1,2$ ;  $5,7 \pm 1,2$ ); 10 – I ( $16,6 \pm 1,6$ ;  $1,7 \pm 1,6$ ). EA Пл – Евразийская плита, I Пл – Индийская плита. Блоки 1-го ранга: Г – Гималайский; П – Памирский; Т – Таримский; ЗТШ – Западно-Тянь-Шаньский; ЦТШ – Центрально-Тянь-Шаньский; АТ – Афгано-Таджикский.

**Fig. 1. Geodynamic scheme of the Central Asian section of the Alpine-Himalayan mountain belt.** 1 – research area; 2 – thrusts; 3 – overflows; 4 – shifts; 5 – vectors of movements of GPS points according to [9]; 6 – GPS measurement points: 1 – Bishkek ( $2,1 \pm 0,8$ ;  $1,8 \pm 1,6$ ); 2 – Osh ( $4,0 \pm 1,3$ ;  $0,6 \pm 1,3$ ); 3 – Harm ( $2,4 \pm 1,2$ ;  $1,2 \pm 1,2$ ); 4 – Shaartuz ( $3,9 \pm 1,1$ ;  $5,5 \pm 1,1$ ); 5 – Kabul ( $10,0 \pm 1,1$ ;  $0,1 \pm 1,1$ ); 6 – Peshawar ( $29,0 \pm 0,9$ ;  $0,8 \pm 0,9$ ); 7 – Horog ( $15,8 \pm 1,1$ ;  $10,7 \pm 1,1$ ); 8 – Tashkent ( $22,5 \pm 1,7$ ;  $1,9 \pm 1,8$ ); 9 – R ( $20,3 \pm 1,2$ ;  $5,7 \pm 1,2$ ); 10 – I ( $16,6 \pm 1,6$ ;  $1,7 \pm 1,6$ ). EA Pl – Eurasian plate, I Pl – Indian Plate, Blocks of the 1st rank: G – Himalayan; P – Pamir; T – Tarim; ZTSh – West Tien Shan; CTSh – Central Tien Shan; AT – Afghan-Tajik.

Показываемые таким образом на карте амплитуды новейших тектонических движений следует рассматривать не только как результат проявления вертикальных движений, а как проекцию на горизонтальную плоскость суммы и вертикальных и горизонтальных перемещений. Амплитуды неотектонических движений позволяют количественно оценить их размах,

интенсивность и направленность. На карте четко выражены подвижные и устойчивые участки. Отображая суммарную величину поднятий и опусканий принятого репера, изолинии очерчивают форму неотектонических структур и позволяют произвести количественный анализ их интенсивности. Условно, для повышения достоверности и эффективности дальнейшего сейсмогеодинамического анализа, территория ЗТШ принимается в качестве структуры 1-го ранга. Она ограничена с трех сторон активными разломами 1-го ранга: с северо-запада – Аксу-Майдантал-Боганалинским, с северо-востока – Таласо-Ферганским и с юга – Гиссаро-Кокшаальским.



**Рис. 2. Фрагмент карты амплитуд новейших тектонических движений Узбекистана [11, 12] и схема расположения РБНС 2-го ранга. 1 – амплитуда новейших тектонических движений, м; 2 – РБНС 2-го ранга, выделенные по амплитудным характеристикам и комплексу геолого-геофизических данных (обозначены кириллицей): А – Чаткало-Кураминская, Б – Приташкентская, В – Ферганская, Г – Атойнок-Ферганская, Д – Южно-Тянь-Шаньская; 3 – границы неотектонических РБНС 2-го ранга, выраженные: а – активными разломами, б – морфологически и амплитудами движений; 4 – внутренние активные (внутри РБНС) разломы. Данные, касающиеся киргизской и таджикской территорий, заимствованы из работ [18-20].**

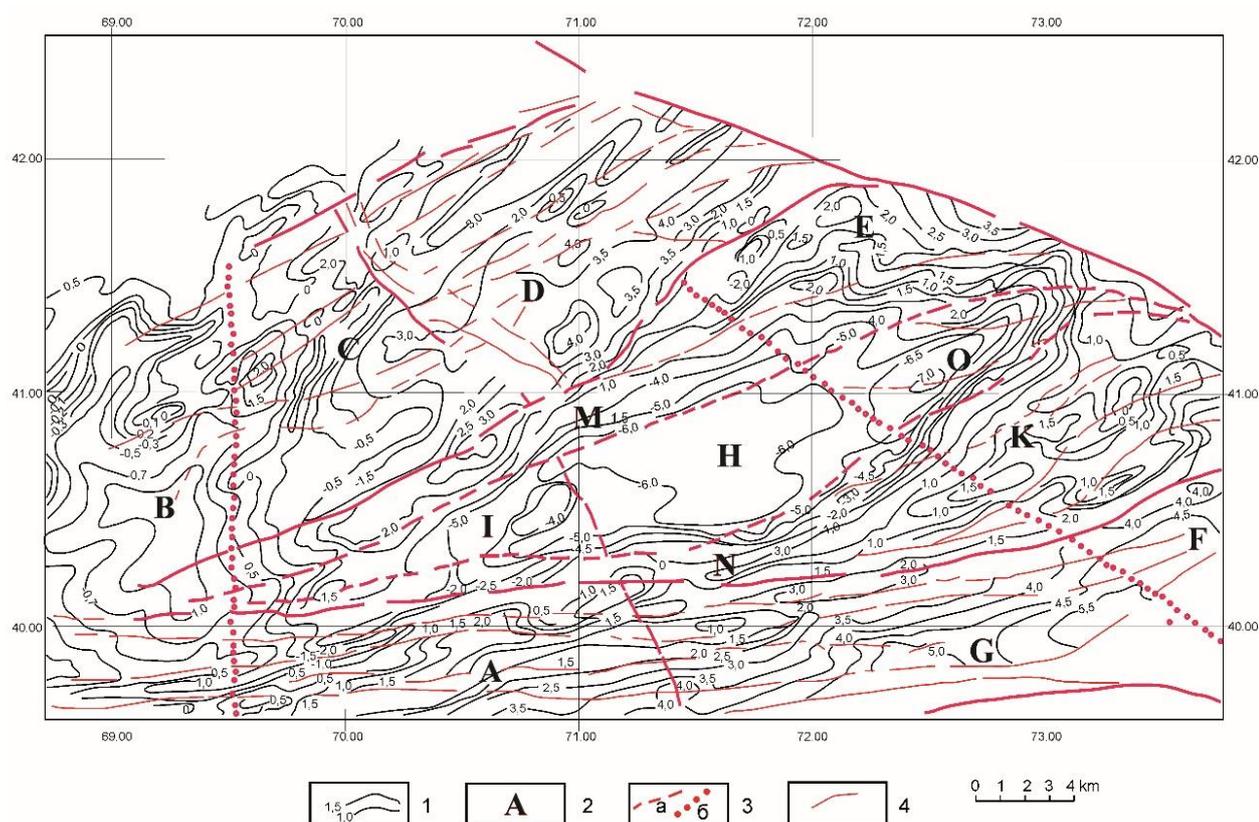
**Fig. 2. Fragment map of the amplitudes of the latest tectonic movements of Uzbekistan [11, 12] and the layout of the RBNS of the 2nd rank. 1 – the amplitude of the latest tectonic movements, m; 2 – RBNS of the 2nd rank, distinguished by amplitude characteristics and a set of geological and geophysical data (indicated in Cyrillic): A – Chatkalo-Kuraminskaya, B – Pritashkentskaya, C – Ferghanskaya, D – Atoinok-Ferghanskaya, D – South Tien Shan; 3 – boundaries of neotectonic RBNS of the 2nd rank, expressed by: a – active faults, b – morphologically and the amplitudes of movements; 4 – internal active (within the RBNS) faults. The data concerning the Kyrgyz and Tajik territories are borrowed from the works of [18-20].**

**Разломно-блоковые неотектонические структуры (РБНС) 2-го ранга.** В пределах ЗТШ выделяются РБНС 2-го ранга: А – Чаткало-Кураминская; Б – Приташкентская; В – Ферганская; Г – Атойнок-Ферганская; Д – Южно-Тянь-Шаньская (см. рис. 2). В пределах РБНС 2-го ранга

могут быть выделены РБНС 3-го, 4-го и т. д. рангов. В данном случае степень ранжирования зависит от масштаба решаемых задач.

**Чаткало-Кураминская РБНС** 2-го ранга (А) с четырех сторон ограничена активными разломами – с северо-востока Таласо-Ферганским, с северо-запада Аксу-Майдантал-Боганалинским разломами 1-го ранга. Остальные границы выполняются активными разломами 2-го ранга: с юго-востока Северо-Ферганским и Восточно-Чаткальским, а с запада Пред-Чаткало-Кураминской флексурно-разрывными зонами (ФРЗ). По ряду признаков (глубинное строение, рисунок и амплитудные показатели и др.) данная РБНС разделяется Кумбель-Коканд-Хайдарканским активным разломом на северную и южную части, которые обозначены буквами С и D (рис. 3).

**Северо-Чаткало-Кураминская РБНС** 3-го ранга (D). Границей РБНС служат те же активные разломы, ограничивающие Чаткало-Кураминский блок 2-го ранга, с юга контролируется Кумбель-Коканд-Хайдарканским активным разломом. В пределах данного блока развиты РБНС 4-го ранга – Угамская, Пскем-Коксуйская, Сандалашская, Чаткальская.



**Рис. 3. Фрагмент карты амплитуд новейших тектонических движений Узбекистана [11, 12] и схема расположения РБНС 3-го ранга. 1 – амплитуда новейших тектонических движений, м; 2 – РБНС 3-го ранга, выделенные по амплитудным характеристикам и комплексу геолого-геофизических данных (буквы латинского алфавита); 3 – границы неотектонических РБНС 3-го ранга, выраженные: а – активными разломами, б – морфологически и амплитудами движений; 4 – внутренние активные (внутри РБНС) разломы.**

**Fig. 3. Fragment map of the amplitudes of the latest tectonic movements of Uzbekistan [11, 12] and the layout of the RBNS of the 3rd rank. 1 – the amplitude of the latest tectonic movements, m; 2 – RBNS of the 3rd rank, distinguished by amplitude characteristics and a set of geological and geophysical data (letters of the Latin alphabet); 3 – boundaries of neotectonic RBNS of the 3rd rank, expressed by: a – active faults, b – morphologically and amplitudes of movements; 4 – internal active (within RBNS) faults.**

**Южно-Чаткало-Кураминская РБНС** 3-го ранга (С). Границей РБНС являются те же активные разломы, ограничивающие Чаткало-Кураминскую РБНС 2-го ранга. С запада фиксируется Пред-Чаткало-Кураминской ФРЗ. Здесь выделяются Каржантауская и Кураминская РБНС 4-го ранга. Палеозойское основание в РБНС 3-го ранга поднято до отметок 4500 м и 3700 м соответственно, а разделяющий их прогиб фундамента не опускается ниже отметок 2000 и 1500 м. Перечисленные РБНС 4-го ранга понижаются в юго-западном направлении и погружаются под отложения мезозоя и кайнозоя в прилегающую с запада Приташкентскую РБНС.

**Атойнок-Ферганская РБНС** 2-го ранга (Г) ограничивает с северо-востока Ферганскую РБНС. Это сложно построенные ассиметричные поднятия, северо-восточной частью примыкающие к Таласо-Ферганскому разлому. Юго-западная часть РБНС в виде виргаций ответвляются и продолжается под мезозойско-кайнозойским покровом Ферганской РБНС. Естественными границами Атойнок-Ферганской РБНС выступают разломы – Таласо-Ферганский с северо-востока и Восточно-Ферганский с юго-запада. К северо-западу граничит с Северо-Чаткало-Кураминской РБНС 3-го ранга посредством Восточно-Чаткальского разлома. По рисунку изолиний, амплитудным характеристикам разделен Северо-Ферганской и Южно-Ферганской ФРЗ на РБНС 3-ранга (Е, О и К).

**Южно-Тянь-Шаньская РБНС** 2-го ранга (Д). Неотектонический структурный план Южно-Тянь-Шаньской РБНС осложнен зонами поперечных нарушений меридионального и северо-западного простирания, с которыми часто связаны зоны трещиноватости, кулисообразное сочленение структур, сопровождаемое горизонтальными смещениями. На основе этих поперечных разломов, рисунку изолиний и амплитудным характеристикам Южно-Тянь-Шаньская РБНС 2-го ранга разделена на РБНС 3-го ранга: А, Г и Ф (см. рис. 3). Так, южные приграничные зоны РБНС 3-го ранга А, Г и Ф представляют зону соприкосновения Южно-Тянь-Шаньской РБНС 2-го ранга и Памирской тектонической дуги. С севера РБНС ограничена Южно-Ферганским глубинным разломом. Вдоль разлома со стороны Ферганской впадины расположены Мальгузарская, Уратюбинская, Сулюкта-Тахтабузская РБНС 5-го ранга.

**Ферганская РБНС** (В). Внутренняя структура РБНС тесно связаны с Атойнок-Ферганской РБНС 2-го ранга. Центральный грабен с двух сторон граничит с Северо-Ферганской и Южно-Ферганской РБНС 3-го ранга (М и Н). Центральный грабен, по [17], разделяется на две РБНС 3-го ранга – Западно-Ферганскую (I) и Восточно-Ферганскую (H). Разделенная Кумбель-Коканд-Хайдарканским разломом, Западно-Ферганская конвергентная РБНС (I) испытала новейшее сжатие за счет встречного двустороннего надвигания Чаткало-Кураминской и Южно-Тянь-Шаньской РБНС 2-го ранга. Восточно-Ферганская моновергентная РБНС (H) реагировала на общее сжатие односторонним, направленным на север, надвиганием структур. Результаты инструментальных наблюдений показали, что г. Андижан и его окрестности опускаются со скоростью 10 мм/год. Здесь же выявлены участки как сжимающихся, так и растягивающихся современных трещин, располагающихся в зоне динамического влияния Южно-Ферганской ФРЗ. Эти факты могут свидетельствовать о том, что Восточно-Ферганская РБНС 3-го ранга (H) подвержена одновременно действующим субвертикально и в северо-восточном направлении напряжениям растяжения. В данном случае, Ферганская РБНС 2-го ранга рассматривается как структура опускания на фоне тангенциального сжатия, согласно теории двухъярусной тектоники плит.

**Приташкентская РБНС** (Б) по Пред-Чаткало-Кураминской ФРЗ сочленяется с Чаткало-Кураминской РБНС 2-го ранга (А). Переход в сторону Туранской платформы Евразийской литосферной плиты постепенный и имеет ассиметричное строение. Ось ее простирания с северо-востока на юго-запад. Глубина залегания фундамента здесь, по геофизическим данным, достигает 3000 м. Почти все положительные и отрицательные РБНС 4-го ранга являются прямым продолжением Южно-Чаткало-Кураминской РБНС 3-го ранга.

**Активные разломы.** Неотъемлемой, наиболее подвижной частью РБНС являются активные разрывные нарушения. Разрывные нарушения, современная сейсмическая активность которых однозначно подтверждается (очаги сильных землетрясений приурочены к зоне динамического влияния активных разломов), при детальном рассмотрении, характеризуются комплексом геолого-геофизических и геоморфологических параметров, удостоверяющих их тектоническую активность в неотектонический и современный этапы развития. Они также четко дешифрируются на аэрокосмофотоматериалах и топокартах разного масштаба. В основу построенной схемы сейсмоактивных разломов земной коры ЗТШ (рис. 4) положены результаты

анализа многочисленных геолого-поисковых, геофизических исследований, проведенных учреждениями Министерства геологии и Академии Наук Узбекистана, а также собственные наблюдения, отраженные в многочисленных статьях и отчетах, выполненных в Институте сейсмологии за период 1971-2024 гг. Определение сейсмоактивности разломов осуществлялось по результатам комплексного анализа: пространственно-временного распределения землетрясений; реконструкций механизмов очагов землетрясений; современных движений по геолого-геоморфологическим признакам и инструментальным данным; данных спутниковой геодезии; материалов тектонической интерпретации результатов математического моделирования. При анализе данной схемы, в первую очередь, привлекают внимание пространственная ориентировка разломов и их положение относительно тектонических блоков 2-го и 3-го рангов. Как показал анализ сети разломов, развитых в пределах ЗТШ, глубинные характеристики разломов, морфология, их порядок и другие параметры со временем могут меняться. Только их простираение существенно не меняется. Это дало возможность предположить авторам работы [22], что сеть разломов заложена в период раннего протерозоя или раньше. Основанием для такого предположения явилось совпадение простираения разломов в различных регионах Азии (Урал, восточная окраина Русской платформы, Северный и Южный Тянь-Шань). В пределах ЗТШ сейсмическую активность проявляют в основном четыре направления регматической сети: северо-восточная, северо-западная, субширотная и субмеридиональная. Указанные направления, преимущественно, контролируют новейший структурный план региона и соответствуют основным параметрам современной геодинамики. На рис. 4 выделены основные активные структурно-контролирующие разломы, в зоне динамического влияния которых возникли все известные современные и исторические землетрясения (цифры черного цвета в кружочках). Цифрами красного цвета обозначены сильные землетрясения, кроме того, здесь выявлены палеосейсмодислокации – следы доисторических землетрясений с интенсивностью не менее 8 и 9 баллов (исследованные в полевых условиях, обозначены буквами алфавита синего цвета, выявленные по аэрокосмофотоматериалам треугольниками красного цвета). Показаны также РБНС 3-го ранга (обозначены буквами латинского алфавита).

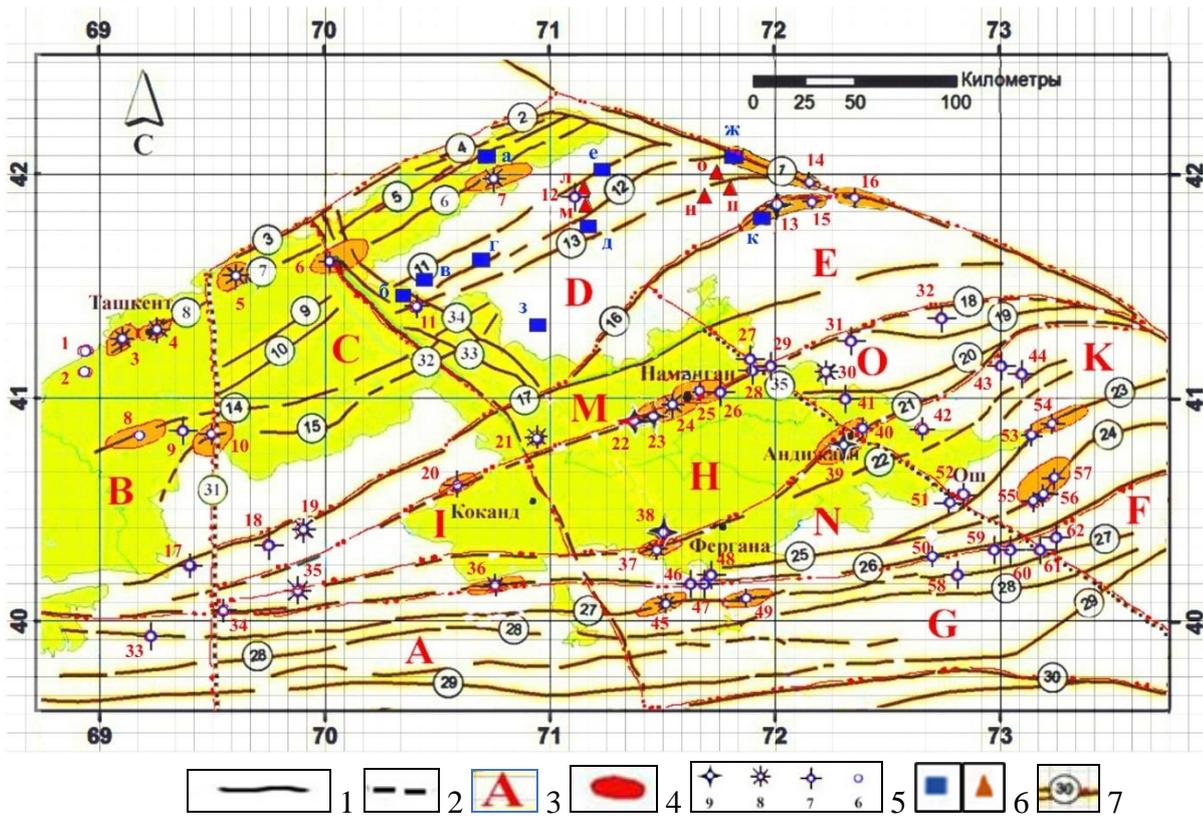


Рис. 4. Карта активных разломов, эпицентры сильных землетрясений, палеосейсмодислокации, по [3-5, 10-13, 15-17, 19, 21] и РБНС 3-го ранга. 1 – активные разломы земной коры (цифры в кружочках черного цвета); 2 – флексурно-разрывные зоны (ФРЗ); 3 – РБНС 3-го ранга; 4 – изосейсты

землетрясений; 5 – землетрясения и их интенсивность в баллах; 6 – палеосейсмодислокации: а – исследованные (буквы синего цвета), б – выявленные по космofотоматериалам (буквы красного цвета). 7 – активные разломы: 1 – Таласо-Ферганский, 2 – Аксу-Майдантальский, 3 – Богоналинский, 4 – Северо-Угамский, 5 – Угам-Майдантальский, 6 – Пскемский, 7 – Каржантауский, 8 – Приташкентская ФРЗ, 9 – Сюрэн-Атинский, 10 – Сукокский, 11 – Южно-Пскемский, 12 – Сандалашский, 13 – Чаткальский, 14 – Северо-Ангренский, 15 – Южно-Ангренский, 16 – Восточно-Чаткальский, 17 – Северо-Ферганский, 18 – Северо-Ферганская ФРЗ, 19 – Баубашаинский, 20 – Кучкаротинский, 21 – Южно-Ферганская ФРЗ, 22 – Кугартский, 23 – Талдысуйский, 24 – Куршабский, 25 – Карачатырский, 26 – Южно-Ферганский, 27 – Нуратау-Катранский, 28 – Каратау-Зарафшанский, 29 – Главный Гиссарский, 30 – Гиссаро-Кокшаальский, 31 – Пред-Чаткало-Кураминский, 32 – Кумбел-Коканд-Хайдарканский, 33 – Кенкольский, 34 – Арашанский, 35 – Восточно-Ферганская ФРЗ.

**Fig.4. Map of active faults, epicenters of strong earthquakes, paleoseismodislocations according to [3-5, 10-13, 15-17, 19, 21] and RBNS of the 3rd rank.** 1 – active faults of the Earth's crust (numbers in black circles; 2 – flexural rupture zones (FRZ); 3 – RBNS of the 3rd rank; 4 – earthquake isoseists; 5 – earthquakes and their intensity in points; 6 – paleoseismodislocations: a – investigated (letters of blue color), b – identified by space photos (letters of red color). 7 – active faults: 1 – Thalasso-Ferghana, 2 – Aksu-Maidantalsky, 3 – Bogonalinsky, 4 – Severo-Ugamsky, 5 – Ugam-Maidantalsky, 6 – Pskemsky, 7 – Karzhantau, 8 – Pritashkentzkaya FRZ, 9 – Suren-Ata, 10 – Sukoksky, 11 – Yuzhno-Pskemsky, 12 – Sandalashsky, 13 – Chatkalsky, 14 – Severo-Angrensky, 15 – Yuzhno-Angrensky, 16 – Vostochno-Chatkalsky, 17 – Severo-Fergana, 18 – Severo-Fergana FRZ, 19 – Baubashainsky, 20 – Kuchkarotinsky, 21 – Yuzhno-Fergana FRZ, 22 – Kugartsky, 23 – Taldysuysky, 24 – Kurshabsky, 25 – Karachatyrsky, 26 – Yuzhno-Ferghana, 27 – Nuratau-Katransky, 28 – Karatau-Zarafshansky, 29 – Glavny-Gissarsky, 30 – Gissaro-Kokshalsky, 31 – Pre-Chatkalo-Kuraminsky, 32 – Kumbel-Kokand-Khaidarkansky, 33 – Kenkolsky, 34 – Arashansky, 35 – East Ferghana FRZ.

**Северо-западная система активных разломов.** К данной системе относят Таласо-Ферганский, Кумбель-Коканд-Хайдарканский, Кенкольский, Арашанский активные разломы, а также Восточно-Ферганскую ФРЗ. Среди них самую заметную роль играет Таласо-Ферганский, который разграничивает Западный и Центральный Тянь-Шань с существенно разными неотектоническими режимами. Этот разлом постоянно привлекает внимание исследователей и является наиболее изученным и сравнительно полно освещенным в геологической литературе. Остальные разломы данной ориентации имели важное значение в новейший этап развития Чаткало-Кураминского блока. Имеются многочисленные следы их новейшей активизации, и они обеспечивают ступенчатое погружение Чаткало-Кураминского блока на юго-запад. Неотектоническая активность зон этих разломов подчеркивается в рельефе горной страны седловинами, линейными депрессиями и цепочками родников. Отметим, что по результатам геофизических работ, в частности, сейсморазведки ОГТ-2 и 3D, Кумбель-Коканд-Хайдарканский разлом пока не находит своего подтверждения [23]. Если коротко рассмотреть историю изучения данного разлома надо сослаться на О.М. Борисова, который впервые его выделил как поперечный глубинный разлом [24]. Далее Д.Х. Якубов, М.А. Ахмеджанов, О.М. Борисов описывали как Кумбель-Кокандский разлом [18]. Среди российских геологов данный разлом использовали в своих разработках [17, 25, 26]. Более детальный анализ неотектонических движений (рис. 5) свидетельствует о том, что данный разлом, по амплитудным характеристикам и рисунку изолиний, как и Восточно-Ферганский, функционировал при проявлении новейших тектонических движений.

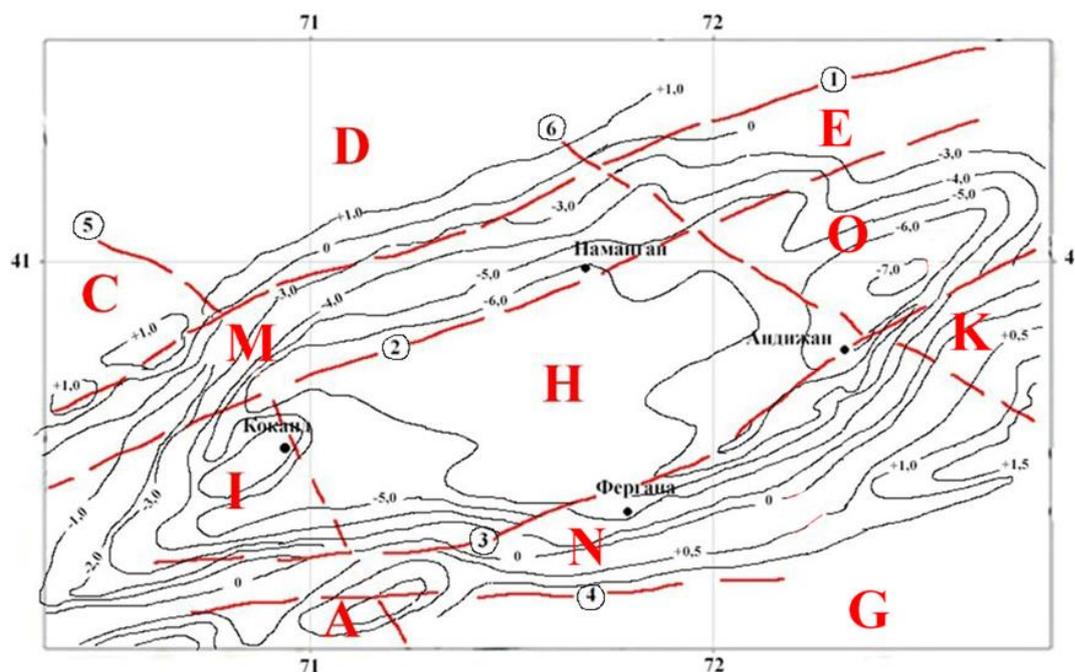


Рис. 5. Фрагмент карты амплитуды новейших тектонических движений (Троицкий и др., 2010), РБНС 3-го ранга и сейсмоактивные разломы: 1 – Северо-Ферганский; 2 – Северо-Ферганская ФРЗ; 3 – Южно-Ферганская ФРЗ; 4 – Южно-Ферганский; 5 – Кумбель-Коканд-Хайдарканский; 6 – Восточно-Ферганский.

Fig. 5. Fragment of the amplitude map of the latest tectonic movements (Troitskiy et al., 2010), RBNS of the 3rd rank and seismically active faults: 1 – North Ferghana; 2 – North Ferghana Federal Reserve; 3 – South Ferghana Federal Reserve; 4 – South Ferghana; 5 – Kumbel-Kokand-Khaidarkan; 6 – East Ferghana.

**Северо-восточная система активных разломов** составляет наиболее распространенную часть активных разломов. Среди них выделяются несколько активных разломов 2-го ранга, сыгравшие структурно-контролирующую роль в неотектонике Чаткало-Кураминской РБНС 2-го ранга: Восточно-Чаткальский (16), Северо-Ферганский (17), Аксу-Майдантальский (2) и Боганалинский (3).

**Субширотная система активных разломов:** к данной системе относится Гиссаро-Кокшаальский краевой активный разлом 1-го ранга (30), являющийся южной границей Южно-Тянь-Шаньской РБНС. Разлом функционировал в течение всего фанерозоя. Систему внутренних активных разломов 2 го ранга составляют (с севера на юг) – Южно-Ферганский (26), Нуратау-Катранский (27), Каратау-Зарафшанский (28) и Главный Гиссарский (29).

**Субмеридиональная система разломов** широко представлена во всех описанных РБНС серией коротких (10-20 км) разрывов, осложняющих внутреннее строение РБНС 3-го и 4-го рангов. Пред-Чаткало-Кураминская ФРЗ, наиболее протяженная, на карте амплитуд неотектонических движений выделяется по рисунку изолиний и амплитудным характеристикам и является зоной контакта юго-западных периклинальных окончаний Южно-Чаткало-Кураминской и Приташкентской РБНС 3-го ранга.

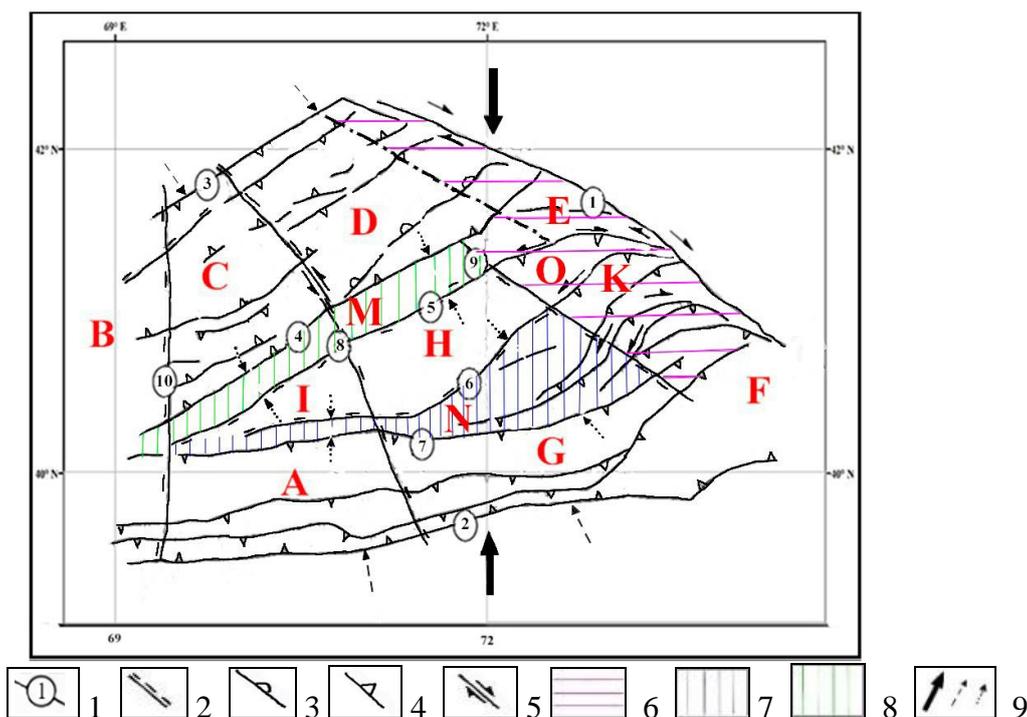
**Флексурно-разрывные зоны.** Располагаясь в контактных зонах РБНС 2-го и 3-го рангов, они представляют сложное сочетание изгибов и разрывных дислокаций. В большинстве ФРЗ возникали разрушительные землетрясения. На исследуемой территории выделены следующие ФРЗ – Пред-Чаткало-Кураминская, Приташкентская, Северо-Ферганская, Южно-Ферганская и Восточно-Ферганская.

Отметим, что имеется достаточное количество публикаций [3-5, 10-13, 15-17, 19, 21, 24-26], которые дают необходимые сведения о конкретных перечисленных на карте активных разломах.

**Морфокинематическая модель активных разломов.** Анализ морфокинематических характеристик активных разломов может дать общее представление о тектонических напряжениях, действовавших в неотектонический и современные этапы развития региона. Так как современные движения, в основном, наследуют неотектонический, то данный анализ необходим. В пределах ЗТШ действует субмеридиональное сжатие. Как можно видеть на рис. 6, в зоне динамического влияния Таласо-Ферганского сдвига, разломы, примыкающие с юго-запада, образуют полукруги, выпуклые на север. Для них характерен подворот с северо-восточной ориентацией на восток. Для этой территории напряжения сжатия имеют северо-западную ориентацию (на рис. 6 показаны горизонтальной штриховкой малинового цвета). В пределах остальных РБНС, кроме Ферганской РБНС, также действуют напряжения сжатия 2-го ранга в северо-западном направлении. Для Ферганской РБНС 2-го ранга, в ее восточной части, действуют напряжения растяжения. Для восточной части Южно-Тянь-Шаньской РБНС 2-ранга (зона динамического влияния Гиссаро-Кокшаальского разлома) напряжения северо-западного простирания, а для западной части напряжения сжатия имеют субмеридиональные простирания.

Судя по конфигурации активных разломов, выпуклых на север-запад, они в большей степени подвержены влиянию Таласо-Ферганского сдвига. В пределах Ферганской РБНС 2-го ранга наблюдается процесс современного трещинообразования, что свидетельствует о действии напряжений растяжения. Взаимодействие растягивающих напряжений в Ферганской РБНС 2-го ранга и сжимающих напряжений в Чаткало-Кураминской и Южно-Тянь-Шаньской РБНС 2-го ранга привело к формированию Северо-Ферганской (М) и Южно-Ферганской (N) РБНС 3-го ранга (на рис. 6 вертикальная штриховка зеленого и голубого цветов), выраженных в современном рельефе адырами.

Таким образом, РБНС представляют геолого-тектонически охарактеризованные территории, ограниченные активными разломами, на которых необходимо проведение комплекса детальных сеймотектонических и сейсмогеодинамических исследований, позволяющих улучшить качество и достоверность проводимых анализов.



**Рис. 6. Морфокинематическая модель активных разломов.** 1 – активные разломы. 1-го ранга: 1 – Таласо-Ферганский, 2 – Гиссаро-Кокшаальский; 2-го ранга: 3 – Аксу-Майдантал-Богоналинский; 4 – Северо-Ферганский; 5 – Южно-Ферганский; 6 – Северо-Ферганская ФРЗ; 7 – Южно-Ферганская ФРЗ; 8 – Кумбель-Коканд-Хайдарканский; 9 – Восточно-Ферганская ФРЗ; 10 – Пред-Чаткало-Кураминская ФРЗ; 2 – флексурно-разрывные зоны (ФРЗ); 3 – надвиг; 4 – взброс; 5 – сдвиг; 6 – зона динамического влияния Таласо-Ферганского сдвига; 7 – Южно-Ферганская

РБНС 3-го ранга; 8 – Северо-Ферганская РБНС 3-го ранга; 9 – векторы напряжений сжатия 1-го, 2-го и 3-го рангов.

**Fig. 6. Morphokinematic model of active faults.** 1 – active faults. 1st rank: 1 – Talaso-Ferghana; 2 – Gissaro-Kokshala; 2nd rank: 3 – Aksu-Maidantal-Bogonalskiy; 4 – North Ferghana; 5 – South Ferghana; 6 – North Ferghana FRZ; 7 – South Ferghana FRZ; 8 – Kumbel-Kokand-Haydarkansky; 9 – East Ferghana FRZ; 10 – In front of Chatkalo-Kuraminskaya FRZ; 2 – flexural-curved zones (FRZ); 3 – overshoot; 4 – overshoot; 5 – shift; 6 – zone of dynamic influence of the Talaso-Ferghana shift; 7 – South Ferghana RBNS of the 3rd rank; 8 – North Ferghana RBNS of the 3rd rank; 9 – compression stress vectors of the 1st-ranks 1, 2, and 3.

## ВЫВОДЫ

1. Выделены РБНС и активные разломы 2-го и 3-го ранга на основе амплитудных характеристик неотектонических движений и комплекса геолого-геофизических данных, что позволит проводить детальные сеймотектонические и сейсмогеодинамические исследования, повышающие достоверность долгосрочного прогноза землетрясений.

2. Сеть активных разломов образуют системы северо-восточного, северо-западного, субширотного и субмеридионального простираний.

3. Активные разломы 1-го и 2-го ранга являются структурно-контролирующими и разграничивают разнонаправленно развивающиеся РБНС 2-го и 3-го ранга.

4. Внутренние разломы, обладая не меньшей интенсивностью землетрясений, определяют дифференцированный характер движений внутри РБС.

5. ФРЗ, располагаясь в теле Приташкентской и Ферганской РБНС 2-го ранга, представляют сложное сочетание изгибовых и разрывных дислокаций. Сейсмическая активность ФРЗ подтверждается многочисленными сильными и разрушительными землетрясениями.

6. В зоне динамического влияния Таласо-Ферганского сдвига располагаются часть Северо-Чаткало-Кураминской РБНС 3-го ранга (D) и Атойнок-Ферганская РБНС 2-го ранга (Г). Для них характерны подвороты тектонических элементов РБНС северо-восточной ориентации на восток и слияние сейсмоактивных разломов с Таласо-Ферганским сдвигом.

7. Активное взаимодействие Ферганской и Чаткало-Кураминской РБНС 2-го ранга, с одной стороны, Южно-Тянь-Шаньской и Ферганской РБНС 2-го ранга – с другой, привело к формированию Северо-Ферганской (M) и Южно-Ферганской (N) РБНС 3-го ранга, которые в современном рельефе выражены адырами.

8. Кинематика неотектонических деформаций в Чаткало-Кураминской, Атойнок-Ферганской и Ферганской РБНС 2-го ранга связана с их противочасовым вращением и активностью Таласо-Ферганского сдвига. Следствием этих процессов является северо-восточное направление активных разломов для Чаткало-Кураминской и Атойнок-Ферганской РБНС 2-го ранга с дальнейшим поворотом и слиянием разломов с Таласо-Ферганским сдвигом. В пределах Южно-Тянь-Шаньской РБНС 2-го ранга основные разломы имеют субширотное простирание.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пейве А.В. Избранные труды. Глубинные разломы и их роль в строении и развитии земной коры. - М.: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. - 352 с.

2. Красный Л.И. Глобальная система геоблоков. - М.: Недра, 1984. - 224 с.

3. Борисов О.М., Зуннунов Ф.Х., Ахмеджанов М.А. Разломно-блоковое строение литосферы Средней Азии // Металлогенические проблемы в Средней Азии. - Т.: Фан, 1987. - С. 33-44.

4. Якубов Д.Х. Геотектонические условия возникновения сильных землетрясений Среднего и Южного Тянь-Шаня. - Т.: Фан, 1991. - 104 с.

5. Dan Peter McKenzie. Plate tectonics of the Mediterranean region // Geophys. «J.Roy.Astron.Soc.». - 1972. - № 30. - 109-130.

6. Сорохтин О.Г. и др. Динамика литосферных плит и происхождение месторождений нефти // Доклады АН СССР. - 1974. - 214. - № 6.

7. Зоненшайн Л.П и др. Глобальная тектоника, магматизм и металлогения. - М.: Недра, 1976. - 232 с.
8. Хаин В.Е. Общая геотектоника. - М.: Недра, 1973. - 511 с.
9. Mohadjer S., Bendick R., Ishuk F. et al. Partitioning of India-Eurasia convergence in the Pamir-Hindu Kush from GPS measurements // Geophys. Res. Lett. - 2010. - Vol. 37. - № L04305. - P. 1-6.
10. Атлас геологических карт Республики Узбекистан. Карта неотектоники / Под ред. Ш.Д. Давлятова, 2016.
11. Троицкий В.И., Садыков Ю.М., Денисов Р.И. К карте новейших тектонических движений Узбекистана // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. - Т., № 7. - Т. 2. - С. 241-244.
12. Атабеков И.У., Садыков Ю.М. Напряженное состояние земной коры Западного Тянь-Шаня в Центральной Азии (Узбекистан). Математическое моделирование // Геотектоника. - 2022. - № 3. - С. 50-65. DOI: 10.31857/S0016853X22030031.
13. Ситдиқов Б.Б. Новейшая тектоника Центральных Кызылкумов и Ферганского сегмента Западного Тянь-Шаня: Автореф. дисс... докт. геол.-мин. наук. - Новосибирск, 1982. - 36 с.
14. Абдрахматов К.Е. Тектонические движения позднего плейстоцена-голоцена территории Кыргызской республики. Автореф. дисс... докт. геол.-мин. наук. - Бишкек, 1995. - 35 с.
15. Абдрахматов К.Е., Аширов Б.М., Айтмырзаев Ж.С. Особенности новейшей тектоники Тянь-Шаня и Джунгарии // Вестник института сейсмологии НАН КР. - 2018. - №2 (12). - С. 8-14.
16. Бабаев А.М. Мирзабоев К.М. Сейсмогенные зоны Таджикистана // Сейсмоструктура некоторых районов юга СССР. - М.: Наука, 1976. - С. 105-118.
17. Пешкова И.Н. Возможная модель строения Ферганской межгорной впадины // Доклады РАН, 1997. - Т. 355. - № 2. - С. 230-234.
18. Якубов Д.Х., Ахмеджанов М.А., Борисов О.М. Региональные разломы Среднего и Южного Тянь-Шаня / Под ред. Г.А. Мавлянова. - Т.: Фан, 1976. - 146 с.
19. Современная геодинамика областей внутриконтинентального горообразования (Центральная Азия) / - М.: Научный мир, 2005. - 350 с.
20. Долгополов Ф.Г. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности региональных геодинамических структур Узбекистана на основе применения трехмерных физико-геологических моделей: Автореф. дисс... докт. геол.-мин. наук. - Т., 2005. - 42 с.
21. Атабеков И.У., Садыков Ю.М., Мамарахимов Ж.К. Многоярусная тектоника и математическое моделирование геодинамической обстановки формирования Ферганской депрессии // Геотектоника. - 2024. - № 1. - С. 88-98.
22. Мордвинцев Д.О. Геологическое строение докембрийских комплексов Ферганской впадины по геофизическим данным: Автореф. дисс... докт. геол.-мин. наук. - Т., 2020. - 41 с.
23. Урманов А.Х. Структурно-тектонические особенности и перспективы нефтегазоносности кайнозойских отложений Ферганской впадины: Автореф. дисс... докт. геол.-мин. наук. - Т., 2025. - 39 с.
24. Борисов О.М. О поперечном глубинном разломе Тянь-Шаня // Узб. геол. журн. - 1962. - № 2.
25. Суворов А.И. Тектоническое районирование Ферганской впадины по генетическим признакам. - М.: Ин-т геологии АН СССР, 1954. - Вып. 158.
26. Рыбин А.И. Тектоническое районирование Ферганской впадины по геофизическим данным // Узб. геол. журн. - 1959. - № 5.

### G'arbiy Tyan-Shanning neotektonik tuzilmalari (bloklari)

Yu. Sadiqov

**Annotatsiya.** G'arbiy Tyan-Shan yer qobig'ining. Yuqori qatlamlarida joylashgan, turli darajadagi yoriqlar bilan chegaralangan neotektonik bloklari zamonaviy kuchlanganlik xolatini yuzaga keltiruchi omillaridan biri sifatida qabul qilinadi. Neotektonik bloklar maydonlarida olib borilgan tadqiqotlar zilzillarni oldin boshoratlashni ishonchlik darajasini oshiradi.

**Kalit so'zlar:** neotektonika, yer yeriqlari bilan chegaralangan neotektonik bloklar. Faol yer yeriqlari.

### Fault-block neotectonic structures of the Western Tien Shan

Yu. Sadykov

**Annotation.** Fault-block neotectonic structures (FBNS) of different ranks in the Earth's crust of the Western Tien Shan, where tectonic stresses accumulate and their limiting faults determine the seismotectonic process in the region and are responsible for generating earthquakes. The neotectonically-based areas of the FBNS allow for detailed seismogeodynamic studies that increase the reliability of long-term earthquake forecasting.

**Key words:** neotectonics, fault-block neotectonic structures, active faults.

## MUHANDISLIK SEYSMOLOGIYASI

UO'K. 550.34:699.84

### GRUNTLARNING JAVOB SPEKTRLARI ASOSIDA SINTETIK AKSELEROGRAMMALAR YARATISH (Buxoro shahri misolida)

A.R. Rahmatov, J.Sh. Bozorov, E.M. Yadigarov, A.S. Xusomiddinov,  
N.M. Muhammadqulov, D. Jumayev, A.K. Qodirboyev

*O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi G'.O. Mavlonov nomidagi Seysmologiya instituti*

**Annotatsiya.** Maqolada qurilish maydonlarining seysmikligini baholashda bino-inshootlar uchun seysmik ta'sirni ifodalovchi gruntlarning javob spektrlari asosida sintetik akselerogrammalar ishlab chiqish bo'yicha tadqiqot ishlari natijalari keltirib o'tilgan. Shuningdek Buxoro shahri hududida olib borilgan ishlar natijasini tahlil qilib 50 yil ichida intensivligi ortib ketmaslik ehtimoli uchun 1:25 000 masshtabda cho'qqi tezlanish xaritasi ishlab chiqilgan.

**Kalit so'zlar:** javob spektri, sintetik akselerogramma, gruntlarning cho'qqi tezlanishi, mikrotremor, zilzila.

**Kirish.** So'ngi vaqtlarda kuchli zilzilalar oqibatlarida yuzaga keladigan talafotlarni kamaytirish hamda aholi va hududlarning seysmik xavfsizligini ta'minlash nihoyatda dolzarb muammolardan biri bo'lib kelmoqda. Seysmik faolligi yuqori bo'lgan davlatlarda bino va inshootlarni loyihalashda qurilish maydonlarining zilzila ta'siriga mustahkamligini tekshirishga imkonini beruvchi sintetik akselerogrammalardan foydalanish samarali hisoblanadi. Shuningdek, zilzila o'choq mexanizmlari xossalari, poydevor zamin grunt sharoitlarini va seysmik tebranish qonuniyatlarini hisobga olgan holda, zamonaviy texnologiyalar asosida sintetik akselerogrammalarni yaratish muhim ahamiyat kasb etadi. Shuningdek seysmik faolligi yuqori bo'lgan davlatlarda zamonaviy muhandislik dasturlari orqali yaratilgan sintetik akselerogrammalar yordamida bino va inshootlarning seysmik mustahkamligini baholash seysmik xavfsizlikni ta'minlash uchun zarur bo'lgan eng muhim bosqichlardan biridir. Ayniqsa, sintetik akselerogrammalardan foydalanish samaralidir, chunki ular real zilzila ta'sirlarini ifodalaydi va binoning seysmik ta'sirlarga qanday javob berishini baholash imkonini beradi. Shu bilan birga, mintaqaviy hududning geologik-tektonik va seysmik sharoitlaridan kelib chiqib, zamonoviy texnologiyalarni qo'llagan holda, sintetik akselerogrammalar yaratish dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda. Sintetik akselerogrammalarni qurilish-loyihalash ishlari amaliyotini keng joriy qilish bo'yicha hozirda dunyoning bir qator rivojlangan mamlakatlarida maqsadli ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilgan. Ushbu muammo bilan turli davrlarda Y. Nakamura, H.M. Murakami, F.F. Aptikayev, K. Rodjan, N.I. Frolova, O.O. Erteleva, V.I. Bagdanov, V.M. Grayzer va N.V. Shebalin, W.B. Joyner, D.M. Boore, K.W. Campbell, X. Kanai, N. Ambraseys, Allin Cornell, A.A. Tikhonov, Yu.A. Koval, N.A. Kostiuik, A.G. Egorov, T.U. Artikov, Yu.K. Chernov, V.Yu. Sokolov, A.X. Ibragimov, R.S. Ibragimov va V.A. Ismailov kabi olimlar tomonidan tadqiqot ishlari olib borilgan.

**Metodlar.** Gruntlarning javob spektrlari asosida sintetik akselerogrammalar yaratish. Javob spektrlari (reaksiya spektrlari) seysmik tasir uchun tezlanishlarni hisoblash nazariyasi va amaliyotida eng muhim, foydali va keng qo'llaniladigan tushunchalardan biridir. 1930 yillarda taklif qilingan ushbu konsepsiya hozirda deyarli barcha xorijiy me'yoriy hujjatlar va zilzilaga chidamlilikni hisoblash bo'yicha ko'rsatmalarda qo'llaniladi.

Rossiya federatsiyasining me'yorlarida «Spektral dinamiklik koeffitsiyenti» ( $\beta$ ) tushunchasi seysmik ta'sirlarni baholash uchun ishlatiladi, ularning egri chiziqlari osilatarning erkin tebranish davri funksiyalari sifatida qurilgan [1].

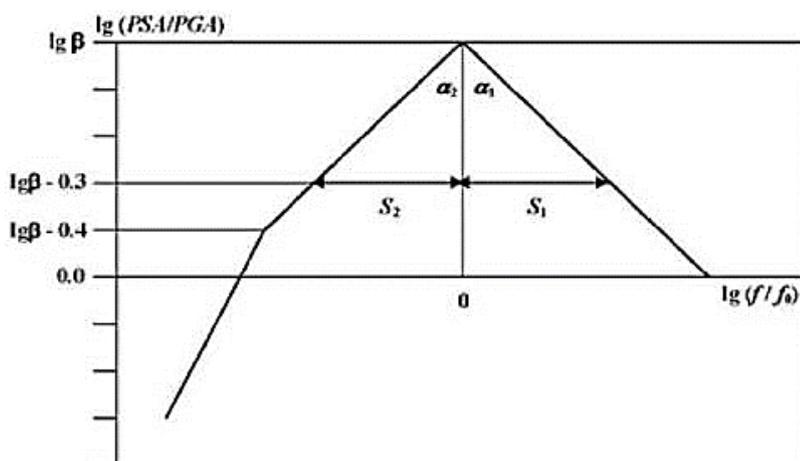
Javob (reaksiya) spektrlarini hisoblash muammolari batafsil o'rganilgan va samarali hisoblash algoritmlari mavjud. O'z navbatida, bu muammo bino va inshootlarni, xususan ayniqsa muhim obyektlarni loyihalash uchun belgilangan javob (reaksiya) spektrlaridan hisoblangan akselerogrammalarni sintez qilish uzoq vaqtdan beri mavjud. Afsuski, hozirgi vaqtda javob (reaksiya) spektrlaridan seysmik ta'sirlarni yaratish bo'yicha faqat umumiy tavsiyalar mavjud. Boshqa tomondan, F.F. Aptikayev ilmiy

asarlarida [2]. Javob (reaksiya) spektrining shaklini, shuningdek seysmik hodisa konvertining shaklini parametrlash uchun yetarli empirik formulalarga ega.

Shunday qilib, F.F. Aptikayev ilmiy natijalarida, berilgan tavsiyalarni va javob (reaksiya) spektrlarini raqamli hisoblash algoritmlarini birlashtirib, belgilangan reaksiya spektrlari asosida hisoblangan seysmik effektlarni sintez qilishga imkon beruvchi dastur yaratildi [3].

Javob (reaksiya) spektrining umumiy qabul qilingan shakli har bir chastotada spektral darajalarni o'rtacha hisoblash yo'li bilan olinadi. Biroq, parametrlash qoidalariga ko'ra, o'lchovsiz parametrni qurish uchun o'lchovli miqdorni (chastotani) ishlatish mutlaqo to'g'ri emas (shakli ta'rifi bo'yicha o'lchovsiz). Ushbu usul «O'rtacha» spektr darajasining pasayishiga va chastota diapazonining kengayishiga olib keladi.

Javob (reaksiya) spektrining shaklini va spektr parametrlari orasidagi ichki o'zaro bog'liqlikni baholash metodologiyasi da ko'rib chiqamiz. Quyidagi parametrlash tizimidan foydalanish tavsiya etiladi – spektrlar SA spektral darajasi bilan ham,  $f_0$  chastotasi bilan ham normallashadi (1-rasm). S birinchi va oxirgi qiymat spektr darajasi maksimal qiymatining yarmiga yetgan chastotalar o'rtasida o'lchangan  $S_1+S_2$  reaksiya spektrining logaritmik kengligi.



1-rasm. Reaksiya spektrini parametrlash sxemasi (F.F. Aptikayev, 2012 y.).

Fig. 1. Reaction spectrum parameterization scheme (F.F. Aptikayev, 2012).

$B$  – dinamik kuchaytirish koeffitsiyentining maksimal qiymati (o'lchovsiz birlik);

$f_0$  – tebranishlar chastotasi.

Seymik ta'sirning kuchliroq gorizontalkomponentning o'rtacha qiymati 3.2 deb qabul qilinadi. Spektrning o'rtacha shaklidan haqiqiy spektrga o'tish uchun kenglikni taxmin qilish kerak, kutilayotgan ustun davr va spektr darajasini ifodalaydi.

O'rtacha spektrining kengligi standart og'ish 0,20 birlik bo'lgan ikkita oktavadir.

$$S = 0,6 + C_1 + C_2 + 0,20,$$

bu yerda  $C_1 = -0,05$  siqilish uchun,  $0,0$  siljish uchun va  $0,05$  kengayish uchun; birinchi toifadagi gruntlar uchun  $C_2 = -0,1$ , ikkinchi toifadagi gruntlar uchun  $0,0$  va uchinchi toifadagi gruntlar uchun  $0,1$  ga teng [4, 5].

Hisoblangan seysmik ta'sirlarni sintez qilish algoritmi akselerogramma yaratish uchun qo'llaniladi. Dinamik kuchaytirgich spektriga mos keladigan akselerogrammalarni yozib olish mumkin.

$$a_{\beta}^0(t) = A(t) \sum_{i=1}^n B_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \tag{1}$$

$A(t)$  – amplituda,  $\phi$  – burchak fazasi,  $n$  – chastotalar miqdori(kolichestva),  $\omega$  – chastota.

$$B_{i,2} = B_{i,1} \frac{\beta(T)}{\beta_1(T)}, \quad (2)$$

$B$  – dinamik kuchaytirish koeffitsiyenti, bu yerda  $\beta_1(T)$ , bizning holatlarimizda, umumlashtirilgan dinamik daromad spektri va  $\beta_2(T)$  – bu birinchi takrorlash bosqichida olingan egri chiziq.

Asosiy akselerogrammadan hisoblangan ma'lumotga o'tish uchun birinchisining qiymatlari PGA ga ko'paytirilishi kerak. Konvertni qurish uchun empirik formuladan foydalanilgan [5]:

$$A_i(t) = A_{max} \left( \frac{3t\tau}{9t^2 - 9t\tau + 4\tau^2} \right), \quad (3)$$

bu yerda  $t$  – vaqt;  $\tau$  – asosiy dovomiylikning tebranish bosqichlari.

F.F. Aptikayevning fikriga ko'ra, bu tebranish konvertining amplitudasini maksimal darajadan 1/2 dan oshadigan vaqt oralig'i sifatida belgilanadi. Ushbu qiymatni aniqlash uchun biz formuladan foydalanamiz [3]:

$$\log \tau = 0.15M_s + 0.5 \log R + C_1 + C_2 - 1.3 \pm 0.3, \quad (4)$$

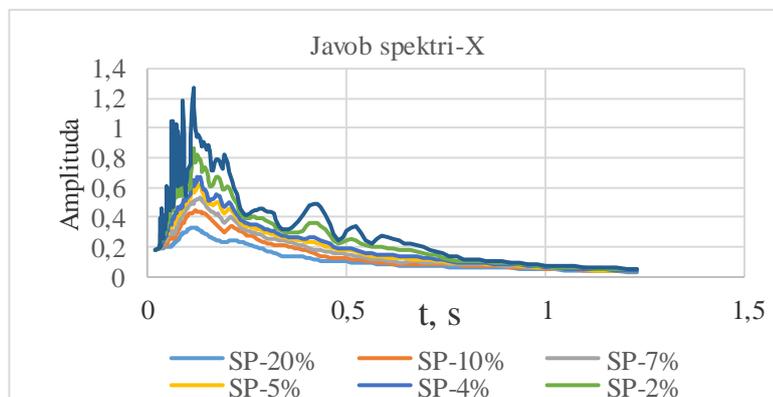
Zilzilalarning o'choq mexanizmidan sodir bo'ladigan harakatlar siqilish  $C_1 = 0,25$ , kengayish  $C_1 = 0,0$ , sirpanish  $C_1 = (-0,25)$  koeffitsiyentlari bilan belgilanadi va grunt tulariga bog'liq holda  $C_2 = 0,15$  birinchi toifa,  $0,00$  ikkinchi toifa va  $0,4$  uchunchi toifa gruntni ajratiladi.

Qurilishning loyihalash dasturlarida seysmik ta'sirni aniqroq baholash uchun uch komponentli akselerogrammalarni sintez qilish va ularning statistik mustaqilligini ta'minlash kerak. Ikki akselerogramma statistik jihatdan mustaqil hisoblanadi, agar korrelyatsiya koeffitsiyentining mutlaq qiymati  $0,3$  dan oshmasligi kerak.

Maksimal gorizontal tebranishning dinamik kuchaytirgich qiymati  $\beta_X(T) = 3,2$  [3]. Ikkinchi gorizontal va vertikal tebranishlar uchun dinamik  $\beta_Y(T) = 3$ ,  $\max \beta_Z(T) = 3$  teng. Maqsad spektridan 10% og'ishgacha ruxsat beriladi. PGA qiymatlari gorizontal komponentlar uchun bir xil, vertikal komponent uchun  $0,7$  teng bo'ladi.

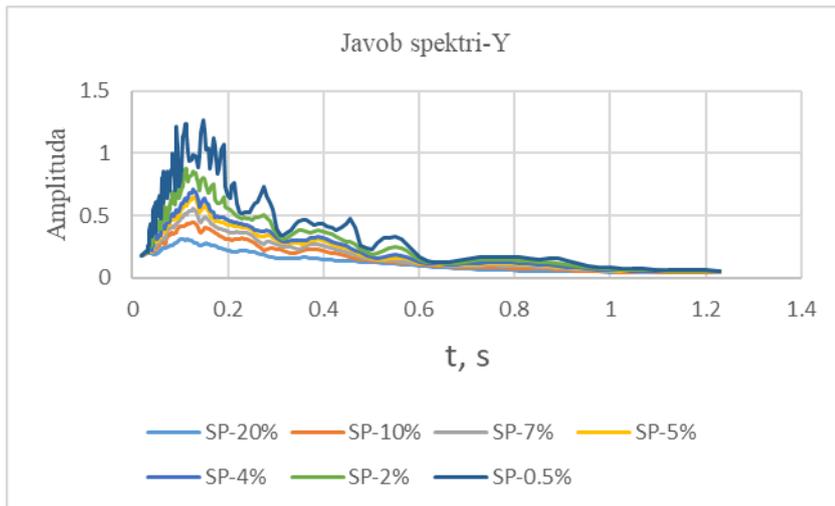
**Natijalar.** Gruntlarni javob spektrini hisoblashda grunt parametrlari hisobga olinadi ( $V_{s30}$ ) ta'sir kuchi seziladigan zilzila o'choqlaridagi sodir bo'ladigan jarayonlar hisobga olinadi. Gruntlarda to'lqinlarni sunish xususiyatlari va zilzila ta'sirida gruntni javob spektrlari yana bir qancha omillar hisoblab chiqiladi. Uch o'q bo'yicha zilzilalarning javob spektrlari (2, 3 va 4-rasm) keltirilgan bo'lib spektrlarni turli og'ish qiymatlar foizlarda berilgan.

Javob spektrlari asosida yaratilgan sintetik akselerogrammalar qurilish maydoni va o'choq orasidagi masofaga bog'liq holda tebranish davrining davomiyligi o'zgarib turadi. Javob spektrlariga asoslangan sintetik akselerogrammalar uch o'q bo'yicha gruntni dinamik kuchaytirgich koeffitsiyentlariga ko'paytiriladi. (5, 6 va 7-rasm) versiyasida amalga oshirildi.



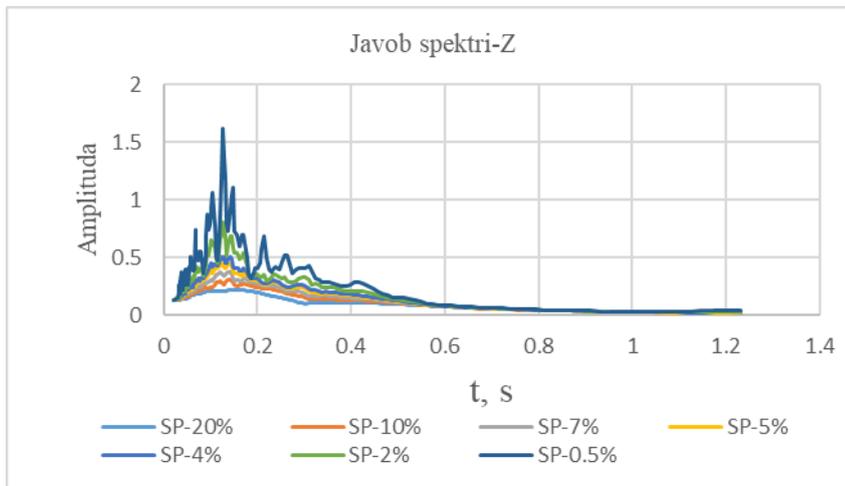
2-rasm. Grunt javob spektri (gorizontal X o'qi bo'yicha).

Fig. 2. Ground response spectrum (along the horizontal X axis).



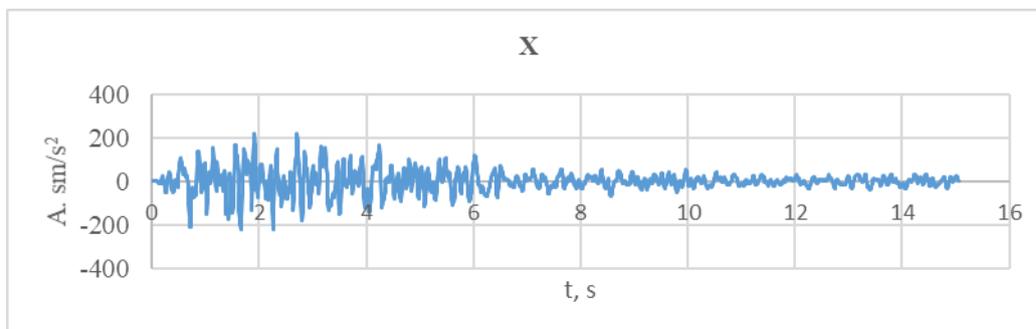
3-rasm. Grunt javob spektri (gorizontal Y o'qi bo'yicha).

Fig. 3. Ground response spectrum (horizontal Y axis).



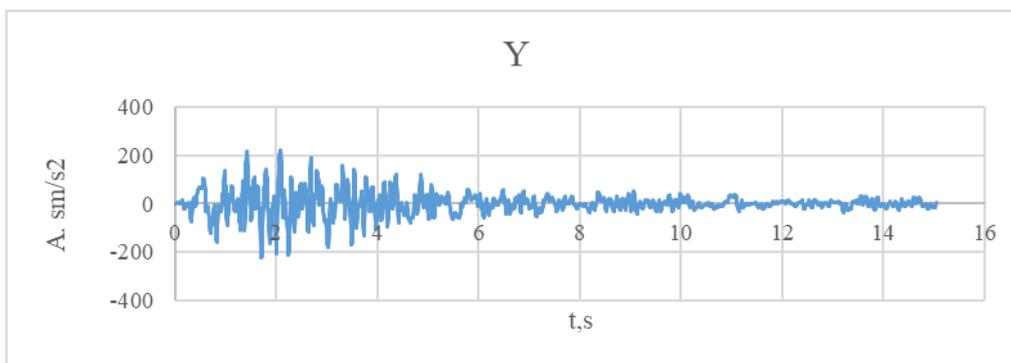
4-rasm. Grunt javob spektri (gorizontal Z o'qi bo'yicha).

Fig. 4. Ground response spectrum (along the horizontal Z axis).



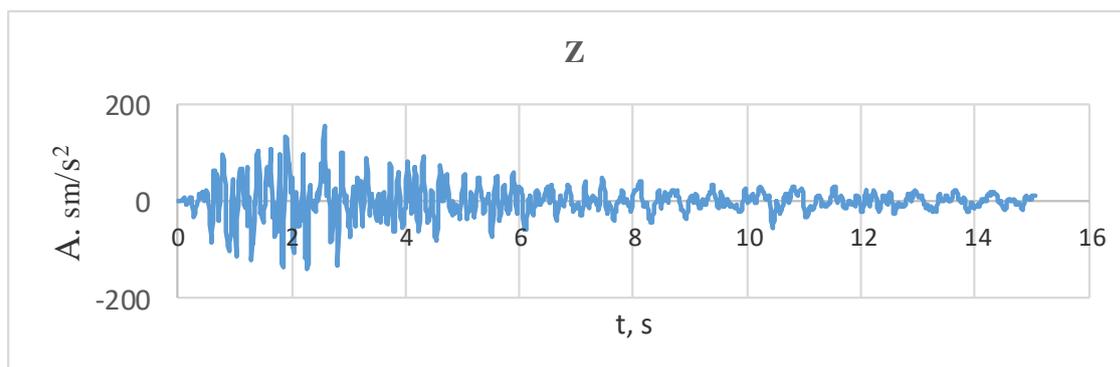
5-rasm. Grunt javob spektri asosida yaratilgan sintetik akselerogramma (gorizontal X o'qi bo'yicha).

Fig. 5. Synthetic accelerogram generated based on the ground response spectrum (along the horizontal X-axis).



6-rasm. Grunt javob spektri asosida yaratilgan sintetik akselerogramma (gorizontal Y o'qi bo'yicha).

Fig. 6. Synthetic accelerogram generated based on the ground response spectrum (along the horizontal Y axis).



7-rasm. Grunt javob spektri asosida yaratilgan sintetik akselerogramma (gorizontal Z o'qi bo'yicha).

Fig. 7. Synthetic accelerogram generated based on the ground response spectrum (along the horizontal Z axis).

Tadqiqot ob'yehti sifatida mintaqamizdagi yirik shaharlardan bir bo'lgan Buxoro shahri hududi tanlangan. Seysmik xafni baholash uchun hududni 1:25 000 mashtabdagi cho'qqi tezlanish xaritasi ishlab chiqildi. Hududning seysmikligini baholash uchun ma'lum bir davrda (50 yil mobaynida) o'ziga xos intensivlikdan oshib ketish ehtimoliga e'tibor qaratiladi. Buxoro mintaqasidagi turli kuzatuv ob'yektlarida yer harakati darajasini baholash uchun ehtimollik yondashuvidan foydalanildi (Kornell (1968), M.Guire (2004) ilmiy ishlariga asoslanildi). Har bir manba o'zining geometrik xususiyatlari o'lchami, joylashuvi va yo'nalishi undagi zilzilalarni qaytarilish xossalari (masalan, maksimal magnitudasi, Gutenberg-Rixter parametrlari –  $a$ ,  $b$ ) bilan tavsiflanadi. Geometrik xususiyatlar zilzila qaydlari, geologik va tektonik ma'lumotlardan olinadi. Zilzilalarning qaytarilish xususiyatlari esa zilzilalarning keng qamrovli katalogi yordamida o'tmishdagi seysmiklikdan baholanadi.

Buxoro shahri hududida tarqalgan gruntlarning seysmik holatini baholash uchun mikrotremor usuli yordamida 50 dan ortiq o'lchov ishlari olib borildi. Olib borilgan o'lchov ma'lumotlari bo'yicha gruntlarda chuqurlik bo'yicha to'lqinlarning tarqalish teligi hisoblandi. Hududda joylashgan har bir o'lchov nuqtasi uchun ko'ndalang to'lqin tezligi ( $V_{s30}$ ), «Evrokod-8» (CEN 2004) tasnifi bo'yicha, hisobga olingan va shunga asoslanib hisoblashlar amalga oshirilgan. Ushbu tadqiqot uchun o'tkazilgan tahlillar «OpenQuake» dasturining 3.19 versiyasi orqali amalga oshirilgan.

Zilzilalar vaqt va sodir bo‘lish joyi bo‘yicha bir xilda sodir bo‘lishi taxmin qilinadigan bir nechta hududlarga tadqiqot maydonini diskretlashtirish taqsimlangan seysmiklik yondashuvining asosini tashkil qiladi. Ushbu yondashuv zilzilalarning butun hududda sodir bo‘lish ehtimoli teng ekanligini nazarda tutadi. Alohida zonalarga bo‘linish analitik hodisalar modelini kalibrlash uchun ham zarurdir. Chunki, model parametrlarini ( $M_{max}$ , a, b) ishonchli tarzda cheklash uchun har bir hududda statistik jihatdan ahamiyatli hodisalar soni talab qilinadi.

Qo‘llanilgan seysmik manba modeli taqsimlangan seysmiklikka asoslangan bir hil maydon manbasi modellarining ikkita muqobil usullari birlashtiradi, biri mahalliy ishlardan (T. Artikov, R. Ibragimov, T. Ibragimova va boshqalar, 2020), ikkinchisi esa EMCA (Ullah va boshqalar, 2015) ilmiy tadqiqodlaridan [7-10].

Gruntlarning so‘nish qonuniyati, GEM Foundation ilmiy tadqiqodlarida (2021) berilgan tanlov mezonlaridan so‘ng va «OpenQuake The HazardLib» ning (Ground motion) modeli ilmiy ishlari GMPE mavjudligi, shuningdek, xalqaro ekspertlar tavsiyalari (masalan, Poggi va boshqalar, 2022) hisobga olingan holda, uchta jadvalda ko‘rsatilganidek, o‘rganilayotgan hudud uchun modellar tanlandi.

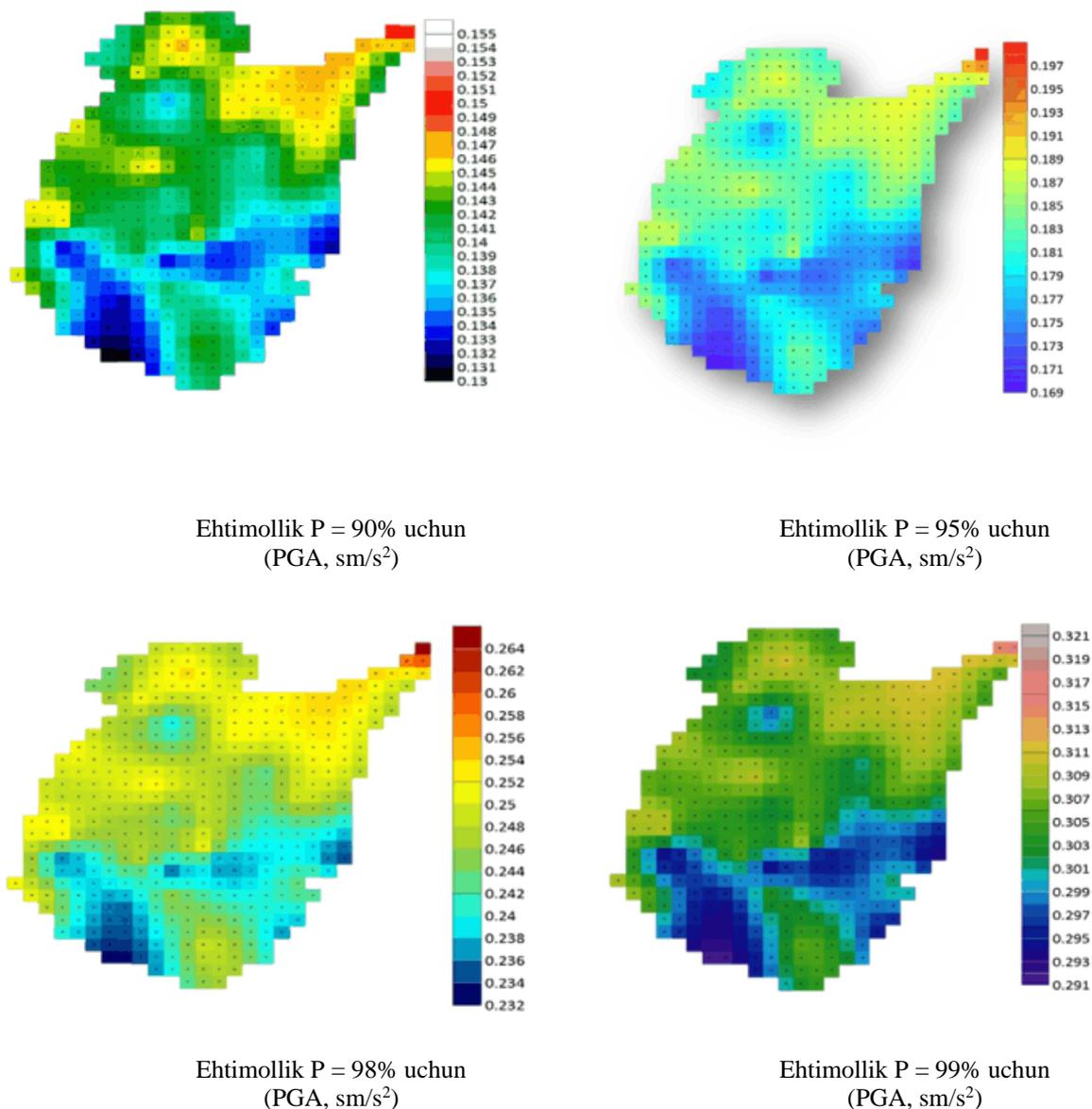
**Gruntlarning so‘nish qonuniyati bo‘yicha modellar**

| Authors (publication year)                  | Magnitude range (Mw) | Database and applicability                                 | Weightage in the logic tree |
|---|----------------------|--|-----------------------------|
| Campbell and Bozorgnia (2014)               | 3,3-8,5              | PEER NGA-West 2, «Active shallow crust»                    | 0,5                         |
| Chiou and Youngs (2014)                     | 3-8                  | PEER NGA-West 2, «Active shallow crust»                    | 0,5                         |
| Atkinson and Boore (2006) – Modified (2011) | 4-8,5                | PEERNGA West 2, NGA–East «Stable Continental Region (SCR)» | 1                           |

Shunisi e‘tiborga loyiqki, gruntlarda to‘lqinlarni harakati qonuniyati modellari odatda ma‘lum tektonik mintaqaga uchun (masalan, subduksiya zonalari, kontinental qobiq va faol tektonik mintaqalar) ishlab chiqilgan. Ushbu tadqiqotda «Faol va sayoz qobiq» uchun ikkita teng og‘irlikdagi GMPE (Kampbell va Bozorgnia, 2014; Chiou va Youngs, 2014) va «Barqaror kontinental qobiq» uchun bitta GMPE (Atkinson va Boore, 2011) tanlab olingan.

Buxoro shahri hududida olib borilgan ishlar natijasini tahlil qilib 50 yil ichida intensivligi ortib ketmaslik ehtimoli uchun 1:25 000 masshtabda cho‘qqi tezlanish xaritasi ishlab chiqildi. Ishlab chiqilgan xaritaga asoslanib 500 m ga 500 m lik yacheykalarga ajratib olindi, har bir yacheyka uchun real zilzila o‘rta spektriga asoslangan sintetik akselerogrammalar bazasi ishlab chiqildi (8-rasm). Sintetik akselerogrammar tebranish davomiyligi 20 sekundni tashkil qiladi, yaratilgan akselerogrammar bazasi xalqaro talablarga mos keladi.

**Tahlil.** Buxoro shahri hududini yacheykalarga ajratishdan maqsad qurilish loyihalash ishlari uchun seysmik xafni oldindan baholash maqsadida ishlab chiqildi. Sodir bo‘lishi mumkin bo‘lgan zilzilalarning maksimal ta‘sirini hisobga olindi va yacheykalarni yirik mashtablarga ajratilganligi aniqlikni yanada oshiradi. Kelajakda loyihalalayotgan qurilish ishlari uchun birmuncha qulayliklar yaratadi. Ishlab chiqilgan 500 m ga 500 m li yacheyka hududida bino-inshoat loyihalansa 50 yil maksimal ehtimolligi uchun yaratilgan bazadan foydalanishu mumkin bo‘ladi.



8-rasm. Buxoro shahri hududining turli xil grunt sharoitlarini hisobga olib yacheykalarga ajratilgan va o'рта spektrga asoslanib yaratilgan sintetik akselerogrammalar bazasi.

Fig. 8. Synthetic accelerogram database created based on the average spectrum, divided into cells taking into account different soil conditions in the Bukhara city area.

## XULOSA

Mikrotremor usuli yordamida shahar hududlari uchun ko'ndalang seysmik to'liqlarning chuqurlik bo'yicha tezliklarining tarqalishi aniqlangan va 2D modellari ishlab chiqilgan. Aniqlangan tezliklar hududlarning geologik-litologik ma'lumotlari bilan birgalikda tahlil qilingan.

Buxoro shahri hududi 500 × 500 m o'lchamga ega bo'lgan yacheykalarga ajratildi va har bir yacheykalar uchun real zilzilalarning o'рта spektriga asoslangan sintetik akselerogrammalar bazasi ishlab chiqildi. Yaratilgan ishlanma qurilish-loyihalash tashkilotlariga foydalanish uchun taqdim qilingan.

## ADABIYOTLAR

1. *Ambraseys N.N., Douglas J., Sarma S.K., Smit P.* Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration // *Bulletin of Earthquake Engineering.* - 2005. - № 3 (1). - P. 1-53.
2. РБ-06–98 «Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ». - М., 2000. - 77 с.
3. *Алтикаев Ф.Ф.* Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. - М.: Наука и образование, 2012. - 176 с.
4. *Курбацкий Е.Н., Баев Л.В.* Спектры максимальных реакций (откликов) конструкций на сейсмические и техногенные динамические воздействия. - М., 2013, 93 с.
5. *Newmark N.M.* A method of computation for structural dynamics // *Journal of Engineering Mechanics, ASCE,* 1959. - Vol. 85 (EM3). - P. 67-94.
6. *Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Зияудинов Ф.Ф.* Сейсмическая опасность территории Узбекистана. - Т., 2012. - 254 с.
7. *Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А.* Связь между периодами сейсмической активизации в различных сейсмоактивных зонах как фактор геологического риска // *Мат-лы 9-й Междунар. науч.-практ. конф.* - 2015. - Т. 2. - С. 27-31.
8. *Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Кучкаров К.И., Мирзаев М.А.* Количественные характеристики сейсмической опасности территории Узбекистана в максимальных значениях скоростей колебаний грунта и в их спектральных амплитудах // *Геодинамика и тектонофизика.* - 2018. - 9(4). - P. 1173-1188. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0389>.
9. *Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A.* Study of modern seismic zoning maps accuracy (case for Eastern Uzbekistan) // *Geodesy and Geodynamics.* - 2016. - Vol. 7. - № 6. - P. 416-424. DOI: 10.1016/J.GEOG.2016.04.015.13.
10. *Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А.* Комплекс карт общего сейсмического районирования территории Узбекистана ОСР-2017 // *Сб. докл. «Геофизические методы решения актуальных проблем современной сейсмологии» Междунар. науч. конф. 15-16 октября 2018 г.* - Т. - С. 17-21.

### Создание синтетических акселерограмм на основе спектров реакций грунтов (на примере города Бухары)

**А.Р. Рахматов, Ж.Ш. Бозоров, Э.М. Ядигаров, А.С. Хусомиддинов, Н.М. Мухаммадқулов, Д. Жумасев, А.К. Кодирбоев**

**Аннотация.** Представлены результаты исследовательских работ по разработке синтетических акселерограмм на основе спектров реакций грунтов, представляющих сейсмический эффект для зданий и сооружений при оценке сейсмичности строительных площадок. Также на основе анализа результатов работ, проведенных на территории города Бухары, разработана карта пикового ускорения в масштабе 1:25 000.

**Ключевые слова:** спектр реакции, синтетическая акселерограмма, пиковое ускорение, микротремор, землетрясение.

### Creation of synthetic accelerograms based on the spectra of soil reactions (using the example of the city of Bukhara)

**A.R. Rahmatov, J.Sh. Bozorov, E.M. Yadigarov, A.S. Xusomiddinov, N.M. Muhammadqulov, D. Jumayev, A.K. Qodirboyev**

**Abstract.** The article presents the results of research on the development of synthetic accelerograms based on the spectra of soil reactions, representing a seismic effect for buildings and structures when assessing the seismicity of construction sites. Also, based on the analysis of the results of the work carried out on the territory of the city of Bukhara, a map of peak acceleration on a scale of 1:25 000 was developed.

**Key words:** reaction spectrum, synthetic accelerogram, peak acceleration, microtremor, earthquake.

## NOYOB OBEKTLAR UCHUN LOKAL SEYSMIK KUZATUV TIZIMINING MAGNITUDA SEZISH IMKONIYATI

**E.Sh. Yuldashev, X.A. Islamov**

*O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi G'.O.Mavlonov nomidagi Seysmologiya instituti*

**Annotasiya.** Maqolada Jizzax viloyati Forish tumanida barpo etilayotgan Hidro elektro stansiyasi hududida olib borilgan seysmik kuzatuvlar, mikroseysmik o'lchovlar keltiriladi. Seysmik kuzatuvdan olingan ma'lumotlarni taxlil qilishda aniqlikni to'g'ri baholovchi dasturlardan foydalanilgan. Shimoliy Nurota seysmogen zonasida hozirgi kunda qanday jarayonlar ketayotganligi haqida ma'lumot keltirilgan.

**Kalit so'zlar:** seysmik kuzatuv, mikroseysmik analiz, seysmogen zonasi.

**Kirish.** Bugungi kunda Respublikamizda energiya resurslari ta'minoti muammolarini hal qilish uchun boshlangan «yashil» energetika hamda IES, GAES, GES, AES energetikasini rivojlantirish masalasi O'zbekiston uchun har qachongidan ham dolzarbligi xammamizga ma'lum. Strategik ob'ektlardagi xavfsizlikni ta'minlash bo'yicha amalga oshirilishi zarur bo'lgan masalalardan biri seysmik kuzatuv monitoringi xisoblanadi.

Seysmik faol bo'lgan hududlarda bunday inshootlar qurish uchun, eng avvalo muhandis geologik va muhandis geofizik tadqiqotlardan so'ng zarur bo'lgan vazifalardan biri bu seysmologik o'lchovlar va seysmik kuzatuvlar bo'lib, buning natijasida bino loyixasini tayyorlashda uning seysmobardoshlik darajasini oshirish bino hududi grunt zichligi va tebranish xususiyatlari xisobini olishni talab etadi, hamda doimiy lokal seymik kuzatuvlar tarmog'i yordamida seysmik faollikni nazorat qilib boriladi.

Seysmik kuzatuv monitoringi energiya ob'ektlarining xavfsiz ishlashini ta'minlashda asosiy omillardan biridir. Mamlakatimizda seysmik faollik yuqori bo'lgan hududlarda, ayniqsa, GES, AES va boshqa yirik sanoat ob'ektlarini qurishdan oldin, muhandislik geologik va geofizik tadqiqotlar amalga oshiriladi. Bu tadqiqotlar natijasida olingan ma'lumotlarga asoslanib, bino loyihalari va infratuzilma qurilishlari seysmobardoshlik darajasini oshirishga yo'naltiriladi.

Bino qurilishining seysmobardoshlik darajasini oshirish uchun, quyidagi omillar hisobga olindi. Hududning geologik tuzilishi, qurilish joyidagi grunt zichligi va tebranish xususiyatlari o'rganiladi. Seysmik xavfsizlik, hududda zilzilalarning kuchi, tebranishlarning intensivligi va boshqalar aniqlanadi. Tebranish xususiyatlari, o'rnatilgan qurilish materiallari va strukturalarining tebranishlarga chidamliligi o'rganiladi.

Hududlarda seysmik stansiyalar tarmog'ini joylashtirish va kuzatuvlar o'tkazish uchun zarur bo'lgan ishlar:

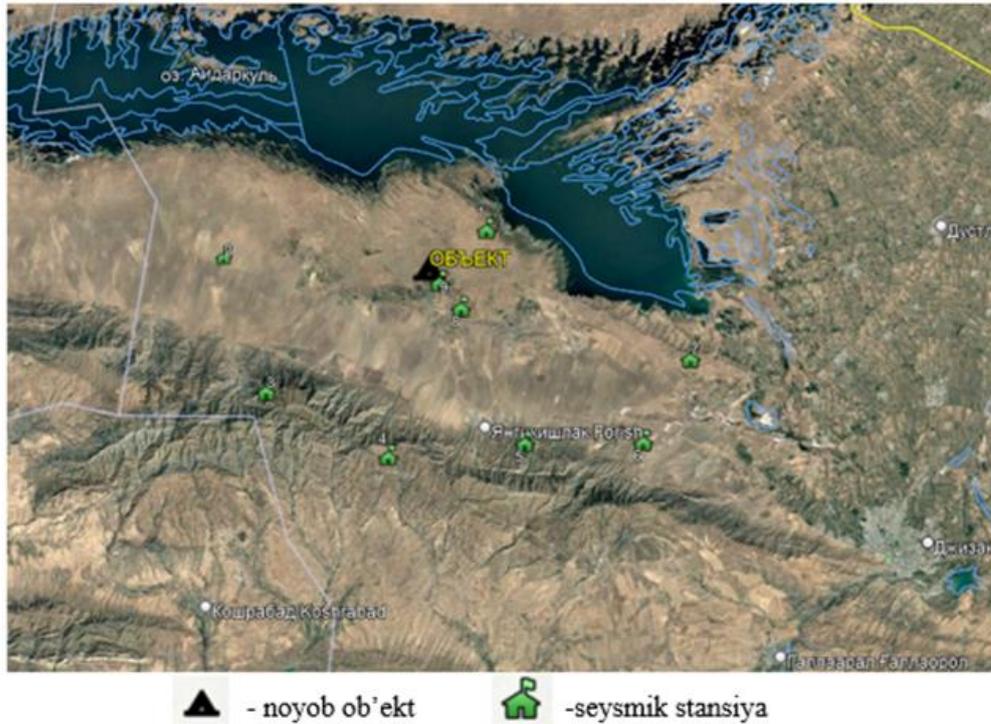
- zilzilalardan tashqari seysmik kuzatuvlarga qo'shimcha ta'sir etuvchi mahalliy, texnogen va sun'iy shovqinlar manbaini aniqlash va ulardan uzoqlashish;
- mahalliy seysmo-geologik sharoitlarni o'rganish hamda seysmik shovqinlar darajasini o'lchash;
- internet aloqa tizimi imkoniyatlarini tekshirish [1, 3].

Lokal seysmik kuzatuv tizimlari muayyan hududdagi (suv omborlari, sanoat konlari, GES, AES yoki sanoat ob'ekti atrofi) seysmik faollikni aniq va xavfsizligiga ta'sir etuvchi tebranishlar xolatini baholash uchun mo'ljallangan yuqori aniqlikdagi tizimlardir (1-rasm).

**Metodologiya.** Tadqiqot «Instrumental seysmologiya va seysmometriya» laboratoriyasi tomonidan belgilangan noyob inshoot hududi va atrofida doimiy seysmik kuzatuv tarmog'i orqali monitoring qilish hamda bir necha yillik ma'lumotlar orqali seysmik rejimni baholashdan iborat. Hudud atrofida 9 ta punktga o'rnatilgan seysmik stansiyalar yordamida besh yil mobaynida seysmik monitoring kuzatuv ishlari olib borilmoqda. Yozib olingan seysmik ma'lumotlar tahlil qilinishi natijasida yillik ma'lumotlar bazasi shakillantirilgan.

Seysmik kuzatuv tarmog'i tadqiqot hududi bo'ylab joylashgan nuqtalarda seysmik intensivlikning oshishiga aniqlik kiritish maqsadida, 10 ta seysmik stansiyadan tayanch qilib Stansiya № 9 tanlab olindi.

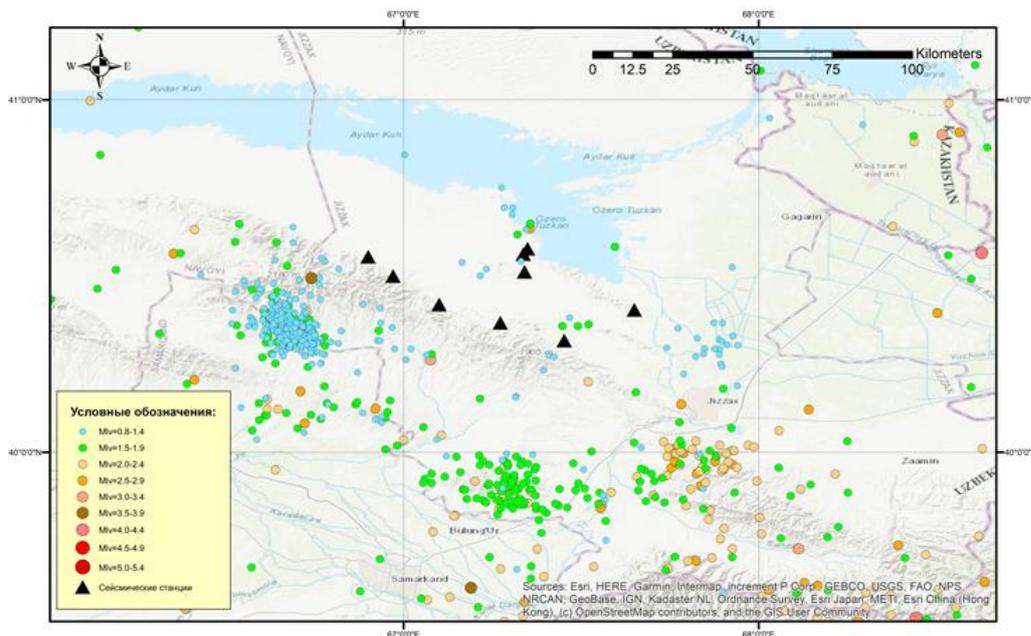
Seysmik monitoring tadqiqotlari zamonaviy keng qamrovli velosimetr Guralp 6TD, Guralp 40TDE va akseleromert Fortumus, Guralp 5TDE raqamli seysmometrlari yordamida amalga oshirildi.



1-rasm. Noyob ob'ekt hududi va atrofiga o'rnatilgan seysmik stansiyalar.

Fig. 1. Seismic stations installed inside and around a unique object.

**Tadqiqotlar va ularning tahlili.** 2023 yil davomida tadqiqot hududi va atrofida keng qamrovli raqamli seysmometrlar yordamida olib borilgan tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki: O'rnatilgan seysmik stansiyalardan 300 km radiusda 4500 ga yaqin ( $0,8 \leq M \leq 5,3$ ) bo'lgan zilzilalarni qayd etdi; ulardan Janubiy Farg'ona va Shimoliy Nurota seysmogen zonasida chuqurligi 5-36 km, magnitudasi ( $4 \leq M \leq 5,3$ ) bo'lgan 50 ga yaqin zilzilalar sodir bo'lganligi aniqlandi (2-rasm).



2-rasm. Tadqiqot hududi atrofida sodir bo'lgan zilzilalar xaritasi.

Fig. 2. Map of earthquakes that occurred around the study area.

Seysmik ta'sirlar intensivligining o'zgarishi zilzila ma'lumotlari bo'yicha hisoblanadi. Ushbu seysmik ta'sirlar o'zgarishi quyidagi formula bilan amalga oshiriladi:

$$\Delta I = 3.3 \times \log \frac{A_i}{A_n}$$

bu erda  $A_i$  – o'rganilayotgan nuqtadagi signalning amplituda miqdori,  $A_n$  – tayanch nuqtadagi signalning amplituda miqdori [2, 7].

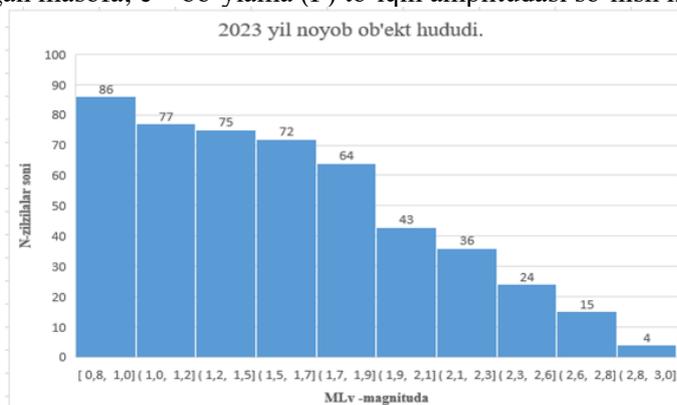
Quyidagi jadvalda 2024 yilda tadqiqot hududga nisbatan 320 km gacha uzoqlikda bo'lib o'tgan magnitudasi ( $4 \leq M \leq 5,2$ ) zilzilalardan 15 ta zilzila xodisasi ma'lumotlar taxliliga ko'ra ularni noyob ob'ektga ta'siri (ball) da va amplitudasi yuqori bo'lgan seysmik xodisalar keltirilgan:

| Punkt               | Zilzila giposentri |       | Stansiya № 1                          |                            |
|---------------------|--------------------|-------|---------------------------------------|----------------------------|
|                     |                    |       | 4273                                  |                            |
| sana, vaqt          | magnituda          | H, km | epitsentrdan stansiyagacha masofa, km | stansiyada sezilish I-ball |
| 08.01.2024 12:06:32 | 4,1                | 15    | 280,44                                | 1,50                       |
| 13.03.2024 21:07:06 | 4,7                | 36    | 336,33                                | 2,16                       |
| 18.03.2024 11:59:45 | 4,2                | 36    | 345,60                                | 1,52                       |
| 22.03.2024 09:01:20 | 4,2                | 5     | 309,53                                | 1,52                       |
| 26.03.2024 09:53:30 | 4,1                | 5     | 313,40                                | 1,35                       |
| 25.03.2024 17:20:13 | 4,7                | 36    | 308,07                                | 2,27                       |
| 12.04.2024 10:17:59 | 4,4                | 5     | 337,34                                | 1,71                       |
| 14.04.2024 21:28:39 | 4,5                | 15    | 309,26                                | 1,97                       |
| 10.06.2024 02:52:24 | 4,5                | 20    | 336,43                                | 1,86                       |
| 10.06.2024 02:54:33 | 4,3                | 36    | 326,48                                | 1,59                       |
| 10.06.2024 03:14:53 | 5,2                | 20    | 344,67                                | 2,88                       |
| 10.08.2024 23:56:22 | 4,2                | 10    | 252,85                                | 3,27                       |
| 25.08.2024 05:09:22 | 4,7                | 36    | 346,47                                | 2,87                       |
| 02.09.2024 17:36:15 | 4,5                | 5     | 275,89                                | 2,12                       |
| 09.12.2024 03:24:09 | 4,4                | 15    | 109,32                                | 3,29                       |

Mirkoseysmik shovqin darajasini baholash asosida stansiyalar qayd qilgan zilzilalar magnitudasi sezish imkoniyati ushbu formula orqali baholanadi.

$$M_{min} = lgA_{min} + 1.2 * lgR + c.$$

R – episentrgacha bo'lgan masofa; c – bo'ylama (P) to'lqin amplitudasi so'nish koeffitsiyenti [2, 4].



3-rasm. Tadqiqot hududi atrofida sodir bo'lgan zilzila magnitudalar diagrammasi.

Fig. 3. Earthquake magnitude diagram around the study area.

## XULOSA

Ushbu maqola fundamental mavzu doirasida olib borilgan tadqiqotlar asosida, noyob ob'ekt uchun o'rnatilgan seysmik stansiyalar tomonidan qayd qilingan seysmik hodisalar tahlili natijasida quyidagilar aniqlandi:

Tadqiqot ob'ektidan 250-340 km masofada sodir bo'lgan magnitudasi ( $4 \leq M \leq 4,6$ ) zilzilalar 2 ball bo'lib ta'sir etishi. 100-250 km da sodir bo'lgan magnitudasi ( $4 \leq M \leq 5,2$ ) zilzilalar 3 ball bilan ta'sir etishini ko'rishimiz mumkin.

Xalal beruvchi omillardan xoli qattiqligi yuqori bo'lgan tog' jinslariga o'rnatilgan seysmomertlar oralig'i xar 6-8 km da bo'lganligi bois biz kichik magnitudali ya'ni ( $0,8 \leq M \leq 3$ ) zilzilalarni qayd qilish imkoniyati oshirildi.

Kuzatuv ob'ektga janubi-sharq tomondan ko'p zilzilalar ta'sir etib turishi aniqlandi.

## ADABIYOTLAR

1. Borman P., Baumbach M., Bock G., Gresser 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. 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.

5. Горшков Г.А. Нормативный хаос в Российском микрорайонировании. - Геоинфо.ру, 2017.

6. Турдукулов А.Т., Камчыбеков М.П., Егембердиева К.А., Камчыбеков И.П. Теоретические основы сейсмического микрорайонирования на примере проведенных работ в Кыргызстане. - 2013. - № 2 (2).

7. Yuldashev E.Sh. Suv omborlarida uzluksiz seysmik kuzatuv olib borishning zamonaviy usullari. - 2021.

### Possibility of determining the magnitude of a local seismic observation system for unique objects

E.Sh. Yuldashev, H.A. Islamov

**Abstract.** The article presents seismic observations and microseismic measurements conducted in the area of the hydroelectric power station under construction in the Farish district of the Jizzakh region. To analyze the data obtained as a result of seismic observations, software was used that allows for an accurate assessment of accuracy. Information is provided on modern processes occurring in the North Nurata seismogenic zone.

**Key words:** seismic monitoring, microseismic analysis, seismogenic zone.

### Возможность определения магнитуды локальной системы сейсмических наблюдений для уникальных объектов

Э.Ш. Юлдашев, Х.А. Исламов

**Аннотация.** Представлены сейсмические наблюдения и микросейсмические измерения, проведенные в районе строящейся гидроэлектростанции в Фаришском районе Джизакской области. Для анализа данных, полученных в результате сейсмических наблюдений, использовалось программное обеспечение, которое позволяет оценить точность. Приведены сведения о современных процессах, происходящих в Северо-Нуратинской сейсмогенной зоне.

**Ключевые слова:** сейсмический мониторинг, микросейсмический анализ, сейсмогенная зона.

УДК 539.3+624.21

## ВЫЯВЛЕНИЕ СПЕЦИФИКИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ, ВЫЗВАННЫХ ДЕФОРМАЦИЕЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Ф.Р. Артиков, Т.С. Курбанов, Б.Г. Алимов

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

**Аннотация.** Изучены микросейсмические колебания, зарегистрированные на сейсмических станциях, установленных для исследований по сейсмическому мониторингу сотрудниками Института сейсмологии и на станциях Центра сейсмопрогностического мониторинга при МЧС РУз. Так, на станциях, установленных для изучения микросейсмических полей, размещенных на скальном основании, по вертикальной компоненте проявляются приливные деформации, обычно синхронные. На станциях, расположенных на других геологических структурах, синхронность, нарушается. Выявлен тренд по вертикальной компоненте на станции «Агалык», вероятно, связанный с наклонами земной поверхности. Наблюдается наличие длиннопериодных импульсов 160 сек по горизонтальным компонентам, связанным с тектоническими процессами. Экспериментально показано, что у сейсмометров, расположенных вблизи разломных зон, по компоненте, направленной к разлому, амплитуда микроколебаний несколько выше. Также выявлен эффект затухания сигнала в 4-5 раз при прохождении через зону дробления разлома.

**Ключевые слова:** микросейсмь, импульсные помехи, периодичность, амплитуда, спектр, сигнал, геоблок, техногенный шум.

**Введение.** Сейсмология как наука, изучающая землетрясения и связанные с ними явления, играет важную роль в понимании динамики земной коры. Узбекистан, расположенный на пересечении границ тектонических плит, характеризуется высокой сейсмологической активностью. Эта территория подвергается влиянию как северо-западной части Индийской плиты, так и Евразийской, что обуславливает частые подземные толчки.

Наиболее активные сейсмические зоны Узбекистана сосредоточены в горных районах Памира и Тянь-Шаня. Исторические данные свидетельствуют о том, что здесь происходили разрушительные землетрясения, оставившие заметный след в архитектуре и культуре региона. Например, Ташкентское землетрясение в 1966 г. привело к значительным разрушениям и человеческим жертвам. Также можно привести много примеров – Газлийское (1976 и 1984 гг.), Кайраккумское землетрясение, произошедшее 13 октября 1985 г. около 10 часов вечера по местному времени; толчки ощущались на территории города Кайраккум (Ленинабадская обл., Таджикская ССР), в ближайших городах области, а также в горных и населенных пунктах Узбекистана.

Современные методы сейсмического мониторинга, такие как использование сейсмометров, GPS и других высокоточных приборов, играют ключевую роль в понимании динамики земной коры. Эти технологии позволяют ученым в реальном времени отслеживать движения тектонических плит и оценивать сейсмическую активность. Узбекистан, используя международный опыт, активно внедряет новые подходы к изучению землетрясений, что способствует повышению уровня безопасности населения.

Сейсмология в Узбекистане вышла на государственный уровень. Это можно увидеть в Постановлениях Президента Республики и в законах Кабинета Министров Республики Узбекистан. В Программах по совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности в республике отмечено: «Определить основными направлениями обеспечения сейсмической безопасности:

- 1) меры, принятые по снижению уровня сейсмической опасности;
- 2) осуществление контроля за сейсмостойкостью зданий и сооружений, находящихся в эксплуатации, а также сдаваемых в эксплуатацию;

3) осуществление контроля за сейсмостойкостью водохранилищ и гидротехнических сооружений, расположенных на территории республики;

4) широкое внедрение современных информационно-коммуникационных технологий в сферу обеспечения сейсмической безопасности;

5) внедрение в практику современных методов и технических средств обеспечения сейсмической безопасности и сейсмостойкости;

6) совершенствование научных основ и технологий обеспечения сейсмической безопасности и сейсмостойкости».

Исследование тонкой структуры сейсмичности – один из существующих методов изучения микросейсмического фона, в котором проявляются такие процессы, как изменение напряженно-деформированного состояния объема земной коры, а также сейсмические события в диапазоне отрицательных магнитуд. Имея методику анализа поведения микросейсм, можно контролировать микросейсмический режим в очаговых зонах.

**Исследуемая территория.** Самыми важными методами изучения внутреннего строения Земли и процессов, происходящих в очагах землетрясений, являются наблюдения за длиннопериодными сейсмическими волнами и собственными колебаниями Земного шара. Главные препятствия в таких исследованиях – различного вида помехи, снижающие эффективную чувствительность широкополосных и длиннопериодных приборов и качество полученных данных. Вместе с тем сейсмический шум от разных источников содержит важные характеристики того места, где он регистрируется, сведения о характерных частотах колебаний грунтов, их динамических свойствах.

Причиной сейсмического шума служит целый комплекс явлений – от собственно сейсмических, таких как колебания от землетрясений, до атмосферных явлений на поверхности Земли, таких как ветер, перепады температур и давлений, циклоническая деятельность на море. В определенном диапазоне частот сейсмические шумы порождаются городами, транспортом, всем тем, что так или иначе связано с практической деятельностью человека.

Кривые спектральной плотности мощности сигнала для оценки уровня техногенных (антропогенных) помех для станций с высоким уровнем помех отражены на рис. 1.

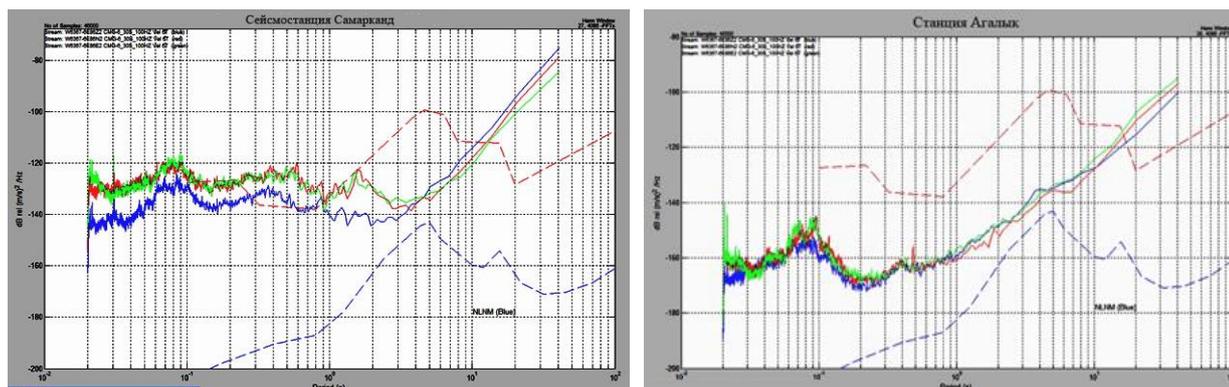


Рис. 1. Спектральные кривые сейсмического шума. Станция Агальк, Самарканд.

Fig. 1. Spectral curves of seismic noise. Station Agalyk, Samarkand.

Площадки расположения этих станций находятся вдалеке от населенных пунктов и промышленных предприятий, тщательно выбраны на основе специальных геологических и инструментальных исследований.

Подобная запись для станции Площадь № 1 – на рис. 2. Здесь также наблюдается модуляция сигнала приливной компонентой с периодом 11 ч. 28 м.

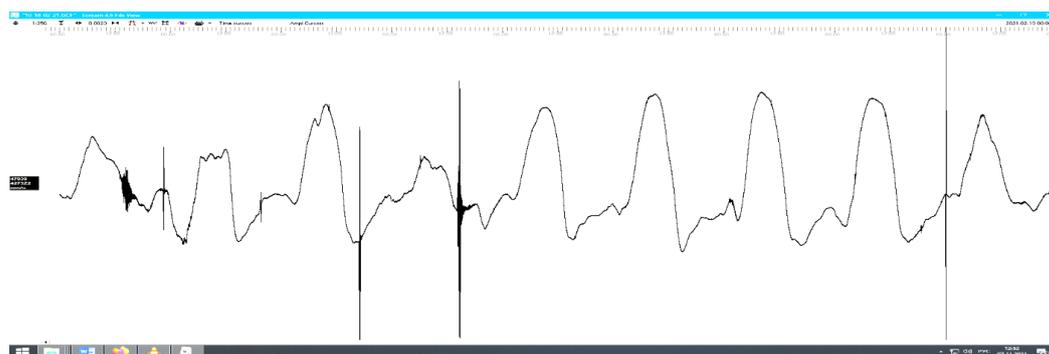


Рис. 2. Площадь № 1. 10-суточная запись, вертикальная компонента.

Fig. 2. Area № 1. 10-day record, vertical component.

Этот пункт регистрации отличается от остальных тем, что сейсмометры расположены на скальном основании. Для станций, сейсмометры которых установлены на грунте (даже мощностью 1 м), такие приливные эффекты не наблюдаются.

Характеристики местных микросейсмических колебаний содержат информацию о строении и режимах релаксации геофизической среды. Локальные участки земной коры отличаются по размерам активных структурных элементов и их подвижности.

Для оценки спектра сигналов по вертикальной составляющей использовалась программа Geopsy ([www.geopsy.org](http://www.geopsy.org)).

При построении спектров нефильтрованного сигнала из-за преобладания (по амплитуде) низкочастотных составляющих, анализ проводить сложно (рис. 3, слева). Поэтому производилась НР-фильтрация с частотой срезы 1 Гц (заложено в программе Geopsy). После этого производился анализ спектральных характеристик микросейсм (см. рис. 3, справа).

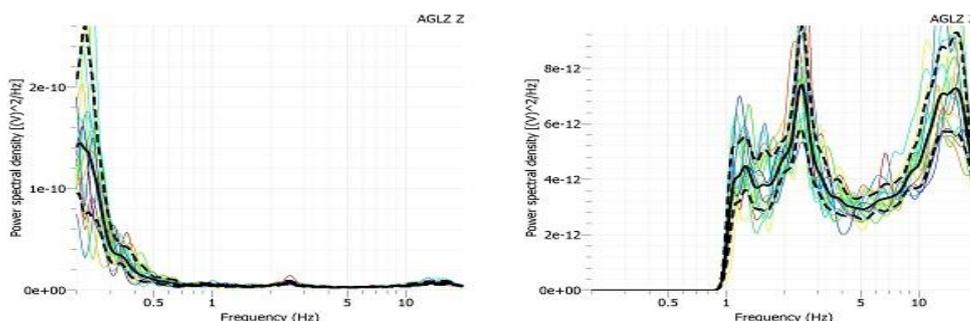


Рис. 3. Спектр сигнала без фильтрации (слева) и с ВЧ фильтром 1 Гц (справа).

Fig. 3. Signal spectrum without filtering (left) and with a 1 Hz high-pass filter (right).

В целях исследования влияния тектонических структур на слабую сейсмичность на перевале Тахтакарача работали две временные сейсмические станции. Вместе со станцией Агалык Республиканского центра Сейсмопрогностического мониторинга МЧС РУз они составили треугольник, обеспечивающий уверенную локацию близких слабых сейсмических событий (табл. 1; рис. 4).

Таблица 1

Координаты временных станций

| Станция | Прибор | Широта | Долгота | Высота, м |
|---------|--------|--------|---------|-----------|
| № 1     | 6N54   | 39.339 | 66.919  | 1505      |
| № 2     | 6N49   | 39.375 | 66.945  | 1522      |
| Агалык  | ВВ-120 | 39.518 | 66.879  | 917       |



Рис. 4. Схема размещения временных станций.

Fig.4. Layout of temporary stations.

Кривые спектральной плотности мощности сигнала на двух временных станциях отражены на рис. 5, 6.

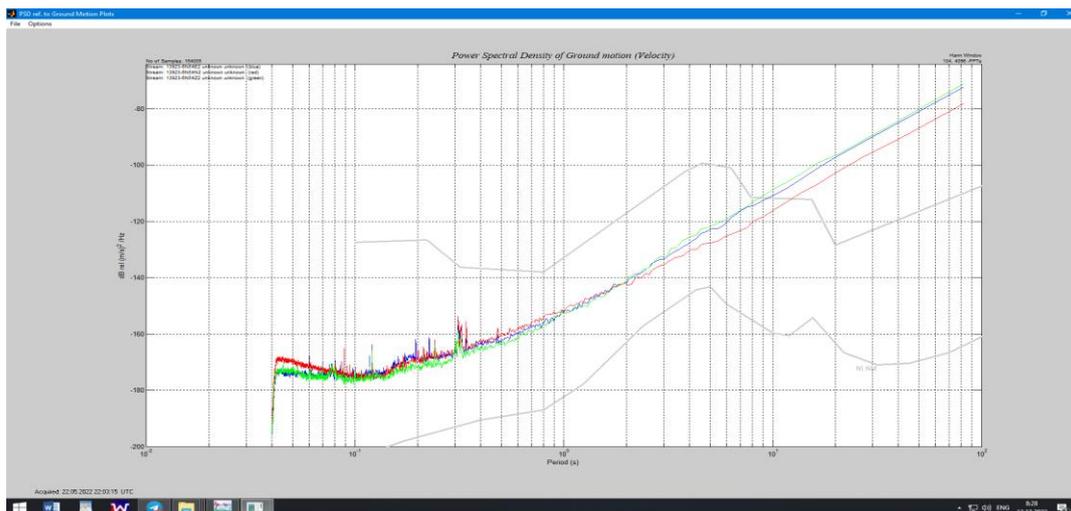


Рис. 5. Фон помех на станции № 1.

Fig. 5. Background interference at station № 1.

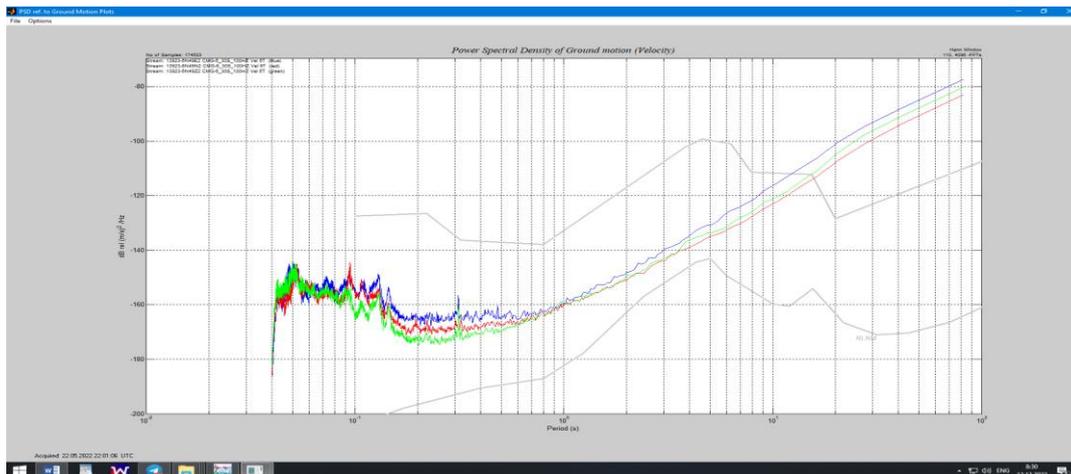


Рис. 6. Фон помех на станции № 2.

Fig. 6. Background interference at station № 2.

Анализ синхронной записи микросейсмических колебаний показал, что имеется связь во времени для обеих станций (рис. 7, 8).

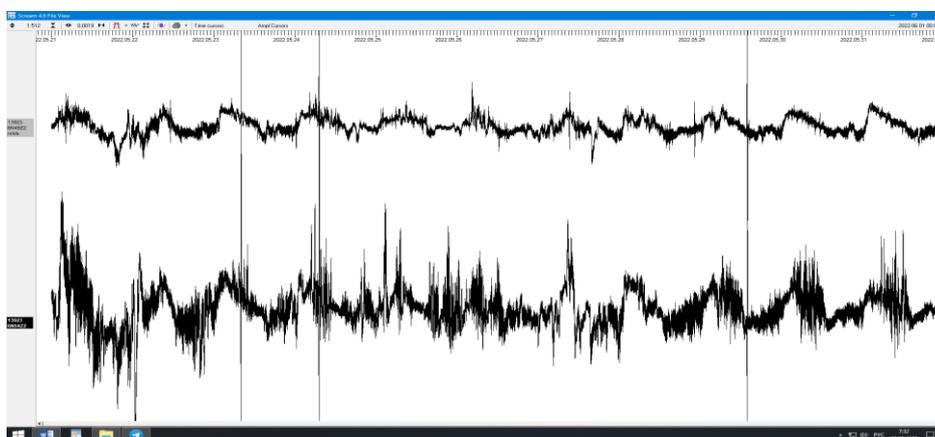


Рис. 7. Фрагмент синхронной записи на двух станциях.

Fig. 7. A fragment of a synchronous recording at two stations.

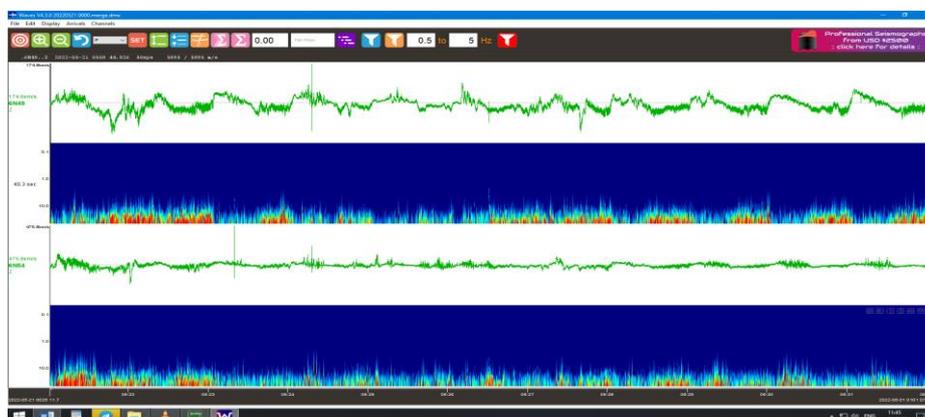


Рис. 8. Фрагмент записи со спектрограммами.

Fig. 8. Fragment of the recording with spectrograms.

На карте (рис. 9) видно, что события приурочены к речному руслу, которое, возможно, проходит по скрытому разлому.

В табл. 2 приведен каталог зарегистрированных сейсмических событий на исследуемой территории.

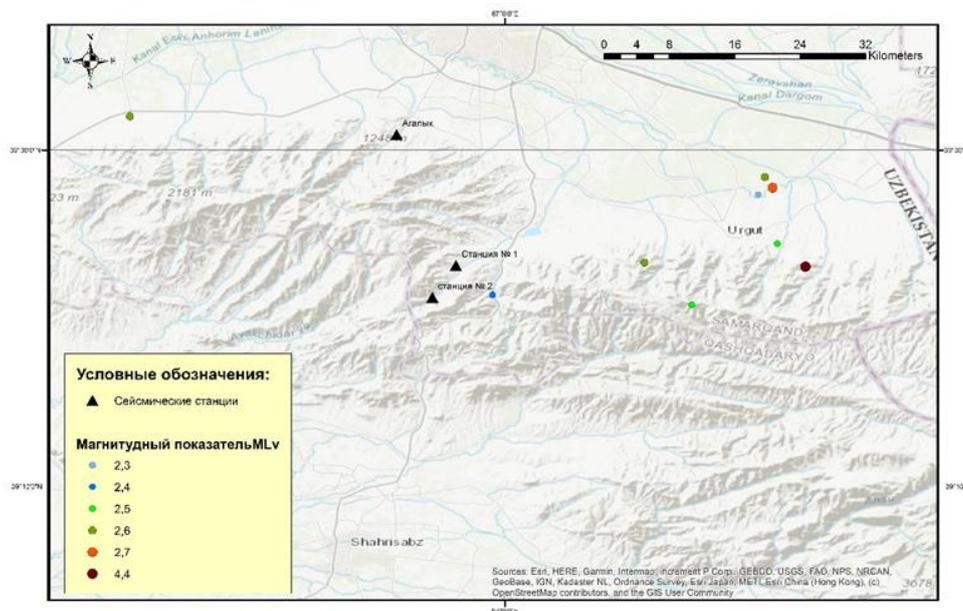


Рис. 9. Результаты локации слабых землетрясений в районе перевала Тахтакарача.

Fig. 9. Results of weak earthquake location in the Takhtakaracha pass area.

Таблица 2

Каталог зарегистрированных временными станциями землетрясений

| Дата       | Время в очаге | Широта   | Долгота  | MLv | H  |
|------------|---------------|----------|----------|-----|----|
| 29.04.2024 | 03:13:46      | 39.53737 | 66.58698 | 2.6 | 10 |
| 29.04.2024 | 19:46:26      | 39.83466 | 67.86179 | 2.6 | 10 |
| 30.04.2024 | 09:36:24      | 38.83528 | 67.51828 | 2.6 | 10 |
| 30.04.2024 | 13:36:46      | 39.32833 | 67.20525 | 2.5 | 10 |
| 01.05.2024 | 13:20:16      | 39.36132 | 67.72419 | 2.4 | 10 |
| 02.05.2024 | 08:35:36      | 39.37537 | 67.15341 | 2.6 | 10 |
| 03.05.2024 | 18:41:20      | 39.33956 | 66.98628 | 2.4 | 10 |
| 05.05.2024 | 19:27:30      | 39.47018 | 67.28596 | 2.6 | 10 |
| 05.05.2024 | 19:34:17      | 39.45024 | 67.27837 | 2.3 | 10 |
| 05.05.2024 | 19:46:00      | 39.45823 | 67.29414 | 2.7 | 10 |
| 06.05.2024 | 04:35:02      | 39.39603 | 67.29930 | 2.5 | 10 |
| 06.05.2024 | 05:41:06      | 39.37059 | 67.33045 | 4.4 | 10 |

Представляет интерес проявление приливных деформаций на станциях, оснащенных широкополосными сейсмометрами.

Ургутское землетрясение, которое произошло 6 мая 2024 г. в 05:41:06 по Гринвичу с магнитудным показателем MLv = 4,4, отражено на рис. 10, 11. Это самые сильные толчки после установки наших временных станций. Так, можно увидеть, что землетрясение произошло недалеко от центра Ургута в Самаркандской области. Зарегистрировало это землетрясение станции Агалык, Бахмал, Жиззах, Пачкамар, Байсун и Зарабах. По графику видно, что зарегистрировали это землетрясение станции, которые стоят на коренных породах.

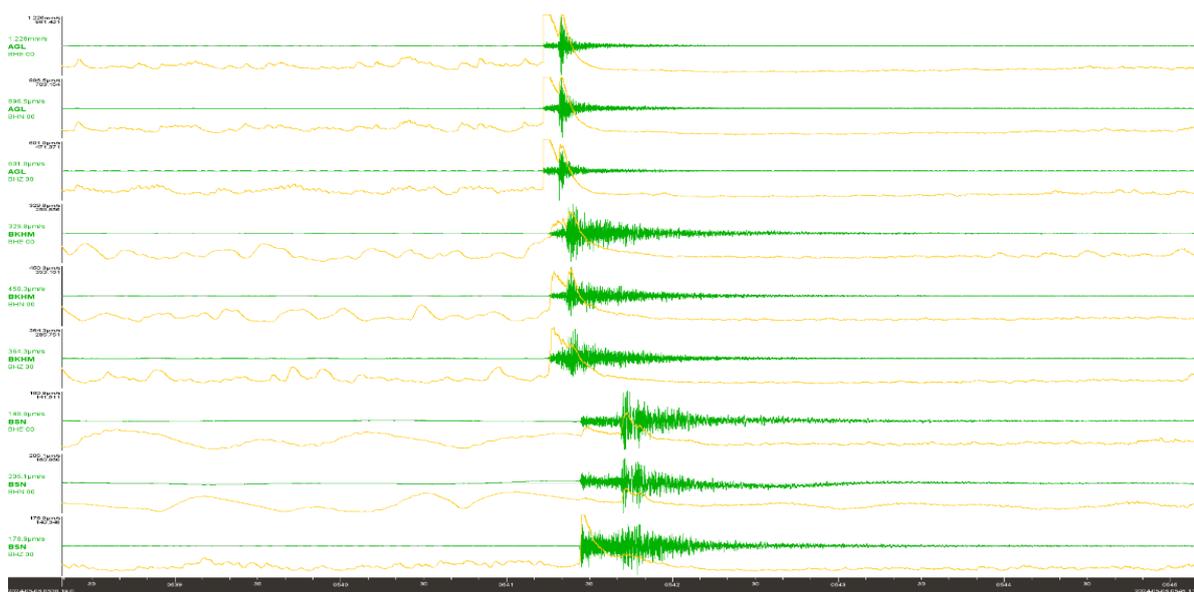


Рис. 10. Запись землетрясения зарегистрированного события. Дата – 06.05.2024 г., время – 05:41:06(UTC).

Fig. 10. Earthquake record of the registered event. Date – 06.05.2024, time – 05:41:06 (UTC).

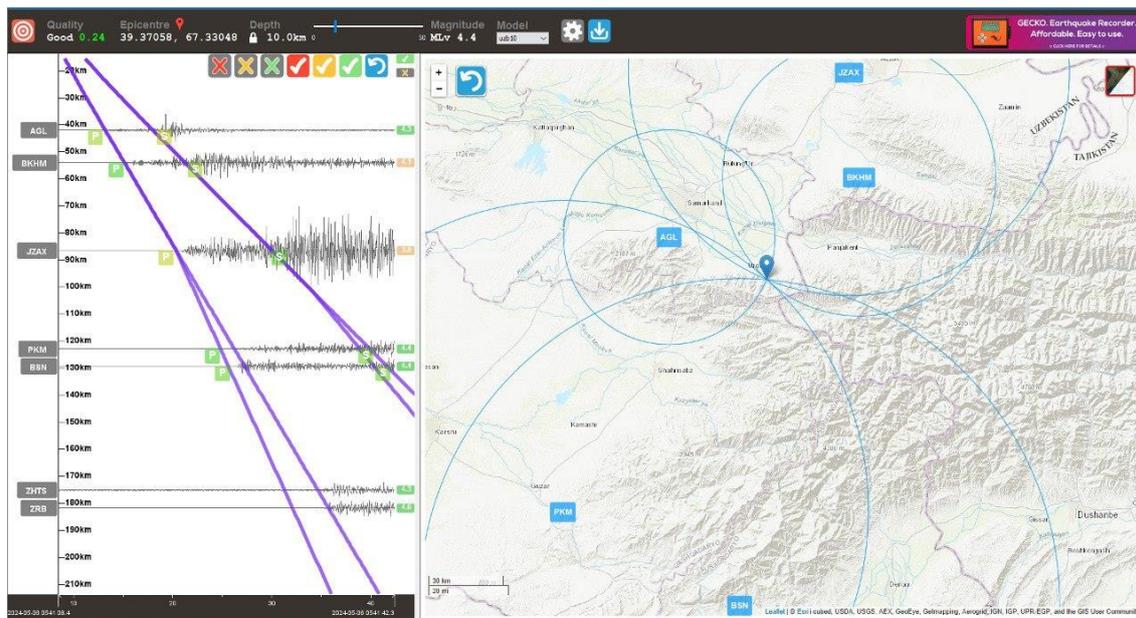


Рис. 11. Определения эпицентра зарегистрированного события с магнитудным показателем MLv = 4,4.

Fig. 11. Definitions of the epicenter of a registered event with a magnitude of MLv = 4,4.

На рис. 12, 13 представлена 11-дневная запись вертикальной компоненты на станции Агалык.

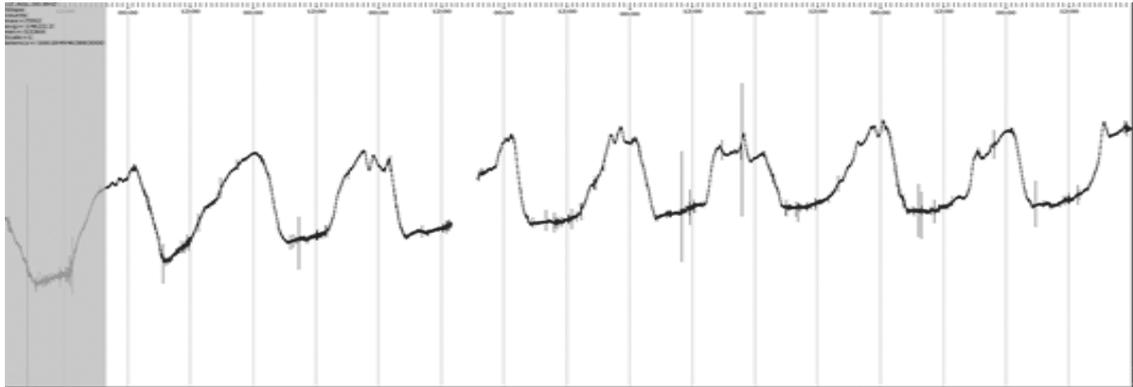


Рис. 12. Суточные вариации по вертикальной компоненте на станции Агалык.

Fig. 12. Daily variations in the vertical component at the Agalyk station.

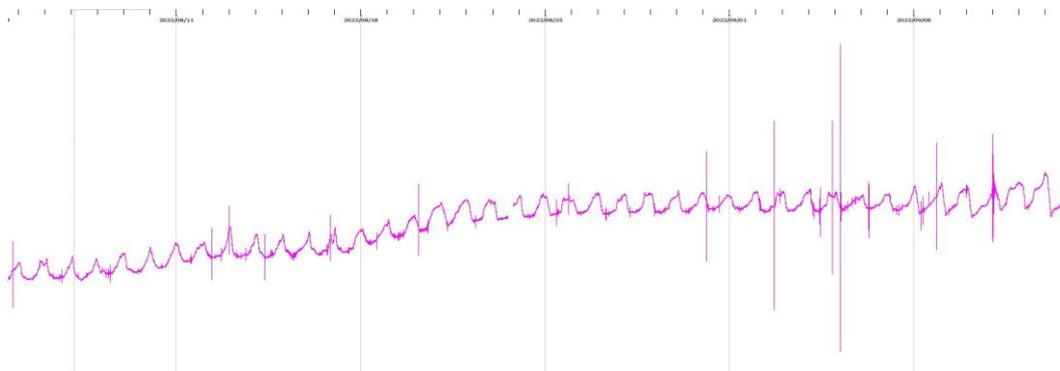


Рис. 13. Суточная запись по компоненте Z на станции Агалык.

Fig. 13. Daily record for component Z at Agalyk station.

Здесь наблюдается тренд, не связанный с приливными деформациями. По-видимому, при соответствующей доработке методики анализа, данные широкополосных станций возможно использовать для измерения наклонов земной поверхности.

11-суточная запись по компоненте Z для трех станций приведена на рис. 14.

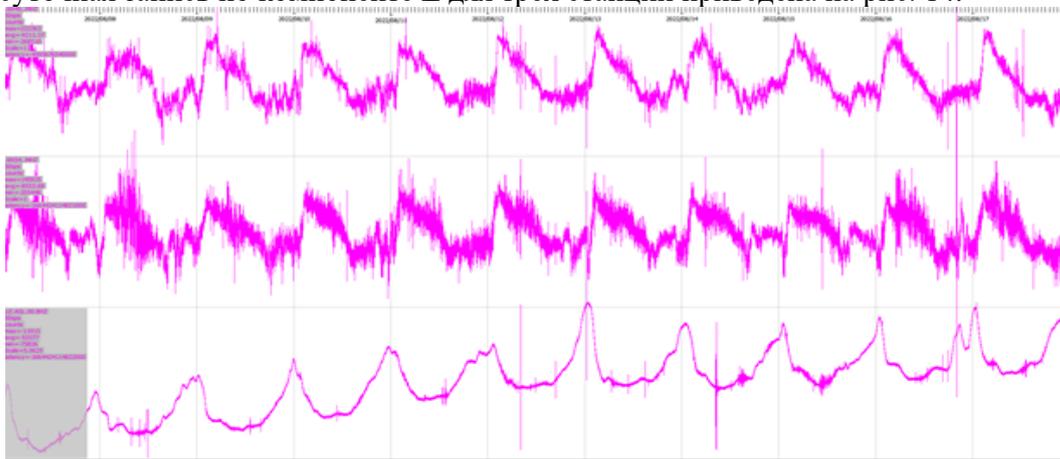
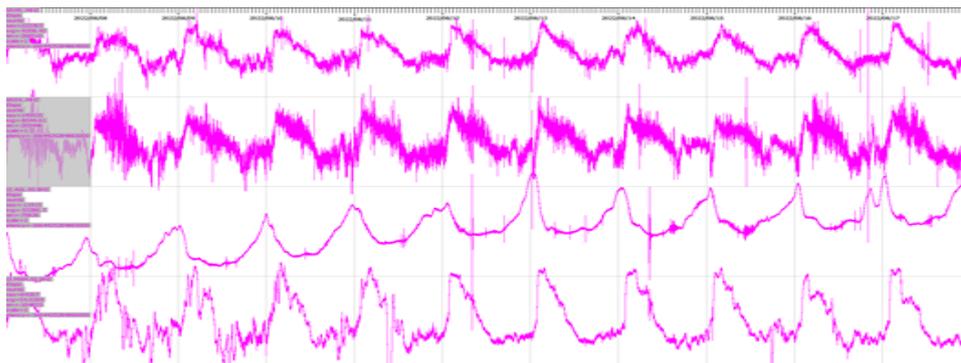


Рис. 14. Вариации по компоненте Z для станций № 1, № 2 и Агалык.

Fig. 14. Variations in the Z component for stations № 1, № 2 and Agalyk.

Здесь видно, что на станции Агалык вариации не синхронны с первыми двумя пунктами регистрации (рис. 15).



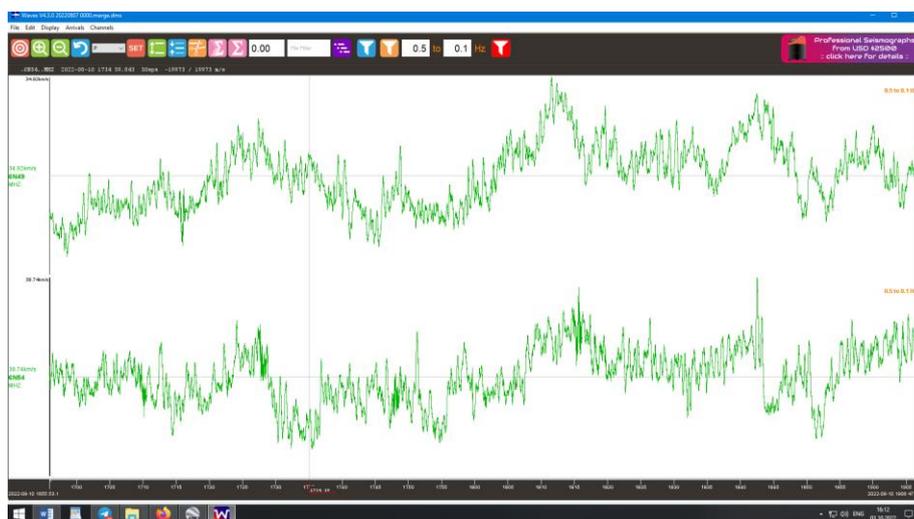
**Рис. 15. Вариации по компоненте Z для станций № 1, № 2, Агалык и Мамай.**

**Fig. 15. Variations in the Z component for stations № 1, № 2, Agalyk and Mamai.**

Можно сделать вывод, что приборы расположены на разных геоблоках, реагируют на приливные воздействия не одновременно.

Амплитуда приливной составляющей по вертикальной компоненте достигает 10 микрон.

Проявляются тектонические структуры в микросейсмическом поле. Фрагмент сейсмограмм на станциях Терсак-1 и Терсак-2 отражен на рис. 16.



**Рис. 16. Фрагмент 120-минутной записи по компоненте Z. Верхняя – ст.Терсак-1, 1,5 км; ст.Терсак-2, 3,5 км от разломной зоны.**

**Fig. 16. Fragment of a 120-minute record for component Z. Upper – Tersak-1 station, 1,5 km; Tersak-2 station, 3,5 km from the fault zone.**

Здесь прибор, расположенный ближе к разлому, регистрирует большие амплитуды микроколебаний. Сейсмические наблюдения показали, что на основе инструментальных измерений можно определить отличительный характер изменения спектральной плотности и энергетической мощности потока микросейсм в разломных зонах и за его пределами.

Этот эффект подтверждается рядом исследователей [1-4]. Разрывные нарушения земной коры существенно влияют на микросейсмический фон. Это связано с повышенной

деформируемостью материала заполнителя разломных зон по сравнению с горными породами, формирующими структурные блоки. В частности, пониженная жесткость тектонических нарушений [1] и, как следствие, повышенная подвижность дробленной горной породы в теле разлома определяют специфически высокую реакцию самого разлома и среды, находящейся в зоне его влияния, на слабые внешние воздействия по сравнению с серединными участками структурных блоков. Результаты инструментальных наблюдений свидетельствуют, например, о том, что слабое возмущение земной коры в виде приливных деформаций вызывает повышенные вариации амплитуды отдельных (характерных для конкретного участка земной коры) спектральных составляющих микросейсмических колебаний, а также интенсивность релаксационных процессов как на самих разломах, так и на участках, расположенных в их окрестностях [4, 5] (рис. 17-20).

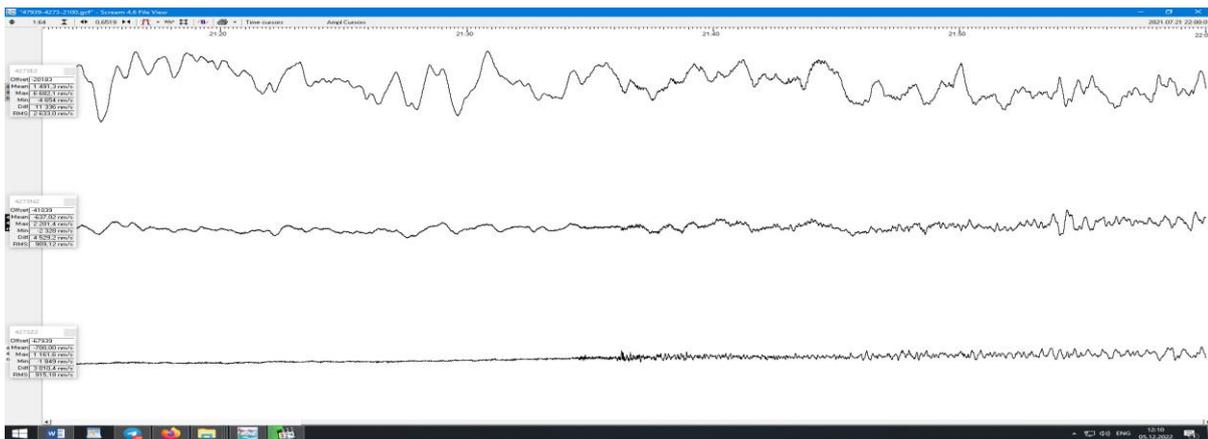


Рис. 17. Фрагмент сейсмограммы на сейсмостанции «Площадка № 1».

Fig. 17. Fragment of a seismogram at seismic station «Site № 1».

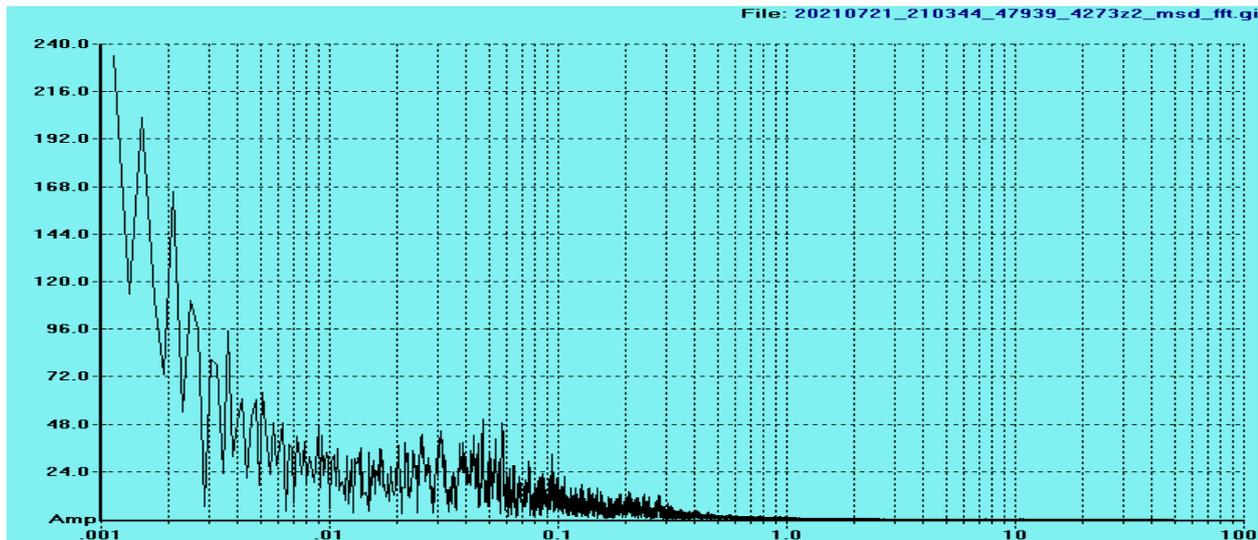


Рис. 18. Спектр сигнала по вертикальной компоненте.

Fig. 18. Signal spectrum by vertical component.

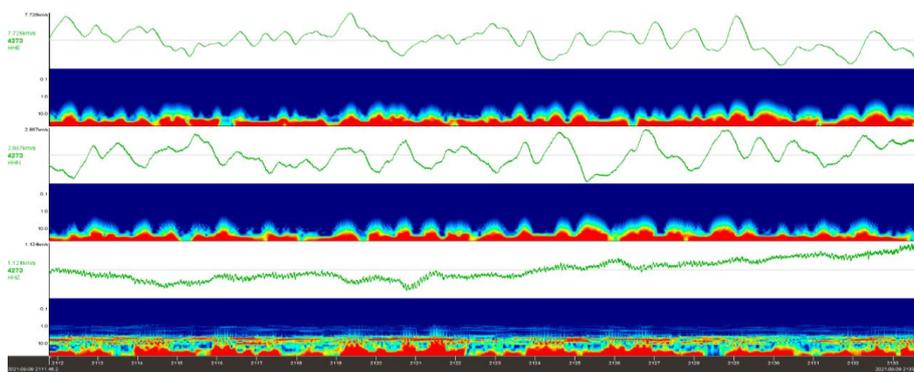


Рис. 19. Спектрограмма по трем компонентам.

Fig. 19. Spectrogram of three components.

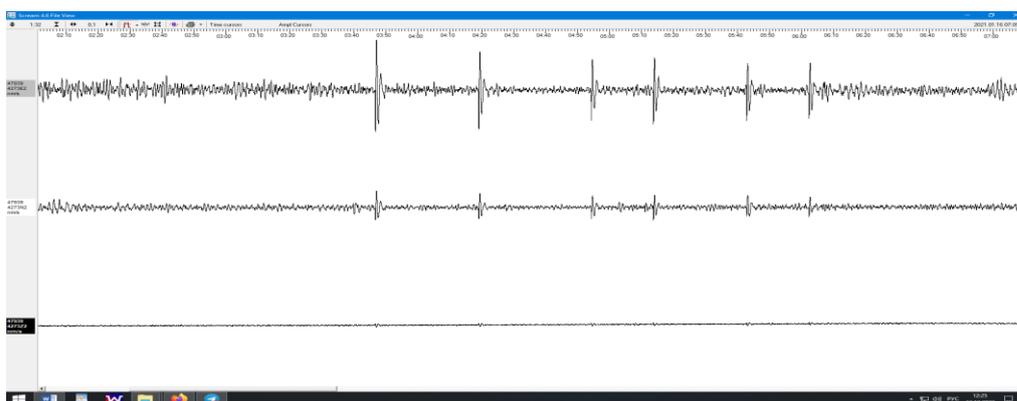


Рис. 20. Фрагмент записи на ст. «Площадка № 1». Использован фильтр: 120 - 10 секунд. По горизонтальным компонентам проходят импульсы с периодом 160 секунд, возможно, тектонического происхождения.

Fig. 20. Fragment of the recording at the station «Site № 1». Filter used: 120 - 10 seconds. Pulses with a period of 160 seconds, possibly of tectonic origin, pass through the horizontal components.

В этом случае амплитуда микросейсм по компоненте восток-запад гораздо выше другой горизонтальной компоненты.

В спектрограмме по этой компоненте также преобладают колебания с периодом ниже 20 сек (рис. 21).

Из полученного набора записей можно сделать вывод о том, что по всех спектрах преобладают периоды 6, 18, 45 сек. Шестисекундные микросейсм связаны с Рэлеевскими волнами, остальные, по-видимому, с собственными частотами Земного шара (рис. 22-24).

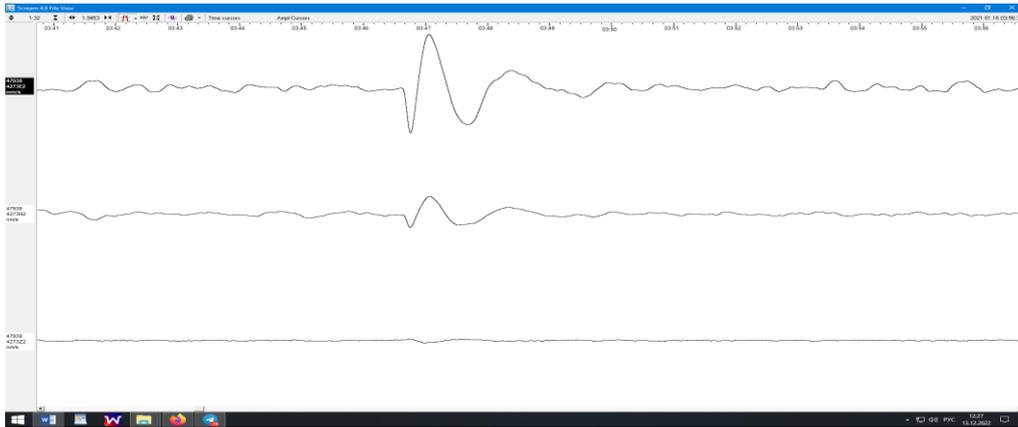


Рис. 21. Развертка фрагмента сейсмограммы.

Fig. 21. Seismogram fragment unfolding.

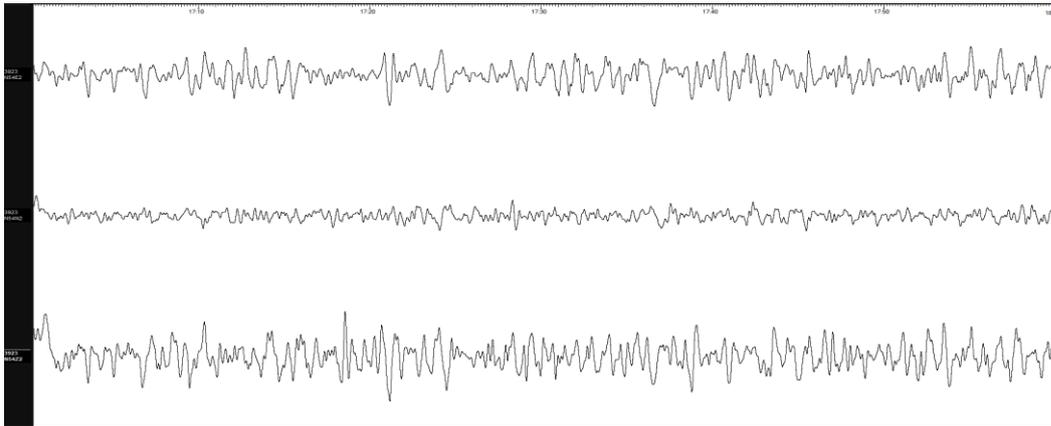


Рис. 22. Фрагмент отфильтрованной записи (120 - 10 сек) станции Терсак-1, расположенной в 1,3 км западнее разлома. Амплитуда по компоненте E\_W больше.

Fig. 22. Fragment of the filtered record (120 - 10 sec) of the Tersak-1 station, located 1,3 km west of the fault. The amplitude for the E\_W component is greater.

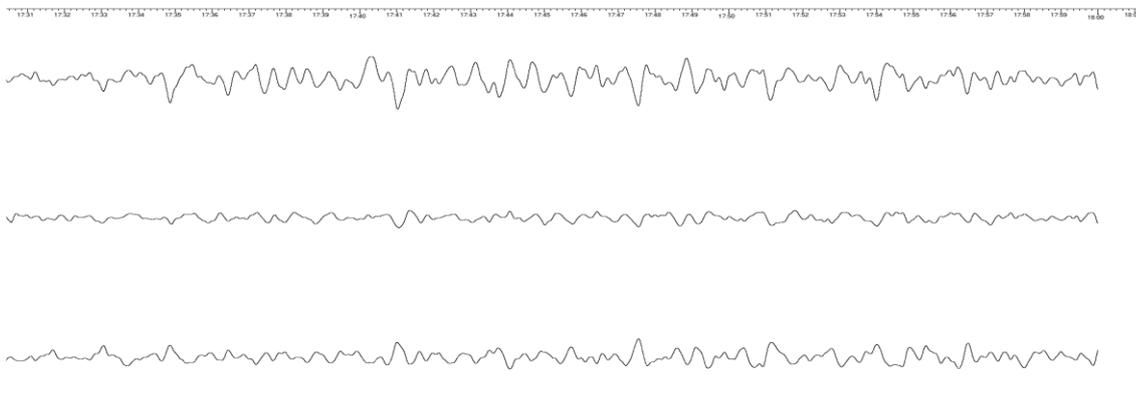


Рис. 23. Фрагмент отфильтрованной записи (120 - 10 сек) станции Терсак-2, расположенной в 3,4 км западнее разлома. Амплитуда по компоненте E\_W больше.

Fig. 23. Fragment of the filtered record (120 - 10 sec) of the Tersak-2 station, located 3,4 km west of the fault. The amplitude for the E\_W component is greater.

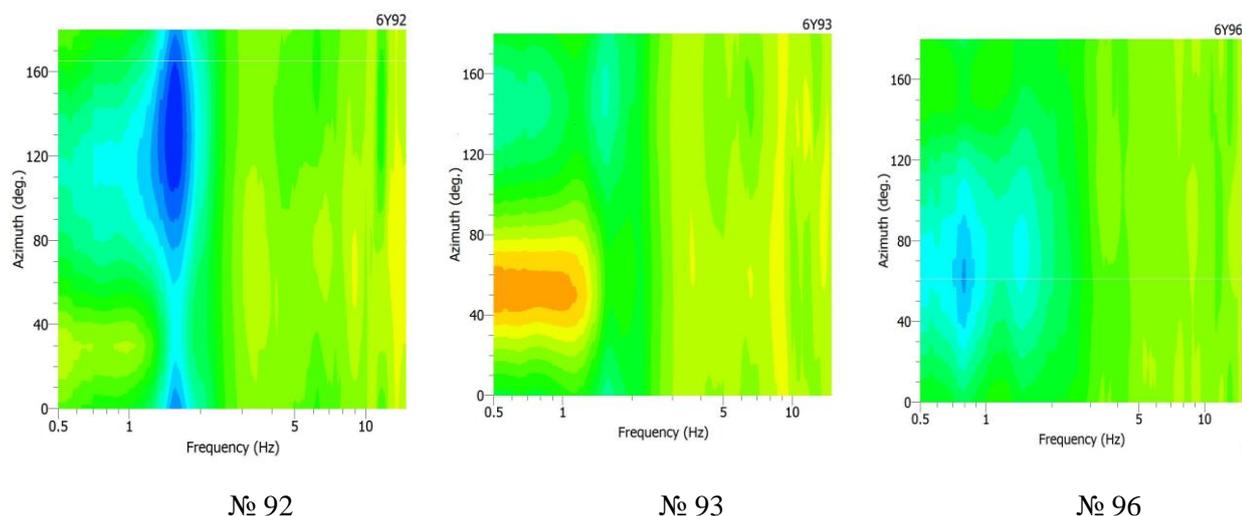


Рис. 24. Ротация спектра HVSr для трех пунктов регистрации (Агалык, № 1, № 2).

Fig. 24. HVSr spectrum rotation for three registration points (Agalyk, № 1, № 2).

Здесь отчетливо проявляется смещение спектра в низкочастотную область после прохождения сигнала сквозь зону разлома. Прибор на самом разломе показал снижение амплитуды сигнала на высоких частотах.

Анализ большого ряда непрерывных записей ряда сейсмических станций, оснащенных широкополосными сейсмометрами (0,03-50 Гц), показал следующее.

Сейсмические станции, расположенные ближе к разлому, регистрируют большие амплитуды микроколебаний по горизонтальным компонентам, направленным к тектоническим структурам. Сейсмические наблюдения показали, что на основе инструментальных измерений можно определить отличительный характер изменения спектральной плотности и энергетической мощности потока микросейсм в разломных зонах и за их пределами.

Для станции Агалык, оснащенной 120-секундным сейсмометром, наблюдается тренд, не связанный с приливными деформациями. По-видимому, при соответствующей доработке методики анализа, данные широкополосных станций возможно использовать для измерения наклонов земной поверхности.

Широкополосные сейсмометры, расположенные на разных геологических структурах, реагируют на приливные воздействия не синхронно.

### Заключение

Разрывные нарушения земной коры существенно влияют на микросейсмический фон. Это связано с повышенной деформируемостью материала заполнителя разломных зон по сравнению с горными породами, формирующими структурные блоки. В частности, пониженная жесткость тектонических нарушений и, как следствие, повышенная подвижность дробленной горной породы в теле разлома определяют специфически высокую реакцию самого разлома и среды, находящейся в зоне его влияния, на слабые внешние воздействия по сравнению с серединными участками структурных блоков.

Исследование структуры сейсмического фона позволяет говорить и о наличии в микросейсмическом фоне низкочастотных импульсных колебаний, имеющих нестационарный характер. Такие колебания могут быть связаны с блоковым движением земной коры.

Синхронные измерения, по крайней мере, двумя сейсмометрами, разнесенными на 100-200 м, дают возможность выявления зоны дробления разломных зон по резкому затуханию амплитуды микросейсм на одном из приборов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Иницирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физическая мезомеханика. - 2004. - Т. 7. - № 1. - С. 5-22.
2. Кочарян Г.Г., Кабыченко Н.В. Проявление блоковых движений в длиннопериодном сейсмическом фоне // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли / Под ред. Ю.И.Зецера. - М., 2003. - Кн. 1. - С. 98-107.
3. Салтыков В.А. Механизм приливных эффектов в сейсмичности на основе модели амплитудно-зависимой диссипации // Физическая мезомеханика. - 2014. - Т. 17. - № 5. - С. 103-110.
4. Соболев Г.А. Сейсмический шум. - М.: ООО «Наука и образование», 2014. - 272 с.
5. Адушкин В.В., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г. Новый подход к мониторингу техногенно-тектонических землетрясений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2017. - № 1. - С. 3-14.

#### Identification of the specificity of microseismic fields caused by deformation of the earth's crust

F.R. Artikov, T.S. Kurbanov, B.G. Alimov

**Abstract.** The article is devoted to the study of microseismic oscillations recorded at seismic stations installed for study by the staff of the Institute of Seismology and at the stations of the Center for Seismophonic Monitoring under the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Uzbekistan, solving the problems of seismic monitoring. It has been established that at stations installed to study microseismic fields located on the rock base, tidal deformations, usually synchronous, are manifested along the vertical component. At stations located on other geological structures, synchronicity is broken. A trend in the vertical component at the Agalyk station was revealed, probably associated with the inclination of the earth's surface. The presence of long-period pulses of 160 seconds was established, by horizontal components associated with tectonic processes. It has been experimentally shown that seismometers located near fault zones, along the component directed towards the fault, have a slightly higher amplitude of microoscillations. The effect of signal attenuation by 4-5 times when passing through the fracture crushing zone was also revealed.

**Key words:** microseisms, impulse interference, periodicity, amplitude, spectrum, signal, geoblock, technogenic noise.

#### Yer qobig'ining deformatsiyasi natijasida kelib chiqadigan mikroseysmik maydonlarning o'ziga xosligini aniqlash

F.R. Artikov, T.S. Kurbanov, B.G. Alimov

**Annotatsiya.** Maqola Seysmologiya instituti xodimlari tomonidan tadqiqot uchun o'rnatilgan seysmik stansiyalarda va O'zbekiston Respublikasi Favqulodda vaziyatlar vazirligi huzuridagi Seysmik bashorat monitoringi markazi stansiyalarida qayd etilgan mikroseysmik tebranishlarni o'rganish, seysmik muammolarni hal qilishga bag'ishlangan. monitoring. Toshli poydevorda joylashgan mikroseysmik maydonlarni o'rganish uchun o'rnatilgan stansiyalarda vertikal komponent bo'ylab odatda sinxron oqim deformatsiyalari paydo bo'lishi aniqlandi. Boshqa geologik tuzilmalarda joylashgan stansiyalarda sinxronlik buziladi. Agalik stansiyasida vertikal komponentda tendentsiya aniqlandi, ehtimol bu yer yuzasining yonbag'irlari bilan bog'liq. Tektonik jarayonlar bilan bog'liq gorizontal komponentlar tomonidan 160 soniyali uzoq muddatli impulsning mavjudligi aniqlandi. Yoriq zonalari yaqinida joylashgan seysmometrlar uchun buzilish tomon yo'naltirilgan komponentdagi mikrotebranishlar amplitudasi biroz yuqoriroq ekanligi eksperimental ravishda ko'rsatilgan. Singan parchalanish zonasidan o'tganda signalning 4-5 marta susayishi ta'siri ham aniqlandi.

**Kalit so'zlar:** mikroseyizmlar, impulsli shovqin, davriylik, amplituda, spektr, signal, geoblok, texnogen shovqin.

УЎК 550.34.01:550.344.5

## СЕЙСМИК ТЎЛҚИН ЭНЕРГИЯСИНING ГРУНТЛАРДА ЮТИЛИШ ХУСУСИЯТИНИ МИКРОТРЕМОР ТАДҚИҚОДЛАРИДА ТАХЛИЛ ҚИЛИШ

**А.Р. Рахматов, Н.М. Муҳаммадқулов, Ж.Ш. Бозоров, Э.М. Ядигаров, А.С. Хусомиддинов**  
*O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi F.O. Mavloнов номидаги Сейсмология институти*  
E-mail: asilbekrahmatov3@gmail.com

**Аннотация.** Ушбу мақола Урганч шаҳри ҳудудидаги грунтларнинг сейсмик энергияни ютиш хусусиятларини микросейсмик тадқиқотлар ёрдамида таҳлил қилишга бағишланган. Ушбу тадқиқот доирасида микросейсмик усулдан фойдаланиб, грунтларнинг динамик параметрлари аниқланди. Шунингдек, грунтларнинг хусусий тебранишлари тўғрисидаги маълумотлар асосида уларнинг сейсмик энергияни ушлаб туриш қобилияти баҳоланган. Тадқиқот натижалари шаҳар инфратузилмасининг сейсмик хавфсизлигини баҳолаш ва замонавий муҳандислик тадбирларини ишлаб чиқишда муҳим илмий асос бўлиб хизмат қилади.

**Калит сўзлар:** грунт, муҳандислик-геологик, частота, амплитуда, микротремор,  $H/V$  усули, сўниш коэффициенти, ютилиш коэффициенти, спектрал таҳлил.

**Кириш.** Урганч шаҳри Ғарбий Ўзбекистон ҳудудида жойлашган. Маъмурий жиҳатдан Урганч шаҳри Хоразм вилоятининг пойтахти ҳисобланади. Муҳандис-геологик жиҳатдан шаҳар ҳудуди 40 метргача чуқурликда ўрганилган бўлиб, асосан гил ва қумли грунтлардан ташкил топган. Ер юзида грунтлар кўпинча ўсимлик қатлами ва тўкма грунтлар билан қопланган бўлиб, айрим жойларда қумли грунтлар очилмалари кузатилади.

Зилзила вақтида бино-иншоот пойдевор грунтларининг энергияни ютиш хусусияти сейсмик хавфни баҳолашда муҳим омил ҳисобланади. Зилзилалар геологик муҳитнинг динамик хусусиятларига бевосита боғлиқ бўлиб, уларнинг кучайиши ва тарқалиши асосан грунтларнинг сейсмик тўлқинларни ютиш ва кучайтириш қобилияти билан белгиланади. Грунтлар турли механик ва физик хусусиятларга эга бўлиб, уларнинг турли тузилишдаги қатламлари зилзила энергиясининг тарқалиш хусусиятларига таъсир кўрсатади. Шунингдек, тектоник жараёнлар ва литологик шароитлар ҳам сейсмик тўлқинларнинг хоссаларини ўзгартиради. Грунтларнинг зилзила энергиясини ютиш хусусияти асосан уларнинг зичлиги, намлиги, литологияси, минералогик таркиби ва стратиграфик шароитларига боғлиқ [1]. Бўшоқ ва қуруқ грунтлар зилзила тўлқинларини узокроқ сақлаб, резонанс эффектини кучайтириши мумкин, бу эса юқори сейсмик хавфни келтириб чиқаради. Аксинча, юқори зичликка эга бўлган чўқинди массивлари ва зичлашган чўқинди жинслар зилзила энергиясини нисбатан тезроқ диссипация қилиб, сейсмик тўлқинларнинг кучини пасайтиради [2]. Тадқиқот натижалари қурилиш ва муҳандислик сейсмологияси соҳасидаги қарорлар қабул қилишда ҳамда сейсмик хариталарни такомиллаштиришда муҳим аҳамият касб этади.

### Адабиётлар таҳлили ва методлар

Грунтларда зилзила энергиясини ютилиш хусусияти ва уларнинг сейсмик тўлқинларга таъсири геология, геофизика ва муҳандислик сейсмологияси соҳаларида кенг ўрганилган. Зилзила тўлқинларининг ютилиш хусусияти асосан сўниш коэффициенти ( $\xi$ ) ва сейсмик сифат фактори ( $Q$ ) орқали баҳоланган. Тадқиқотчиларнинг манбаларида таъкидланишича, бўшоқ ва юқори гил миқдорига эга грунтлар паст сифат фактори ( $Q \sim 0$ ) га эга бўлиб, улар зилзила тўлқинларини кучайтириб, резонанс ҳодисасини ҳосил қилади [3]. Аксинча, юқори зичликка эга тоғ жинслари юқори сифат фактори билан ажралиб, сейсмик тўлқинларни нисбатан тезроқ ютиши мумкин (Аки К., Richards P., 2002).

$H/V$  усули (Nakamura., 1989) микросейсмик тадқиқотларда кенг қўлланилган [4]. Бу усул асосан лёс ва чўқинди тузилмаларнинг сейсмик тўлқинларга таъсирини баҳолаш учун

ишлатилади. Ушбу усул ёрдамида аниқланган резонанс частота ( $f_0$ ) ва спектрал кенглик ( $B$ ) орқали грунтларнинг ютилиш коэффициенти ҳисобланиши мумкин [5].

Тадқиқотлар шуни кўрсатадики,  $H/V$  усули сейсмик хавфни баҳолашда самарали метод ҳисобланиб, жойнинг сейсмик хусусиятларини тез ва аниқ таҳлил қилиш имконини беради.

**Гил ва қумли грунтларда намлик ва ютилиш хусусиятлари.** Гил ва қумли грунтларда ютилиш коэффициенти бир қатор омиллар таъсирида ўзгаради [6]. Ютилиш коэффициенти ( $\alpha$ ) қиймати грунтнинг намлик даражаси ва структурасига боғлиқ равишда ўзгаради. Қуруқ қумли ва гилли грунтларда ютилиш коэффициенти паст (0,011-0,013) бўлиб, бу уларнинг тебраниш энергиясини кам сўндиришини кўрсатади. Намлик миқдори ошган сари ютилиш коэффициенти ҳам ортиб, 0,015-0,018 оралиғида бўлади, бу эса грунтнинг тебраниш энергиясини яхшироқ юта бошлашини англатади. Юқори намликка эга қумли ва гилли грунтларда ютилиш коэффициенти максимал даражада (0,019-0,021) бўлиб, бу ҳолатда грунт суюқланиш ҳолатига ўтиши (куйқаланиши) ва тебранишларни тез сўндириши мумкин. Бу ўз навбатида энергия миқдорини камайтиради (1-жадвал) [7].

1-жадвал

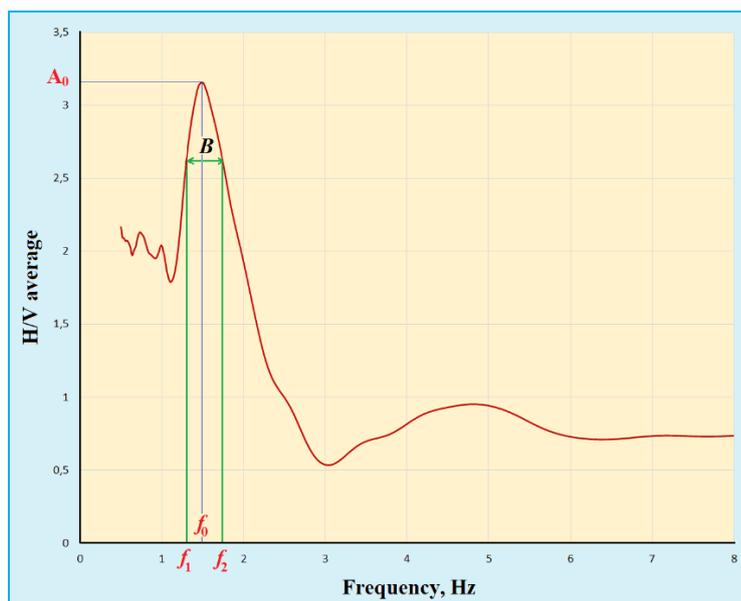
**Грунтлар, таснифи ва уларнинг ютилиш коэффициенти ( $\alpha$ ) қийматлари бўйича экспериментал жадвал**

| № | Грунт тури                | Геологик тасниф  | Ютилиш коэффициенти ( $\alpha$ ) оралик қиймати | Изоҳлар  |
|---|---------------------------|--|---|--|
| 1 | Зич қумтошлар             | Цементланган қумлар, палео-қум қатламлари, зичлашган қатламлар         | 0,001 – 0,010                                   | Кам ёриқланган, зич тузилма, сув ютувчанлиги паст. Энергия ютилиши минимал               |
| 2 | Ил билан зичлашган қумлар | Ил заррачалари ва қум аралаш, майда заррачали, намлик сақловчи жинслар | 0,012 – 0,020                                   | Сувга тўйинганлик юқори, ғовак, сейсмик энергияни сезиларли ютади. Чўкишга мойил         |
| 3 | Бўш қумлар                | Йирик ва ўртача донали, сув таъсирида чўкиш эҳтимоли юқори             | 0,017 – 0,026                                   | Сув билан тез тўйинади, ютилиш коэффициенти ўртача, лойка қатламлар билан алмашган ҳолда |
| 4 | Қум-гил қатламлари        | Қум, гил ва ил аралаш қатламлар, ғовак ва сувли                        | 0,020 – 0,030                                   | Енгил зичлашган, силжиш ва деформацияга мойил. Энергия ютилиши кучли                     |
| 5 | Нам гилли грунтлар        | Лой, ил ва гил аралаш қатламлар, сувга бой                             | 0,025 – 0,035                                   | Сув билан тўйинганлиги юқори, паст зичлик, юқори ютилиш. Тез деформацияланади            |
| 6 | Қуруқ гил қатламлари      | Лой ва гил асосли, зич, таркибида сув миқдори кам бўлган жинслар       | 0,010 – 0,020                                   | Қуруқ ҳолатда зич ва эластик, сувга тўйинганда ютилиш ортади                             |
| 7 | Шағалли қумлар            | Шағал ва қум аралаш, сув ўтувчанлиги яхши                              | 0,010 – 0,020                                   | Қаттиқ, ютилиши кам, аммо сув таъсирида структура заифлашади                             |
| 8 | Қум-шағал қатламлари      | Дарё водийси конлари, қум ва шағалнинг аралаш шакли                    | 0,013 – 0,022                                   | Бўш, сувни яхши ўтказади. Зилзила пайтида деформация эҳтимоли ўрта даражада              |

Ушбу жадвалда грунтларнинг литологик тузилиши, геологик тавсифи ҳамда сейсмик тўлқин энергиясини ютишдаги  $\alpha$  қийматларининг ўртача оралиқлари кўрсатилган.

**Микросейсмик тадқиқотлар.** Ўзбекистоннинг йирик шаҳар ва вилоят марказлари сейсмик микрохудудлаштириш хариталарига эга. Шу билан бир қаторда, 2024 йилда Урганч шаҳрининг турли нуқталарида ҳам микросейсмик ўлчовлар муваффақиятли амалга оширилган.

Тадқиқот ҳудудида микросейсмик ўлчовлар «Guralp-6TD» сейсмометри ёрдамида амалга оширилган. «Guralp-6TD» уч ўқли, кенг частотали, рақамли сейсмометр бўлиб, тезкор ва осон ўрнатиш учун мўлжалланган. У ер ости тебранишларини 30 сониядан (0,03 Гц) 100 Гц гача бўлган частота диапазонида ўлчаш имкониятига эга. Олинган сейсмограмма маълумотларидан фойдаланган ҳолда HVSR усулида (Накамура, 1989) грунтнинг эркин тебраниш частотаси ва  $H/V$  амплитуда нисбати ўртасидаги боғлиқликлар таҳлил қилинади (1-расм) [8].



1-расм. H/V спектрал нисбат графиги.

Бу ерда  $A_0$  ва  $f_0$  – мос равишда грунтнинг максимал H/V тебраниш амплитудаси нисбати ва частотаси;  $B$  – спектр кенглиги;  $f_1, f_2$ , – спектр кенглигининг чегаравий частоталари.

**Ярим қувват кенглиги усули (Half-power bandwidth method):** HVSR усулида грунтнинг амплитуда-частота муносабатидан фойдаланган ҳолда француз олими П.Й. Бард томонидан ишлаб чиқилган «Ярим қувват кенглиги усули» кенг қўлланилган. 2001-2004 йилларда Европа тадқиқот ташаббуси SESAME (Site effects assessment using ambient excitations) лойиҳасида грунтларда энергиянинг сўниши, микросейсмик тебранишлар ёрдамида энергиянинг ютилиш коэффицентларини аниқлаш ишлари олиб борилган. Грунтнинг HVSR спектри олинганда «Ярим қувват кенглиги усули» дан фойдаланиб, максимал қувватнинг ярми (50%) орқали спектр кенглигининг параметрлари ҳисоблаб чиқилади:

$$P = \frac{P_{\max}}{2},$$

бу ерда  $P$  – қувват.

Физика курсидан бизга маълумки, тебранувчи жисмларнинг энергияси ёки қуввати амплитуданинг квадратига тўғри пропорционалдир. Юқоридаги формулани амплитуда орқали ифодалаганда қуйидаги муносабат ўринли бўлади:

$$A^2 = \frac{A_{\max}^2}{2} \quad A = \sqrt{\frac{1}{2}} A_{\max} \approx 0,707 A_{\max}.$$

Шунинг учун ҳам спектр кенглиги ( $B$ ) H/V спектри максимал қийматининг 0,707 қисмидан олинади.

Тадқиқот майдони бўйича ҳар бир нуқта учун олинган маълумотлар қайта ишланади. Грунтларнинг эркин тебраниш спектрлари олинади. Спектр кенглиги ( $B$ ), резонанс частота ( $f_0$ ) ва спектр кенглигининг чегаравий частоталари ( $f_1, f_2$ ) қийматларидан қуйидаги формула бўйича сўниш коэффиенти ( $\xi$ ) аниқланади [9].

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad \xi = \frac{B}{2f_0}; \quad (1)$$

$$B = f_2 - f_1. \quad (2)$$

Грунт эркин тебранишида резонанс частота ( $f_0$ ), сўниш коэффиенти ( $\xi$ ) ва кўндаланг тўлқин тезлиги ( $V_s$ ) ёрдамида ютилиш коэффиенти ( $\alpha$ ) қуйидагича аниқланади:

$$\alpha = \frac{2\pi f_0 \xi}{V_s}$$

бу ерда  $\alpha$  – грунтнинг zilzila энергиясини ютиш (ўзида сақлаб қолиш) коэффициентини. Ютилиш коэффициентини % кўрсаткичида кўп ҳолларда ифодаланади. Ушбу формула грунтнинг тебраниш хусусиятларини таҳлил қилишда сўниш ва ютилиш коэффициентлари орасидаги боғланишни кўрсатади.

HVSR спектрларидан аниқланган қийматлар (юқорида санаб ўтилган параметрлар) ёрдамида ютилиш коэффициентини ҳисобланади.

### Натижалар

Тадқиқот майдони бўйича кўплаб микросейсмик ўлчов нуқталарида ютилиш коэффициентининг қиймати ҳисоблаб чиқилди (2-жадвал).

2-жадвал

Ўлчов нуқталари бўйича микротремор тадқиқоти натижалари ва ютилиш коэффициентининг ҳисобланган қийматлари

| №  | Кенглик | Узоқлик | $f_0$ (Hz) | $A_0$ | $V_{s30}$ м/с | $f_1$ (Hz) | $f_2$ (Hz) | $\xi$ | $\alpha$ | $\alpha, \%$ |
|----|---------|---------|------------|-------|---------------|------------|------------|-------|----------|--------------|
| 1  | 41,59   | 60,57   | 1,40       | 5,36  | 234,0         | 1,14       | 1,61       | 0,33  | 0,012    | 1,20         |
| 2  | 41,60   | 60,59   | 1,45       | 5,39  | 233,6         | 1,07       | 1,61       | 0,39  | 0,015    | 1,50         |
| 3  | 41,59   | 60,59   | 1,50       | 3,16  | 236,4         | 1,26       | 1,85       | 0,44  | 0,018    | 1,80         |
| 4  | 41,59   | 60,60   | 1,22       | 5,13  | 222,6         | 1,07       | 1,61       | 0,33  | 0,011    | 1,10         |
| 5  | 41,59   | 60,62   | 1,50       | 4,84  | 245,2         | 1,10       | 1,72       | 0,47  | 0,018    | 1,80         |
| 6  | 41,58   | 60,61   | 1,45       | 5,36  | 229,8         | 1,10       | 1,72       | 0,45  | 0,018    | 1,80         |
| 7  | 41,58   | 60,63   | 1,50       | 4,47  | 241,1         | 1,03       | 1,72       | 0,52  | 0,020    | 2,00         |
| 8  | 41,57   | 60,63   | 1,14       | 4,57  | 231,4         | 0,76       | 1,72       | 0,55  | 0,017    | 1,70         |
| 9  | 41,57   | 60,65   | 1,27       | 4,70  | 270,3         | 0,73       | 1,72       | 0,63  | 0,019    | 1,90         |
| 10 | 41,56   | 60,65   | 1,50       | 5,34  | 242,5         | 1,18       | 1,90       | 0,54  | 0,021    | 2,10         |
| 11 | 41,56   | 60,62   | 0,78       | 7,50  | 255,7         | 0,63       | 0,90       | 0,11  | 0,002    | 0,20         |
| 12 | 41,56   | 60,61   | 1,36       | 4,76  | 244,8         | 1,00       | 1,70       | 0,48  | 0,017    | 1,66         |
| 13 | 41,55   | 60,59   | 0,64       | 1,07  | 284,7         | 0,60       | 0,86       | 0,08  | 0,001    | 0,12         |
| 14 | 41,58   | 60,57   | 1,35       | 5,30  | 221,9         | 1,30       | 1,66       | 0,24  | 0,009    | 0,93         |
| 15 | 41,57   | 60,57   | 1,40       | 5,52  | 209,8         | 1,00       | 1,71       | 0,50  | 0,021    | 2,08         |
| 16 | 41,56   | 60,57   | 1,37       | 5,27  | 275,1         | 1,00       | 1,72       | 0,49  | 0,015    | 1,54         |
| 17 | 41,55   | 60,58   | 1,38       | 4,43  | 225,1         | 1,10       | 1,72       | 0,43  | 0,016    | 1,65         |
| 18 | 41,54   | 60,63   | 1,35       | 5,69  | 246,0         | 1,20       | 1,76       | 0,38  | 0,013    | 1,30         |
| 19 | 41,55   | 60,61   | 1,46       | 5,00  | 254,2         | 1,18       | 1,88       | 0,51  | 0,018    | 1,84         |
| 20 | 41,56   | 60,64   | 1,41       | 4,36  | 267,4         | 1,00       | 1,84       | 0,59  | 0,020    | 1,96         |
| 21 | 41,56   | 60,59   | 1,30       | 4,69  | 248,3         | 0,60       | 1,72       | 0,73  | 0,024    | 2,39         |
| 22 | 41,56   | 60,58   | 1,44       | 4,40  | 256,7         | 1,14       | 1,72       | 0,42  | 0,015    | 1,47         |
| 23 | 41,57   | 60,58   | 1,44       | 3,36  | 264,4         | 0,50       | 1,80       | 0,94  | 0,032    | 3,20         |
| 24 | 41,57   | 60,60   | 1,47       | 4,73  | 217,0         | 0,55       | 1,78       | 0,90  | 0,038    | 3,85         |
| 25 | 41,57   | 60,59   | 1,49       | 5,25  | 226,5         | 1,40       | 1,66       | 0,19  | 0,008    | 0,80         |
| 26 | 41,57   | 60,62   | 1,45       | 3,90  | 247,0         | 1,10       | 1,90       | 0,58  | 0,021    | 2,14         |
| 27 | 41,54   | 60,62   | 1,46       | 3,77  | 298,8         | 0,80       | 1,66       | 0,63  | 0,019    | 1,93         |
| 28 | 41,53   | 60,62   | 1,43       | 4,52  | 274,7         | 1,10       | 1,84       | 0,53  | 0,017    | 1,73         |
| 29 | 41,54   | 60,59   | 1,36       | 4,79  | 265,0         | 0,99       | 1,66       | 0,46  | 0,015    | 1,47         |
| 30 | 41,54   | 60,57   | 1,36       | 4,97  | 242,0         | 0,75       | 1,75       | 0,68  | 0,024    | 2,40         |
| 31 | 41,53   | 60,58   | 1,46       | 3,77  | 298,8         | 0,80       | 1,66       | 0,63  | 0,019    | 1,93         |
| 32 | 41,53   | 60,60   | 1,42       | 4,78  | 258,6         | 1,10       | 1,78       | 0,48  | 0,017    | 1,66         |
| 33 | 41,52   | 60,62   | 1,48       | 4,26  | 232,1         | 1,00       | 1,94       | 0,70  | 0,028    | 2,79         |
| 34 | 41,51   | 60,60   | 1,37       | 4,86  | 233,1         | 1,00       | 1,78       | 0,53  | 0,020    | 1,97         |

|    |       |       |      |      |       |      |      |      |       |      |
|----|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|
| 35 | 41,52 | 60,59 | 3,28 | 1,31 | 254,2 | 3,20 | 3,32 | 0,20 | 0,016 | 1,59 |
| 36 | 41,56 | 60,66 | 1,36 | 4,10 | 250,4 | 0,50 | 1,80 | 0,88 | 0,030 | 3,02 |
| 37 | 41,55 | 60,65 | 1,58 | 2,88 | 240,9 | 1,10 | 2,00 | 0,71 | 0,029 | 2,93 |
| 38 | 41,55 | 60,66 | 1,36 | 4,19 | 232,6 | 0,60 | 1,70 | 0,75 | 0,027 | 2,75 |
| 39 | 41,54 | 60,67 | 1,37 | 5,00 | 246,5 | 0,99 | 1,72 | 0,50 | 0,017 | 1,75 |
| 40 | 41,53 | 60,69 | 1,26 | 5,00 | 240,6 | 0,90 | 1,66 | 0,48 | 0,016 | 1,57 |
| 41 | 41,54 | 60,66 | 1,32 | 4,18 | 239,6 | 0,50 | 1,70 | 0,79 | 0,027 | 2,74 |
| 42 | 41,53 | 60,67 | 1,41 | 4,30 | 267,1 | 0,90 | 1,80 | 0,63 | 0,021 | 2,10 |
| 43 | 41,54 | 60,65 | 1,58 | 3,38 | 237,3 | 1,00 | 1,90 | 0,71 | 0,030 | 2,97 |
| 44 | 41,52 | 60,63 | 1,45 | 4,17 | 247,2 | 0,70 | 1,80 | 0,80 | 0,029 | 2,94 |
| 45 | 41,51 | 60,62 | 1,44 | 3,94 | 245,8 | 1,00 | 1,84 | 0,60 | 0,022 | 2,23 |
| 46 | 41,51 | 60,64 | 1,40 | 4,16 | 252,1 | 1,10 | 1,66 | 0,39 | 0,014 | 1,37 |
| 47 | 41,51 | 60,65 | 1,35 | 5,31 | 236,9 | 1,00 | 1,78 | 0,53 | 0,019 | 1,88 |
| 48 | 41,51 | 60,67 | 1,43 | 3,97 | 236,4 | 0,90 | 1,84 | 0,67 | 0,026 | 2,55 |
| 49 | 41,53 | 60,64 | 1,40 | 5,38 | 258,6 | 1,00 | 1,72 | 0,50 | 0,017 | 1,71 |
| 50 | 41,53 | 60,65 | 1,38 | 4,70 | 241,5 | 1,00 | 1,84 | 0,58 | 0,021 | 2,08 |
| 51 | 41,52 | 60,66 | 0,65 | 4,29 | 237,4 | 1,00 | 1,72 | 0,23 | 0,004 | 0,40 |
| 52 | 41,51 | 60,67 | 1,36 | 4,42 | 229,7 | 0,50 | 1,60 | 0,75 | 0,028 | 2,78 |
| 53 | 41,52 | 60,68 | 1,33 | 3,71 | 239,0 | 0,98 | 1,79 | 0,54 | 0,019 | 1,88 |
| 54 | 41,52 | 60,69 | 1,26 | 4,51 | 249,2 | 0,90 | 1,66 | 0,48 | 0,015 | 1,52 |
| 55 | 41,52 | 60,71 | 1,09 | 5,07 | 218,8 | 0,60 | 1,45 | 0,46 | 0,014 | 1,45 |

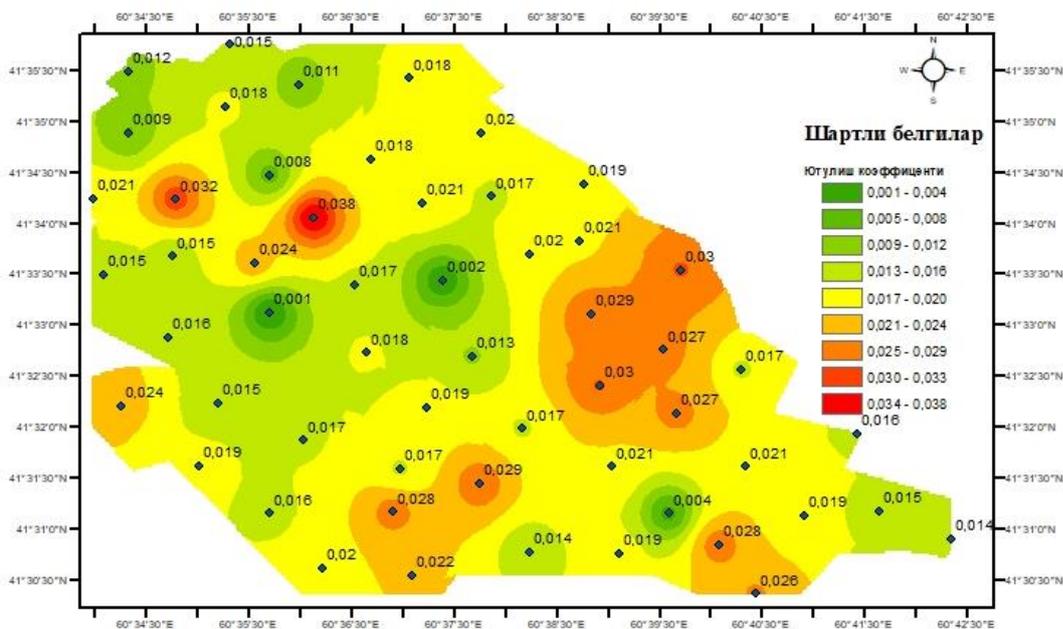
Олиб борилган микросейсмик ўлчовлар ва уларнинг асосида тузилган ютилиш коэффициенти ( $\alpha$ ) изолиния харитаси шуни кўрсатдики, шаҳар ҳудудида грунтларнинг зилзила энергиясини ютиш хусусиятлари турлича бўлиб, грунтларнинг литологик таркиби, зичлиги ва сувга тўйинганлик даражаси билан бевосита боғлиқ ҳолда ўзгаради (2-расм).

Тадқиқот ҳудуди геологик нуқтайи назардан қуйи Амударё ҳавзасига мансуб бўлиб, асосан текислик зонада жойлашган. Ушбу ҳудудда геологик кесимни кум, гил, қумтош, кум-шағалли жинслар ва палеоген, неоген даврларига оид ётқизиклар ташкил этади. Шу боис ютилиш коэффициентининг тақсимланиши грунтларнинг табиий турини ва уларнинг механик хоссаларини акс эттиради.

### Муҳокама

Ўтказилган тадқиқотлар натижасида шаҳар ҳудудида ютилиш коэффициенти ( $\alpha$ ) қийматлари 0,001 дан 0,038 гача бўлган интервалда аниқланди. Олинган маълумотлар грунтларнинг сейсмик энергияни ютиш қобилияти уларнинг литологик тузилиши, физик-механик хусусиятлари ва сувга тўйинганлик даражаси билан узвий боғлиқ эканини тасдиқлайди.

Ютилиш коэффициентининг паст қийматлари ( $\alpha = 0,001-0,010$ ) асосан зич структурага эга бўлган, цементланган ёки қаттиқ сиқилган гетероген (турли таркибли) грунтларга тегишли бўлиб, улар зилзила вақтида сейсмик энергиянинг минимал даражада ютилишини таъминлайди. Бундай грунтлар кўпинча қумтошлар, майда заррачали лой-қум аралашмалари ва механик жиҳатдан барқарор, юқори зичликка эга қатламлар билан ифодаланади. Бундай тузилмаларда ғоваклик паст, эластик модули юқори ва энергия узатиш қобилияти кучли бўлади.



2-расм. Ютилиш коэффициентининг майдон бўйича тақсимланиш харитаси.

Ютилиш коэффициентининг ортқича қийматлари ( $\alpha = 0,015-0,025$ ) асосан юмшоқ, тўлик зичлашмаган кумли-гилли қатламлар, ҳамда қисман сув билан тўйинган грунтларга хосдир. Бундай грунтлар сейсмик энергияни маълум даражада ютиб, унинг амплитудасини пасайтиради, бу эса бино-иншоот пойдеворлари барқарорлиги учун алоҳида аҳамиятга эга ҳисобланади.

Юқори ютилиш коэффициенти қийматлари ( $\alpha = 0,026-0,038$ ) эса, асосан, ғоваклиги юқори бўлган, намликка бой ва шўрлик хосилаларга ҳамда гил-қум, қум-шағал аралашмаларидан ташкил топган, чуқур сувли горизонтлар билан боғлиқ грунтларга хосдир. Ушбу грунтлар сейсмик энергияни сезиларли даражада ютиб, ер ости тебранишларининг сиртга чиқиш амплитудасини пасайтиради, бироқ бундай ҳудудларда деформация ва чўкиш жараёнларининг юз бериш эҳтимоли юқори бўлади.

Изолиниялар харитасида кузатилган ютилиш коэффициентининг кенг қиймат диапазони шаҳар ҳудудидаги грунтларнинг литологик бир хил эмаслигини ҳамда сувга тўйинган чуқур зоналарнинг мавжудлигини кўрсатади. Юқори  $\alpha$  қийматлари асосан қадимги дарё водийлари, сув тўпланиш майдонлари ва техноген таъсирдаги ҳудудлар билан боғлиқ бўлиши мумкин.

Умуман олганда, грунтларнинг зилзила энергиясини ютиш қобилияти қуйидаги геологик-геофизик омиллар билан белгиланади:

- грунт зичлиги – юқори зичликка эга грунтлар энергияни кам ютади ва сейсмик тўлқинларни узок масофага етказиш қобилиятига эга;
- сувга тўйинганлик даражаси – сув билан тўйинган грунтларда энергиянинг ютилиш даражаси юқори бўлади, бу эса динамик зичлик ва деформация хавфини оширади;
- грунт таркибидagi ғоваклик ва дарзланиш даражаси – ғоваклиги юқори бўлган грунтлар сейсмик энергияни кўпроқ ютади, бу эса сейсмик тўлқинларнинг сўнишини кучайтиради.

Тадқиқот натижалари шаҳар ҳудудида бино ва иншоотлар пойдеворларини жойлаштириш, сейсмик барқарорликни баҳолаш ва замонавий қурилиш технологияларини ишлаб чиқишда муҳим амалий аҳамиятга эга. Шу билан бирга, ютилиш коэффициентининг ҳудудий тақсимотини ўрганиш геологик тузилманинг мураккаблиги, динамик барқарорлик даражаси ва келгусидаги геофизик тадқиқотлар учун ишончли маълумот базасини яратишга хизмат қилади.

## ХУЛОСА

Урганч шаҳри ҳудудида олиб борилган микросейсмик тадқиқотлар натижалари, грунтларнинг зилзила энергиясини ютиш хусусиятини аниқлашда Н/В усулининг самарали эканлигини тасдиқлади. Тадқиқот давомида грунтларнинг эркин тебраниш частотаси, амплитудасининг спектрал таҳлили орқали сўниш коэффициенти ( $\xi$ ) ва ютилиш коэффициенти ( $\alpha$ ) аниқланди. Ушбу параметрлар шаҳар ҳудудидаги грунтларнинг сейсмик хавф даражасини

баҳолашда ва лойиҳалаш ишларида муҳим аҳамиятга эга. Ютилиш коэффициентининг қиймати грунтларнинг намлик даражаси, зичлиги ва литологик таркибига боғлиқ ҳолда сезиларли даражада фарқ қилгани қайд этилди. Қуруқ ва бўшоқ грунтларда ютилиш коэффициенти паст бўлиб, зилзила тўлқинлари кучайиши ва резонанс ҳодисаларини келтириб чиқариши мумкин. Намлик юқори бўлган гил ва қумли грунтларда эса ютилиш коэффициенти юқори бўлиб, зилзила энергияси тезроқ диссипация қилиниши қайд этилди.

Тадқиқот натижалари шаҳар инфратузилмасини сейсмик хавфдан муҳофаза қилиш мақсадида бино-иншоот пойдевор грунтларининг физик-механик ва сейсмик хусусиятларини инобатга олган ҳолда замонавий муҳандислик ечимларини ишлаб чиқишга илмий асос яратади. Шунингдек, мазкур усул келгусида сейсмик микрохудолаштириш ишларини янада аниқлаштириш ва сейсмик хавф хариталарини такомиллаштиришда кенг қўлланилиши мумкин.

#### ADABIYOTLAR

1. *Ismailov V.A., Yodgorov Sh.I., Allayev Sh.B., Mamrozikov T.U., Avazov Sh.B.* Seismic microzoning of the Tashkent territory based on calculation methods // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 2022. - Vol. 152. 107045, doi:10.1016/j.soildyn.2021.107045.
2. *Бозоров Ж., Исмаилов В.* Оценка влияния методов силикатизации лессовых грунтов на изменение их сейсмических свойств // *Вестник НУУз*. - 2020. - № 3/1. - С. 149-153.
3. *Field E., Jacob H.* Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio // *Bulletin of Earthquake Engineering* // Article. - 2008. - Vol. 6. - P. 75-108. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-007-9058-x>
4. *Nakamura Y.* A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI)*. - 1989. - 30 (1). - P. 25-33.
5. *Konno K., Ohmachi T.* Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1998. - 88 (1). - P. 235-237.
6. *Mitchell J.K.* *Fundamentals of Soil Behavior*. - 1993. - 44 p. <https://www.wiley.com>
7. *Tokimatsu K., Yoshimoto N.* Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Test Data // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. - 2004. P. 9.
8. *Bard P.* Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? In *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion* P. 1251-1279. Balkema. [https://www.researchgate.net/publication/228998764\\_Microtremor\\_measurements\\_A\\_tool\\_for\\_site\\_effect\\_estimation](https://www.researchgate.net/publication/228998764_Microtremor_measurements_A_tool_for_site_effect_estimation)
9. *Bonnefoy-Claudet S., Cotton F., & Bard P.-Y.* The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review // *Earth-Science Reviews*. - 2006. - № 79(3-4). - P. 215-220.

#### Анализ характеристик затухания энергии сейсмических волн в грунтах на основе микротреморных исследований

**А.Р. Рахматов, Н.М. Мухаммадқулов, Ж.Ш. Бозоров, Э.М. Ядигаров, А.С. Хусомидинов**

**Аннотация.** Статья посвящена анализу характеристик поглощения сейсмической энергии грунтами на территории города Урганч с использованием микросейсмических исследований. В рамках исследования с применением микросейсмического метода определены динамические параметры грунтов. Также на основе данных о собственных колебаниях грунтов оценена их способность к удержанию сейсмической энергии. Результаты исследования служат важной научной основой для оценки сейсмической безопасности городской инфраструктуры и разработки современных инженерных мероприятий.

**Ключевые слова:** грунт, инженерно-геологический, частота, амплитуда, микротремор, метод H/V, коэффициент затухания, коэффициент поглощения, спектральный анализ.

#### Analysis of the attenuation properties of seismic wave energy in soils through microtremor investigations

**A.R. Rakhmatov, N.M. Mukhammadqulov, Zh.Sh. Bozorov, E.M. Yadigarov, A.S. Khusomiddinov**

**Abstract.** This article is dedicated to analyzing the seismic energy absorption properties of soils in the Urgench city area using microseismic investigations. Within the framework of this study, the dynamic characteristics of soils were evaluated using the microseismic method. Based on free oscillation data, the ability of soils to retain seismic energy was assessed. The research provides a significant scientific basis for evaluating the seismic safety of urban infrastructure and developing modern engineering measures.

**Key words:** ground, engineering geology, frequency, amplitude, microtremor, H/V method, damping coefficient, absorption coefficient, spectral analysis.

УДК 550.34.012

**ИНТЕРПОЛЯЦИЯ Vs30 В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ДАННЫХ: ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**Д.Д. Юсупов<sup>1,2</sup>, С.Б. Халбаев<sup>1,2</sup>, Ж.З. Кодиров<sup>2</sup>, О.Ф. Закирова<sup>2</sup>, Т.У. Мамарозиков<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт сейсмологии им. Г.О. Мавлонова АН РУз, Ташкент, Республика Узбекистан<sup>2</sup>Филиал РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина в г. Ташкенте, Республика Узбекистан

E-mail: diyorbek.yusuopov@gmail.com

**Аннотация.** Рассматривается задача построения карт распределения параметра Vs30 (средней скорости распространения сдвиговых волн в верхних 30 м разреза) в условиях дефицита исходных данных на примере г. Ферганы. Проведён анализ нормативных требований к плотности точек наблюдений и установлено значительное несоответствие фактической плотности измерений. Для изучения влияния плотности и геометрии наблюдений на качество интерполяции разработаны три сценария моделирования Vs30, отражающие различную степень геологической сложности. Осуществлена интерполяция по четырём методам: Kriging, Minimum Curvature, Triangulation и Inverse Distance to a Power (IDW). По результатам качественного и количественного анализа установлено, что наилучшее соответствие геологической структуре обеспечивает метод Kriging. Выполнена интерполяция для г. Ферганы с использованием всех четырёх методов, а также дана оценка их эффективности. Работа послужила основой для последующего применения алгоритмов машинного обучения для автоматического построения карт Vs30 по инженерно-геологическим данным.

**Ключевые слова.** Vs30, сейсмическое микрорайонирование, интерполяция, Kriging, Minimum Curvature, Triangulation и Inverse Distance to a Power (IDW).

**Введение**

Параметр **Vs30** (средняя скорость распространения поперечных волн в верхних 30 м геологического разреза) является ключевым показателем при оценке сейсмической опасности и широко используется для целей **сейсмического микрорайонирования (СМР)**. Его значение напрямую влияет на расчёт сейсмического воздействия и проектирование инженерных сооружений. Высокая значимость Vs30 обусловлена тем, что он служит индикатором сейсмических свойств грунтов и входит в международные и национальные стандарты классификации территорий по сейсмической опасности [1, 2].

Сейсмическое микрорайонирование выполняется для различных типов территорий и объектов: в пределах населённых пунктов, вдоль трасс линейных сооружений (автомобильные и железные дороги, трубопроводы, тоннели, плотины и др.), а также для особо ответственных объектов (атомные электростанции, химические предприятия и др.) [3, 4].

В данной работе рассматривается задача СМР применительно к городской застройке. Такой выбор обусловлен необходимостью учитывать пространственное распределение инженерно-геологических условий на относительно плотной и неоднородной территории.

Оценка Vs30 может проводиться различными методами инженерно-геофизических исследований, включая сейморазведочные, методы пенетрации, вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) и др. При выполнении инженерных изысканий в городских условиях осуществляется точечная регистрация скоростных характеристик с соблюдением заранее намеченной плотности точек для исследуемой территории [3, 4].

Однако в реальных условиях не всегда удаётся обеспечить равномерное распределение точек измерений параметра Vs30 по исследуемой площади. Это связано с ограничениями, вызванными городской застройкой, недоступными или закрытыми для работ территориями и другими факторами. В результате происходит неравномерное покрытие территории измерительными точками, а также снижение фактической плотности наблюдений. Такая ситуация создаёт серьёзные трудности при интерпретации данных и пространственной экстраполяции результатов для построения карт распределения Vs30.

Актуальность решения данной задачи заключается в том, что выбор способа интерполяции и плотности измерений напрямую влияет на достоверность построения моделей инженерно-геологических условий. При этом действующие нормативные документы содержат лишь ориентировочные рекомендации относительно необходимой плотности измерений. Таким образом, возникает необходимость в сравнительном анализе различных методов интерполяции Vs30 и оценке влияния плотности наблюдений на точность построения карт, что и является основной целью данной работы.

В рамках исследования проведено моделирование карт распределения Vs30 с различной пространственной разрешённостью, выполнен сравнительный анализ методов интерполяции, а также определён наиболее подходящий способ для построения корректных карт Vs30 с учётом выявленных ограничений.

#### Проблематика интерполяции Vs30 на примере г. Ферганы

Основной проблемой при построении карты параметра Vs30 в городских условиях является несоответствие между нормативной плотностью точек измерений и фактическими возможностями полевых работ. Это несоответствие обусловлено рядом объективных факторов – плотная городская застройка, наличие территорий с ограниченным доступом, а также организационные и технические ограничения.

Целевой объект настоящего исследования – **город Фергана**, на территории которого в 2022 г. Институтом сейсмологии АН Республики Узбекистан выполнены работы по сейсмическому микрорайонированию. В рамках этих исследований проведены сейсморазведочные измерения методом многоканального анализа поверхностных волн (MASW) на **72 точках наблюдения**. На рис. 1 представлена карта распределения Vs30, построенная на основе полученных данных [5].

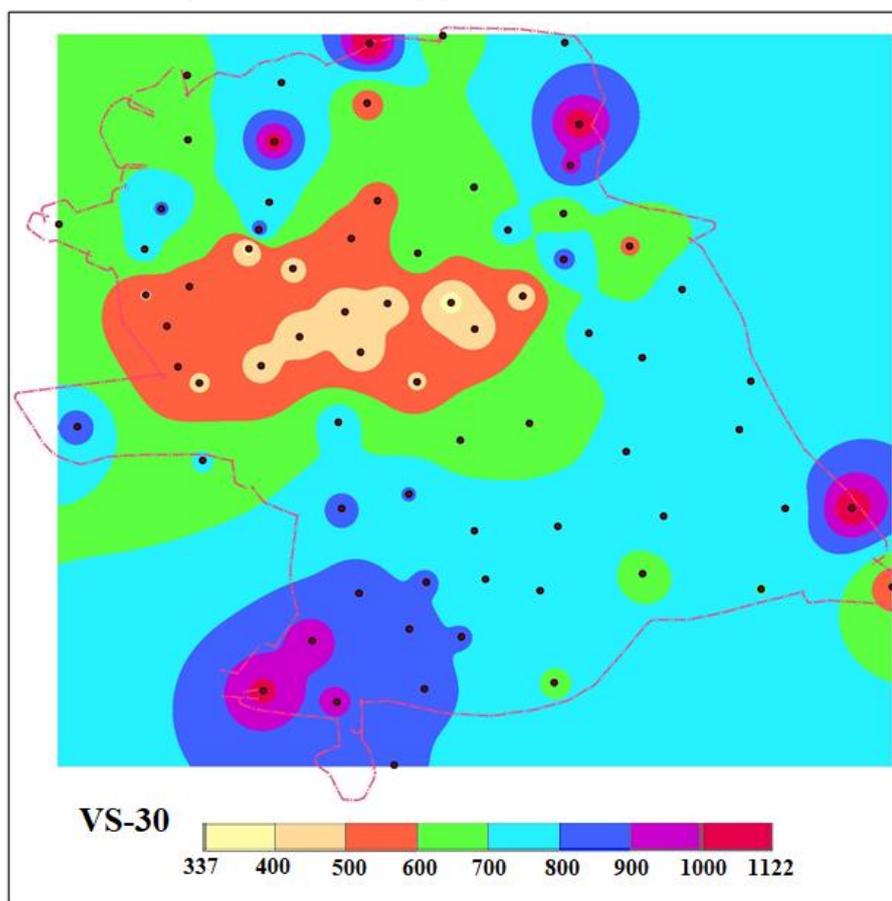


Рис. 1. Карта распределения Vs30 по г. Фергане на основе MASW (72 точки).  
Источник: Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, 2022 [5].

Отметим, что общая площадь города **95,6 км<sup>2</sup>**, и на её территории, согласно нормативным документам, должно быть обеспечено существенно большее количество точек наблюдений.

Для обоснования плотности точек измерений использованы два ключевых источника:

- РСН 60-86 – Республиканские строительные нормы [4];
- Методическое руководство по ДСР и СМР [3].

В соответствии с классификацией города (класс «Б», геологическая сложность – 3 категория) и с учётом масштабов проведения работ (1:25 000), расчёт необходимого количества точек приведён в табл. 1.

Таблица 1

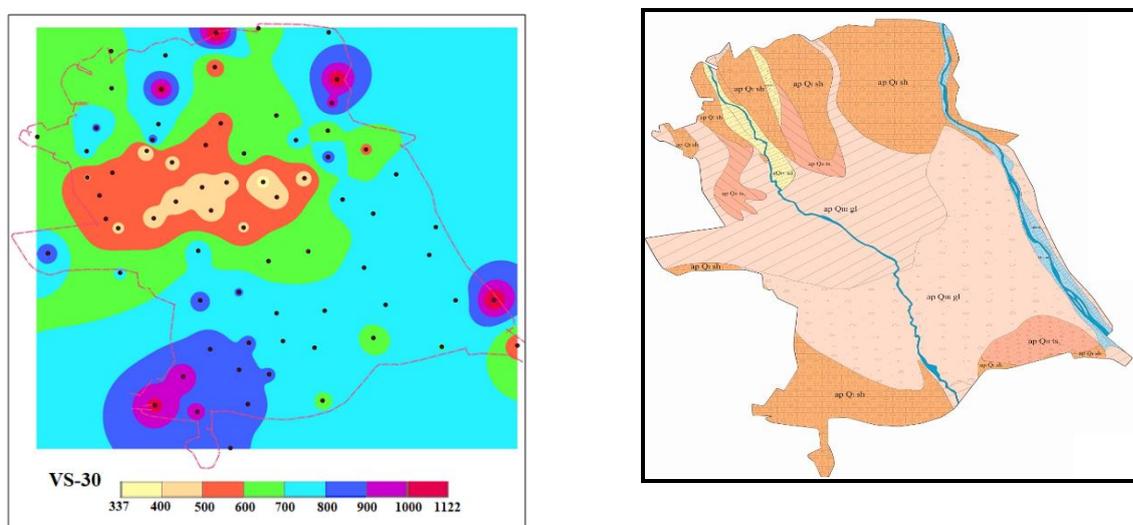
Расчёт необходимой плотности точек для оценки параметра Vs30 по нормативным документам

|  |  |                                   |         |
|--|--|-----------------------------------|---------|
| 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   |                                   |         |
| <b>Рекомендуемые плотности для разных масштабов карт согласно РСН-60-86</b>                              |  |                                   |         |
|  | 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   | <b>765</b>   | 956                               | 860,5   |
| Рекомендуемое количество для масштаба 1:25 000   | <b>287</b>   | 478                               | 382,5   |
| <b>Рекомендуемые плотности для разных масштабов карт согласно методическому руководству по ДСР и СМР</b> |  |                                   |         |
|  | мин  | макс                              | среднее |
| 1:25 000   | <b>192</b>   |                                   |         |
| <b>Вывод</b>   | 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 обрабатываемое количество   | 72   |                                   |         |
| Плотность на 1 кв.км.  | <b>0,75 точек</b>  |                                   |         |

Таким образом, фактическая плотность составляет **менее одной точки на квадратный километр**, что не соответствует ни одному из нормативных минимумов. Это указывает на явный **дефицит данных**, который серьёзно ограничивает возможности корректной интерполяции Vs30.

Дополнительно следует отметить, что, помимо недостаточной плотности точек измерений, построенная **карта распределения Vs30** демонстрирует **геометрическое несоответствие** фактической инженерно-геологической обстановке территории. При сопоставлении карты Vs30 с инженерно-геологической картой г. Ферганы выявлены расхождения в очертаниях зон с различными грунтовыми условиями (рис. 2). На **карте Vs30**

визуально прослеживается нарушение латеральной согласованности значений, что может быть следствием как недостаточной плотности наблюдений, так и некорректного выбора метода интерполяции. Следовательно, проблема интерполяции параметра  $V_{s30}$  в условиях дефицита данных усугубляется не только количественными, но и **качественными ошибками пространственного построения карт**.



**Рис. 2. Сопоставление карт распределения  $V_{s30}$  по г. Фергане и Геолого-литологической карты**

(условные обозначения – возраст и генезис породы).

Источник: Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, 2022.

### Моделирование распределения $V_{s30}$ на основе инженерно-геологических закономерностей

Распределение параметра  $V_{s30}$  тесно связано с инженерно-геологическими характеристиками разреза, а также с морфологией рельефа. Это объясняется тем, что именно физико-механические свойства горных пород (плотность, упругость, трещиноватость) в наибольшей степени определяют скоростные характеристики волнового поля, наблюдаемые в процессе сейморазведочных работ. Структурные особенности геологического строения, такие как наличие разломов, тектонических границ, смена литологических комплексов, также влияют на характер распространения сейсмических волн. Поэтому закономерности между инженерно-геологическими условиями и распределением  $V_{s30}$  физически обоснованы.

Таким образом, использование инженерно-геологических данных для моделирования  $V_{s30}$  является оправданным. Дополнительно, связь между уклоном рельефа, геоморфологическими особенностями и параметром  $V_{s30}$  была доказана в ряде международных исследований. Так, работы **T. Allen и D. Wald** [6] продемонстрировали, что уклон местности может использоваться в качестве прокси для  $V_{s30}$  в глобальных масштабах. Аналогично, **M. Matsuoka** [7] показал, что инженерно-геоморфологическая классификация позволяет с высокой достоверностью прогнозировать распределение параметра  $V_{s30}$ .

В настоящем исследовании данная физическая взаимосвязь использована в качестве основы для построения моделей распределения  $V_{s30}$ , что позволяет учитывать как поверхностные геологические данные, так и латеральные изменения скоростных характеристик.

В рамках данной работы смоделированы три сценария построения карт  $V_{s30}$ , на основе которых впоследствии проведено тестирование методов интерполяции. Размерность каждой карты составляла  $100 \times 100$  ячеек. Привязка к метрам и масштабу приведена ниже.

### *Первый сценарий моделирования: простые геометрические тела*

Первый сценарий предусматривал построение карты, содержащей простые геометрические фигуры, отражающие логическую дифференциацию различных геологических тел (рис. 3). Такой подход позволяет контролируемо задавать чёткие границы между зонами с различными скоростными характеристиками и является удобным инструментом для анализа поведения методов пространственной интерполяции, выявления артефактов и зон искажений.

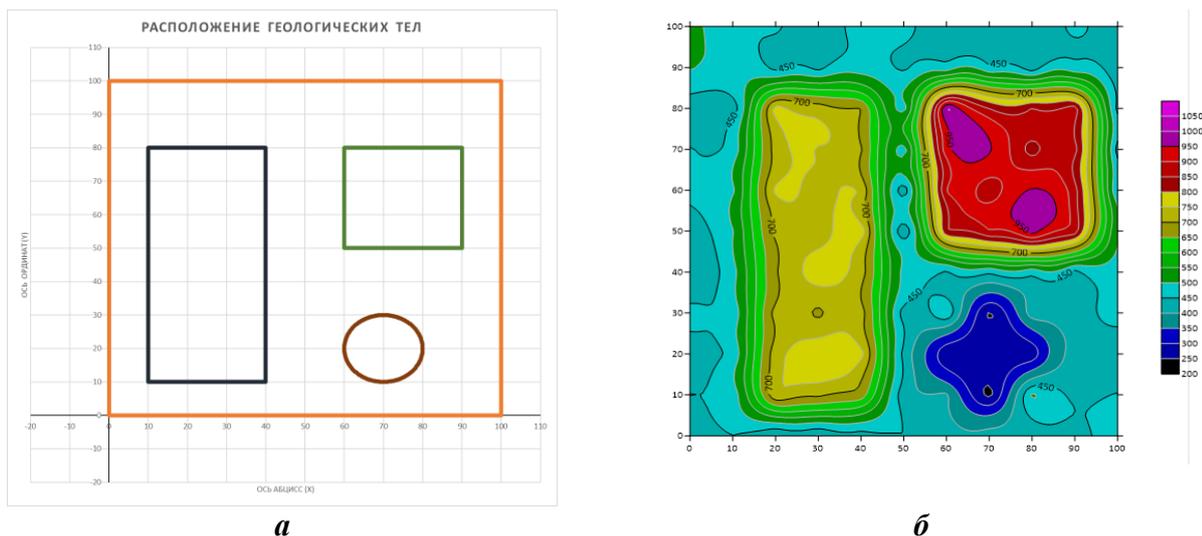
Карта включает четыре геологические зоны: прямоугольник, квадрат, окружность и фоновую область. Каждая фигура рассматривается как отдельная геологическая единица со своими скоростными характеристиками среды. Распределение тел представлено на рис. 3. Значения  $V_{s30}$  в пределах каждой геологической зоны были заданы на основе инженерно-геологических характеристик, типичных для района г. Ферганы, с учётом классификации NEHRP и отечественных нормативов по категориям грунтов (I-III). Принятые значения приведены в табл. 2.

Важно подчеркнуть, что  $V_{s30}$  моделировался не как постоянное значение в каждой зоне, а как **случайная величина, распределённая по нормальному закону**. Это решение обосновано как теоретически, так и эмпирически. Согласно руководству PEER,  $V_{s30}$  для различных геологических единиц – таких как голоценовые аллювиальные отложения – варьирует в пределах, описываемых нормальным распределением, что отражено в статистических данных (среднее и стандартное отклонение), полученных в рамках проекта NGA [8]. Таким образом, в рамках настоящей работы значения  $V_{s30}$  для каждой геологической зоны были смоделированы с помощью генерации случайных величин, подчиняющихся нормальному распределению с заданными параметрами: медианой ( $\mu$ ) и стандартным отклонением ( $\sigma$ ). Это позволяет учесть естественную вариабельность скоростных характеристик в пределах литологически однородной среды, приближая модель к реальным геофизическим условиям. Стоит отметить, что логика моделирования параметра  $V_{s30}$  посредством Гауссовского распределения была продолжена при построении карт по второму и третьему сценарию.

Таблица 2

Распределение значений параметров  $V_{s30}$  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     |



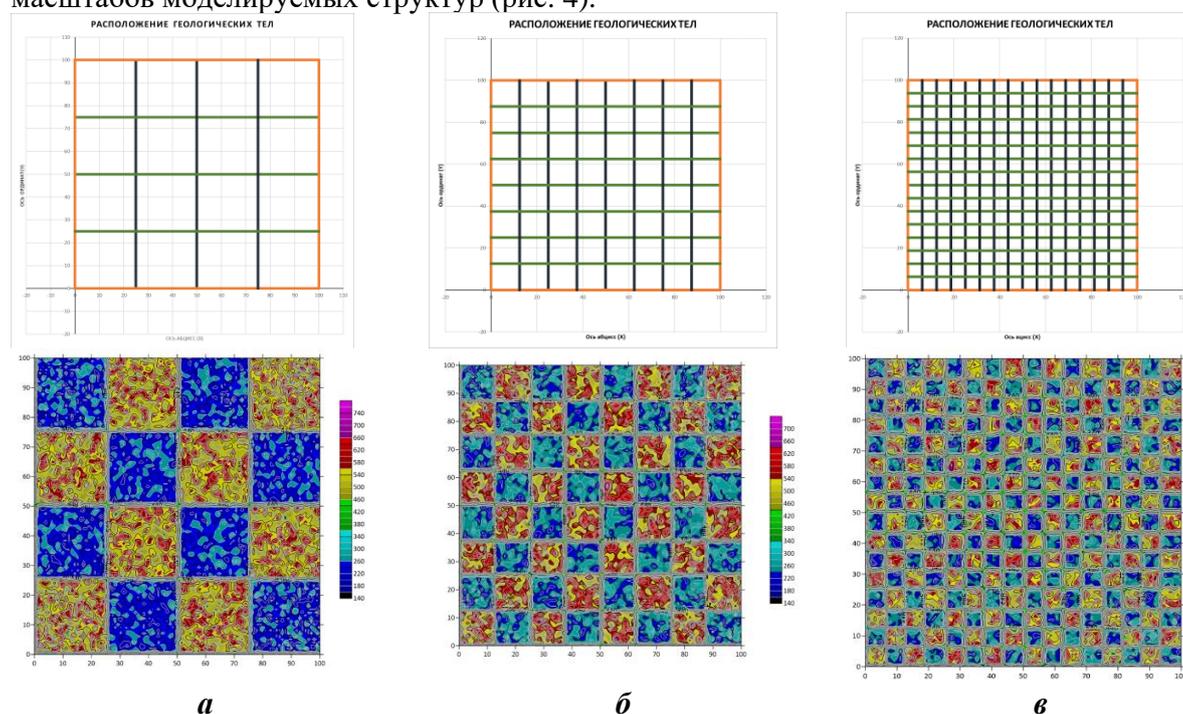
**Рис. 3. Моделирование карты Vs30 (первый сценарий) построением простых геометрических фигур**

(а – геометрическое распределение геологических зон; б – распределение параметров Vs30 по нормальному закону, построение методом Kriging).

***Второй сценарий моделирования: шахматные доски***

Второй сценарий моделирования был реализован в виде карт, представляющих сетку шахматного типа. Этот метод широко используется в задачах верификации и тестирования качества различных алгоритмов сейсмической томографии и интерполяции. Он позволяет задать строго контролируруемую чередующуюся структуру геологических зон с контрастными физико-механическими свойствами и тем самым служит удобным инструментом для количественной оценки разрешающей способности методов интерполяции.

В рамках данного сценария построены три карты с различной пространственной детализацией: 4×4, 8×8 и 16×16 ячеек, что соответствует различным уровням сложности и масштабов моделируемых структур (рис. 4).



**Рис. 4. Моделирование карты Vs30 (второй сценарий) в форме шахматных досок.**

(а – размерность 4×4, б – размерность 8×8, в – размерность 16×16).

Изменяя количество ячеек при фиксированной общей площади модели (2,5 км × 2,5 км), можно формально варьировать **размер наименьшего различного объекта**, тем самым имитируя различные сценарии геологической сложности и плотности измерений. Это позволяет оценить, при каком масштабе геологических неоднородностей данный метод интерполяции сохраняет достоверность.

Каждая ячейка шахматной структуры трактовалась как отдельная геологическая зона, с присвоением ей одного из двух характерных значений Vs30: **250 м/с** и **550 м/с**. Эти значения были выбраны также на базе данных анализа распределения скоростей по г. Фергане, но с достаточным контрастом для уверенного различия при последующей обработке.

Внутри каждой ячейки значения Vs30 моделировались как случайные величины с нормальным распределением, аналогично подходу в первом сценарии. Параметры распределений значений Vs30 представлены в табл. 3.

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 (рис. 5). 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.

Такая постановка задачи позволяет исследовать способность метода интерполяции не только воспроизводить крупномасштабную структуру, но и точно передавать локальные детали при различной плотности исходных точек. Особенно важно это в задачах, где Vs30 применяется для зонирования территории по сейсмическим свойствам в условиях фрагментированных наблюдений.

### *Третий сценарий моделирования: реалистичная геометрия и планирование плотности точек*

Третий сценарий моделирования – это логическое развитие концепции шахматных досок. При сохранении сеточной структуры (в данном случае 5×5 ячеек) модель допускает наличие не двух, а **до 16 различных типов геологических тел**, каждое из которых характеризуется собственным диапазоном значений Vs30 (рис. 6). Такой подход позволяет приблизить модель к реальным условиям строения геологического разреза, где литологическая неоднородность выражается в сложной, мозаичной структуре без резких и регулярных границ, как в предыдущем сценарии.

В отличие от резких контрастов второго сценария, здесь реализован **градиентный переход скоростей** между соседними зонами. Это отражает природную изменчивость свойств грунтов и позволяет моделировать как латеральные, так и вертикальные изменения сейсмических характеристик в пределах инженерно-геологического разреза. Каждая геологическая ячейка формировалась на основе Гауссовского распределения Vs30 с индивидуальными параметрами – медианой и стандартным отклонением.

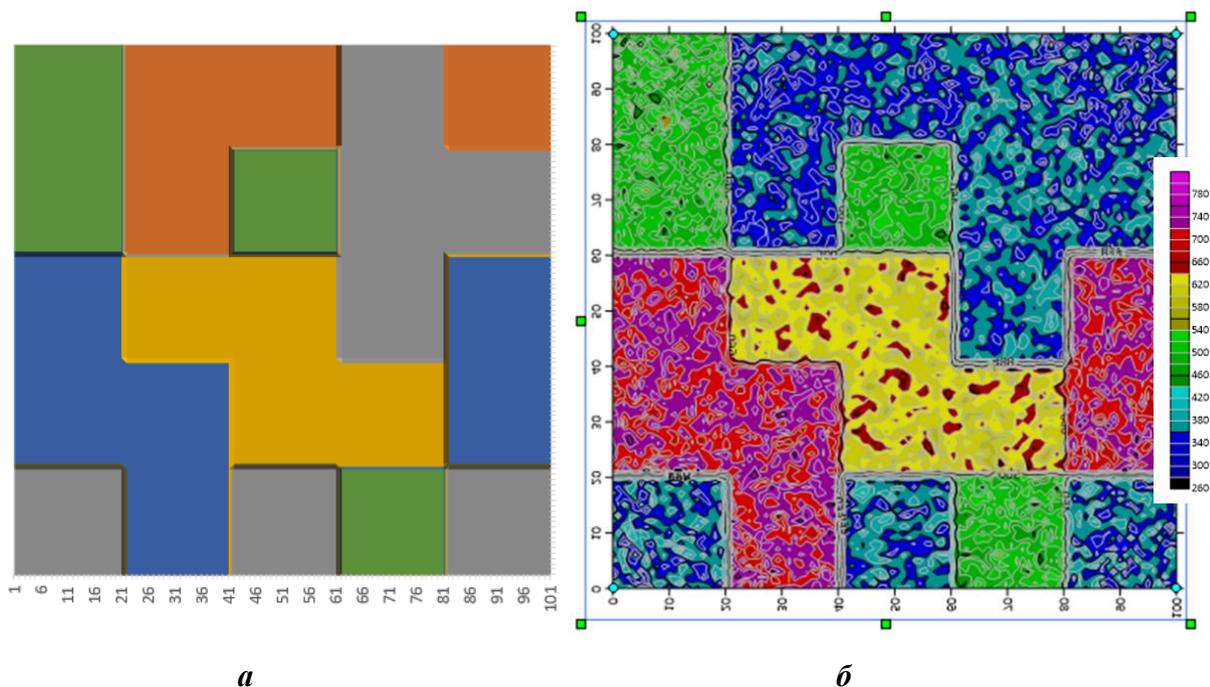
Кроме того, данный сценарий был реализован как **модульная платформа**, позволяющая:

- ✓ изменять количество зон (от 2 до 16);
- ✓ варьировать размерность сетки – выбирать желаемое количество (5×5, 10×10, 16×16 и др.);
- ✓ настраивать диапазоны Vs30 и параметры распределения;
- ✓ генерировать карты с заданными различными сценариями для последующего анализа методов интерполяции.

Это делает данную модель особенно перспективной не только для верификации алгоритмов интерполяции, но и как **инструмент планирования полевых инженерно-геофизических работ**. В частности, с её помощью можно:

- ❖ предсказывать поведение разных методов интерполяции в условиях сложной геологической обстановки;
- ❖ моделировать **варианты размещения точек** на карте и оценивать результат при различных плотностях наблюдений;
- ❖ оптимизировать выбор точек наблюдений на этапе предполевого анализа.

Таким образом, предложенная карта становится ключевым компонентом будущих исследований в области **планирования инженерных изысканий и стратегического распределения точек в условиях дефицита данных**. Кроме того, за её реализацией лежит **гибкий и математически корректный алгоритм**, который может быть расширен и адаптирован под задачи моделирования для любых территорий.



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

Таким образом, предложенная карта становится ключевым компонентом будущих исследований в области **планирования инженерных изысканий и стратегического распределения точек в условиях дефицита данных**. Кроме того, за её реализацией лежит **гибкий и математически корректный алгоритм**, который может быть расширен и адаптирован под задачи моделирования для любых территорий.

#### **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 км<sup>2</sup> (2,5 км × 2,5 км), что соответствует 100×100 ячейкам при размере одной ячейки 25 м × 25 м. Плотность наблюдательных точек представлена в табл. 4.

Плотность точек при разном количестве точек измерений на карте

| Плотность точек<br>(на км <sup>2</sup> ) | Количество точек<br>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<sup>2</sup>. При этом плотность менее 1 точки на км<sup>2</sup> была исключена из анализа в связи с недостаточной репрезентативностью (при 0,75 точки/км<sup>2</sup> количество скважин составляло бы всего 5 точек, что недостаточно для оценки интерполяции).

Таким образом, выбранные плотности точек позволили оценить работу методов интерполяции в условиях различной детальности и плотности наблюдений, что важно для планирования изыскательских работ в реальных условиях.

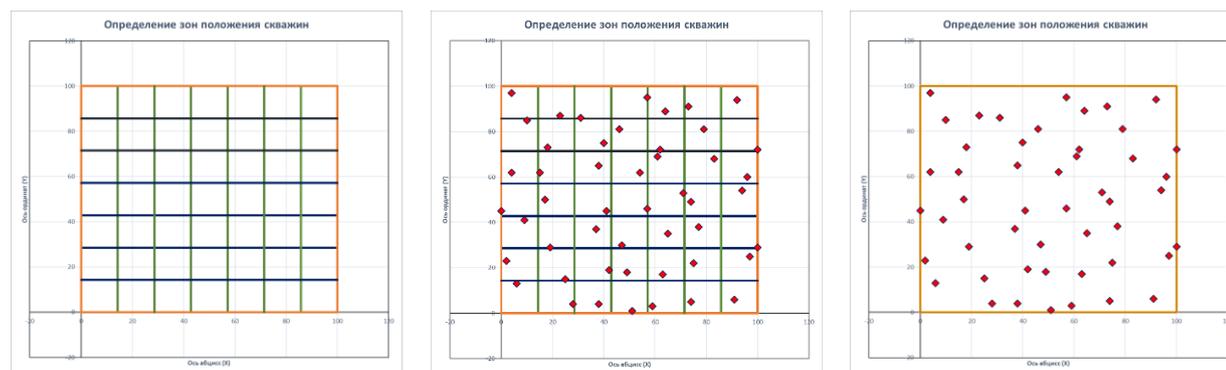
#### Методика распределения точек на карте

Для обеспечения равномерного покрытия территории точками измерений карта разбита на **49 квадратных зон (7×7)**. В пределах каждой зоны случайным образом выбиралась одна точка с условием минимального расстояния между точками не менее одной пятой стороны зоны.

Изначально сгенерированы **49 точек**, из которых затем случайным образом удалялись 4 точки для получения требуемого количества в 45 точек. Далее для задания плотностей 35, 25 и 15 точек производилось последовательное удаление точек с сохранением равномерности распределения. Таким образом, обеспечивалась пропорциональная разрядка сети точек без образования скоплений.

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

На рис. 7 представлен алгоритм выбора точек для исследований (для 45 точек).



**Рис. 7. Алгоритм определения зон и последующего определения равномерного покрытия точек по территории исследования.**

Для объективной количественной оценки качества интерполяции дополнительно сформирована тестовая выборка точек, которые не использовались при построении карты Vs30. Эти точки предназначены исключительно для валидации полученных интерполяционных моделей, по аналогии с методикой разбиения данных на обучающую и тестовую выборки в машинном обучении.

Выбраны **10 выколотых точек**, распределённых равномерно по всей карте. Для их размещения карта разделена на 5 квадратных зон, в каждой из которых случайным образом были выбраны 2 точки с условием минимального расстояния между ними (не менее одной пятой длины стороны зоны).

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

Кроме того, для обеспечения воспроизводимости эксперимента в табл. 5 приведены координаты всех точек: как участвующих в интерполяции, так и выколотых.

**Kriging (Ordinary Kriging)**. Геостатистический метод Kriging реализует концепцию пространственной автокорреляции через моделирование вариограммы. За счёт минимизации дисперсии предсказания метод даёт наилучшую интерполяцию в статистическом смысле. Он особенно эффективен в задачах с переменной плотностью данных, так как учитывает структуру взаимосвязей между точками. Кроме того, он позволяет адаптироваться к локальным геологическим условиям, что важно для территории с высокой неоднородностью, как, например, городская среда [11, 12].

**Minimum Curvature** Метод минимальной кривизны минимизирует суммарную кривизну поверхности, моделируя её как тонкий лист металла, натянутый над точками наблюдений. В отличие от многих других методов, он не создаёт искусственных экстремумов, и обеспечивает реалистичную гладкость распределения Vs30. Это делает его особенно подходящим для задач, где нужно сохранить естественную геометрию волнового поля в условиях нехватки данных [13].

**Triangulation with Linear Interpolation** Этот метод основан на построении триангуляции Делоне по точкам наблюдений. Внутри каждого треугольника значения интерполируются линейно. Метод не требует дополнительных предпосылок, имеет высокую вычислительную эффективность и идеально подходит для оперативного картографирования. Он позволяет точно сохранить значения Vs30 в точках измерений и минимизировать искажения [14, 15].

Таблица 5

Координаты скважин (участвующих в интерполяции и выколотых)

| Точки для расчета интерполяции |    |    |          |    |    |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
|--------------------------------|----|----|----------|----|----|----------|----|----|----------|----|----|---------|----|----|
| 45 точек                       |    |    | 35 точек |    |    | 25 точек |    |    | 15 точек |    |    | 7 точек |    |    |
| №                              | X  | Y  | №        | X  | Y  | №        | X  | Y  | №        | X  | Y  | №       | X  | Y  |
| 1                              | 2  | 0  | 1        | 2  | 0  | 1        | 2  | 0  | 1        | 2  | 0  | 1       | 44 | 98 |
| 2                              | 92 | 2  | 2        | 92 | 2  | 2        | 92 | 2  | 2        | 92 | 2  | 2       | 7  | 84 |
| 3                              | 53 | 4  | 3        | 53 | 4  | 3        | 53 | 4  | 3        | 53 | 4  | 3       | 12 | 53 |
| 4                              | 74 | 5  | 4        | 74 | 5  | 4        | 33 | 7  | 4        | 20 | 15 | 4       | 20 | 15 |
| 5                              | 33 | 7  | 5        | 33 | 7  | 5        | 66 | 15 | 5        | 44 | 22 | 5       | 75 | 33 |
| 6                              | 12 | 15 | 6        | 12 | 15 | 6        | 20 | 15 | 6        | 75 | 33 | 6       | 46 | 55 |
| 7                              | 20 | 15 | 7        | 20 | 15 | 7        | 44 | 22 | 7        | 96 | 50 | 7       | 79 | 88 |
| 8                              | 66 | 15 | 8        | 66 | 15 | 8        | 94 | 23 | 8        | 12 | 53 |         |    |    |
| 9                              | 75 | 20 | 9        | 44 | 22 | 9        | 3  | 30 | 9        | 46 | 55 |         |    |    |
| 10                             | 44 | 22 | 10       | 94 | 23 | 10       | 75 | 33 | 10       | 29 | 58 |         |    |    |
| 11                             | 94 | 23 | 11       | 3  | 30 | 11       | 28 | 36 | 11       | 58 | 76 |         |    |    |
| 12                             | 32 | 24 | 12       | 75 | 33 | 12       | 96 | 50 | 12       | 7  | 84 |         |    |    |
| 13                             | 3  | 30 | 13       | 28 | 36 | 13       | 64 | 51 | 13       | 95 | 86 |         |    |    |
| 14                             | 44 | 31 | 14       | 86 | 37 | 14       | 12 | 53 | 14       | 79 | 88 |         |    |    |
| 15                             | 75 | 33 | 15       | 36 | 38 | 15       | 46 | 55 | 15       | 44 | 98 |         |    |    |
| 16                             | 28 | 36 | 16       | 96 | 50 | 16       | 29 | 58 |          |    |    |         |    |    |
| 17                             | 67 | 37 | 17       | 64 | 51 | 17       | 87 | 60 |          |    |    |         |    |    |
| 18                             | 86 | 37 | 18       | 12 | 53 | 18       | 1  | 60 |          |    |    |         |    |    |
| 19                             | 36 | 38 | 19       | 78 | 53 | 19       | 58 | 76 |          |    |    |         |    |    |
| 20                             | 96 | 50 | 20       | 46 | 55 | 20       | 7  | 84 |          |    |    |         |    |    |
| 21                             | 64 | 51 | 21       | 29 | 58 | 21       | 95 | 86 |          |    |    |         |    |    |
| 22                             | 12 | 53 | 22       | 1  | 60 | 22       | 79 | 88 |          |    |    |         |    |    |
| 23                             | 78 | 53 | 23       | 87 | 60 | 23       | 25 | 92 |          |    |    |         |    |    |
| 24                             | 41 | 54 | 24       | 70 | 62 | 24       | 63 | 97 |          |    |    |         |    |    |
| 25                             | 46 | 55 | 25       | 22 | 68 | 25       | 44 | 98 |          |    |    |         |    |    |
| 26                             | 21 | 56 | 26       | 53 | 68 |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 27                             | 29 | 58 | 27       | 42 | 74 |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 28                             | 1  | 60 | 28       | 58 | 76 |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 29                             | 87 | 60 | 29       | 7  | 84 |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 30                             | 70 | 62 | 30       | 95 | 86 |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 31                             | 22 | 68 | 31       | 79 | 88 |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 32                             | 53 | 68 | 32       | 0  | 92 |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 33                             | 42 | 74 | 33       | 25 | 92 |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 34                             | 77 | 74 | 34       | 63 | 97 |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 35                             | 96 | 75 | 35       | 44 | 98 |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 36                             | 58 | 76 |          |    |    |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 37                             | 18 | 78 |          |    |    |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 38                             | 7  | 84 |          |    |    |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 39                             | 95 | 86 |          |    |    |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 40                             | 79 | 88 |          |    |    |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 41                             | 38 | 90 |          |    |    |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 42                             | 0  | 92 |          |    |    |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 43                             | 25 | 92 |          |    |    |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 44                             | 63 | 97 |          |    |    |          |    |    |          |    |    |         |    |    |
| 45                             | 44 | 98 |          |    |    |          |    |    |          |    |    |         |    |    |

| Выколотые точки |    |     |
|-----------------|----|-----|
| №               | X  | Y   |
| 1               | 21 | 34  |
| 2               | 32 | 80  |
| 3               | 83 | 100 |
| 4               | 54 | 1   |
| 5               | 68 | 71  |
| 6               | 12 | 14  |
| 7               | 7  | 55  |
| 8               | 57 | 88  |
| 9               | 92 | 49  |
| 10              | 48 | 38  |

### Обоснование выбора

Выбранные методы охватывают весь спектр подходов: от простых детерминированных до продвинутых геостатистических. Это позволяет провести всесторонний анализ:

- ✓ IDW – базовый метод с возможностью гибкой настройки влияния дальних точек;
- ✓ Kriging – сложный адаптивный метод с вариограммной моделью, чувствителен к структуре данных;
- ✓ Minimum Curvature – физически реалистичная гладкая интерполяция, хороша при разреженных данных;
- ✓ Triangulation – быстрый и точный инструмент для картографирования без переусложнения модели.

Дальнейшие этапы работы включают применение этих методов к модельным картам Vs30, построенным ранее, с последующим анализом качества интерполяции как по визуальным признакам (качественная оценка), так и по числовым показателям (количественная оценка ошибок).

### Интерполяция модельных данных Vs30 и визуализация результатов

После выбора и обоснования методов интерполяции следующим этапом исследования является применение их к ранее построенным модельным картам Vs30. Цель данного этапа – оценить, насколько эффективно каждый из выбранных методов восстанавливает пространственное распределение скоростных характеристик среды в различных сценариях геологической сложности (рис. 8-10) и при разной плотности измерений.

Для этого была проведена серия экспериментов по интерполяции, охватывающая:

- ❖ три сценария моделирования (геометрические фигуры, шахматные доски и сложная реалистичная модель);
- ❖ пять уровней плотности точек наблюдений (от 7 до 45 точек на 6,25 км<sup>2</sup>);
- ❖ четыре метода интерполяции (IDW, Kriging, Minimum Curvature и Triangulation).

Каждая комбинация (сценарий × плотность × метод) визуализирована в виде карты распределения Vs30, что позволило как провести качественную визуальную оценку, так и заложить основу для количественного анализа ошибок на этапе валидации.

На заключительном этапе исследования выполнена количественная оценка точности построения карт Vs30 по результатам интерполяции. В качестве тестовой выборки использовались «выколотые» точки, равномерно распределённые по территории и не участвовавшие в построении интерполяционных моделей.

Анализ проводился по следующим метрикам:

- ❖ среднеквадратичная ошибка;
- ❖ средняя абсолютная ошибка;
- ❖ отклонение от медианных значений.

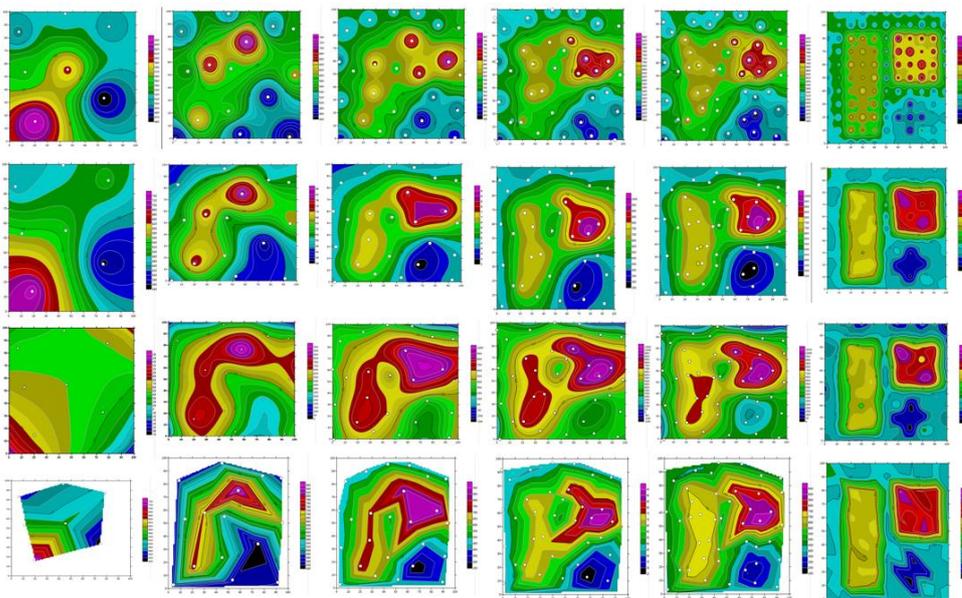


Рис. 8. Результаты интерполяций – карты Vs30, построенные по первому сценарию.

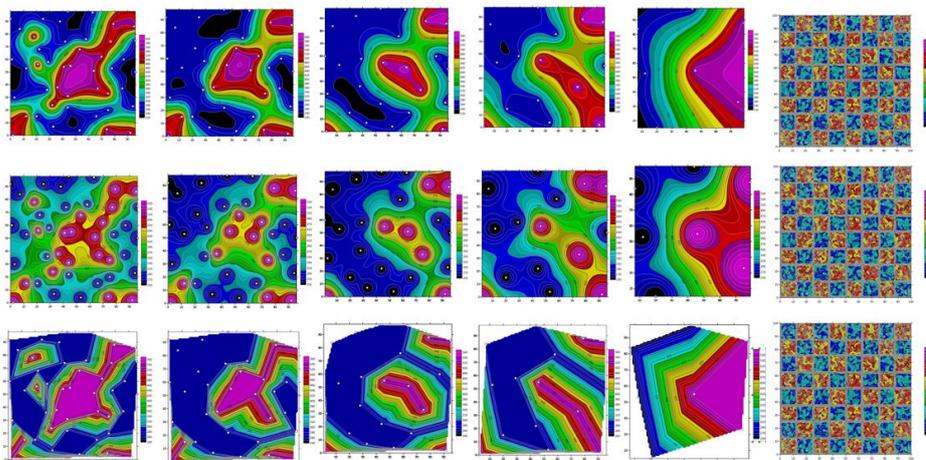


Рис. 9. Результаты интерполяций – карты Vs30, построенные по второму сценарию.

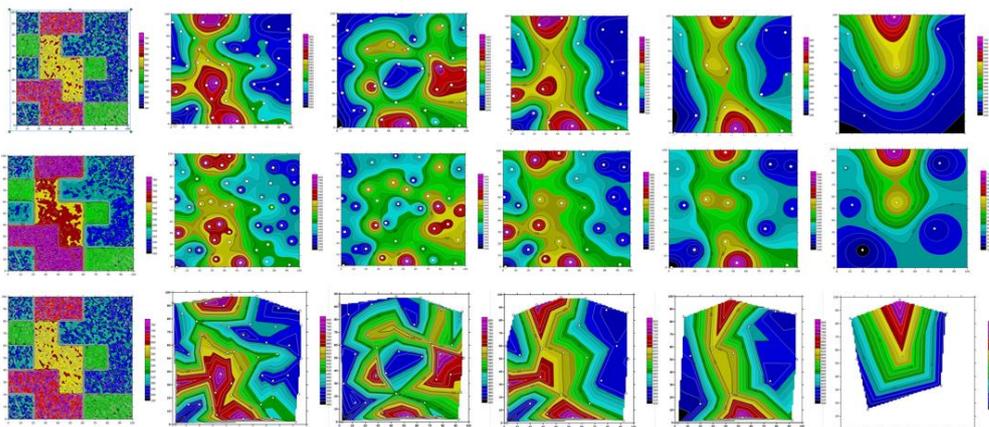


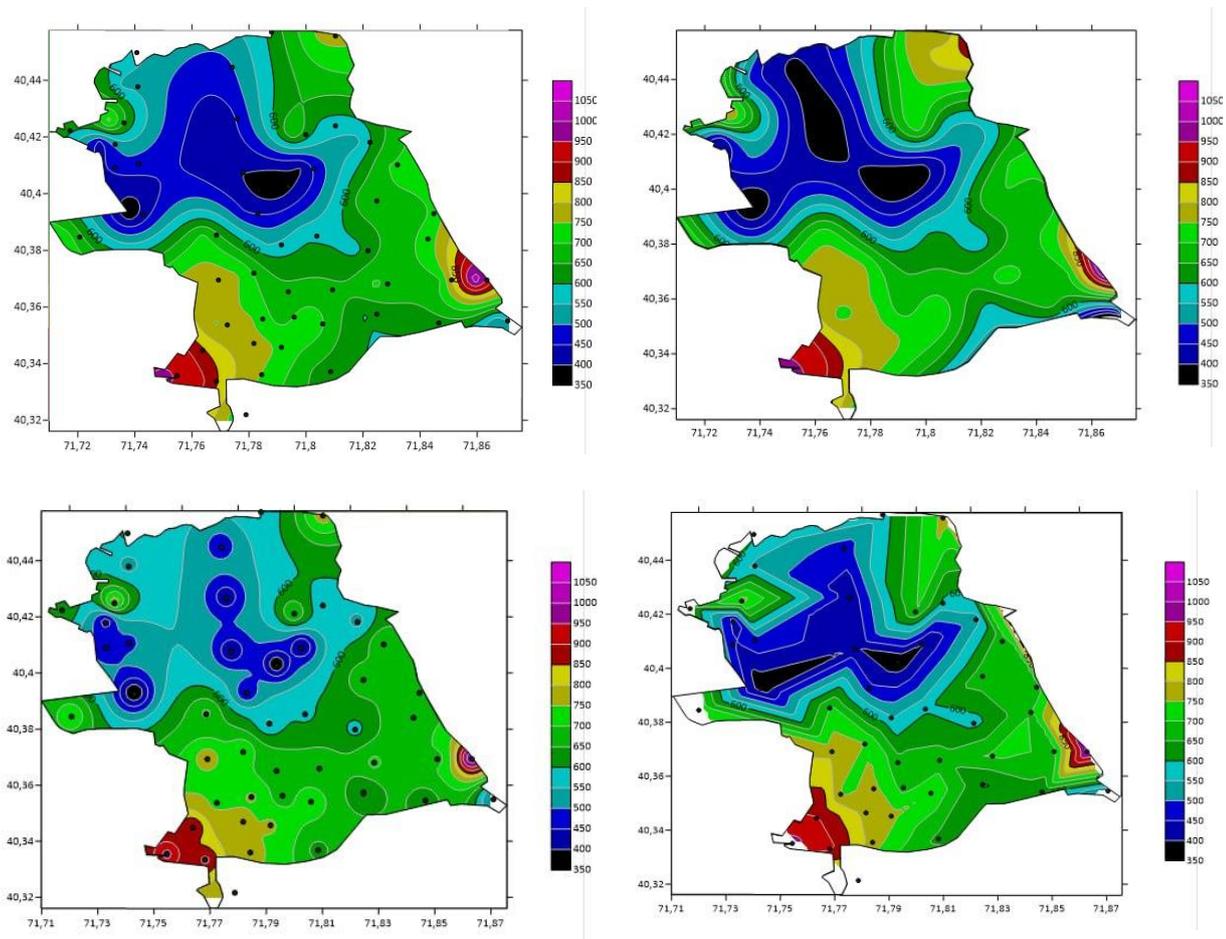
Рис. 10. Результаты интерполяций – карты Vs30, построенные по третьему сценарию.

Результаты позволили выделить следующие обобщённые закономерности.

- ✓ **Наилучшие результаты** по всем метрикам, а также и по качественному анализу, показал **метод Kriging**, что подтверждает его устойчивость к вариативности плотности точек и высокую адаптивность к структуре данных.
- ✓ **Метод минимальной кривизны** занял второе место, продемонстрировав хорошие показатели при моделировании плавных переходов, особенно в третьем сценарии.
- ✓ Методы **Triangulation** и **Inverse Distance to a Power (IDW)** показали существенно худшие результаты – с выраженными артефактами и низкой точностью при малой плотности наблюдений.

Эти выводы являются основанием для выбора **Kriging** в качестве основного метода построения карт Vs30 при дальнейших практических применениях, в т. ч. – для реальных данных по г. Фергане.

В качестве заключительного шага исследования была выполнена интерполяция параметра Vs30 для территории г. Ферганы с использованием всех четырёх рассмотренных методов (рис. 11). Это позволило провести их сравнительный анализ уже на реальных данных и оценить особенности работы каждого алгоритма в условиях ограниченного количества наблюдений и сложной инженерно-геологической структуры.



**Рис. 11. Результаты интерполяции параметра Vs30 для г. Ферганы по методам: Kriging, Minimum Curvature, Inverse Distance to a Power (IDW) и Triangulation.**

## Заклучение

В данной работе рассмотрена задача построения карт распределения параметра  $V_{s30}$  в условиях дефицита данных на примере территории г. Ферганы. Было показано, что при фактической плотности измерений, существенно не соответствующей нормативным требованиям, построение корректных карт требует особого подхода к интерполяции и учёта инженерно-геологических закономерностей.

Для решения поставленной задачи разработаны три сценария моделирования  $V_{s30}$ , отражающие различные типы геологической сложности. На их основе проведён всесторонний анализ четырёх методов интерполяции: Inverse Distance to a Power, Triangulation, Minimum Curvature и Kriging. Результаты количественного и визуального анализа показали, что:

- ✓ Kriging демонстрирует наилучшие результаты по точности, качеству и соответствию инженерно-геологической структуре;
- ✓ Minimum Curvature также показывает высокие показатели, особенно в сценариях с плавными градиентами скоростей;
- ✓ методы IDW и Triangulation оказались наименее устойчивыми, особенно при малой плотности точек.

На заключительном этапе все методы применены к реальным данным по г. Фергане. Полученные результаты подтвердили, что метод Kriging обеспечивает наибольшую согласованность с инженерно-геологической картой, сохраняя как крупномасштабные закономерности, так и локальные особенности геоструктур.

## Перспективы и развитие

Результаты, полученные в рамках данного исследования, легли в основу последующего этапа работы – разработки модели на базе методов машинного обучения, позволяющей строить карты  $V_{s30}$  непосредственно на основе инженерно-геологических карт.

Кроме того, предложенные подходы могут использоваться при планировании полевых изысканий: модель третьего сценария, а также алгоритм генерации точек с учётом плотности и разрешения, позволяют оптимизировать размещение наблюдательных скважин на ранних этапах инженерных проектов.

## 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 Республики Узбекистан, 2022. - 200 с.
6. Allen T.I., Wald D.J. Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions ( $V_{s30}$ ) and Amplification Around the Globe. U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1357. - 69 p.
7. Matsuoka M. Amplification Capability and Geomorphologic Classification // Tokyo Institute of Technology. Presentation materials and report. - 2012.
8. Wair B.R., DeJong J.T., & Shantz T. (2012). Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles. PEER Report 2012/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

9. Allen T.I., Wald D.J. (2009). On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (Vs30) // BSSA, 99(2A). - 935-943.
10. Golden Software, Inc. (2023). Surfer 23 Reference Manual.
11. Li W., Peng Y., Wang J. (2023). Spatially correlated Vs30 estimation in the Beijing area // Front. Earth Sci., 10:950582.
12. Li X., Heap A. (2022). Comparative Analysis of Interpolation Methods // Appl. Sci., 11(20):9566.
13. Briggs I.C. (1974). Machine contouring using minimum curvature // Geophysics, 39(1). - 39-48.
14. Surfer Help (2025). Triangulation with Linear Interpolation.
15. J. Geophys. Res. (2017). Crustal intrinsic and scattering attenuation of high-frequency shear waves.

### **Интерполяция Vs30 в условиях дефицита данных: инженерно-геологическое моделирование и перспективы развития**

**Д.Д. Юсупов, С.Б. Халбаев, Ж.З. Кодиров, О.Ф. Закирова, Т.У. Мамарозиков**

**Annotatsiya.** Maqolada Farg'ona shahri misolida Vs30 parametrining (yuqori 30 metr kesimdagi kesuvchi to'lqinlarning o'rtacha tezligi) tarqalish xaritalarini qurish masalasi, ma'lumotlar yetishmovchiligi sharoitida ko'rib chiqiladi. Kuzatuv nuqtalari zichligi bo'yicha me'yoriy talablar tahlil qilinib, amaldagi o'lchovlar zichligi bilan sezilarli tafovut mavjudligi aniqlangan. Interpolyatsiya sifati zichlik va joylashuv geometriyasiga qanday bog'liqligini o'rganish uchun turli geologik murakkablik darajasini aks ettiruvchi uchta Vs30 modellashtirish ssenariysi ishlab chiqildi. Interpolyatsiya to'rtta usul yordamida bajarildi: Kriging, Minimum Curvature, Triangulation va Inverse Distance to a Power (IDW). Sifat va miqdoriy tahlil natijalariga ko'ra, Kriging usuli geologik tuzilishga eng mos natijalarni bergani aniqlandi. Tadqiqot yakunida Farg'ona shahri uchun barcha to'rtta usul bo'yicha interpolyatsiya amalga oshirildi va ularning samaradorligi baholandi. Mazkur ish Vs30 xaritalarini muhandislik-geologik ma'lumotlar asosida avtomatik ravishda qurish uchun mashinaviy o'rganish algoritmlarini qo'llashda asos bo'ldi.

**Kalitli so'zlar.** Vs30, seismik mikrorayonlashtirish, interpolyatsiya, Kriging, Minimum Curvature, Triangulation, Inverse Distance to a Power (IDW)

### **Vs30 interpolation in conditions of data scarcity: engineering and geological modeling and development prospects**

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

**Abstract.** The article addresses the problem of constructing Vs30 distribution maps (average shear-wave velocity in the upper 30 meters of the subsurface) under data scarcity conditions, using the city of Fergana as a case study. An analysis of regulatory requirements for observation point density revealed a significant discrepancy with the actual number of measurements. To assess the impact of data density and spatial configuration on interpolation quality, three Vs30 modeling scenarios were developed, reflecting varying degrees of geological complexity. Interpolation was performed using four methods: Kriging, Minimum Curvature, Triangulation, and Inverse Distance to a Power (IDW). The results of both qualitative and quantitative analyses showed that Kriging produced the best match with the geological structure. In the final part of the study, all four methods were applied to real data from Fergana, and their performance was evaluated. The work laid the foundation for subsequent application of machine learning algorithms to generate Vs30 maps based on engineering-geological information.

**Keywords.** Vs30, seismic microzonation, interpolation, Kriging, Minimum Curvature, Triangulation, Inverse Distance to a Power (IDW)

| <b>M u n d a r i j a</b>   | sah.       |
|--|------------|
| <b>Ibragimova T.L.</b><br>O‘zbekistondagi o‘choq zonalarida zilzilalarning takrorlanish bahosi   | <b>5</b>   |
| <b>Yusupov D.D., Mamarozikov T.U.</b><br>MASW ma’lumotlari bo‘yicha Vs baholash usullarini takomillashtirish: usulning kamchiliklari va ularni bartaraf etish yo‘llari   | <b>16</b>  |
| <b>Mamarahimov J.Q.</b> Toshkentoldi hududida kuchli zilzilalar joylarini mashinaviy o‘rganish algoritmlari asosida aniqlash   | <b>32</b>  |
| <b>Egamberdiev S.A., Xusomiddinov S.S., Azimov A.M., Nuriddinov N.R.</b><br>Geomagnit maydonning kuchli bo‘ronlari va ularning lokal seysmiklikka ta’siri  | <b>39</b>  |
| <b>Abdullaev N., Atabaev D., Radjabov Sh.</b><br>Sanoat geofizikasi ma’lumotlari bo‘yicha Buxoro-Xiva regioni Chorjou pog‘onasi janubi-g‘arbiy qismi quduqlari kesmalarini davriy bo‘lish uslubiyati sharhi                  | <b>48</b>  |
| <b>Nurmatov U.A., Yusupdjanova U.A.</b><br>Markaziy O‘zbekiston faol yoriqlarining faolligi va makondagi holatini aniqlash masalasiga doir   | <b>56</b>  |
| <b>Sodiqov Yu.</b><br>G‘arbiy Tyan-Shanning neotektonik tuzilmalari (bloklari)   | <b>63</b>  |
| <b>Rahmatov A.R., Bozorov J.Sh., Yadigarov E.M., Xusomiddinov A.S., Muhammadqulov N.M., Jumayev D., Qodirboyev A.K.</b><br>Gruntlarning javob spektrlari asosida sintetik akselerogrammlar yaratish (Buxoro shahri misolida) | <b>75</b>  |
| <b>Yuldashev E.Sh., Islamov X.A.</b><br>Noyob obektlar uchun lokal seysmik kuzatuv tizimining magnituda sezish imkoniyati  | <b>83</b>  |
| <b>Artikov F.R., Kurbanov T.S., Alimov B.G.</b><br>Yer qobig‘ining deformatsiyasi natijasida kelib chiqadigan mikroseyismik maydonlarning o‘ziga xosligini aniqlash  | <b>87</b>  |
| <b>Рахматов А.Р., Мухаммадқулов Н.М., Бозоров Ж.Ш., Ядигаров Э.М., Хусомиддинов А.С.</b><br>Сейсмик тўлқин энергиясининг грунтларда ютилиш хусусиятини микротремор тадқиқодларида таҳлил қилиш                               | <b>101</b> |
| <b>Yusupov D.D., Xalbayev S.B., Kodirov J. Z., Zakirova O. F., Mamarozikov T.U.</b><br>Ma'lumotlar tanqisligi sharoitida vs30 interpolatsiyasi: muhandislik-geologik modellashtirish va rivojlanish istiqbollari             | <b>108</b> |

| <b>С о д е р ж а н и е</b>   | стр.       |
|--|------------|
| <b>Ибрагимова Т.Л.</b><br>Оценки повторяемости землетрясений в очаговых зонах Узбекистана  | <b>5</b>   |
| <b>Юсупов Д.Д., Мамарозиков Т.У.</b><br>Совершенствование оценки Vs по данным MASW:<br>ограничения метода и подходы к их преодолению   | <b>16</b>  |
| <b>Мамарахимов Ж.К.</b> Определение мест сильных землетрясений в<br>Приташкентском регионе на основе алгоритмов машинного обучения   | <b>32</b>  |
| <b>Эгамбердиев С.А., Хусомиддинов С.С., Азимов А.М., Нуриддинов Н.Р.</b><br>Сильные бури геомагнитного поля и их влияние на локальную сейсмичность   | <b>39</b>  |
| <b>Абдуллаев Н., Атабаев Д., Раджабов Ш.</b><br>Обзор методики циклического расчленения разрезов скважин<br>юго-западной части Чарджоуской ступени Бухаро-Хивинского региона,<br>по данным промысловой геофизики                 | <b>48</b>  |
| <b>Нурматов У.А., Юсупджанова У.А.</b><br>К вопросу уточнения активности и пространственного положения<br>активных разломов Центрального Узбекистана   | <b>56</b>  |
| <b>Садыков Ю.М.</b><br>Разломно-блоковые неотектонические структуры Западного Тянь-Шаня  | <b>63</b>  |
| <b>Рахматов А.Р., Бозоров Ж.Ш., Ядигаров Э.М., Хусомиддинов А.С.,<br/>Мухаммадкулов Н.М., Жумаев Д., Кодирбоев А.К.</b><br>Создание синтетических акселерограмм на основе спектров реакций грунтов<br>(на примере города Бухары) | <b>75</b>  |
| <b>Юлдашев Э.Ш., Исламов Х.А.</b><br>Возможность определения магнитуды локальной системы<br>сейсмических наблюдений для уникальных объектов  | <b>83</b>  |
| <b>Артиков Ф.Р., Курбанов Т.С., Алимов Б.Г.</b><br>Выявление специфики микросейсмических полей,<br>вызванных деформацией земной коры   | <b>87</b>  |
| <b>Рахматов А.Р., Мухаммадкулов Н.М., Бозоров Ж.Ш., Ядигаров Э.М.,<br/>Хусомиддинов А.С.</b><br>Анализ характеристик затухания энергии сейсмических волн в грунтах<br>на основе микротреморных исследований                      | <b>101</b> |
| <b>Юсупов Д.Д., Халбаев С.Б., Кодиров Ж.З., Закирова О.Ф., Мамарозиков Т.У.</b><br>Интерполяция Vs30 в условиях дефицита данных: инженерно-геологическое<br>моделирование и перспективы развития                                 | <b>108</b> |

| <b>C o n t e n t</b>   | page       |
|--|------------|
| <b>Ibragimova T.L.</b><br>Estimates of earthquake recurrence in focal zones in Uzbekistan  | <b>5</b>   |
| <b>Yusupov D.D., Mamarozikov T.U.</b><br>Improving the evaluation of VS based on MASW data: limitations of the method and approaches to overcome them  | <b>16</b>  |
| <b>Mamarakhimov J.K.</b><br>Identifying potential strong earthquake locations in the Tashkent region using machine learning algorithms   | <b>32</b>  |
| <b>Egamberdiev S.A., Xusomiddinov S.S., Azimov A.M., Nuriddinov N.R.</b><br>Strong geomagnetic field storms and their impact on local seismicity   | <b>39</b>  |
| <b>Abdullaev N., Atabaev D., Radjabov Sh.</b><br>Overview of the methodology of cyclic division of wells of the south-western part of the Chardzhou step of the Bukhara-Khiva region based on industrial geophysics data                         | <b>48</b>  |
| <b>Nurmatov U.A., Yusupdjanova U.A.</b><br>On the issue of clearing the activity and spatial position of active failures of Central Uzbekistan   | <b>56</b>  |
| <b>Sadykov Yu.</b><br>Fault-block neotectonic structures of the Western Tien Shan  | <b>63</b>  |
| <b>Rahmatov A.R., Bozorov J.Sh., Yadigarov E.M., Xusomiddinov A.S., Muhammadqulov N.M., Jumayev D., Qodirboyev A.K.</b><br>Creation of synthetic accelerograms based on the spectra of soil reactions (using the example of the city of Bukhara) | <b>75</b>  |
| <b>Yuldashev E.Sh., Islamov H.A.</b><br>Possibility of determining the magnitude of a local seismic observation system for unique objects  | <b>83</b>  |
| <b>Artikov F.R., Kurbanov T.S., Alimov B.G.</b><br>Identification of the specificity of microseismic fields caused by deformation of the earth's crust   | <b>87</b>  |
| <b>Rakhmatov A.R., Mukhammadqulov N.M., Bozorov Zh.Sh., Yadigarov E.M., Khusomiddinov A.S.</b><br>Analysis of the attenuation properties of seismic wave energy in soils through microtremor investigations                                      | <b>101</b> |
| <b>D.D. Yusupov, S.B. Khalbaev, Zh.Z. Kodirov, O.F. Zakirova, T.U. Mamarozikov</b><br>Vs30 interpolation in conditions of data scarcity: engineering and geological modeling and development prospects   | <b>108</b> |

**Коллектив авторов**

**SEISMOLOGIYA MUAMMOLARI**

**ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОЛОГИИ**

**SEISMOLOGY PROBLEMS**

**2025, № 1, том 7**

*Утверждено к печати Ученым советом  
Института сейсмологии им. Г.А.Мавлянова (29.05.2025 г. № 7)*

Редактор *Т.Г.Кочергина* (рус.)

Компьютерная верстка *В.Р.Юсупов*

---

Формат 80×64<sub>1/8</sub>. Усл. печ. л. 16. Уч.-изд. л. 18. Тираж 100 экз.  
Отпечатано в Бизнес Полиграф.  
Ташкент, Чиланзар, ул. Козиробот, 65.

Обуна индекси (подписной индекс) 1351.