

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

SEYSMOLOGIYA MUAMMOLARI

ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОЛОГИИ

PROBLEMS SEISMOLOGY

№ 1

ТОМ 8

2026

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 2026

TAHRIR XAY'ATI

Bosh muharrir:

Ismailov Vaxitxan

Alixanovich –

g.-m. f. d., prof.

Bosh muharrir o'rinbosari:

Alimuhamedov Ilxom

Mizratovich –

g.-m. f. n.

Mas'ul kotib:

Nurmatov Ulfat

Amanovich –

f.-m. f. n.

Tahrir hay'ati a'zolari:

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный
редактор:**

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

**Заместитель главного
редактора:**

**Алимухамедов Ильхом
Мизратович –
к. г.-м. н.**

**Ответственный
секретарь:**

**Нурматов Улфат
Аманович –
к. ф.-м. н.**

Члены редакционной коллегии:

Абдуллабеков Кахарбой Носирбекович, д. ф.-м. н., *акад. (Узбекистан)*; **Абдрахматов Канатбек Ермакович**, д. г.-м. н., *акад. (Киргизия)*; **Пулод Аминзода**, д. т. н. *(Тажикистан)*; **Атабаев Дилшод Хусайнбаевич**, д. г.-м. н., *проф. (Узбекистан)*; **Етирмишли Гурбан Джалал ўгли**, д. г.-м. н., *член-корр. НАНА (Азербайджан)*; **Ибрагимова Татьяна Львовна**, 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)*; **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. Зульфияханум, 3. Тел.: +99871 241-51-70; +99871 241-44-80. E-mail: seismologiya@mail.ru. Website: www.seismos.uz

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief:

**Ismailov Vahidkhan
Alikhanovich –**

D.Sc. in Geol. & Min., Prof.

Deputy Chief Editor:

**Alimukhamedov Ilkhom
Mizratovich –**

PhD in Geol. & Min.

Assistant Editor:

**Nurmatov Ulfat
Amanovich –**

PhD in Phys. & Math.

Members of the Editorial Board:

Abdullabekov Kakharboy 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);* **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);* **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

ПРОБЛЕМА СОГЛАСОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА

Р.С. Ибрагимов

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

E-mail: ibrroma@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается проблема согласования площадных и разломных моделей сейсмических источников при вероятностной оценке сейсмической опасности. Показано, что совместное использование различных типов источников может приводить к противоречиям в оценках скоростей высвобождения сейсмического момента, повторяемости сильных землетрясений и распределения сейсмичности между разломными и фоновыми компонентами модели. Предложена концептуальная схема согласования моделей, основанная на использовании двух независимых критериев. Первый критерий связан с балансом скоростей высвобождения сейсмического момента и отражает согласованность энергетического бюджета различных представлений региональной сейсмичности. Второй критерий основан на сопоставлении повторяемости сильных землетрясений и рассматривается как проверка гипотезы о квазистационарности регионального сейсмического процесса. В качестве основных инструментов согласования рассмотрены модели повторяемости активных разломов и параметризация фоновой сейсмичности. Отмечена необходимость учета геодинамической неоднородности территории Узбекистана при построении фоновых компонентов модели. Предлагаемый подход может служить основой для разработки физически согласованных моделей сейсмических источников в задачах вероятностной оценки сейсмической опасности.

Ключевые слова: вероятностная оценка сейсмической опасности, PSHA, сейсмические источники, активные разломы, фоновая сейсмичность, скорость высвобождения сейсмического момента, повторяемость землетрясений, Узбекистан.

Введение. Вероятностная оценка сейсмической опасности (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA) [Cornell, 1968; McGuire, 2004] в настоящее время является общепринятым инструментом количественной оценки ожидаемых сейсмических воздействий при проектировании ответственных сооружений и разработке нормативных документов по сейсмостойкому строительству. Ключевым элементом PSHA являются модели сейсмических источников, определяющие пространственное распределение сейсмичности, параметры повторяемости землетрясений и максимальные ожидаемые магнитуды.

Исторически наиболее широко распространены площадные модели сейсмических источников, основанные на анализе инструментальных и исторических каталогов землетрясений. В рамках такого подхода исследуемая территория разделяется на сейсмоопасные зоны, для которых определяются параметры повторяемости землетрясений и характеристики сейсмического режима. Вместе с тем развитие неотектонических, геологических, геодезических и палеосейсмологических исследований привело к накоплению значительного объема данных об активных разломах, включая сведения об их геометрии, кинематике и скоростях современных смещений. Это создало предпосылки для широкого использования разломных моделей сейсмических источников в современных исследованиях сейсмической опасности.

Современная практика PSHA всё чаще предполагает совместное использование площадных и разломных моделей. Однако такое объединение различных типов источников далеко

не всегда является тривиальной задачей. Площадные и разломные модели формируются на основе различных наборов исходных данных, характеризуют различные временные интервалы наблюдений и используют различные подходы к описанию сейсмического процесса. В результате для одного и того же региона могут возникать существенные различия в оценках скоростей высвобождения сейсмического момента, повторяемости сильных землетрясений и распределения сейсмичности между разломными и фоновыми компонентами модели.

Для территории Узбекистана данная проблема приобретает особую актуальность. С одной стороны, для региона разработаны детальные площадные модели сейсмических источников, основанные на многолетних каталогах инструментальной и исторической сейсмичности. С другой стороны, в последние годы существенно расширилась информация об активных разломах Тянь-Шаня и сопредельных территорий, включая данные о геометрии разломов, скоростях позднечетвертичных смещений и параметрах современных деформаций. Использование этих данных в рамках вероятностной оценки сейсмической опасности неизбежно ставит вопрос о согласовании различных представлений региональной сейсмичности.

Несмотря на широкое применение комбинированных моделей источников, вопросы их согласования до настоящего времени остаются недостаточно разработанными. В большинстве исследований основное внимание уделяется параметризации отдельных компонентов модели, тогда как критерии физической непротиворечивости площадных и разломных представлений сейсмичности формулируются лишь косвенно или вовсе отсутствуют.

В настоящей работе рассматривается проблема согласования площадных и разломных моделей сейсмических источников в рамках вероятностной оценки сейсмической опасности. Предлагается подход, основанный на использовании двух независимых критериев согласования: баланса скоростей высвобождения сейсмического момента и соответствия повторяемости сильных землетрясений. Первый критерий отражает согласованность энергетического бюджета моделей, тогда как второй может рассматриваться как проверка гипотезы о квазистационарности регионального сейсмического процесса на различных временных масштабах. Рассматриваются основные инструменты согласования моделей, включая выбор закона повторяемости для активных разломов и параметризацию фоновой сейсмичности, а также предлагается общая схема построения физически непротиворечивых моделей сейсмических источников для задач PSHA.

Постановка задачи согласования площадных и разломных моделей

В современной практике вероятностной оценки сейсмической опасности для описания пространственного распределения сейсмичности обычно используются два принципиально различных подхода – площадные и разломные модели сейсмических источников.

Площадные модели основываются преимущественно на анализе инструментальных и исторических каталогов землетрясений. В этом случае территория разделяется на отдельные сейсмогенные зоны, для каждой из которых определяются параметры повторяемости землетрясений, максимальные магнитуды и характеристики сейсмического режима. Пример подобной модели для территории Узбекистана приведен на рис. 1.

Разломные модели, напротив, используют информацию о геометрии активных разломов, их кинематике, скоростях современных смещений и сейсмическом потенциале. Пример разломной модели представлен на рис. 2.

Несмотря на то, что оба подхода предназначены для описания одного и того же природного процесса, используемые исходные данные и методы параметризации существенно различаются. Площадные модели являются, прежде всего, статистическим представлением наблюдаемой сейсмичности, тогда как разломные модели отражают геологические и геодинамические особенности накопления тектонических деформаций.

При независимом построении площадных и разломных моделей могут возникать внутренние противоречия, затрудняющие их совместное использование в рамках единой схемы PSHA. Наиболее существенны следующие проблемы:

- различие скоростей высвобождения сейсмического момента, определяемых по каталогам землетрясений и по параметрам активных разломов;
- различие оценок повторяемости сильных землетрясений, получаемых по данным современной сейсмичности и по скоростям позднечетвертичных смещений;

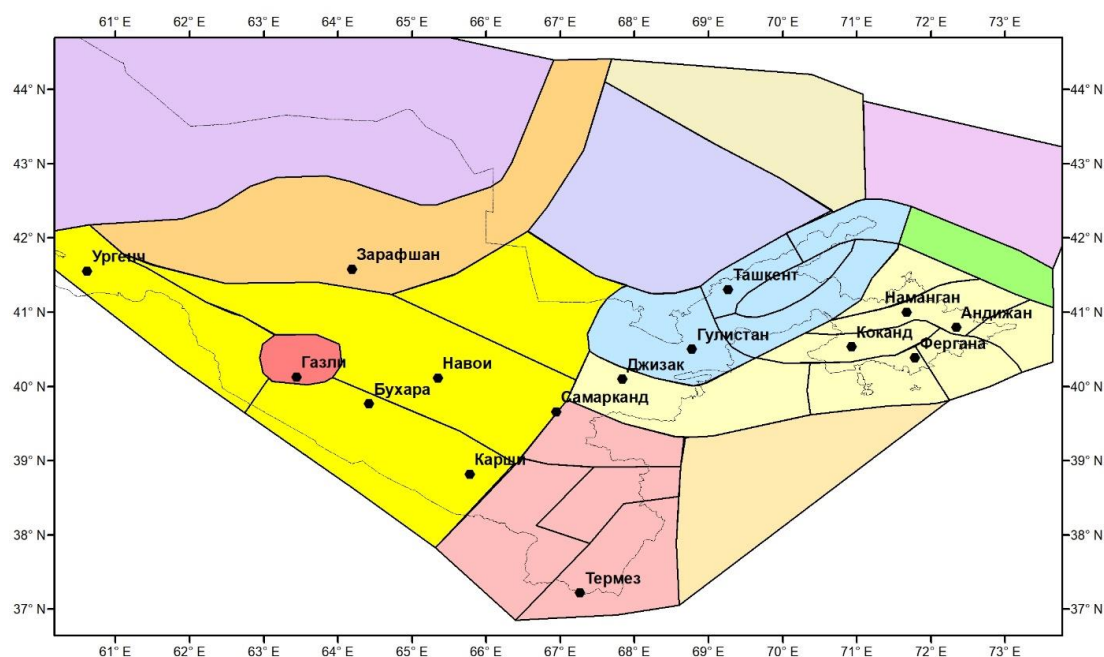


Рис. 1. Схематическая карта площадной модели территории Узбекистана.
Figure 1. Schematic map of the seismic area-source model of Uzbekistan.

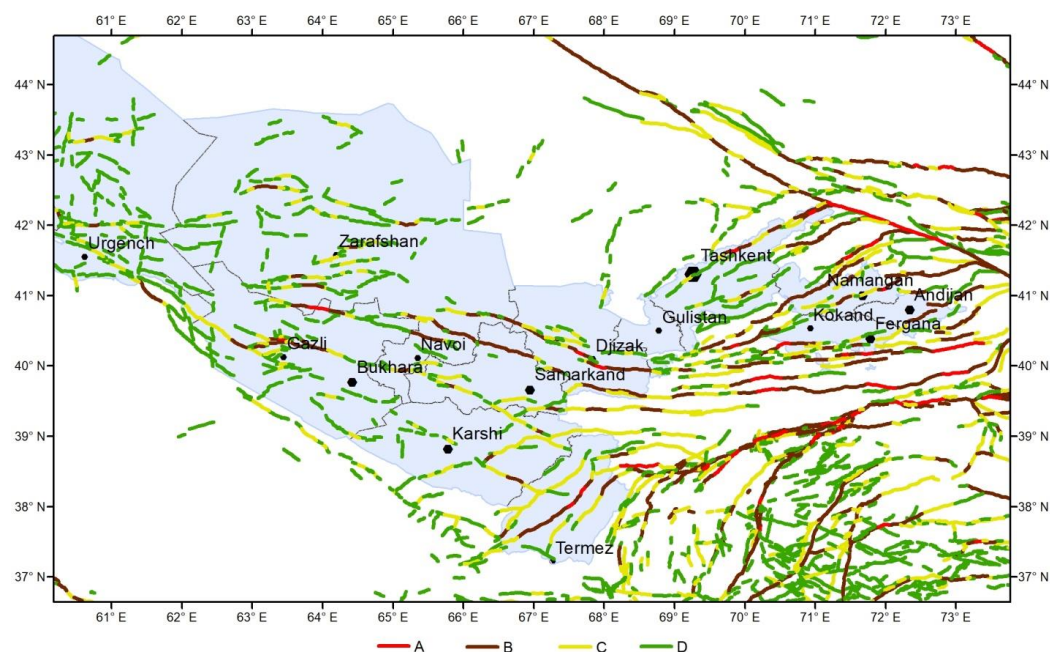


Рис. 2. Карта активных разломов земной коры территории Узбекистана, по [Bachmanov et al., 2017], с указанием классов достоверности проявления современной геодинамической активности.
Figure 2. Map of active crustal faults in Uzbekistan after [Bachmanov et al., 2017], showing the reliability classes of evidence for recent geodynamic activity.

- неопределенность распределения сейсмичности между разломными и фоновыми компонентами модели;
- возможность двойного учета части сейсмичности при одновременном использовании площадных и разломных источников.

На рис. 3 схематически показаны основные элементы данной проблемы. Площадная модель формируется на основе каталогов землетрясений и параметров повторяемости, характеризующих современный этап развития сейсмического процесса. Разломная модель базируется на геологических данных и отражает накопленный результат тектонических

деформаций за существенно более длительные интервалы времени. Вследствие различия временных масштабов и используемых исходных данных параметры этих моделей не обязаны автоматически совпадать. Поэтому при совместном использовании различных типов сейсмических источников возникает задача их физически обоснованного согласования. В настоящей работе предполагается, что такое согласование должно осуществляться на основе независимых критериев, характеризующих как энергетические параметры сейсмического процесса, так и его долговременную устойчивость во времени.

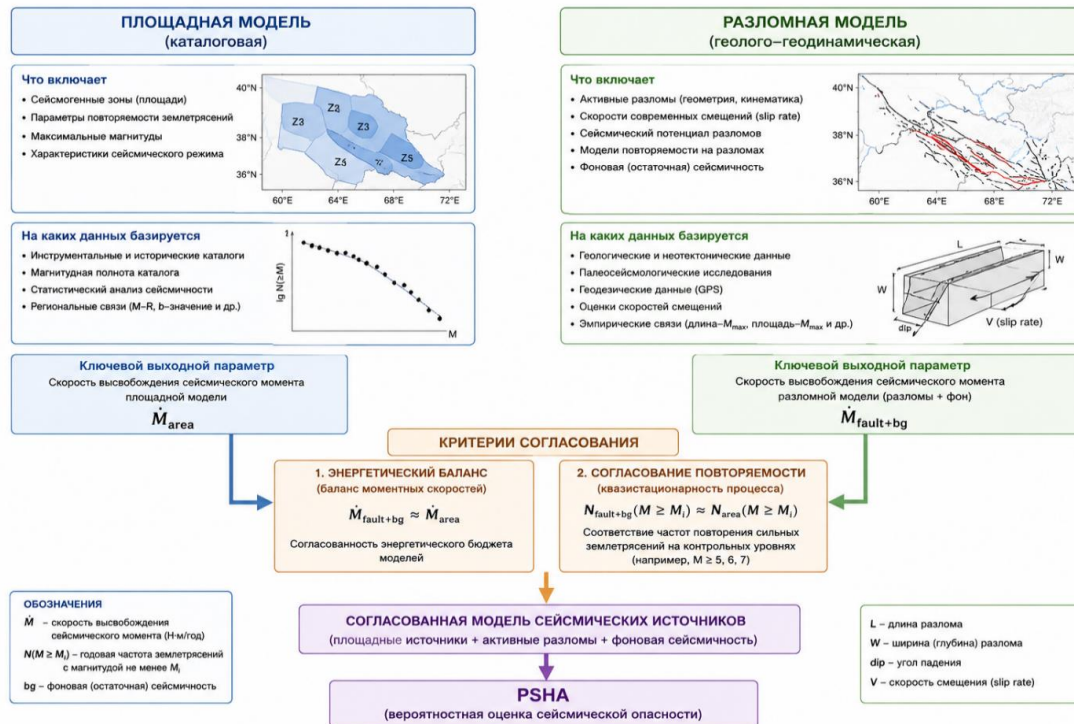


Рис. 3. Схематическое представление проблемы согласования площадных и разломных моделей сейсмических источников.

Figure 3. Schematic illustration of the harmonization problem between area-source and fault-source seismic models.

Критерий энергетического баланса

Одной из основных проблем совместного использования площадных и разломных моделей сейсмических источников является обеспечение их физической согласованности. Поскольку обе модели предназначены для описания одного и того же тектонического процесса, они должны характеризоваться сопоставимыми скоростями накопления и высвобождения тектонической деформации.

В настоящей работе в качестве первого критерия согласования предлагается использовать баланс скоростей высвобождения сейсмического момента. Сейсмический момент является интегральной характеристикой землетрясения и определяется величиной смещения по разлому, площадью разрыва и упругими свойствами среды. Хотя сейсмический момент не является прямой мерой энергии, он непосредственно связан с работой, совершаемой при смещении крыльев разлома, и поэтому широко используется для количественной оценки интенсивности тектонического процесса. Для землетрясений с моментной магнитудой (M) сейсмический момент определяется соотношением Hanks–Kanamori [Hanks, Kanamori, 1979]:

$$M_0(M) = 10^{1.5M+9.1},$$

где (M_0) – сейсмический момент (Н·м).

Для площадных моделей скорость высвобождения сейсмического момента определяется на основе параметров повторяемости землетрясений:

$$\lambda(M) = \lambda_{ref} 10^{-b(M-M_{ref})},$$

где λ_{ref} – частота повторения референтной магнитуды M_{ref} ; b – параметр наклона закона повторяемости.

Тогда скорость высвобождения сейсмического момента площадного источника определяется интегрированием по диапазону магнитуд:

$$\dot{M}_{area} = \int_{M_{ref}}^{M_{max}} M_0(M) \frac{d\lambda(M)}{dM} dM.$$

Подставляя выражения закона Гутенберга–Рихтера и зависимости момента от магнитуды, в результате интегрирования получаем выражение:

$$\dot{M}_{area} = \lambda_{ref} \frac{b}{1.5-b} 10^{9.1+1.5M_{ref}} \left[10^{(1.5-b)(M_{max}-M_{ref})} - 1 \right].$$

Суммарная скорость высвобождения сейсмического момента коровой части площадной модели определялась суммированием вкладов всех площадных источников. Суммарная моментная скорость разломной системы определялась суммированием вкладов всех разломов:

$$\dot{M}_{fault} = \sum_i \dot{M}_{fault,i}$$

В отличие от площадной модели, в данном случае скорость высвобождения момента определяется параметрами современных тектонических деформаций и отражает долговременное поведение разломной системы.

С физической точки зрения сравнение величин $\dot{M}_{area}$ и $\dot{M}_{fault}$ представляет сопоставление двух независимых оценок интенсивности одного и того же геодинамического процесса. Первая оценка основана на современной наблюдаемой сейсмичности, вторая – на геологических и неотектонических данных.

Существенные различия между скоростями высвобождения момента свидетельствуют о внутренней несогласованности моделей сейсмических источников. В этом случае одна из моделей предполагает существенно больший или меньший объём тектонической деформации, чем другая.

Следовательно, условие близости скоростей высвобождения сейсмического момента может рассматриваться как критерий согласованности энергетического бюджета площадной и разломной моделей. В практических приложениях допустимое различие между оценками определяется уровнем неопределённости исходных данных и обычно не должно превышать нескольких десятков процентов.

Однако согласование моментных скоростей само по себе ещё не гарантирует эквивалентности моделей. Различные модели могут обеспечивать близкие значения суммарного сейсмического момента, но существенно различаться по частотам повторения сильных землетрясений. Поэтому вторым необходимым элементом согласования является сопоставление характеристик повторяемости сильных событий.

Вторым независимым критерием согласования площадных и разломных моделей сейсмических источников предлагается использовать соответствие оценок повторяемости сильных землетрясений.

Необходимость такого критерия обусловлена тем, что близость скоростей высвобождения сейсмического момента сама по себе не гарантирует эквивалентности сравниваемых моделей. Одинаковые значения моментных скоростей могут достигаться при существенно различных распределениях сейсмичности по магнитудам. В результате две модели, характеризующиеся сходным энергетическим бюджетом, могут прогнозировать различную повторяемость сильных землетрясений, оказывающих определяющее влияние на результаты вероятностной оценки сейсмической опасности.

Принципиальное отличие площадных и разломных моделей заключается также в различии временных интервалов, на которых формируются исходные данные.

Площадные модели основаны на анализе инструментальных и исторических каталогов землетрясений и, следовательно, отражают современное состояние сейсмического процесса на интервале от первых сотен до первых тысяч лет. Разломные модели используют оценки скоростей позднечетвертичных смещений, полученные по геологическим, неотектоническим и

геодезическим данным. Такие оценки характеризуют накопление деформаций на временных интервалах порядка тысяч и десятков тысяч лет. Если обе модели описывают один и тот же тектонический процесс, то оценки повторяемости сильных землетрясений, полученные на основе современных каталогов и на основе скоростей смещений активных разломов, не должны существенно различаться. В этом смысле согласование повторяемости может рассматриваться как косвенная проверка гипотезы о квазистационарности регионального сейсмического процесса.

Под квазистационарностью в данном случае понимается отсутствие существенных долговременных изменений основных характеристик сейсмического режима, прежде всего частот возникновения сильных землетрясений. Иными словами, предполагается, что современная сейсмичность является репрезентативным проявлением тектонического процесса, который в среднем сохраняет свои статистические характеристики на интервалах времени, сопоставимых с периодами формирования позднечетвертичных деформаций.

Для количественного сопоставления повторяемости сильных землетрясений в площадной и разломной моделях использовался функционал Φ :

$$\Phi = \sum_i w_i | N^{fault+bg}(M \geq M_i) - N^{area}(M \geq M_i) |,$$

где $M_i = 5.0, 6.0, 7.0$; $N^{fault+bg}(M \geq M_i)$ – кумулятивная повторяемость землетрясений для объединённой разломно-фоновой модели; N^{area} – кумулятивная повторяемость для площадной модели; w_i – весовые коэффициенты.

Минимальные значения функционала Φ соответствуют наилучшему согласованию площадной и разломной моделей по характеристикам повторяемости сильных землетрясений.

Таким образом, критерий квазистационарности дополняет критерий энергетического баланса и позволяет контролировать не только общий уровень тектонической активности, но и структуру распределения сейсмичности по магнитудам. Только совместное выполнение обоих критериев обеспечивает физически непротиворечивое согласование различных представлений региональной сейсмичности.

Модели повторяемости активных разломов как инструмент согласования. Одним из основных источников неопределенности при построении разломных моделей сейсмических источников является выбор закона повторяемости землетрясений на активных разломах. В отличие от площадных моделей, параметры которых непосредственно определяются по каталогам землетрясений, для активных разломов повторяемость сильных событий обычно оценивается косвенно на основе скоростей тектонических смещений и геометрических характеристик разломов. При этом различные модели повторяемости могут приводить к существенно различным оценкам частот сильных землетрясений даже при одинаковых значениях скоростей смещения и скоростей высвобождения сейсмического момента.

В настоящее время наибольшее распространение получили три группы моделей повторяемости активных разломов.

Модели Anderson–Luco [Anderson, Luco, 1983] основаны на предположении о непрерывном распределении сейсмичности по закону Гутенберга–Рихтера при условии сохранения заданной скорости тектонической деформации. Для таких моделей характерны сравнительно высокие частоты сильных землетрясений.

Модели Youngs–Coppersmith [Youngs, Coppersmith, 1985] предполагают существование характеристических землетрясений, магнитуды которых близки к максимальным магнитудам рассматриваемых разломов. В результате значительная часть сейсмического момента переносится событиями, сосредоточенными вблизи верхнего конца магнитудного диапазона.

Модели tapered Gutenberg–Richter [Kagan, 1997; Bird, Kagan, 2004] занимают промежуточное положение между двумя указанными подходами. В них сохраняется непрерывный характер распределения повторяемости, однако в области больших магнитуд вводится плавное ограничение распределения с помощью параметра угловой магнитуды M_{cor} (corner magnitude). Такой подход позволяет избежать как резкого накопления событий в области характеристических магнитуд, так и чрезмерного увеличения частот наиболее сильных землетрясений.

С точки зрения согласования площадных и разломных моделей выбор закона повторяемости играет роль одного из основных регулирующих параметров. Изменение модели повторяемости приводит к перераспределению сейсмического момента между землетрясениями различных магнитуд и, следовательно, непосредственно влияет на характеристики повторяемости

сильных событий. Поэтому выбор модели повторяемости должен рассматриваться не только как элемент эпистемической неопределенности, но и как один из ключевых инструментов согласования различных представлений региональной сейсмичности.

Фоновая сейсмичность как инструмент согласования моделей. При совместном использовании площадных и разломных моделей существенное значение приобретает параметризация фоновой сейсмичности. Традиционно фоновая компонента рассматривается как часть региональной сейсмичности, не связанная с конкретными параметризованными активными разломами.

В рамках предлагаемого подхода фоновая сейсмичность интерпретируется не как независимый источник, а как остаточная компонента модели, обеспечивающая согласование площадного и разломного представлений региональной сейсмичности.

При этом величина фоновой компоненты не может рассматриваться как постоянная для всей территории исследования. Ее параметры должны определяться с учетом геодинамических особенностей различных регионов.

Территория Узбекистана включает несколько крупных геодинамических доменов, существенно различающихся по уровню современной тектонической активности. К ним относятся орогенная область горного обрамления Ферганской впадины, переходная зона Приташкентского района и платформенные районы Западного Узбекистана, расположенные в пределах Туранской плиты.

Указанные области характеризуются различными уровнями сейсмической активности, плотностью активных разломов и интенсивностью современных деформаций. Вследствие этого доля сейсмичности, описываемая явными разломными источниками, и доля остаточной фоновой сейсмичности также должны различаться.

В орогенных районах с высокой концентрацией активных разломов значительная часть сейсмического момента может быть непосредственно связана с параметризованными разломными структурами, что предполагает относительно меньшую роль фоновой компоненты. Напротив, в платформенных и переходных областях существенная часть сейсмичности может не иметь однозначной связи с конкретными активными разломами и должна учитываться в составе фоновой модели.

Таким образом, параметры фоновой сейсмичности целесообразно рассматривать как регионально зависимые величины, определяемые в процессе согласования моделей с учетом особенностей геодинамического строения территории.

Предлагаемая схема согласования моделей сейсмических источников. Рассмотренные выше критерии и инструменты согласования позволяют сформулировать общую последовательность построения физически непротиворечивой модели сейсмических источников для задач вероятностной оценки сейсмической опасности. Предлагаемая схема согласования приведена на рис. 4.

На первом этапе выполняется построение площадной модели сейсмических источников на основе инструментальных и исторических каталогов землетрясений. Для каждой сейсмогенной зоны определяются параметры повторяемости землетрясений и рассчитывается соответствующая скорость высвобождения сейсмического момента.

На втором этапе формируется разломная модель, включающая геометрию активных разломов, скорости современных смещений и оценки максимальных магнитуд. На основе этих данных рассчитываются скорости высвобождения сейсмического момента для разломных источников.

На третьем этапе выбирается модель повторяемости землетрясений на активных разломах. В качестве альтернативных вариантов могут использоваться модели Anderson–Luco, Youngs–Coppersmith и tapered Gutenberg–Richter.

На четвертом этапе выполняется параметризация фоновой сейсмичности. При этом параметры фоновой компоненты рассматриваются как один из основных инструментов согласования площадной и разломной моделей и должны определяться с учетом региональных особенностей тектонического строения исследуемой территории.

На пятом этапе осуществляется проверка выполнения критерия энергетического баланса путем сопоставления скоростей высвобождения сейсмического момента площадной и разломно-фоновой моделей.

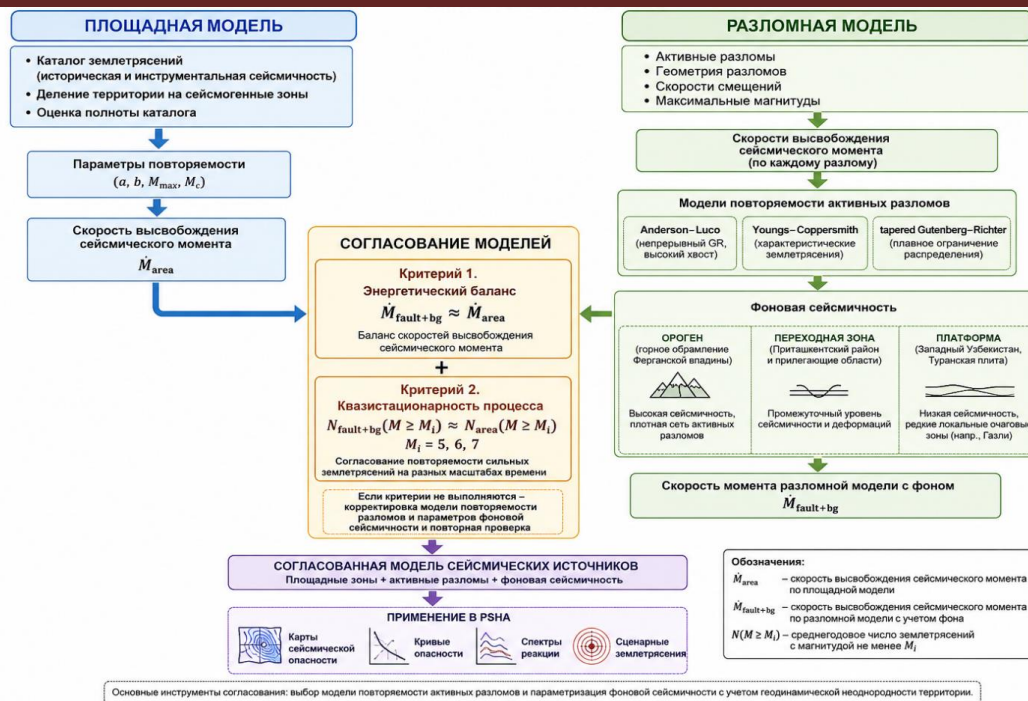


Рис. 4. Концептуальная схема согласования площадных и разломных моделей сейсмических источников.
 Figure 4. Conceptual framework for harmonizing area-source and fault-source seismic models.

На шестом этапе анализируется соответствие повторяемости сильных землетрясений в рамках критерия квазистационарности сейсмического процесса.

Если оба критерия выполняются одновременно, модель может рассматриваться как согласованная и использоваться для дальнейших расчетов вероятностной сейсмической опасности. В противном случае производится корректировка параметров моделей повторяемости разломов и фоновой сейсмичности с последующей повторной проверкой критериев согласования.

Таким образом, согласование моделей сейсмических источников – это итерационный процесс поиска решения, обеспечивающего одновременное выполнение энергетических и статистических ограничений.

Заключение

Современная практика вероятностной оценки сейсмической опасности всё чаще предполагает совместное использование площадных и разломных моделей сейсмических источников. Однако такие модели формируются на основе различных наборов исходных данных и характеризуют различные временные масштабы сейсмического процесса, что может приводить к существенным расхождениям в оценках скоростей высвобождения сейсмического момента, повторяемости сильных землетрясений и распределения сейсмичности между разломными и фоновыми компонентами модели.

В работе предложена концептуальная схема согласования площадных и разломных моделей сейсмических источников, основанная на использовании двух независимых критериев. Первый критерий связан с балансом скоростей высвобождения сейсмического момента и отражает согласованность энергетического бюджета различных представлений региональной сейсмичности. Второй критерий основан на сопоставлении повторяемости сильных землетрясений и может рассматриваться как проверка гипотезы о квазистационарности сейсмического процесса на временных масштабах от периода инструментальных наблюдений до позднечетвертичного времени.

Показано, что основными инструментами согласования моделей являются выбор закона повторяемости землетрясений на активных разломах и параметризация фоновой сейсмичности. Изменение этих компонентов позволяет регулировать как общий уровень сейсмической активности модели, так и распределение сейсмичности по магнитудам при сохранении физической непротиворечивости результирующей модели источников.

Для территории Узбекистана задача согласования моделей сейсмических источников имеет особую актуальность в связи с накоплением значительного объёма данных об активных разломах и возрастающим использованием разломных источников в современных схемах PSHA. При этом параметры фоновой сейсмичности целесообразно определять с учётом геодинамической неоднородности территории, включая орогенные области Тянь-Шаня, переходные зоны и платформенные районы Туранской плиты.

Предлагаемый подход следует рассматривать как концептуальную основу для построения физически согласованных моделей сейсмических источников. Его дальнейшее развитие связано с количественной реализацией предложенных критериев и их апробацией на материалах региональных исследований территории Узбекистана.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson J.G., Luco J.E. Consequences of slip rate constants on earthquake occurrence relations // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1983. - Vol. 73. - P. 471-496.
2. Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. THE ACTIVE FAULTS OF EURASIA DATABASE // Geodynamics & Tectonophysics. - 2017. - 8(4). - P. 711-736. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>
3. Bird P., Kagan Y.Y. Plate-tectonic analysis of shallow seismicity: apparent boundary width, beta-value, corner magnitude, coupled lithosphere thickness, and coupling in seven tectonic settings // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2004. - Vol. 94. - № 6. - P. 2380-2399. DOI: 10.1785/0120030107.
4. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // Bull. Seism. Soc. Am. - 1968. - Vol. 58. - P. 1583-1606.
5. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale // Journal of Geophysical Research. - 1979. - Vol. 84. - № B5. - P. 2348-2350. DOI: 10.1029/JB084iB05p02348.
6. Kagan Y.Y. Seismic moment-frequency relation for shallow earthquakes: regional comparison // Journal of Geophysical Research. - 1997. - Vol. 102. - № B2. - P. 2835-2852. DOI: 10.1029/96JB03386.
7. McGuire R.K. Seismic Hazard and Risk Analysis. Ed.by M/S/ Agabian, (EERI Publ., Earthquake Engineer. Res. Inst., Oakland, California, USA. 2004). - 240 p.
8. Youngs R.R., Coppersmith K.J. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1985. - Vol. 75. - P. 939-964.

Toward harmonized seismic source models for probabilistic seismic hazard assessment of Uzbekistan R.S. Ibragimov

Abstract. The paper addresses the problem of harmonizing area-source and fault-source models in probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). It is shown that the combined use of different source representations may result in inconsistencies in seismic moment release rates, recurrence characteristics of large earthquakes, and the partitioning of seismicity between fault and background components. A conceptual framework for source-model harmonization is proposed based on two independent criteria. The first criterion is associated with the balance of seismic moment release rates and reflects the consistency of the energy budget represented by different source models. The second criterion is based on the comparison of large-earthquake recurrence rates and is interpreted as a test of the quasi-stationarity of the regional seismic process. Fault recurrence models and background seismicity parameterization are considered as the principal tools for model harmonization. Particular attention is given to the geodynamic heterogeneity of Uzbekistan, which should be taken into account when defining background seismicity parameters. The proposed approach provides a conceptual basis for developing physically consistent seismic source models for probabilistic seismic hazard assessment.

Key words: probabilistic seismic hazard analysis, PSHA, seismic source models, active faults, background seismicity, seismic moment release rate, earthquake recurrence, Uzbekistan.

**O'zbekistonda eskiy seysmik xavfni baholash uchun uygunlashtirilgan seysmik
manba modellariga yo'nalish
R.S. Ibragimov**

Annotatsiya. Maqolada seysmik xavfni ehtimollik asosida baholash (PSHA) jarayonida maydonli va uzilma manbalar modellarini o'zaro moslashtirish muammosi ko'rib chiqilgan. Turli tipdagi seysmik manbalarni birgalikda qo'llash seysmik moment ajralish tezligi, kuchli zilzilalar takrorlanish chastotasi hamda seysmik faollikning uzilma va fon komponentalari o'rtasida taqsimlanishi bo'yicha qarama-qarshiliklarga olib kelishi mumkinligi ko'rsatilgan. Seysmik manbalar modellarini moslashtirishning konseptual sxemasi taklif etilgan bo'lib, u ikkita mustaqil mezonga asoslanadi. Birinchi mezon seysmik moment ajralish tezliklari balansiga asoslanib, regional seysmiklikning turli tasvirlari uchun energetik balansning mosligini tavsiflaydi. Ikkinchi mezon kuchli zilzilalar takrorlanishining mosligiga asoslanib, regional seysmik jarayonning kvazistatsionarligi gipotezasini tekshirish sifatida qaraladi. Moslashtirishning asosiy vositalari sifatida faol uzilmalar uchun takrorlanish modellari hamda fon seysmiklik parametrizatsiyasi ko'rib chiqilgan. O'zbekiston hududining geodinamik jihatdan notekis tuzilishi fon seysmiklik parametrlarini aniqlashda hisobga olinishi zarurligi ta'kidlangan. Taklif etilgan yondashuv seysmik xavfni ehtimollik asosida baholash masalalarida fizik jihatdan moslashtirilgan seysmik manbalar modellarini yaratish uchun konseptual asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Kalit so'zlar: seysmik xavfni ehtimollik asosida baholash, PSHA, seysmik manbalar modellari, faol uzilmalar, fon seysmiklik, seysmik moment ajralish tezligi, zilzilalar takrorlanishi, O'zbekiston.

УДК 550.34

**О ФОРМАХ МАГНИТУДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ 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. Закон Гутенберга–Рихтера широко используется для описания магнитудного распределения землетрясений и является основой оценки сейсмической опасности. Однако всё больше данных свидетельствует о том, что реальное распределение сейсмичности может отклоняться от линейной зависимости Гутенберга–Рихтера, что может отражать фундаментальные различия в физических механизмах генерации землетрясений. В настоящей работе выполнен количественный анализ формы магнитудного распределения землетрясений в трёх очаговых зонах Узбекистана (9, 18, 20), представляющих различные типы сейсмического режима. Для соответствующих выборок землетрясений проведены оценка магнитуды полноты и параметров повторяемости методом максимального правдоподобия, анализ хвостовой части распределения и проверка статистической значимости отклонений наблюдаемого распределения от линейной модели, а также раздельный анализ фоновой и роевой сейсмичности. Показано, что зона 9 (очаговая зона Каратагских землетрясений 1907 г.) характеризуется устойчивым избытком событий больших магнитуд по сравнению с линейной зависимостью Гутенберга–Рихтера. Зона 18 (очаговая зона Папских землетрясений 1984 г.) характеризуется более сложным поведением. Несмотря на то, что суммарное распределение близко к линейному, декластеризация выявляет принципиальные различия между фоновой и роевой сейсмичностью. Фоновая сейсмичность подчиняется закону Гутенберга–Рихтера, тогда как роевая последовательность демонстрирует дефицит крупных событий. В зоне 20 (очаговая зона Андижанского и Аимского землетрясений 1902, 1903 гг.) магнитудное распределение статистически согласуется с линейной зависимостью Гутенберга–Рихтера в широком диапазоне магнитуд. Полученные результаты показывают, что магнитудные распределения землетрясений не являются универсально линейными и могут существенно различаться в зависимости от физических механизмов их генерации. Наблюдаемые различия между зонами отражают особенности тектонического нагружения и механизмов высвобождения напряжений. Результаты подчёркивают важность анализа хвоста распределения и декластеризации при исследовании сейсмичности и имеют существенное значение для оценки сейсмической

опасности, особенно в зонах, где режим устойчивого избытка событий больших магнитуд может увеличивать вероятность возникновения сильных землетрясений по сравнению со стандартной моделью Гутенберга–Рихтера.

Ключевые слова: каталоги землетрясений, магнитуда полноты, методы декластеризации каталогов, повторяемость землетрясений, зависимость Гутенберга–Рихтера, магнитудное распределение землетрясений.

Введение. Магнитудное распределение землетрясений является одной из фундаментальных статистических характеристик сейсмичности и отражает закономерности накопления и высвобождения упругой энергии в земной коре. В большинстве тектонически активных регионов это распределение описывается линейной зависимостью Гутенберга–Рихтера (ГР), согласно которой логарифм числа землетрясений, превышающих заданную магнитуду, линейно уменьшается с ростом магнитуды. Параметр b этой зависимости является ключевой характеристикой сейсмического режима и широко используется при анализе сейсмичности и оценке сейсмической опасности [Gutenberg, Richter, 1944].

Вместе с тем многочисленные исследования показали, что в ряде регионов наблюдаются систематические отклонения от линейной зависимости Гутенберга–Рихтера, особенно в области больших магнитуд. Такие отклонения могут проявляться как относительный избыток крупных событий или, напротив, их дефицит по сравнению с линейной моделью. Эти особенности связываются с физическими характеристиками очаговых зон, включая геометрию и сегментацию разломов, пространственную неоднородность напряжённого состояния и режимную структуру сейсмичности.

Особое значение имеет то, что наблюдаемое магнитудное распределение может представлять суперпозицию различных режимов сейсмичности, таких как фоновая тектоническая сейсмичность и роевые последовательности. Поскольку эти режимы могут характеризоваться различными статистическими свойствами, их совместный анализ может приводить к смещённым оценкам параметров повторяемости и искажённому представлению о структуре магнитудного распределения.

Анализ формы магнитудного распределения имеет принципиальное значение для задач вероятностного анализа сейсмической опасности (PSHA), поскольку параметры повторяемости напрямую определяют частоту сильных землетрясений и, следовательно, оценки сейсмической опасности. Использование некорректной модели магнитудного распределения может приводить к систематическим ошибкам в оценке вероятности сильных событий.

Несмотря на фундаментальное значение этой проблемы, количественные исследования формы магнитудного распределения с использованием строгих статистических тестов и режимного анализа остаются ограниченными, особенно для регионов Центральной Азии. В частности, недостаточно изучена устойчивость отклонений хвостовой части распределения и их связь с режимной структурой сейсмичности.

Цель настоящей работы заключается в количественном анализе формы магнитудного распределения землетрясений в отдельных очаговых зонах Узбекистана с использованием статистически строгого подхода и выявлении его связи с режимами сейсмичности. Для этого выполнены оценка параметров повторяемости методом максимального правдоподобия, анализ хвостовой части распределения. Особое внимание уделено анализу режимной зависимости распределения и устойчивости полученных результатов.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является сейсмичность отдельных очаговых зон Узбекистана, характеризующихся различными типами магнитудного распределения землетрясений. В качестве репрезентативных примеров выбраны три очаговые зоны (зоны 9, 18 и 20) [Artikov et al., 2018; Ибрагимова, 2025a], в пределах которых происходили сильные землетрясения, для которых имеются достаточно полные выборки инструментальных и исторических наблюдений (рис. 1).

Предварительный анализ графиков повторяемости показал различное поведение в области высокомагнитудных землетрясений по сравнению с прогнозом на основе слабых и умеренных событий.

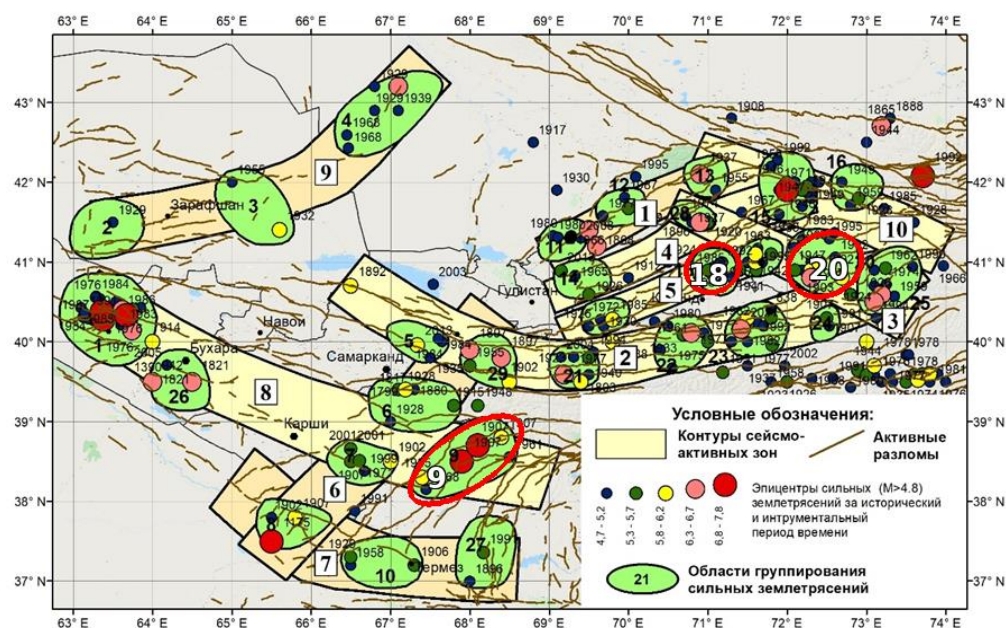


Рис. 1. Объект исследования – зоны 9, 18 и 20 на схеме сейсмоактивных зон территории Узбекистана с указанием эпицентров сильных ($M \geq 4,7$) землетрясений с исторических времен [Ибрагимова, 2025a].

Figure 1. Study area – zones 9, 18, and 20 on the seismic zoning map of Uzbekistan, showing epicenters of strong ($M \geq 4,7$) earthquakes since historical times [Ibragimova, 2025a].

Предметом исследования является форма магнитудного распределения землетрясений, включая поведение его хвостовой части, устойчивость параметров повторяемости и влияние режимной структуры сейсмичности на статистические характеристики распределения. Особое внимание уделено количественной оценке отклонений наблюдаемого распределения от линейной зависимости Гутенберга–Рихтера.

Исходные данные

Исходные данные представлены каталогами землетрясений для выбранных очаговых зон, сформированными на основе объединения инструментальных и исторических наблюдений. Каталоги включают сведения о времени возникновения, координатах эпицентра и магнитуде землетрясений.

Магнитуды приведены к единой шкале ML с использованием стандартных соотношений пересчёта, что обеспечивает однородность каталогов [Раутиан, 1960; Rautian et al., 2007; Ибрагимова, 2023] и наибольшую полноту данных в диапазоне малых и средних магнитуд. Частотно-магнитудные распределения строились с шагом магнитуды 0,1, что соответствует точности определения локальной магнитуды ML в используемом каталоге. Такой шаг позволяет сохранить максимальную информативность распределения без дополнительного агрегирования данных.

Оценка полноты каталогов

Анализ магнитудного распределения выполнялся для представительного диапазона магнитуд, ограниченного снизу магнитудой полноты M_c , определяемой как минимальная магнитуда, начиная с которой каталог считается статистически полным. Нижний порог полноты каталога M_c оценивался для каждой очаговой зоны по магнитуде ML на полном интервале

наблюдений с использованием трёх независимых методов: максимальной кривизны (MAXC), теста согласия goodness-of-fit (GFT) и метода полного диапазона магнитуд (EMR) [Ибрагимова, 2025b]. Совокупный анализ представительности каталогов методами MAXC, GFT и EMR показал, что значения магнитуды полноты для всех трёх очаговых зон варьируют в диапазоне 2,4-3,0. С учётом согласованности оценок MAXC и GFT [Wiemer, Wyss, 2000] и более консервативного характера EMR [Woessner, Wiemer, 2005], в качестве единого порога представительности принято значение $M_c = 2,6$, обеспечивающее баланс между полнотой каталога и статистической устойчивостью параметров повторяемости.

Результаты оценки минимальной представительной магнитуды выборки каждой зоны методами MAXC, GFT и EMR приведены на рис. 2, а сведения об объеме выборок, включая ее представительную часть, – в табл. 1.

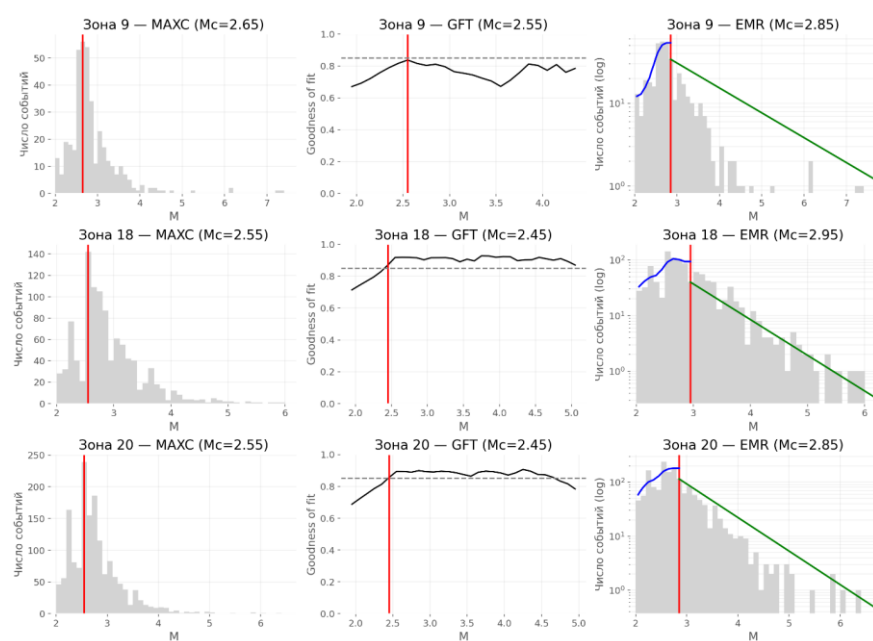


Рис. 2. Оценки представительной магнитуды M_c выборок каталога для зон 9, 18 и 20 методами MAXC, GFT и EMR.
Figure 2. Estimates of the completeness magnitude (M_c) for the earthquake catalogs of zones 9, 18, and 20 obtained using the MAXC, GFT, and EMR methods.

Таблица 1

Основные характеристики выборок землетрясений для исследуемых очаговых зон

Table 1

Main characteristics of the earthquake catalogs

Очаговая зона	Число событий всего/ $\geq M_c$	Минимальная магнитуда	Максимальная магнитуда	Магнитуда полноты
9	390/317	2,0	7,4	2,6
18	1035/837	2,0	6,0	2,6
20	1554/1135	2,0	6,4	2,6

Декластеризация выборок

Для исключения влияния зависимых событий (афтершоков и форшоков) и выделения фоновой сейсмичности выполнялась декластеризация выборок с использованием следующих методов:

- метода Гарднера–Кнопоффа [Gardner, Knopoff, 1974];
- метода Урхаммера [Uhrhammer, 1986];
- метода ближайшего соседа [Zaliapin et al., 2008];
- алгоритм DBSCAN пространственной кластеризации на основе плотности с учетом шума [Ester et al., 1996; Schubert et al., 2017].

Использование нескольких методов декластеризации позволило оценить устойчивость полученных результатов относительно выбора алгоритма выделения фоновой сейсмичности. Так, классические алгоритмы Gardner–Knopoff и Uhrhammer интерпретируют роевую последовательность как зависимую сейсмичность и удаляют значительную часть событий. Метод ближайшего соседа выявляет пространственно-временную структуру каталога, однако может дробить рой на несколько кластеров. Алгоритм же DBSCAN, основанный на плотностной кластеризации, позволяет выделить роевую последовательность как самостоятельный кластер, что делает возможным её отдельный анализ.

Оценка параметров повторяемости и анализ хвостовой части магнитудного распределения

Параметры магнитудного распределения оценивались методом максимального правдоподобия (MLE) [Aki, 1965; Utsu, 1965; Kijko, Smit, 2012] для представительного диапазона магнитуд $M \geq M_c$. Неопределённость $\sigma(b)$ оценивалась методом bootstrap [Davison, Hinkley, 1997; Efron B., 1979].

В работе использована кумулятивная форма распределения Гутенберга–Рихтера $\log_{10} N(M \geq m)$, поскольку она непосредственно соответствует классическому уравнению повторяемости и оперирует фактическим числом событий. В отличие от нормализованного распределения, где используются относительные частоты, кумулятивное устойчивее при малом числе сильных землетрясений и поэтому предпочтительно для анализа хвоста распределения.

Для количественной оценки поведения хвостовой части магнитудного распределения вводилась пороговая магнитуда хвоста, обозначаемая как M_t [Pisarenko, Sornette, 2003], аналогично пороговому значению x_{min} , используемому при анализе степенных распределений [Clauset et al., 2009; Kagan, 2002]. При выборе пороговой магнитуды M_t параметр b закона Гутенберга–Рихтера оценивался **только по линейной части** частотно-магнитудного распределения в диапазоне $M_c \leq M \leq M_{lin}$, чтобы исключить смещение параметров при наличии возможного утолщения хвоста. Порог M_t , определённый по отклонению от линейного закона Гутенберга–Рихтера, может отражать переход к иным режимам сейсмичности или изменение масштаба очаговых процессов.

Для предварительной оценки верхней границы линейной части частотно-магнитудного распределения использовался анализ зависимости параметра закона Гутенберга–Рихтера b от минимальной магнитуды M_{min} , т. е. функция $b(M_{min})$. Систематические изменения $b(M_{min})$ могут указывать на отклонения хвоста распределения от классического закона Гутенберга–Рихтера, включая дефицит или избыток сильных землетрясений [Kagan, 1999; Bird and Kagan, 2004]. Для экспоненциального распределения магнитуд, соответствующего закону Гутенберга–Рихтера, оценка параметра b , полученная методом максимального правдоподобия, должна быть инвариантна к изменению минимальной магнитуды M_{min} . Систематические изменения $b(M_{min})$ указывают на отклонения хвоста распределения магнитуд от линейного закона Гутенберга–Рихтера. Для исключения влияния уменьшения объёма выборки анализ зависимости $b(M_{min})$ проводился только для порогов магнитуды, при которых число событий оставалось статистически достаточным. Полученные таким образом оценки использовались как первое приближение для выбора пороговой магнитуды M_t . Для проверки статистической значимости отклонений хвоста магнитудного распределения – избыток (недосток) крупных событий выше порога M_t – использовался точный пуассоновский тест [Pisarenko, Sornette, 2003], при котором наблюдаемое число событий сравнивается с ожидаемым числом событий, предсказанным линейной моделью.

Для каждого M_t вычислялись наблюдаемое число событий $N_{obs}(M \geq M_t)$ и ожидаемое $N_{exp}(M_t)$ по нулевой модели Гутенберга–Рихтера с параметрами, оценёнными методом максимального правдоподобия при $M \geq M_c$. В качестве количественной меры отклонения использовалось отношение наблюдаемого числа событий к ожидаемому:

$$R(M_t) = \frac{N_{obs}(M \geq M_t)}{N_{exp}(M \geq M_t)}$$

Значения $R(M_t) > 1$ указывают на относительный избыток событий больших магнитуд, тогда как значения $R(M_t) < 1$ соответствуют их относительному дефициту. В соответствии с рекомендациями по анализу степенных распределений [Clauset et al., 2009], устойчивость полученных результатов проверялась при варьировании пороговой магнитуды в диапазоне значений, соответствующих области больших магнитуд.

Значимость отклонения хвоста оценивалась по пуассоновской вероятности p (M_t) $= P\{X \geq N_{obs} | X \sim \text{Pois}(N_{exp})\}$. Дополнительно применялась поправка на множественные сравнения для обеспечения корректности статистических выводов [Holm, 1979].

Порог M_t выбирался как значение, обеспечивающее наибольшую статистическую выраженность отклонения (минимум p) при ограничении $N_{exp}(M_t) \geq 1$ для устойчивости оценки. Пороговая магнитуда M_t определялась как параметр, задающий нижнюю границу анализа хвостовой части магнитудного распределения.

Устойчивость результатов проверялась для декластеризованных каталогов, полученных методами Гарднера–Кнопоффа, Урхаммера, ближайшего соседа и DBSCAN, а также при раздельном анализе роевого и фоновых режимов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Очаговая зона 9

Предварительно установлено, что в зоне 9 сильные, близкие к M_{max} , землетрясения повторяются чаще, чем это прогнозируется по слабым и умеренным землетрясениям [Ибрагимова, 2025a]. Анализ выполнен для полного каталога землетрясений зоны 9 за весь период исторических и инструментальных наблюдений.

Верхняя граница линейного участка распределения магнитуд M_t определялась поэтапно по совокупности трех признаков: устойчивости $b(M_{min})$, визуальной линейности кумулятивной функции повторяемости и результатов статистического тестирования хвостовой части распределения.

Анализ зависимости параметра b от пороговой магнитуды показал, что при $M_c = 2,6$ в диапазоне $M_{min} = 2,6-2,8$ оценки b остаются сравнительно устойчивыми и составляют около 0,88-0,90. Начиная с $M_{min} \approx 2,9-3,0$ наблюдается их понижение до $b < 0,8$, что может указывать на относительный избыток сильных событий по сравнению с линейной моделью Гутенберга–Рихтера. Кумулятивное частотно-магнитудное распределение для зоны 9 (рис. 3) демонстрирует хорошо выраженный линейный участок в диапазоне $M = 2,6-5,0$, аппроксимируемый законом Гутенберга–Рихтера с параметрами $b = 0,994$. Bootstrap-оценка неопределённости по 10 000 реализациям дала 95% доверительный интервал 0,900-1,106, что подтверждает статистическую устойчивость оценки и её близость к классическому значению $b \approx 1,0$. При больших магнитудах ($M > 5,0$) наблюдается систематическое превышение числа событий по сравнению с экстраполяцией линейной зависимости, что указывает на наличие избытка сильных землетрясений и формирование тяжёлого хвоста распределения.

Для количественной проверки отклонения верхней части спектра использован односторонний пуассоновский тест для числа событий $N_{obs}(M \geq M_t)$ относительно ожидаемого числа $N_{exp}(M_t) = 10^{a-bM_t}$ по фоновой ГР-модели. Для учёта множественных проверок применялась поправка Холма (табл. 2).

Таблица 2

Количественный тест хвостовой части магнитудного распределения зоны 9

Table 2

Quantitative test of the tail of the magnitude distribution for zone 9

M_t	N_{obs}	N_{exp}	$R(M_t)$	p	p_{Holm}
5,0	5	1,283	3,897	0,01012	0,01012
5,2	5	0,812	6,160	0,00150	0,00451
5,3	5	0,646	7,744	0,00055	0,00274
5,4	4	0,514	7,789	0,00193	0,00451
5,5	4	0,408	9,792	0,00084	0,00335

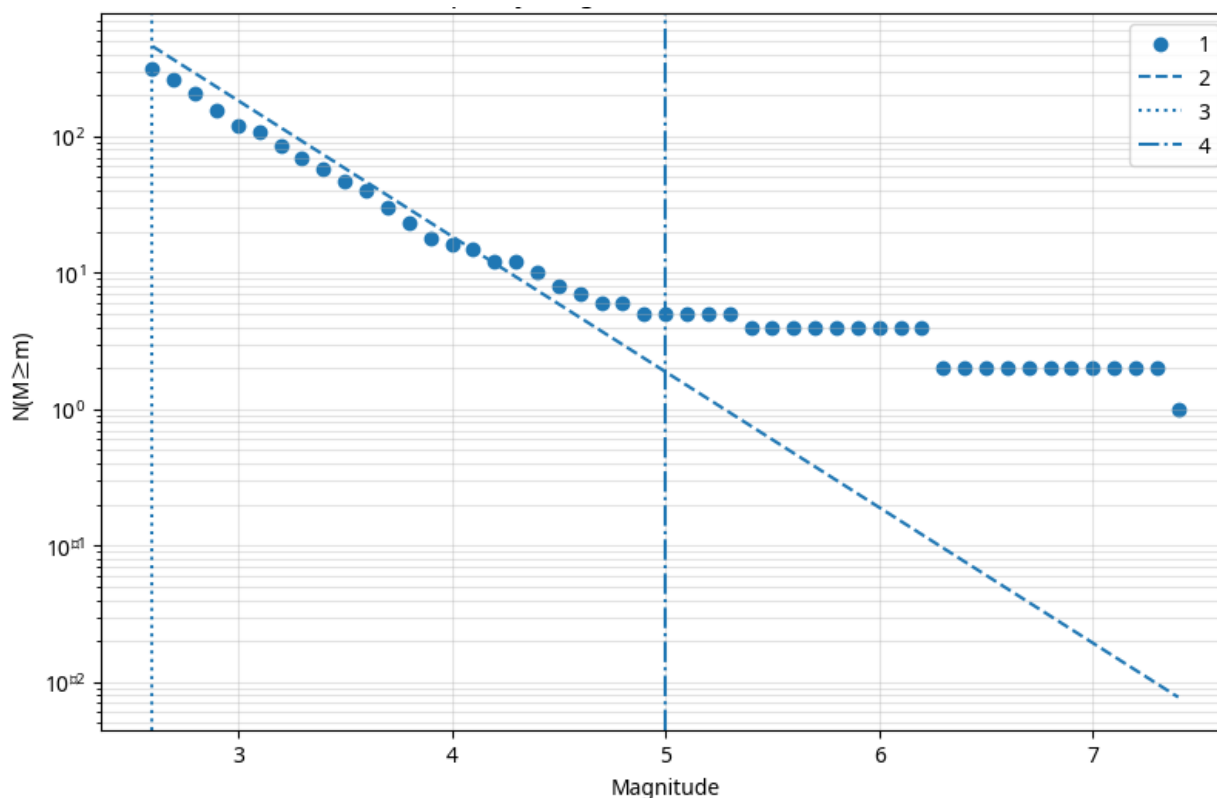


Рис. 3. Кумулятивное распределение повторяемости землетрясений для зоны 9 в полулогарифмических координатах: 1 – наблюдаемая кумулятивная функция повторяемости $N(M \geq m)$; 2 – линейная модель Гутенберга–Рихтера, построенная для диапазона $2,6 \leq M \leq 5,0$ при $b = 0,994$; 3 – магнитуда представительности каталога $M_c = 2,6$; 4 – верхняя граница линейного участка $M_t = 5,0$.

Figure 3. Cumulative earthquake recurrence distribution for zone 9 in semi-logarithmic coordinates: (1) observed cumulative recurrence function $N(M \geq m)$; (2) linear Gutenberg–Richter law model fitted over the range $2,6 \leq M \leq 5,0$ with $b = 0,994$; (3) completeness magnitude $M_c = 2,6$; (4) upper bound of the linear segment $M_t = 5,0$.

Таким образом, для зоны 9 линейная часть частотно-магнитудного распределения в диапазоне $M = 2,6-5,0$ хорошо описывается законом Гутенберга–Рихтера с параметром $b = 0,994$. При порогах $M_t = 5,0-5,5$ наблюдаемое число сильных событий систематически превышает ожидаемое по экстраполяции линейной зависимости, причём это превышение статистически значимо как по одностороннему пуассоновскому тесту, так и после поправки Холма. Декластеризация каталога различными методами не привела к устранению избытка сильных событий. Это указывает на то, что наблюдаемое отклонение от закона Гутенберга–Рихтера связано с особенностями фоновой сейсмичности, а не с кластерными эффектами.

Тем самым для зоны 9 подтверждается статистически устойчивый избыток сильных землетрясений относительно модели Гутенберга–Рихтера. В то время как линейная часть распределения формируется фоновым процессом, область больших магнитуд отражает включение

дополнительного механизма генерации сильных землетрясений в пределах отдельных сегментов активных разломов.

Очаговая зона 18

Для зоны 18 ранее было отмечено, что сильные, близкие к M_{max} , землетрясения происходят реже, чем это прогнозируется линейной частью графика повторяемости. Это очаговая область Папского роя землетрясений 1984-1985 гг., в которой последние 40 лет сильных землетрясений не зафиксировано. Загиб хвостовой части графика повторяемости вниз может характеризовать дефицит сильных землетрясений в этой зоне [Ибрагимова, 2025a].

Установлено, что для полного каталога график $b(M_{min})$ не выявляет устойчивого перелома распределения и показывает, что оценки параметра b в основном остаются в диапазоне 0,68-0,74 до $M_{min} \approx 3.4$, а при больших M_{min} становятся нестабильными из-за сокращения числа событий (рис. 4). Последовательный перебор M_t показывает номинальный избыток событий при $M_t = 4.0-4.2$, однако после $M_t \geq 4.3$ статистическая значимость исчезает после поправки Холма. Следовательно, для полного каталога зоны 18 робастно выделить M_t как порог дефицитного хвоста нельзя и, в целом, каталог совместим с единой линейной зависимостью Гутенберга–Рихтера выше $M_c = 2.6$ (табл. 3).

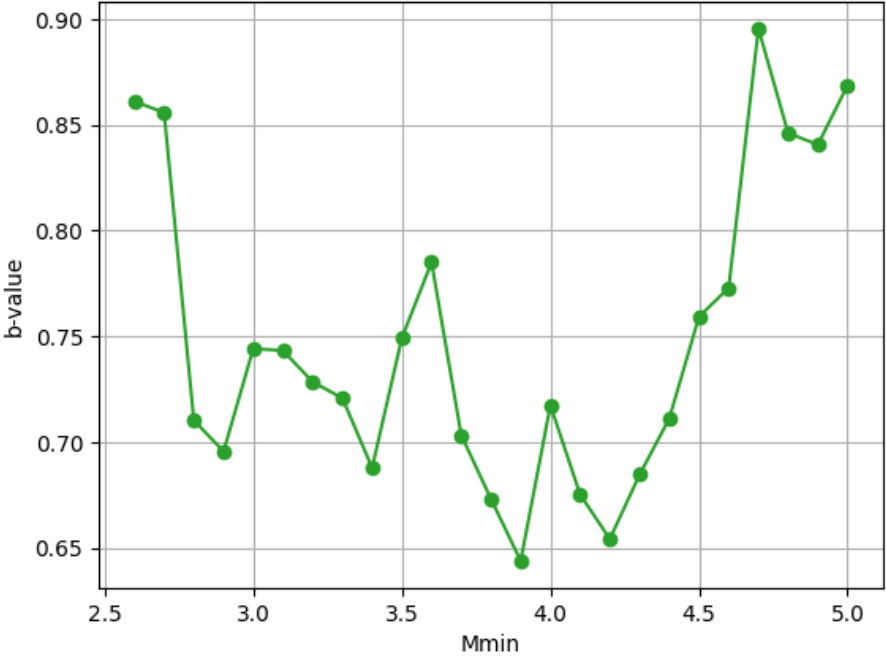


Рис. 4. Зависимость оценки параметра наклона закона Гутенберга–Рихтера b от нижнего порога магнитуды M_{min} для очаговой зоны 18.
Figure 4. Dependence of the Gutenberg–Richter b -value estimate on the lower magnitude threshold M_{min} for source zone 18.

Количественный тест хвостовой части магнитудного распределения зоны 18
Quantitative test of the tail of the magnitude distribution for zone 18

Таблица 3
Table 3

M_t	N_{obs}	N_{exp}	$R(M_t)$	p	p_{Holm}
4,0	59	34,442	1,713	0,000089	0,001329
4,1	56	28,186	1,987	0,000003	0,000040
4,2	44	25,945	1,696	0,000766	0,010728
4,3	36	23,055	1,561	0,007514	0,077060
4,4	32	19,649	1,629	0,006375	0,076501
4,5	28	16,887	1,658	0,008140	0,077060
4,6	25	14,400	1,736	0,007005	0,077060

4,7	21	12,579	1,669	0,018383	0,147063
4,8	20	10,474	1,910	0,005642	0,073343
4,9	15	9,483	1,582	0,059274	0,414915
5,0	12	8,306	1,445	0,135282	0,811693
5,1	10	7,161	1,396	0,186184	0,811693
5,2	8	6,204	1,290	0,284503	0,832432
5,3	7	5,265	1,330	0,277477	0,832432
5,4	7	4,359	1,606	0,151357	0,811693
5,5	5	3,829	1,306	0,337876	0,832432

Далее была выполнена декластеризация каталога зоны 18 четырьмя независимыми методами (Gardner–Knopoff, Uhrhammer, Nearest Neighbor и пространственно-временным алгоритмом DBSCAN). Несмотря на различия в числе удаляемых событий, все методы согласованно выделяют крупный кластер, соответствующий известной роевой последовательности 1984 г. [Папское..., 1986]. Собственно, зона 18 изначально [Artikov et al., 2018] и была выделена как очаговая зона этих землетрясений. При пороге представительности $M_c = 2,6$ полный каталог зоны 18 включает 837 событий. После выделения роевой последовательности 1984 г. каталог был разделён на фоновую сейсмичность (537 событий, ~64%) и отдельный каталог роя (300 событий, ~36%). Такое разделение позволило независимо исследовать частотно-магнитудные распределения для фонового тектонического режима и роевой сейсмичности, а также оценить влияние роевой активности на статистические характеристики полного каталога (рис. 5).

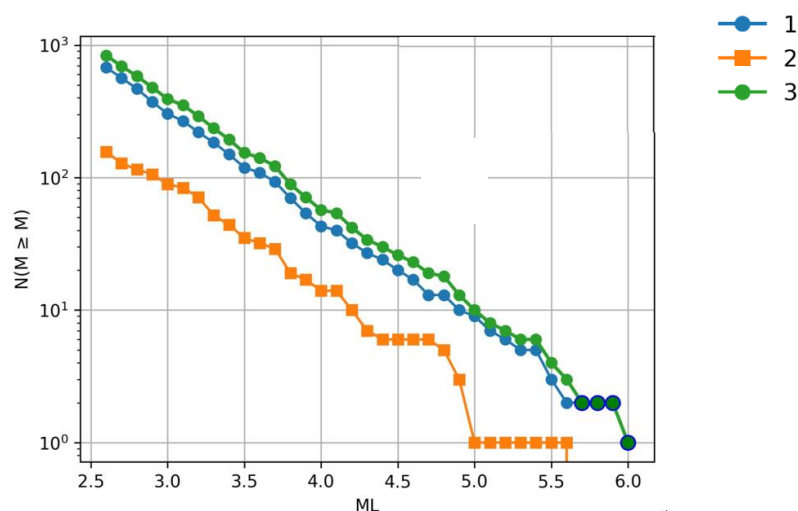


Рис. 5. Частотно-магнитудное распределение (FMD) для зоны 18: 1 – фон, 2 – рой 1984 г., 3 – полный каталог.
Figure 5. Frequency–magnitude distribution (FMD) for zone 18: (1) background seismicity; (2) the 1984 swarm; (3) the full catalog.

Анализ зависимости $b(M_{min})$ показывает существенное различие между фоновыми событиями и роевой активностью 1984 г. Фоновая сейсмичность характеризуется параметром ($b \approx 0,7$) и близка к линейному закону Гутенберга–Рихтера. Роевой процесс демонстрирует значительно более высокие значения ($b \approx 0,9-1,1$), отражающие относительный дефицит сильных землетрясений. Нестабильность $b(M_{min})$ для полного каталога обусловлена смещением этих двух типов сейсмичности (рис. 6).

В зоне 18 влияние роевой активности проявляется преимущественно в диапазоне малых и средних магнитуд, тогда как в области ($M \gtrsim 4,7-5,0$) вклад роя резко сокращается, и распределение начинает определяться главным образом фоновыми событиями. Поэтому полный каталог представляет суперпозицию двух режимов сейсмичности, что затрудняет выделение единого порога M_t и объясняет нестабильность функции $b(M_{min})$.

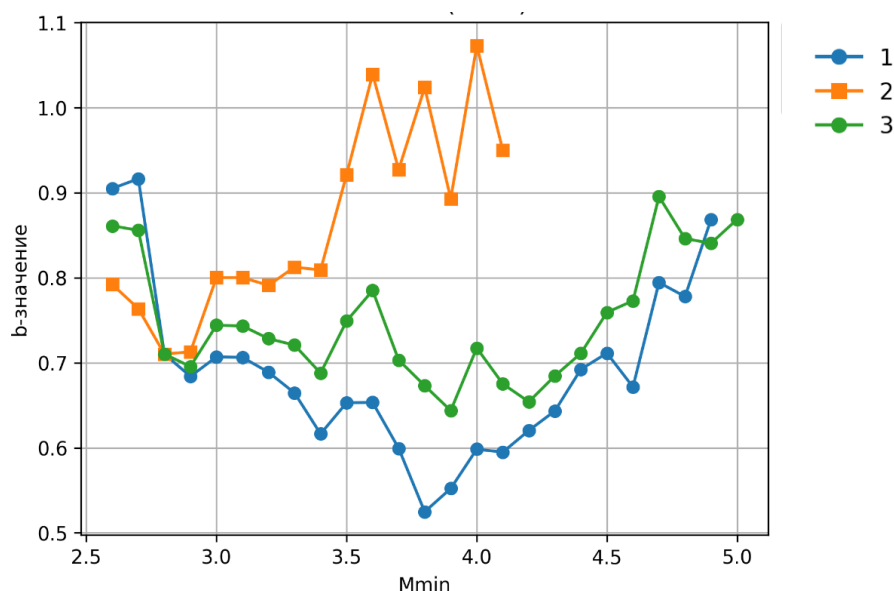


Рис. 6. Зависимость параметра b от минимальной магнитуды M_{min} для зоны 18: 1 – фон, 2 – рой 1984 г., 3 – полный каталог.

Figure 6. Dependence of the b -value on the minimum magnitude M_{min} for zone 18: (1) background seismicity; (2) the 1984 swarm; (3) the full catalog.

Фоновая сейсмичность демонстрирует близкое к линейному распределение Гутенберга–Рихтера, тогда как роевой эпизод характеризуется более пологим наклоном и повышенной долей событий средней магнитуды. Смещение этих режимов в полном каталоге создаёт видимость дефицита крупных событий в хвостовой части распределения. Область $M \approx 4,7-5,0$ соответствует переходу от смешанного роево-фоновому режиму к преимущественно фоновой сейсмичности.

Таким образом, особенности частотно-магнитудного распределения зоны 18 обусловлены **смещением двух различных режимов сейсмичности** – фонового процесса, подчиняющегося закону Гутенберга–Рихтера, и локальной роевой активности 1984 г. Наблюдаемая кривизна хвоста полного каталога обусловлена смещением этих двух типов сейсмичности.

Зона 18 расположена в области активной тектоники Ферганской системы разломов, характеризующейся сложным напряжённым состоянием и наличием нескольких пересекающихся структур. Для этой области характерно сочетание сдвиговых и взбросовых механизмов, что отражает современное поле сжатия, связанное с продолжающимся взаимодействием Тянь-Шаньской орогенной системы и окружающих блоков. Такая тектоническая обстановка благоприятна для развития **кластерной и роевой сейсмичности**, поскольку пересечение активных разломов и наличие зон повышенной трещиноватости создают условия для локальной концентрации напряжений и их постепенной разгрузки сериями землетрясений. Выделенная последовательность 1984 г. в зоне 18 хорошо согласуется с этой моделью. Пространственный анализ показал, что эпицентры образуют вытянутое облако с ориентировкой около 24° (NE–SW). Эта ориентировка совпадает с направлением локальных поперечных структур, пересекающих основные NW–SE разломы Ферганского региона. Сопоставление с картой регионального напряжённого состояния показывает, что ось последовательности ориентирована примерно перпендикулярно направлению максимального сжатия σ_3 , которое имеет преимущественно NW–SE простираение [Rebetsky et al., 2020]. Это согласуется с интерпретацией роя как активации вторичной структуры в зоне пересечения разломов в условиях регионального сжатия (рис. 7).

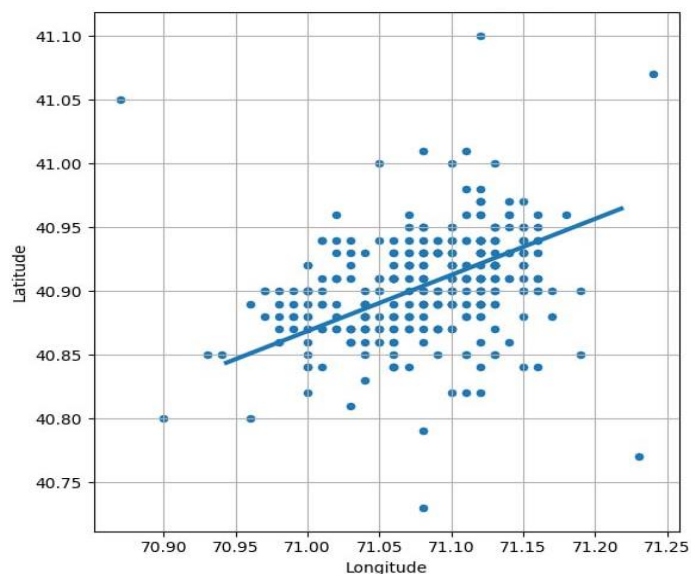


Рис. 7. Ориентация в пространстве эпицентров выделенного в зоне 18 ряда землетрясений.
Figure 7. Spatial distribution of epicenters of the earthquake swarm identified in zone 18.

Очаговая зона 20

Предварительно установлено, что в зоне 20 линейная зависимость выдерживается во всем магнитудном диапазоне (до $M_{\max}^{\text{набл}}$) [Ибрагимова, 2025a]. Поэтому для зоны 20 была проверена гипотеза о линейной форме распределения магнитуд в рамках закона Гутенберга–Рихтера при $M_c = 2,6$. Анализ зависимости $b(M_{\min})$ показал устойчивость оценок параметра b

($b \approx 0,9$), что указывает на наличие линейного участка распределения. Кумулятивная функция повторяемости в полулогарифмических координатах демонстрирует устойчивую линейную зависимость в широком диапазоне магнитуд (рис. 8).

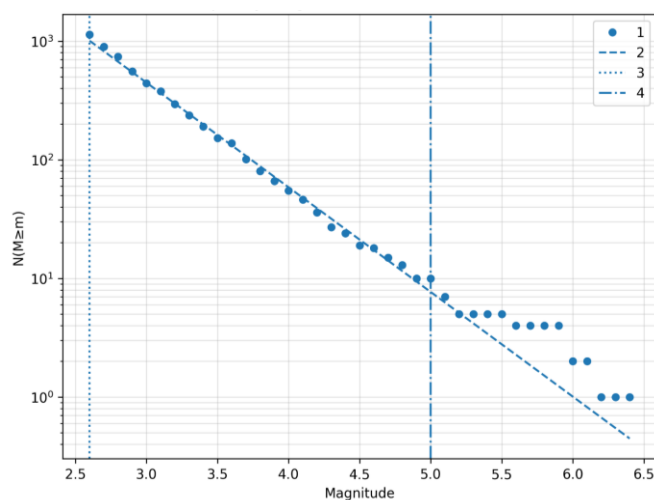


Рис. 8. Кумулятивное распределение повторяемости землетрясений для зоны 20 в полулогарифмических координатах: 1 – наблюдаемая кумулятивная функция повторяемости $N(M \geq m)$; 2 – линейная модель Гутенберга–Рихтера, построенная для диапазона $2,6 \leq M \leq 5,0$ при $b = 0,992$; 3 – магнитуда представительности каталога $M_c = 2,6$; 4 – верхняя граница линейного участка $M_t = 5,0$.

Figure 8. Cumulative earthquake recurrence distribution for zone 20 in semi-logarithmic coordinates: (1) observed cumulative recurrence function $N(M \geq m)$; (2) linear Gutenberg–Richter model fitted over the range $2,6 \leq M \leq 5,0$ with $b = 0,992$; (3) completeness magnitude $M_c = 2,6$; (4) upper bound of the linear segment $M_t = 5,0$.

Анализ хвостовой части частотно-магнитудного распределения для зоны 20 показывает (табл. 4), что при всех рассмотренных порогах M_t наблюдаемое число событий превышает ожидаемое по экстраполяции линейной части закона Гутенберга–Рихтера $R(M_t) > 1$, что формально указывает на относительный избыток крупных событий по сравнению с экстраполяцией линейной части GR. Однако после *Holm*-коррекции **ни один порог M_t не достигает статистической значимости**: во всех случаях $p > 0.05$. Минимальное скорректированное значение p наблюдается при $M_t = 5,0$ ($p_{Holm} \approx 0,073$), что указывает на отсутствие статистически значимых отклонений от линейной модели Гутенберга–Рихтера.

Количественный тест хвостовой части магнитудного распределения зоны 20

Таблица 4

Table 4

Quantitative test of the tail of the magnitude–frequency distribution for Zone 20

M_t	N_{obs}	N_{exp}	$R(M_t)$	p	p_{Holm}
5,0	10	4,389	2,279	0,01465	0,07327
5,2	5	3,139	1,593	0,20855	0,21794
5,3	5	2,501	1,999	0,10897	0,21794
5,4	5	1,993	2,508	0,05205	0,15615

Таким образом, для зоны 20 кумулятивная функция повторяемости при $M_c = 2,6$ в интервале $2,6 \leq M \leq 5,0$ хорошо описывается линейной зависимостью Гутенберга–Рихтера. Продолжение аппроксимирующей прямой в область больших магнитуд показывает, что хвостовая часть распределения в целом согласуется с линейной моделью: статистически значимого избытка или дефицита крупных событий не выявлено.

Дополнительная аппроксимация по всему диапазону наблюдаемых магнитуд показала, что общий вид распределения остается близким к линейному. Однако параметры зависимости при этом несколько изменяются по сравнению с оценками, полученными для интервала $[M_c, M_t]$, что отражает влияние редких крупнейших событий на общий наклон регрессии. Поэтому для параметризации основного режима повторяемости предпочтительно использовать интервал $[M_c, M_t]$, тогда как аппроксимация по всему диапазону может рассматриваться лишь как вспомогательная проверка устойчивости вывода о квазилинейной форме распределения. Для интервала $[2,6; 5,0]$ параметр $b \approx 0,992$, тогда как в $[2,6; 6,4]$ $b \approx 0,955$ (неопределенность параметра, оцененная бутстрэп-методом по 2000 реализаций: $\sigma(b) = 0,029$, 95% доверительный интервал: $[0,902 < b < 1,018]$). Таким образом, частотно-магнитудное распределение **зоны 20 в целом близко к линейному, а включение хвоста не приводит к принципиальному пересмотру параметров закона Гутенберга–Рихтера**. Дополнительная проверка показала, что **исключение единственного максимального события $M = 6,4$ практически не влияет на оценки параметров повторяемости**. Следовательно, различия между аппроксимациями для интервалов $[M_c, M_t]$ и $[M_c, M_{max}]$ обусловлены не отдельным экстремальным событием, а в целом включением хвостовой части распределения.

Проверка устойчивости по декластеризованным разными методами каталогам не меняет качественного вывода: форма распределения остаётся близкой к линейной зависимости Гутенберга–Рихтера.

Очаговая зона 20 (районы Андижанского и Аймского землетрясений) расположена в пределах восточной части Западного Тянь-Шаня, где, по данным реконструкции напряжённого состояния по механизмам очагов землетрясений, преобладает режим субгоризонтального сжатия с близмеридиональной ориентировкой оси максимального главного напряжения и взбросовой либо взбросо-сдвиговой кинематикой разрывов [Rebetsky et al., 2020; Ibragimova et al., 2021]. Анализ частотно-магнитудного распределения при $M_c = 2,6$ не выявил статистически значимого отклонения хвостовой части от линейной модели Гутенберга–Рихтера, что указывает на согласованность реализуемой сейсмичности зоны с региональным напряжённым режимом. Физический смысл – масштабно-инвариантный режим разрушения.

Обсуждение и выводы

Анализ зон 9, 18 и 20 выявил различия в форме магнитудно- частотного распределения землетрясений в области магнитуд близких к значению M_{max} . Отклонения от линейного закона, установленные для зон 9 и 18, могут иметь различную природу и обусловлены как структурными особенностями разломных систем, так и временной нестационарностью сейсмического процесса.

В зоне 9 наблюдается статистически значимый избыток сильных землетрясений относительно линейной аппроксимации закона Гутенберга–Рихтера. Такое поведение распределения указывает на повышенную вероятность возникновения относительно крупных событий по сравнению с классическим степенным распределением. Подобная картина может отражать способность разломной системы реализовывать крупномасштабные разрывы, вероятно, связанные с механической связностью отдельных сегментов разлома и локализацией деформации на главных структурах.

В зоне 18 форма частотно-магнитудного распределения определяется наложением различных режимов сейсмичности. Здесь существенную роль играет кластерная последовательность 1984 г., характеризующаяся более высоким значением параметра b , чем фоновая сейсмичность. Сложная форма частотно-магнитудного распределения обусловлена не особенностями хвоста распределения, а суперпозицией различных режимов сейсмического процесса.

В зоне 20 частотно-магнитудное распределение в пределах представительного диапазона магнитуд близко к линейному закону Гутенберга–Рихтера. Отсутствие статистически значимых отклонений указывает на более однородный режим разрушения, при котором землетрясения различных магнитуд подчиняются единому статистическому закону. Это может свидетельствовать о более равномерном распределении деформации и отсутствии выраженной сегментации разломной системы.

Различия в форме распределения правых частей графиков повторяемости для трех зон, расположенных в одном сейсмоактивном регионе, подчеркивают важную роль локальной структуры поля напряжений очаговых зон – степени сегментации разломов, пространственной концентрации деформации и способности отдельных сегментов к совместному разрыву.

Полученные результаты демонстрируют, что параметр M_c , характеризующий начало отклонения от линейного закона Гутенберга–Рихтера, может иметь различную физическую природу. В зоне 9 он, вероятно, отражает переход к крупномасштабным разломным событиям, тогда как в зоне 18 связан с наложением различных режимов сейсмичности. В зоне 20 такой переход фактически не проявляется, что соответствует статистически однородному режиму разрушения.

Таким образом, форма частотно-магнитудного распределения может рассматриваться как индикатор структурной организации очаговой зоны и режима сейсмичности. Учет временной структуры каталога и выделение кластерных последовательностей являются важными условиями корректной интерпретации параметров закона Гутенберга–Рихтера и их использования при анализе повторяемости землетрясений и параметризации сейсмических источников.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Ибрагимова Т.Л. О выборе связи между моментной и локальной магнитудами при оценке сейсмической опасности // Проблемы сейсмологии. - Т.: АН РУз, 2023. - Т. 5. - № 2. - С. 5-10.
2. Ибрагимова Т.Л. Оценки повторяемости землетрясений в очаговых зонах Узбекистана // Проблемы сейсмологии. - Т., 2025а. - Т. 7. - № 1. - С. 5-15.
3. Ибрагимова Т.Л. Формирование каталога землетрясений для оценки сейсмической опасности железнодорожной трассы Мазари-Шариф-Герат (Северный Афганистан) // Проблемы сейсмологии. - Т., 2025б. - Т. 7. - № 2. - С. 14-27.

4. Папское землетрясение 1984 г. / Отв. ред. В.Г.Гафуров. - Т.: Фан, 1986. - 136 с.
5. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. - М.: АН СССР, 1960. - С. 75-114.
6. Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits // Bulletin of the Earthquake Research Institute. - 1965. - Vol. 43. - P. 237-239.
7. 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.j.geog.2017.11.005.
8. Bird P., Kagan Y.Y. Plate-tectonic analysis of shallow seismicity: apparent boundary width, beta-value, corner magnitude, coupled lithosphere thickness, and coupling in seven tectonic settings // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2004. - Vol. 94. - № 6. - P. 2380-2399. DOI: 10.1785/0120030107.
9. Clauset A., Shalizi S.R., Newman M.E.J. Power-law distributions in empirical data // SIAM Review. - 2009. - Vol. 51. - № 4. - P. 661-703. <https://doi.org/10.1137/070710111>.
10. Davison A.C., Hinkley D.V. Bootstrap methods and their application. - Cambridge: Cambridge University Press, 1997. - 582 p.
11. Efron B. Bootstrap methods: another look at the jackknife // The Annals of Statistics. - 1979. - Vol. 7. - № 1. - P. 1-26. DOI: 10.1214/aos/1176344552.
12. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD). - 1996. - P. 226-231.
13. Gardner J., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1974. - Vol. 64. - № 5. - P. 1363-1367.
14. 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>.
15. Holm S. A simple sequentially rejective multiple test procedure // Scandinavian Journal of Statistics. - 1979. - 6. - P. 65-70.
16. Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A., Rebetsky Yu.L. The current stress of earth's crust in the territory of Uzbekistan according to focal earthquake mechanisms // Geodynamics & Tectonophysics. - 2021. - 12(3). - P. 435-454. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0532>
17. Kagan Y.Y. Universality of the seismic moment-frequency relation // Geophysical Journal International. - 1999. - 136(2). - P. 376-386.
18. Kagan Y.Y. Seismic moment distribution revisited // Geophysical Journal International. - 2002. - 148. - P. 520-541. [<https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01594.x>]
19. Kijko A., Smit A. Extension of the Aki-Utsu b -value estimator for incomplete catalogs // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2012. - Vol. 102, № 3. - P. 1283-1287. DOI: 10.1785/0120110226.
20. Pisarenko V.F., Sornette D. Characterization of extreme earthquake events // Pure and Applied Geophysics. - 2003. - 160. - P. 2343-2364. <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2426-y>
21. Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. Origins and methodology of the Russian energy K -class system and its relationship to magnitude scales // Seismological Research Letters. - 2007. - 78 (6). - P. 579-590.
22. Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A. Stress State of Uzbekistan's Seismically Active Areas // Seismic Instruments. - 2020. - 56. - P. 679-700. <https://doi.org/10.3103/S0747923920060079>.
23. Schubert E., Sander J., Ester M., Kriegel H.-P., Xu X. DBSCAN revisited, revisited: Why and how you should (still) use DBSCAN // ACM Transactions on Database Systems. - 2017. - Vol. 42(3). - Article 19. <https://doi.org/10.1145/3068335>
24. Uhrhammer R. Characteristics of Northern and Central California seismicity // Earthquake Notes. - 1986. - Vol. 57. - No. 1. - P. 21.
25. Utsu T. A method for determining the value of b // Geophysical Bulletin of Hokkaido University. - 1965. - Vol. 13. - P. 99-103.
26. Wiemer S., Wyss M. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2000. - Vol. 90. - № 4. - P. 859-869. doi: 10.1785/0119990114.
27. Wilks S.S. The large-sample distribution of the likelihood ratio // Annals of Mathematical Statistics. - 1938. - 9. - 60-62.
28. Woessner J., Wiemer S. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2005. - 95(2). - P. 684-698.
29. Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V., Wong H. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // Physical Review Letters. - 2008. - Vol. 101. - Iss. 1-4. - Art. 018501. doi: 10.1103/PhysRevLett.101.018501.

On the forms of earthquake magnitude distributions in seismogenic zones of Uzbekistan**T.L. Ibragimova**

Abstract. The Gutenberg–Richter law is widely used to describe the magnitude–frequency distribution of earthquakes and constitutes a cornerstone of seismic hazard assessment. However, increasing evidence indicates that real seismicity may deviate from the linear Gutenberg–Richter relationship, reflecting fundamental differences in the physical mechanisms of earthquake generation. In this study, a quantitative analysis of the shape of the magnitude–frequency distribution is performed for three seismogenic zones in Uzbekistan (zones 9, 18, and 20), representing different seismic regimes. For the corresponding earthquake samples, the magnitude of completeness and recurrence parameters are estimated using the maximum likelihood method; the tail behavior of the distribution is analyzed; statistical tests are applied to evaluate the significance of deviations from the linear Gutenberg–Richter model; and separate analyses of background and swarm seismicity are conducted. The results show that zone 9 (the source region of the 1907 Karatag earthquakes) is characterized by a statistically robust excess of large-magnitude events relative to the Gutenberg–Richter extrapolation. Zone 18 (the source region of the 1984 Pap earthquake sequence) exhibits more complex behavior: although the overall distribution is close to linear, declustering reveals fundamental differences between background and swarm seismicity. The background seismicity follows the Gutenberg–Richter law, whereas the swarm sequence shows a deficit of large events. In contrast, zone 20 (the source region of the 1902 Andijan and 1903 Aimy earthquakes) displays a magnitude–frequency distribution that is statistically consistent with the Gutenberg–Richter relation over a wide magnitude range. These findings demonstrate that earthquake magnitude distributions are not universally linear and may vary significantly depending on the underlying physical mechanisms of seismicity generation. The observed differences between the zones reflect variations in tectonic loading and stress release processes. The results highlight the importance of tail analysis and declustering in seismicity studies and have important implications for seismic hazard assessment, particularly in regions where a persistent excess of large events may lead to higher probabilities of strong earthquakes compared to the standard Gutenberg–Richter model.

Key words: earthquake catalogs, completeness magnitude, catalog declustering methods, earthquake recurrence, Gutenberg–Richter relation, earthquake magnitude distribution.

O‘zbekistonning seysmogen zonalarida zilzilalar magnituda taqsimotining shakllari haqida**T.L. Ibragimova**

Annotatsiya. Gutenberg–Rixter qonuni zilzilalarning magnituda–takrorlanish taqsimotini tavsiflashda keng qo‘llaniladi va seysmik xavfni baholashning asosiy nazariy asoslaridan biri hisoblanadi. Biroq, tobora ko‘proq ma‘lumotlar real seysmik jarayonlar Gutenberg–Rixter qonunining chiziqli bog‘liqligidan chetga chiqishi mumkinligini ko‘rsatmoqda, bu esa zilzilalarning hosil bo‘lish mexanizmlaridagi fundamental farqlarni aks ettirishi mumkin. Mazkur ishda O‘zbekistonning turli seysmik rejimlarni ifodalovchi uchta o‘choq zonasi (9, 18 va 20-zonalar) uchun magnituda–takrorlanish taqsimotining shakli miqdoriy jihatdan tahlil qilindi. Tegishli zilzilalar to‘plami uchun to‘liqlik magnitudasi va takrorlanish parametrlari maksimal ehtimollik usuli yordamida baholandi, taqsimotning “dum” (katta magnitudalar sohasi) qismi tahlil qilindi, kuzatilgan taqsimotning Gutenberg–Rixter chiziqli modelidan og‘ishlarining statistik ahamiyati tekshirildi, shuningdek fon va roy (to‘da) seysmikligi alohida ko‘rib chiqildi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, 9-zona (1907-yilgi Karatag zilzilalari o‘choq zonasi) Gutenberg–Rixter bog‘liqligiga nisbatan katta magnitudali hodisalarning barqaror ortiqchaligi bilan tavsiflanadi. 18-zona (1984-yilgi Pap zilzilalari o‘choq zonasi) murakkabroq xatti-harakatni namoyon etadi: umumiy taqsimot chiziqli ko‘rinishga yaqin bo‘lsa-da, deklaasterizatsiya fon va roy seysmikligi o‘rtasida prinsipial farqlarni aniqlaydi. Fon seysmikligi Gutenberg–Rixter qonuniga bo‘ysunadi, biroq roy ketma-ketligi yirik magnitudali hodisalarning yetishmovchiligi bilan tavsiflanadi. 20-zonada (1902-yilgi Andijon va 1903-yilgi Aimy zilzilalari o‘choq zonasi) magnituda–takrorlanish taqsimoti keng magnituda diapazonida Gutenberg–Rixter qonuni bilan statistik jihatdan mos keladi. Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, zilzilalarning magnituda taqsimoti universal ravishda chiziqli emas va ularning shakli zilzilalar hosil bo‘lishining fizik mexanizmlariga bog‘liq holda sezilarli darajada farq qilishi mumkin. Zonalar orasidagi farqlar tektonik yuklanish va kuchlanishlarning bo‘shashish mexanizmlaridagi xususiyatlarni aks ettiradi. Natijalar taqsimotning dum qismini tahlil qilish va deklaasterizatsiyaning muhimligini ta’kidlaydi hamda, ayniqsa, katta magnitudali hodisalarning ortiqchaligi kuzatiladigan hududlarda, Gutenberg–Rixter standart modeliga nisbatan kuchli zilzilalar ehtimoli yuqoriroq bo‘lishi mumkinligini ko‘rsatib, seysmik xavfni baholash uchun muhim ahamiyatga ega.

Kalit so‘zlar: zilzilalar kataloglari, to‘liqlik magnitudasi, kataloglarni deklaasterizatsiya qilish usullari, zilzilalar takrorlanishi, Gutenberg–Rixter qonuni, zilzilalar magnituda taqsimoti.

SEYSMOTEKTONIKA VA GEODINAMIKA

УДК 551.24:551.21

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКАЯ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА РАЙОНА СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ АФГАНИСТАНА

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

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

Аннотация. Работа посвящена изучению сейсмотектонической и сейсмической обстановки северной части Афганистана, куда приурочена линия строительства железной дороги Мазари-Шариф-Герат. По современным геодинамическим представлениям, территория Афганистана расположена на западном фланге Памиро-Пенджабского клина Альпийско-Гималайского складчатого пояса. Основные морфоструктуры изучаемой территории – крупные зоны поднятий и прогибов, грабены и горсты, надвиговые и сдвиговые структуры – формировались в течение новейшего этапа. Сеть активных разломов, являющаяся основным элементом морфоструктур, возникла в неогене (N) и четвертичное (O) время и сыграла существенную роль при формировании современной морфоструктуры территории. В северной части Афганистана выделены более восьми крупных структур, контролирующих разломы изучаемой территории. Пространственно все эти разломы имеют субширотное и северо-восточное простирание. Изучены особенности распределения сильных и сильнейших землетрясений, которые создают реальную угрозу для строящихся объектов, а также особенности проявления землетрясений с $M > 5,0$.

Ключевые слова: сейсмотектоника, геодинамика, морфоструктура, разломы, эпицентры землетрясений, магниту́да.

Введение. В настоящее время в связи с наступлением политической стабильности на территории Афганистана начаты интенсивные работы по освоению ее природных богатств, развитию водных и железнодорожных коммуникаций, а также по строительству Кош-Тепинского канала протяженностью 285 км. Существует ряд соглашений по строительству железнодорожных магистралей: Транс-Афганской магистрали (Узбекистан–Афганистан–Пакистан), по развитию строительства железной дороги Туркменистан–Афганистан–Таджикистан и Хар-Герат, а также магистрали Мазари-Шариф–Герат. Основная часть планируемых линий строительства проходит по сейсмоактивной северной части территории Афганистана, где часто происходят сильные и сильнейшие землетрясения. В этой связи наиболее актуально изучить сейсмическую и сейсмотектоническую обстановку территорий, где проходит планируемая линия железной дороги. Работа посвящена изучению сейсмотектонической и сейсмической обстановки линии строительства железной дороги Мазари-Шариф–Герат.

По современным геодинамическим представлениям территория Афганистана расположена на западном фланге Памиро-Пенджабского клина Альпийско-Гималайского складчатого пояса, который начал формироваться с началом неогенового периода в виде гигантской горизонтальной экструзии (первично интрузивные породы выжимаются, в твердом состоянии, в вышележащие слои) [Буртман, 2013]. Тектоническая структура Афганистана осложнена надвигами и шарьяжами (тектоническими покровами).

Новейшая тектоника. Современный рельеф Афганистана сравнительно молодой (25 млн. лет). Перед формированием современного рельефа вся территория представляла обширную низменность и невысокие горы, с отметками до 500 м. Контрастные орогенные движения начались в раннем неогене. В неогене (N) и четвертичное (O) время возникла сеть активных разломов, сыгравших существенную роль при формировании современной морфоструктуры, сопровождавшейся вулканизмом и землетрясениями, о чем свидетельствуют обнаруженные палеосейсмодислокации (следы крупных землетрясений). Были созданы крупные

зоны поднятий и прогибов, грабены и горсты, надвиговые и сдвиговые структуры (рис. 1). В рассматриваемой части современной морфоструктуры региона выделяются Банди-Туркестанское (I) и Памиро-Паропамизское (II) поднятия, ограничивающиеся Сейстанской впадиной и Приамударьинской областью опускания. Памиро-Паропамизское сводово-глыбовое поднятие ориентировано в субширотном направлении. В центральной части поднятия располагаются дугообразные хребты: Шахдаринский, Ходжа-Мухамед, Сафедкох, Паропамиз с абсолютными отметками от 7500 м на востоке (за пределами Афганистана) до 3500 м на западе. В северной части Памиро-Паропамизского поднятия располагается Банди-Туркестанское поднятие широтного простираения.



Рис. 1. Схема новейшей тектоники Афганистана, по [5]. Сводово-глыбовые поднятия: 1 – районы максимального (свыше 5200 м) поднятия; 2 – районы весьма интенсивного (более 3500 м) поднятия; 3 – районы интенсивного (более 2500 м) поднятия; 4 – районы умеренного и слабого (менее 2500 м) поднятия (первая ступень); 5 – поднятые блоки внутри области опускания (А – Обигармский, Б – Кафир-Памиронианский, В – Альбурзский); 6 – оси сводово-глыбовых поднятий (I – Банди-Туркестанского, II – Памиро-Паропамизского). Области опускания: 7 – слабые (менее 100 м), 8 – средние (до 500 м), 9 – интенсивные (свыше 2000 м), 10 – весьма интенсивные (свыше 5000 м); 11 – предгорные впадины и их номера (1 – Нижне-Герирудская, 2 – Кушкская, 3 – Даулятабадская, 4 – Келифская, 5 – Вахшская, 6 – Пулихумрийская, 7 – Ишккешская, 8 – Кулябская, 9 – Кокчинский грабен, 10 – Сейстанская неотектоническая впадина, 11 – Хамунская впадина); 12 – межгорные впадины и их номера (12 – Чакхаранская, 13 – Яковланская, 14 – Бамианская, 15 – Чарикарская, 16 – Баграмская, 23 – Анджуманская, 24 – Зобакская). 13 – внутригорные впадины (цифры на схеме): 25а – Пенджабская, 15 – разломы, активизированные в неоген-четвертичное время; 16 – современные сейсмогенные разломы и палеосейсмодислокации.

Fig. 1. Neotectonic scheme of Afghanistan according to [5]. Dome-and-block uplifts: 1 – areas of maximum uplift (over 5200 m); 2 – areas of very intense uplift (over 3500 m); 3 – areas of intense uplift (over 2500 m); 4 – areas of moderate and weak uplift (less than 2500 m) (first stage); 5 – uplifted blocks within subsidence areas (A – Obigarm, B – Kafir-Pamirionian, C – Alborz); 6 – axes of dome-and-block uplifts (I – Bandi-Turkestan, II – Pamir-Paropamiz). Subsidence areas: 7 – weak (less than 100m); 8 – moderate (up to 500 m); 9 – intense (over 2000 m); 10 – very intense (over 5000 m); 11 – foreland basins and their numbering (1 – Lower Gerirud, 2 – Kushka, 3 – Daulatabad, 4 – Kelif, 5 – Vakhsh, 6 – Pulikhumri, 7 – Ishkamesh, 8 – Kulyab, 9 – Kokcha graben; 10 – Sistan neotectonic basin, 11 – Hamun basin); 12 – intermontane basins and their numbering (12 – Chakhcharan, 13 – Yakawlang, 14 – Bamiyan, 15 – Charikar, 16 – Bagram, 23 – Anjuman, 24 – Zobak); 13 – intramontane basins (numbers on the scheme): 25a – Punjab; 15 – faults reactivated in the Neogene–Quaternary; 16 – modern seismogenic faults and paleoseismodislocations.

Другим элементом современной морфоструктуры региона являются прогибы. В целом новейшие прогибы занимают меньше пространства, нежели поднятия. В пределах областей прогибания выделяются четыре типа опусканий: межгорные впадины, разделяющие области поднятий; внутригорные впадины, разделяющие отдельные части поднятий; поперечные

впадины, наложенные на предыдущие типы, и предгорные впадины и области прогибания, лежащие на периферии поднятий и образующие самостоятельные, весьма обширные структуры. Все прогибы выполнены неоген-четвертичными грубообломочными пестроцветными осадками, сносимыми с гор, и характеризуются наиболее активным развитием в четвертичное время. Строящаяся линия железной дороги в центральной и западной части по простиранию пересекает районы интенсивного (более 2500 м), умеренного и слабого (менее 2500 м) поднятия. А восточная часть приурочена к районам слабого опускания (менее 100 м).

Геодинамика. Современная кинематика деформаций региона изучена методами космической геодезии. По данным GPS, скорость сокращения площади между пунктом Пешавар у границы Индостана и пунктом Гарм у северо-западной границы Памира определена в $31,8 \pm 1,5$ мм/год [Mohadjer et al., 2010], меридиональная составляющая сокращения – 26,6 мм/год. Эта величина показывает скорость сокращения площади всего Памир-Пенджабского синтаксиса. Сокращения Памира, по данным, полученным в пунктах Хорог (у южной границы Памира) и Гарм (на северо-западной границе Памира), происходят со скоростью $16,2 \pm 1,6$ мм/год [Mohadjer et al., 2010], меридиональная составляющая сокращения – 13,4 мм/год. Следовательно, половина сокращения площади синтаксиса происходит южнее Памира.

Территория между пунктами Хорог на Памире и Ош в Ферганской впадине сокращается со скоростью $11,8 \pm 2$ мм/год [Mohadjer et al., 2010]. Большая часть этого сокращения происходит на границе Памира и Тянь-Шаня: различие между скоростью перемещения в северном направлении пунктов GPS, расположенных в Заалайском хребте и в Фергане, составляет около 10 мм/год. По другим расчетам, также основанным на данных GPS, Памир сближается с Алаем со скоростью 13 ± 4 мм/год [Reigber et al., 2001], или 15 мм/год [Зубович и др., 2004, 2007], или $17,5 \pm 0,8$ мм/год [Yang et al., 2008].

С расширением Памира в западном направлении, вероятно, связано сближение пункта Хорог на юге Памира с пунктом Шаартуз в Таджикской депрессии со скоростью $6,2 \pm 1$ мм/год. Сравнение данных о перемещении пунктов Ташкоргон и Хорог свидетельствует о расширении Памира в широтном направлении со скоростью $8,8 \pm 2$ мм/год. По данным о перемещении пунктов Пешавар и Кабул, в Белуджестане на западной границе Памир-Пенджабского синтаксиса происходит лево-сдвиговое смещение со скоростью $18,1 \pm 1$ мм/год. По результатам измерений, скорость перемещений пункта Кабул по меридиональному направлению равняется $vN = 10,0 \pm 1,1$ мм/год, а по широтному и по $vW = 0,1 \pm 1,1$ мм/год. Пункт Хорог перемещается по северному направлению $vN = 15,8 \pm 1,1$ мм/год, а по широтному $vW = 10,7 \pm 1,1$ мм/год. Компоненты скорости перемещения пунктов GPS определены по отношению к Евразии (рис. 2).

Активные разломы. Следующим элементом современной морфоструктуры являются активные разломы. На левом борту Памиро-Пенджабского клина выделяются крупные левые сдвиги Чаманский (9) и Дарвазский (3) север-северо-восточного простирания (см. рис. 2). Большую роль в современной структуре данного региона играют система правых сдвигов, куда входят Альбурс-Мормульский (4), Андарабский (5), Банди-Туркестанский (6), в целом имеющие северо-западную ориентацию, и Герирудский (Гератский) (7) субширотного простирания [Wheeler, Rukstales, 2007, Славин, 1976]. Эти разломы структуроконтролирующие, разделяют крупные поднятия и прогибы. По сейсмологическим данным, они потенциально сейсмоопасные. Заметную роль при формировании современной структуры сыграли смещения по Зебак-Мунджанскому (8) и Чаманскому (9) левым сдвигам. Отметим, что приведенные на рис. 2 разломы хотя приняты в качестве основных сейсмогенных, на самом деле большая часть из них состоит из системы разломов соответствующей ориентации. На юге Кундузской системы складчатые структуры срезаются очень молодой Альбурзско-Мормульской зоной разломов; на востоке они отделены разломом от Кулябского предгорного прогиба. На западе Саманганский блок ограничен Рабатакским разломом от Кафирниганского блока.



Рис. 2. Схема активных разломов Афганистана и векторы скоростей перемещения пунктов GPS, по [Mohadjer et al., 2010]. 1 – активные разломы: (1 – Гиссаро-Кокшаальский, 2 – Вахш-Заалайский, 3 – Дарвазский, 4 – Альбурс-Мормульский, 5 – Андарабский, 6 – Банди-Туркестанский, 7 – Герирудский (Гератский), 8 – Зебак-Мунджанский, 9 – Чаманский); 2 – проектируемая ж/д Мазари-Шариф–Герат; 3 – векторы скоростей перемещения пунктов GPS относительно стабильной части Евразии;

Fig. 2. Map of active faults in Afghanistan and velocity vectors of GPS station movements according to [Mohadjer et al., 2010]. 1 – active faults: (1 – Gissar–Kokshaal, 2 – Vakhsh–Zaalay, 3 – Darvaz, 4 – Alborz–Mormul, 5 – Andarab, 6 – Band-e Turkistan, 7 – Hari Rud (Herat), 8 – Zebak–Munjan, 9 – Chaman); 2 – proposed Mazari-Sharif–Herat railway; 3 – velocity vectors of GPS station movements relative to the stable part of Eurasia, according to the data.

Особенности сейсмичности разломных зон

Результаты исследования сеймотектонических особенностей территории Афганистана позволили принимать вышеперечисленные разломы земной коры в качестве геологической основы линейных источников сейсмических колебаний. Из перечисленных разломов, создающих наибольшую угрозу строящейся линии железной дороги, можно отметить высокопотенциальный Альбурс-Мормульский субширотного простирания. Отметим, что западная часть Альбурс-Мормульского разлома имеет субширотное простирание, протяженностью 140-145 км. По мере продвижения к востоку в простирании разлома прослеживается тенденция поворачивания к северо-востоку. В области Мазари-Шарифа Альбурс-Мормульский разлом сочленяется с Багланской системой разломов. Эта область сочленения двух кусков разлома отличается относительно высокой сейсмичностью. На рис. 3 приведены эпицентры сильных (с $M \geq 6,0$) землетрясений, происшедшие за период с 1902 по 2025 г. [<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>]. На рис. 3 зеленым цветом обозначены эпицентры исторических землетрясений, нанесенные по данным «Нового каталога сильных землетрясений на территории СССР...» [1977]. Так, за 120-летний период в зоне данного разлома в радиусе 50-60 км от Мазари-Шарифа произошли 3 землетрясения с $M \geq 6,0$ и одно с $M = 7,1$. Эпицентры этих землетрясений расположены на расстоянии от 15 до 45 км от линии строящейся линии железной дороги (см. рис. 3). В юго-восточной части зоны Багланской системы разломов в 1909 г. отмечено сильнейшее Айважское землетрясение с $M = 8,0$. Расстояние от эпицентра землетрясения до г. Мазари-Шариф 150-155 км. В последние годы высокой сейсмической активностью отличился район Герата. Согласно каталогу [<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>], в 2023 г. на расстоянии 22-24 км от города в течение 9 дней возникли четыре землетрясения с $M = 6,3$. До этих событий сильное землетрясение с $M = 6,1$ возникло в 1102 г., которое привело к разрушениям в г. Герат [Новый каталог..., 1977]. Центральная часть строящейся линии железной дороги приурочена к относительно спокойной, в сейсмическом отношении, части территории Афганистана. Кроме очаговой области Гератских землетрясений, на сейсмическую опасность строящейся железной

дороги могут влиять сейсмические сотрясения от землетрясений, возникающих в пределах Ирана. Как видно из рис. 3, на расстоянии 200-280 км от Герата имеется область высокой концентрации очагов сильных землетрясений. В ее пределах в 1968, 1979 и 1997 гг. возникли три сильных землетрясения с $M \geq 7,0$. Кроме того, за исследуемый период возникли более 5-6 землетрясений с $M \geq 6,0$. Наблюдаемая ситуация свидетельствует о том, что наиболее повышенной сейсмической опасности подвергаются северо-восточная и юго-западная части линии строящейся железной дороги.

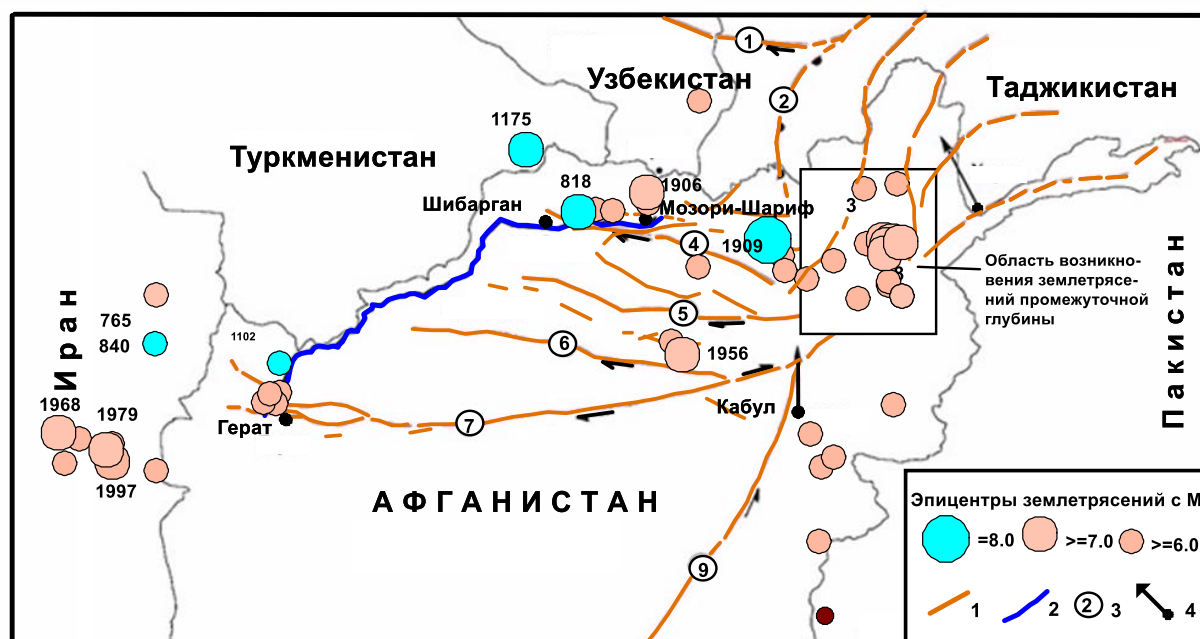


Рис. 3. Эпицентры сильнейших землетрясений и активные разломы земной коры Афганистана. 1 – разломы земной коры; 2 – линия железной дороги; 3 – номер разлома; 4 – направления движения пунктов, по данным GPS (зеленым цветом обозначены эпицентры землетрясений, по [Новый каталог..., 1977]).

Fig. 3. Epicenters of the strongest earthquakes and active faults of the Earth's crust in Afghanistan. 1 – crustal faults; 2 – railway line; 3 – fault number; 4 – directions of movement of points according to GPS data. (Earthquake epicenters are shown in green according to [Nov.Catalog..., 1977]).

На рис. 4, 5 и 6 приведены карты эпицентров землетрясений, происшедших в пределах изучаемой территории за период с 1902 по 2025 г. с $M \geq 5,0$, $M \geq 4,0$ и $M \geq 3,0$. Как видно из рисунков, в распределении эпицентров землетрясений с $M \leq 6,0$ значимых отличий от тех, что наблюдались в распределении сильных, не отмечается. Значимое увеличение количества эпицентров землетрясений с $M \geq 5,0$ наблюдается в районе Мазари-Шарифа и прилегающих территориях, а также в районе Герата. В центральной части линии строящейся железной дороги возникновения землетрясений слабой и умеренной силы не отмечено. Это свидетельствует о том, что центральная часть выбранной линии железной дороги находится в относительно спокойной в сейсмическом отношении зоне, где отсутствуют зоны активных разломов. Северо-западные окончания Андарабского (5) и Банди-Туркестанского (6) разломов пространственно не доходят до линии железной дороги, следовательно, не могут представлять ей большую угрозу. На строящийся объект реальная сейсмическая угроза исходит от Альбурс-Мормульского (4) и западного окончания Герирудского (Гератского) (7) разломов.



Рис. 4. Карта активных разломов и эпицентры землетрясений с $M \leq 5,0$ северной части Афганистана. Эпицентры землетрясений, по [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search]. 1 – разломы земной коры; 2 – линия железной дороги; 3 – номер разлома; 4 – направления движения пунктов, по данным GPS.

Fig. 4. Map of active faults and earthquake epicenters with $M \leq 5,0$ in northern Afghanistan. Earthquake epicenters are from [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search]. 1 – crustal faults; 2 – railway line; 3 – fault number; 4 – directions of movement of points according to GPS data.



Рис. 5. Карта активных разломов и эпицентры землетрясений с $M \leq 4,0$ северной части Афганистана. Эпицентры землетрясений, по [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search]. 1 – разломы земной коры; 2 – линия железной дороги; 3 – номер разлома; 4 – направления движения пунктов, по данным GPS.

Fig. 5. Map of active faults and earthquake epicenters with $M \leq 4,0$ in northern Afghanistan. Earthquake epicenters are from [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search]. 1 – crustal faults; 2 – railway line; 3 – fault number; 4 – directions of movement of points according to GPS data.

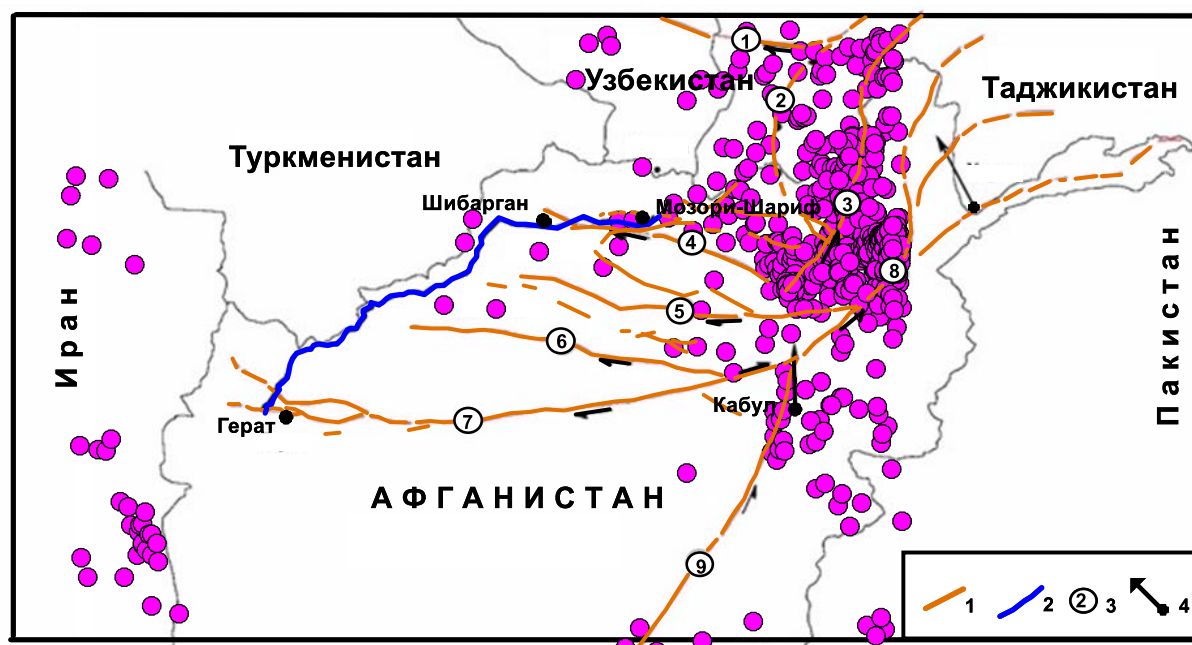


Рис. 6. Карта активных разломов и эпицентры землетрясений с $M \leq 3,0$ северной части Афганистана. Эпицентры землетрясений, по [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search]. 1 – разломы земной коры; 2 – линия железной дороги; 3 – номер разлома; 4 – направления движения пунктов, по данным GPS.

Fig. 6. Map of active faults and earthquake epicenters with $M \leq 3,0$ in northern Afghanistan. Earthquake epicenters are from [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search]. 1 – crustal faults; 2 – railway line; 3 – fault number; 4 – directions of movement of points according to GPS data.

ВЫВОДЫ

1. Современный морфоструктурный план Афганистана сформирован в неотектонический этап развития (25 млн. лет).

2. В формировании современной морфоструктуры существенную роль сыграли активные разломы.

3. Современное геодинамическое положение Афганистана в ближайшей перспективе не претерпит существенных изменений.

4. Выделяемые правосторонние сдвиги: Альбурс-Мормульский (4) и Герирудский (Гератский) (7) разломы представляют реальную угрозу проектируемой железной дороге при тектонических подвижках и должны быть учтены при оценке сейсмической опасности объекта.

5. Эпицентры сильных (с $M \geq 7,0$ и $M \geq 6,0$) землетрясений в основном приурочены к зонам Альбурс-Мормульского и Герирудского (Гератского) разломов.

6. Андарабский и Банди-Туркестанский разломы до настоящего времени проявили себя только лишь землетрясениями с $M \leq 5,9$ и по сейсмическому потенциалу намного уступают Альбурс-Мормульскому и Герирудскому (Гератскому) разломам.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Zubovitch A.B. и др. Поле деформаций, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня // Геология и геофизика. - 2001. - Т. 42. - № 10. - С. 1634-1640.
2. Mohadjer S., Bendick R., Ishuk Ф. 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.
3. Reigber C., Michel G.W., Galas R., Angermann D., Klotz J., Chen J.Y., Papschev A., Arslanov R., Tzurkov V.E., Ishanov M.C. New space geodetic constraints on the distribution of deformation

- in Central Asia // *Earth Planet. Sci. Lett.* - 2001. - Vol. 191. - P. 157-165.
4. Yang S., Li J., Wang Q. The deformation pattern and fault rate in the Tian Shan Mountains inferred from GPS observations // *Sci in China. Ser. D: Earth Sci.* - 2008. - Vol. 51. - P. 1064-1080.
5. Буртман В.С. Геодинамика Памир-Пенджабского синтаксиса // *Геотектоника.* - 2013. - № 1. - С. 36-58.
6. Славин В.И., Демин В.Н. Орогенный (неотектонический) этап развития территории Афганистана // *Изв. Вузов. Геология и разведка.* - 1972. - № 2. - С. 63-73.
7. Славин В.И. Тектоника Афганистана. - М.: Недра, 1976. - 205 с.
8. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н.В.Кондорской и Н.В.Шебалина. - М.: Наука, 1977. - 536 с.
9. Wheeler R.L., Rukstales K.S. 2007. Seismotectonic map of Afghanistan and adjacent areas: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1104, 1 plat. http://neotec.ginras.ru/neomaps/M020_Afghanistan_2007_Seismotectonic.
10. Каталог землетрясений Афганистана за 1902-2025 годы. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.

Afg'onistonning shimoliy qismi hududining seysmotektonik va seysmik holati U.A. Nurmatov, Yu.M. Sadykov, U.A. Yusupdjanova

Annotatsiya. Mazkur ish Afg'onistonning shimoliy qismining seysmotektonik va seysmik sharoitlarini o'rganishga bag'ishlangan bo'lib, urilishi rejalashtirilgan Mozori Sharif–Hirot temir yo'li aynan shu hududdan. Zamonaviy geodinamik tasavvurlarga ko'ra, Afg'oniston hududi Alp–Himolay buklamali mintaqasiga kiruvchi Pomir–Panjob sintaksisining g'arbiy qanotida joylashgan. O'rganilayotgan hududning asosiy morfostrukturalari – yirik ko'tarilish va cho'kish zonalari, graben va gorstlar, shuningdek, surilma (nadvig) va siljish (strike-slip) tuzilmalar tektonik rivojlanishning eng so'nggi bosqichida shakllangan. Morfostrukturaning asosiy elementi hisoblangan faol yer yoriqlari tarmog'i Neogen (N) va To'rtlamchi (Q) davrlarda vujudga kelib, hududning hozirgi morfostrukturasini shakllantirishda muhim rol o'ynagan. Afg'onistonning shimoliy qismida mavjud strukturalarini nazorat qiluvchi sakkizdan ortiq yirik, yer yoriqlari mavjudligi aniqlangan. Joylashuvi jihatdan bu yer yoriqlarining barchasi asosan subkenglik va shimoli-sharqiy yo'nalishga ega bo'lib xududning kuchli zilzilalari aynan ular zonasida sodir bo'lishi aniqlangan. Qurilayotgan temir yo'l uchun real xavf tug'diruvchi kuchli va juda kuchli zilzilalarning tarqalish xususiyatlari, shuningdek, magnitudasi $M < 5,0$ bo'lgan zilzilalarning namoyon bo'lish xususiyatlari tahlil qilingan.

Kalit so'zlar: seysmotektonika, geodinamika, uzilishlar, epitsentr, magnituda.

Seismotectonic and Seismic Conditions of the Northern Part of Afghanistan U.A. Nurmatov, Yu.M. Sadykov, U.A. Yusupdjanova

Annotation. This work is devoted to the study of the seismotectonic and seismic conditions of the northern part of Afghanistan, where the Mazar-i-Sharif–Herat railway construction line is located. According to modern geodynamic concepts, the territory of Afghanistan lies on the western flank of the Pamir–Punjab syntaxis within the Alpine–Himalayan fold belt. The main morphostructures of the studied area—large uplift and depression zones, grabens and horsts, as well as thrust and strike-slip structures – were formed during the latest stage of tectonic development. The network of active faults, which is the main element of the morphostructure, originated in the Neogene (N) and Quaternary (Q) periods and played a significant role in shaping the present-day morphostructure of the region. In the northern part of Afghanistan, more than eight major fault-controlled structures have been identified. Spatially, all these faults exhibit predominantly sublatitudinal and northeastern trends. The distribution patterns of strong and major earthquakes, which pose a real threat to the railway under construction, have been analyzed, as well as the characteristics of earthquakes with magnitudes greater than $M < 5,0$.

Key words: seismotectonics, geodynamics, faults, epicenter, magnitude, морфоструктура, earthquake epicenters.

MUHANDISLIK SEYSMOLOGIYASI

UO‘K 550.34:551.435.6

OHANGARON SUV OMBORI HUDUDIDAGI KO‘CHKILARNING DINAMIK FAOLLIGINI MIKROSEYSMIK TADQIQOTLAR ASOSIDA BAHOLASH

**Sh.I. Yodgorov, N.M. Muhammadqulov, B.B. Xayriddinov, Sh.B. Avazov, A.K. Qodirboyev,
Sh.Z. Abdushukurov**

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi G‘.O. Mavlonov nomidagi Seysmologiya instituti

Annotatsiya. Mazkur maqolada Yuqori-Turk ko‘chkisi hududida ko‘chki massasining dinamik faolligi mikroseysmik kuzatuvlar asosida kompleks baholangan. O‘tkazilgan spektral tahlillar natijasida ko‘chki ichida rezonans xususiyatlarining yaqqol namoyon bo‘lishi, past chastota diapazonida tebranish energiyasining selektiv kuchayishi hamda bloklar kesimida dinamik ko‘rsatkichlarning sezilarli farqlanishi aniqlangan. Surilma massivi ichida elastik parametrlar kontrasti va qatlamlararo nomutanosiblik mavjudligi dinamik zaif zonalarining shakllanishiga sabab bo‘layotgani qayd etildi. Olingan natijalar ko‘chki maydonida energiya taqsimotining notekisligini ko‘rsatib, ayrim bloklarda dinamik faollikning nisbatan yuqori ekanligini tasdiqlaydi. Tadqiqot surilma hududlarida dinamik holatni aniqlash, zaif uchastkalarni ajratish hamda geodinamik barqarorlikni baholashda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so‘zlar: Yuqori-Turk ko‘chkisi, seysmometrik tadqiqotlar, HVSU usuli, rezonans chastota (f_0), H/V, zaiflik indeksi (K_g), surilma bloklari, dinamik faollik.

Kirish. Ko‘chki jarayonlari tog‘li va tog‘oldi hududlarida eng xavfli geologik jarayonlardan biri bo‘lib, ular gidrotexnik inshootlar, transport kommunikatsiyalari va aholi punktlari xavfsizligiga bevosita tahdid soladi. Ayniqsa suv omborlari ta’siridagi qiyaliklarda gruntlarning suv bilan to‘yinishi, darzlanish jarayonlari hamda tashqi dinamik omillar ko‘chki massivi barqarorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Bunday sharoitlarda surilmaning ichki tuzilmasini va uning dinamik holatini aniqlash monitoring tizimining muhim tarkibiy qismi hisoblanadi. Shunday yirik ko‘chkilardan Yuqori-Turk ko‘chkisi alohida ahamiyatga ega. Yuqori-Turk ko‘chkisi Ohangaron daryosining chap qirg‘og‘ida joylashgan yirik surilma massivi bo‘lib, blokli tuzilishga ega va uzoq yillardan buyon monitoring ostida saqlanadi. Hududning geologik tuzilishi darzlangan paleozoy va cho‘kindi mezo-kaynozoy jinslari bilan tavsiflanadi. Hidrogeologik sharoitlarning murakkabligi, suv ombori rejimining o‘zgaruvchanligi hamda yaqin atrofdagi texnogen tebranish manbalari surilma massivining dinamik faolligini oshiruvchi omillar sifatida qaraladi. Shu bois ko‘chki hududida gruntlarning dinamik xususiyatlarini aniqlash alohida amaliy ahamiyatga ega (1-rasm).



1-rasm. Yuqori-Turk ko'chkisining morfostrukturaviy tuzilishi va yoriqlanish zonalari.

An'anaviy geodezik va muhandis-geologik kuzatuvlar ko'chki harakatining sirt ko'rinishlarini aniqlash imkonini bersa-da, surilma bloklarining ichki dinamik xususiyatini baholash uchun mikroseysmik monitoring samarali usul hisoblanadi. Mikrotremorlar asosida grunt qatlamlarining rezonans xususiyatlari va tebranishlarning kuchayish darajasini aniqlash surilmaning zaif zonalarini ajratish imkonini beradi. Dinamik faollik darajasini aniqlash, surilma bloklari o'rtasidagi farqlanishlarni baholash hamda monitoring tizimini takomillashtirish zarurati bilan belgilanadi. Amaliy jihatdan esa, olingan natijalar gidrotexnik inshootlar xavfsizligini ta'minlash, xavfli geologik jarayonlarni prognozlash va hududiy seysmik ta'sir bahosini aniqlashtirish uchun muhimdir [1].

Tadqiqotning maqsadi Yuqori-Turk ko'chkisi hududida mikroseysmik tadqiqotlar ma'lumotlari asosida surilma massivining dinamik faolligini baholashdan iborat. Belgilangan maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar qo'yildi: ko'chki hududi va undan tashqarida mikroseysmik o'lchov nuqtalarini tashkil etish; tinch holatdagi mikroseysmik tebranishlarni qayd etish va qayta ishlash; tebranishlarning asosiy chastotalari va spektral kuchayish xususiyatlarini aniqlash; dinamik ko'rsatkichlar asosida bloklar bo'yicha solishtirma tahlil o'tkazish; surilma bloklarining nisbiy faollik darajasini baholash va dinamik zaif zonalarini ajratish.

Mazkur tadqiqot Yuqori-Turk ko'chkisining dinamik xususiyatlarini kompleks baholash orqali monitoring tizimini ilmiy asoslashga qaratilgan bo'lib, natijalar hududning geodinamik barqarorligini aniqlash va xavfli geologik jarayonlarni boshqarish bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqishda qo'llanishi mumkin.

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili. So'nggi yillarda ko'chki jarayonlarini o'rganishda geofizik usullar, ayniqsa seysmik va elektrorazvedka usullari keng qo'llanilmoqda. An'anaviy muhandislik-geologik tadqiqotlar (burg'ilash, inklinometr, piezometr kuzatuvlari) surilma tekisligini aniqlashda yuqori aniqlik bersa-da, ular murakkab relyefli hududlarda qimmat va texnik jihatdan qiyin amalga oshiriladi. Shu sababli, iqtisodiy samaradorlikni ta'minlaydigan hamda ishonchli natija beruvchi geofizik usullarni asosli ravishda tanlash va ularni kompleks qo'llash hozirgi sharoitda dolzarb ilmiy-amaliy muammolardan biri hisoblanadi.

Ko'chki tadqiqotlarida faol seysmik usullar seysmik refraksiya va ko'pkanalli sirt to'lqinlari tahlili (MASW) grunt qatlamlarining tezlik parametrlari va geofizik chegaralarini aniqlashda samarali natijalar bergan. Biroq ushbu usullar ko'p hollarda katta hajmdagi dala ishlarini va murakkab apparaturani talab qiladi. Shu nuqtai nazardan, passiv seysmik usullar, xususan, gorizontal-vertikal

spektral nisbat (HVSР) metodi, so'nggi o'n yilliklarda ko'chki jarayonlarini o'rganishda keng qo'llanila boshladi [2, 3].

Alonso-Pandavenes va boshqalar (2023) Ekvadorning Pujili hududidagi faol ko'chkida HVSР metodini qo'llab, surilma ichki tuzilmasi va surilish tekisligini aniqlash imkoniyatlarini ko'rsatganlar. Tadqiqotda 70 ta HVSР nuqtasi, faol seysmik refraksiya va MASW ma'lumotlari bilan integratsiyalangan holda tahlil qilingan. Mualliflar gruntning asosiy rezonans chastotasi va kuchayish ko'rsatkichlari asosida ikki qatlamli modeldan foydalanib surilish yuzasining chuqurligini aniqlaganlar. Bundan tashqari, elastiklik egri chiziqlari inversiyasi yordamida kesim bo'yicha ko'ndalang to'lqin tezliklari taqsimoti tiklangan hamda natijalar Nakamura tenglamasi orqali olingan qiymatlar bilan solishtirilgan. Ushbu tadqiqotning muhim jihati shundaki, HVSР metodining nafaqat rezonans chastotasini aniqlash, balki surilma ichki tuzilmasini va potentsial zaif zonalarini belgilash imkoniyati mavjudligi isbotlangan. Ayniqsa, spektral kuchayish ko'rsatkichining ortishi va tezlik kontrastining mavjudligi surilish tekisligi bilan bog'liq ekanligi aniqlangan. Mualliflar, shuningdek, yo'nalishlilik tahlili orqali surilma ichidagi yoriqlar va deformatsion zonalar bilan bog'liq dinamik xususiyatlarni ajratish mumkinligini ko'rsatganlar. HVSР usuli yumshoq qatlam ustidagi qattiq qavat mavjud bo'lganda yuqori samaradorlikka ega bo'lib, tezlik kontrasti mavjudligi asosiy rezonans chastotasining shakllanishini ta'minlaydi. Spektral nisbat amplitudasi esa yuqori va past elastik impedansli qatlamlar o'rtasidagi nomutanosiblik bilan bog'liq. Ko'plab tadqiqotlarda HVSР usuli grunt qalinligini baholash, ko'ndalang to'lqin tezligini aniqlashda qo'llanilgan. Bundan tashqari, Nakamura tomonidan taklif etilgan zaiflik ko'rsatkichi (yoki zaiflik indeksi – K_g) grunt massasining deformatsiyalanish qobiliyatini baholash uchun qo'llanilib, ko'chki barqarorligini aniqlashda muhim mezon sifatida ko'rib chiqiladi. Yuqori qiymatlar siljish ehtimoli va siljish energiyasining kuchayishi bilan bog'liq deb talqin qilinadi [4].

Zamonaviy tadqiqotlar HVSР metodining ko'chki jarayonlarini erta bosqichda aniqlash, surilish yuzasini belgilash hamda dinamik zaif zonalarini ajratishda samarali va iqtisodiy usul ekanligini ko'rsatmoqda. Biroq, aksariyat ishlar faol va passiv usullar integratsiyasiga qaratilgan bo'lib, ayrim hududlarda faqat mikroseysmik monitoring asosida dinamik faollikni fazoviy baholash masalasi yetarlicha yoritilmagan [5, 6].

Tadqiqot metodikasi. Yuqori-Turk ko'chkisi blokli tuzilishga ega murakkab surilma massividan iborat. Maydon uchta asosiy blokka ajratilgan bo'lib, ular morfologik va dinamik xususiyatlariga ko'ra farqlanadi: I-blok (g'arbiy qism), II-blok (janubiy-markaziy qism) va III-blok (sharqiy qism).

1. Ko'chki hududi geologik jihatdan murakkab tuzilishga ega bo'lib, uning asosini Paleozoy eratemasiga mansub darzlangan va nisbatan qattiq jinslar tashkil etadi. Ushbu jinslar ko'chki massivining tub asosini hosil qiladi va butun hudud bo'ylab eng pastki qatlam sifatida joylashgan. Paleozoy jinslari ustida Paleogen davri yotqiziqlari yotadi. Mazkur yotqiziqlar tektonik va ekzogen jarayonlar ta'sirida sezilarli darajada buzilgan, darzlangan hamda ayrim uchastkalarda strukturaviy yaxlitligini yo'qotgan. Paleogen qatlamlari ustini esa suglinok, chaqiq materiallar hamda elyuvial-delyuvial genezisli bo'shoq gruntlar qoplab yotadi. Yuqori qatlamlar suv bilan oson to'yinuvchi, zichligi nisbatan past va mexanik jihatdan zaif gruntlardan tashkil topgan. Ushbu qatlamlarning qattiq Paleozoy asos bilan chegarasida elastik va fizik-mexanik parametrlar o'rtasida sezilarli kontrast kuzatiladi. Aynan shu elastik parametrlar kontrasti mikroseysmik tebranishlarning selektiv kuchayishiga hamda rezonans hodisalarining shakllanishiga sharoit yaratadi. Natijada past tezlikli ustki qatlamlarda seysmik energiyaning to'planishi va dinamik zaiflik zonalarining rivojlanishi kuzatiladi. Hudud suv ombori sathining tebranishlari, atmosfera yog'inlari va texnogen ta'sirlar bilan bog'liq gidrogeologik o'zgarishlarga moyil. Bu omillar grunt massasining dinamik xususiyatlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

2. O'lchov nuqtalarining joylashuvi. Mikroseysmik o'lchovlar ko'chki massivi va undan tashqaridagi barqaror hududni qamrab oladigan tarzda joylashtirildi (2-rasm). Jami 40 ta o'lchov nuqtasi tashkil etildi: 30 ta nuqta bevosita surilma bloklari ichida (I, II va III bloklar bo'yicha taqsimlangan), 10

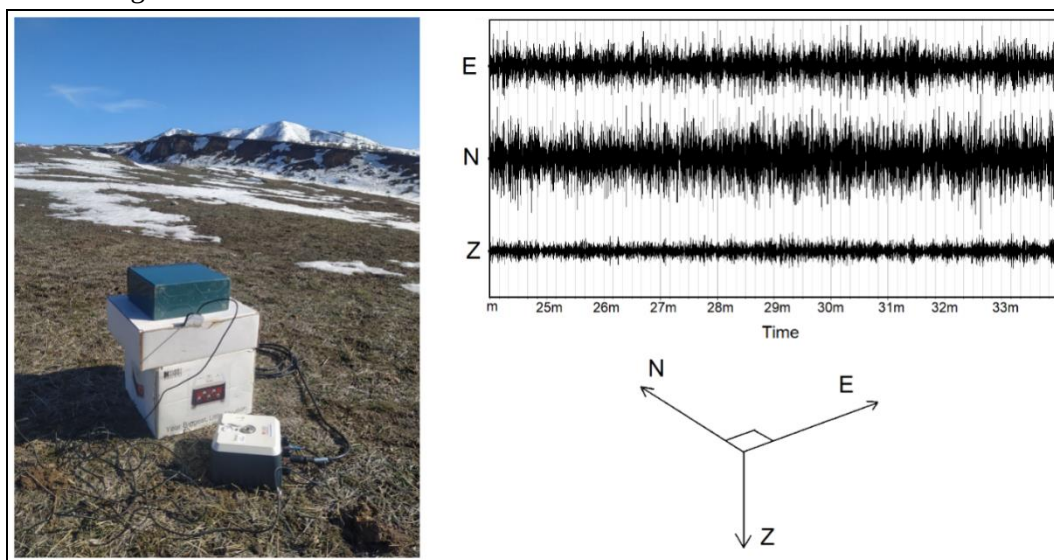
ta nuqta ko'chkiidan tashqarida nisbatan barqaror hududda bloklararo solishtirma tahlil uchun joylashtirildi.



2-rasm. O'lchov nuqtalarining ko'chki maydonida va tashqi barqaror zonada sxematik joylashuvi.

Bunday joylashtirish fazoviy taqqoslash imkonini berib, surilma ichidagi va tashqi hududlardagi dinamik ko'rsatkichlar farqlanishini aniqlashga imkon yaratdi. Nuqtalar relyef, morfologik elementlar va blok chegaralarini inobatga olgan holda tanlandi.

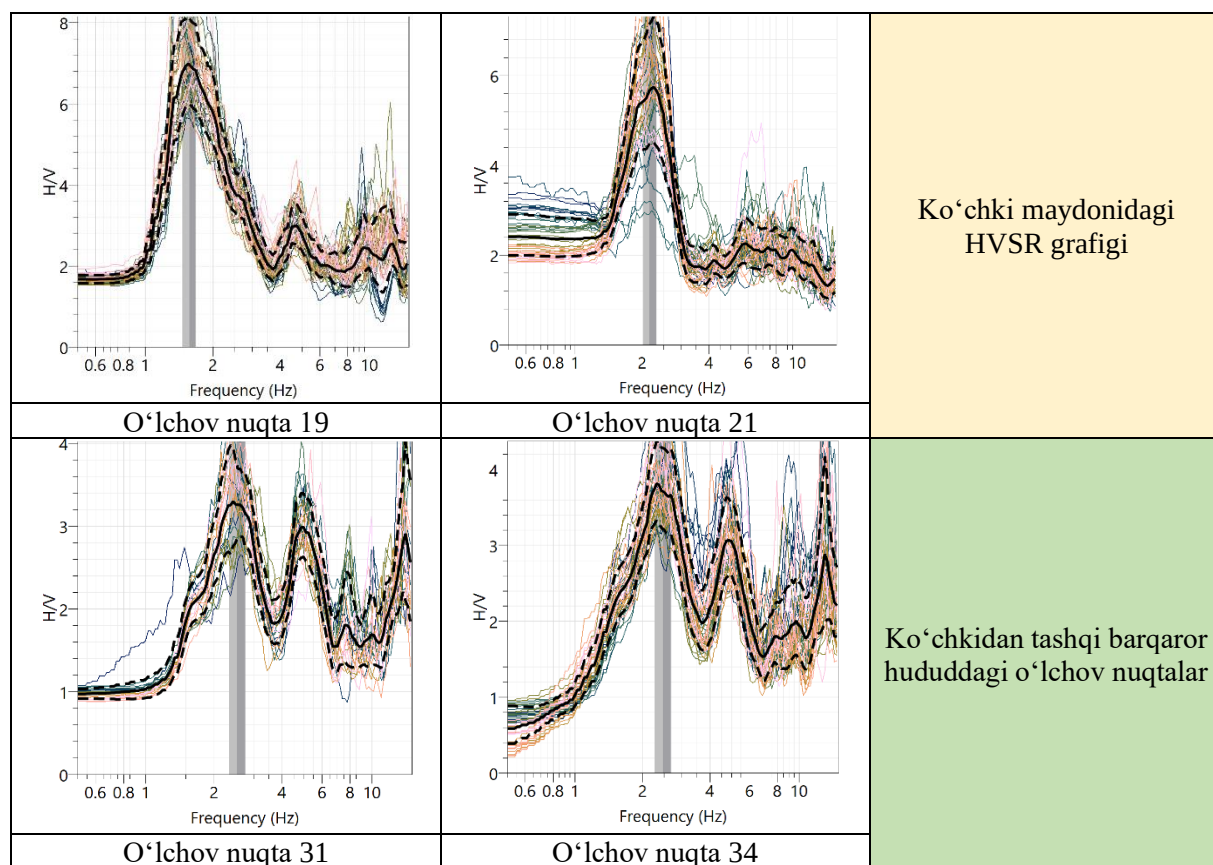
3. Qo'llanilgan asbob-uskunalar. Tadqiqotda «ETNA 2» tipidagi uch komponentali raqamli seysmometr qo'llanildi (3-rasm). Seysmometr uch o'qda tebranishlarni qayd etadi, past chastotali mikroseysmik fonni yuqori aniqlikda yozib olish imkoniyatiga ega hamda dala sharoitida barqaror ishlash uchun moslashtirilgan.



3-rasm. «ETNA 2» seysmometri va olingan mikrotremor yozuvlari (Ko'chki maydonida).

Seysmometr gorizontallari geografik shimol-janub va sharq-g'arb yo'nalishlariga orientatsiya qilindi. Qurilmaning barqaror o'rnatilishi va tashqi shovqinlardan maksimal darajada izolyatsiya qilinishi ta'minlandi. Har bir nuqtada tinch holat sharoitida, tashqi mexanik ta'sirlarsiz, kamida 20-30 daqiqa davomida o'lchovlar amalga oshirildi. Yozuvlar 200 Hz namuna olish chastotasida qayd etildi.

4. HVSR usuli va ma'lumotlarni qayta ishlash. Mikroseysmik yozuvlar gorizontall-vertikal spektral nisbat (HVSR) usuli asosida qayta ishlandi. Usulning nazariy asosi gruntning tabiiy rezonans chastotasini aniqlashga asoslangan bo'lib, yumshoq qatlam ustidagi qattiq asos mavjud bo'lganda spektral kuchayish hodisasi kuzatiladi. Tadqiqot maydoni bo'yicha jami 40 ta nuqtada mikrotremorlar talqin qilindi. Ularning ba'zilari 4-rasmda ko'rsatib o'tilgan.



4-rasm. Ko'chki maydonida va tashqi barqaror hududda olingan HVSR spektral nisbatlari.

Spektral egri chiziqlarda yaqqol pik mavjud bo'lishi yuqori elastik kontrastni ko'rsatadi. Keng yoki ko'p pikli spektrlar esa ichki qatlamlanish yoki murakkab geologik tuzilmani bildiradi.

5. Seysmik ko'rsatkichlarni aniqlash. Yuqori-Turk ko'chkisi hududida olingan mikroseysmik o'lchovlar natijasida har bir nuqta uchun rezonans chastotasi, spektral kuchayish amplitudasi hamda seysmik zaiflik indeksi aniqlandi. Seysmik zaiflik indeksi ko'plab geofizik tadqiqotchilar tomonidan taklif etilgan quyidagi formula asosida ifodalanadi [7-13]:

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0}, \quad (1)$$

bu yerda: A_0 – asosiy grunt rezonans chastotasidagi maksimal H/V amplitudasi; f_0 – gruntning asosiy rezonans chastotasi (Hz); K_g – seysmik zaiflik indeksi.

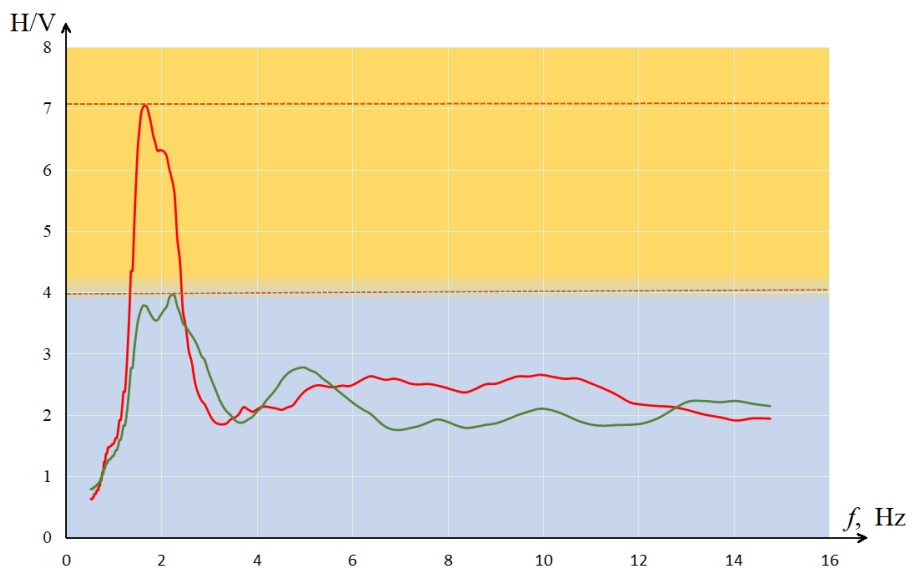
O'lchov nuqtalari surilma bloklari (I, II, III) va ko'chkidan tashqaridagi barqaror hudud bo'yicha guruhlandi. Quyidagi jadvalda olingan asosiy seysmik parametrlar keltirilgan.

Ko'chki hududi va tashqi barqaror zonalarda olingan mikroseysmik parametrlar

Ko'chkida olingan o'lchov nuqtalari			
O'lchov nuqta	f_0	H/V	K_g
I blok			
1	2,05	5,91	17,0381
2	1,85	6,22	20,91265
3	1,81	6,01	19,95586
4	1,89	5,68	17,07005
5	1,91	5,95	18,53534
6	1,88	6,10	19,79255
7	1,72	7,84	35,73581
8	1,62	8,76	47,36889
9	1,59	9,39	55,45415
10	1,61	10,16	64,11528
II blok			
11	1,78	4,54	11,57955
12	1,69	6,51	25,07698
13	1,68	6,09	22,07625
14	1,64	6,29	24,12445
15	1,59	6,70	28,2327
16	1,59	7,11	31,79377
17	1,60	6,61	27,30756
18	1,59	6,93	30,20434
19	1,57	6,97	30,94325
20	2,22	7,01	22,13518
III blok			
21	2,17	5,66	14,76295
22	2,18	5,55	14,12959
23	2,15	5,21	12,62516
24	2,14	5,65	14,91706
25	2,25	4,90	10,67111
26	2,23	6,31	17,85475
27	2,18	6,52	19,50018
28	2,19	6,41	18,76169
29	2,18	6,38	18,67174
30	2,17	6,20	17,71429
Ko'chkidan tashqarida olingan o'lchov nuqtalari			
31	2,54	3,26	4,184094
32	2,53	3,25	4,174901
33	2,47	3,71	5,57251
34	2,39	4,04	6,829121
35	2,42	2,91	3,499215
36	2,48	3,57	5,139073
37	2,47	3,67	5,452996
38	2,45	3,55	5,143878
39	2,44	3,85	6,074795
40	2,54	3,75	5,536417

Natijalar va ularning tahlili. Yuqori-Turk ko'chkisida I, II va III bloklar kesimida mikroseysmik tebranishlarni tahlil qilish asosida surilma massasining dinamik faolligi hamda rezonans xususiyatlari baholandi. Har bir blok bo'yicha olingan H/V spektral nisbatlari barqaror (ko'chkidan tashqari) hududda aniqlangan ma'lumotlar bilan solishtirildi. Natijalar gruntning rezonans chastotasi (f_0) va maksimal H/V spektral amplituda nisbati (A_0) ko'rsatkichlari bo'yicha baholandi.

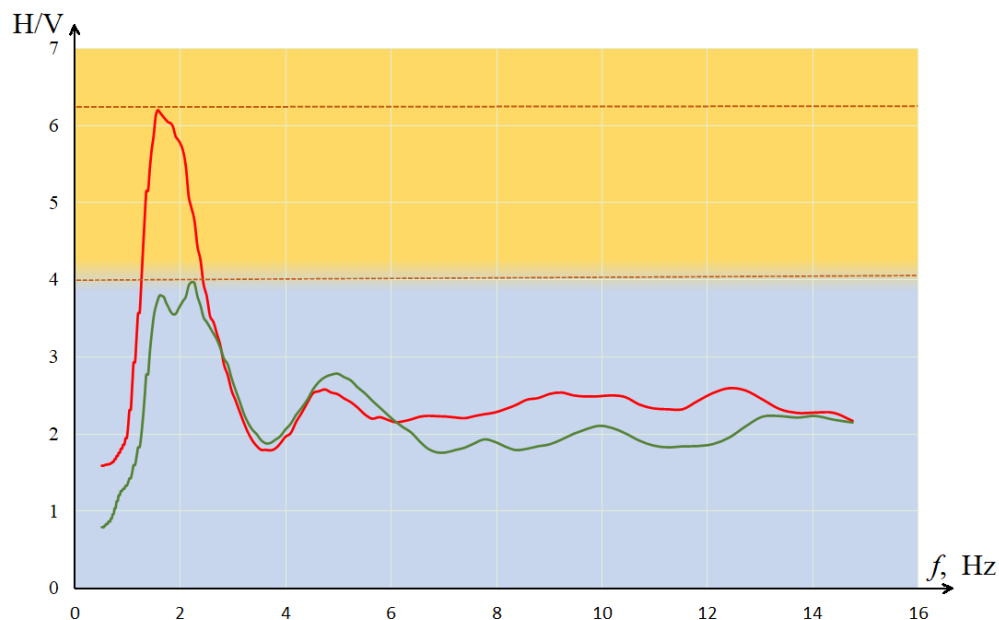
I blok bo'yicha natijalar. I blokda H/V spektral nisbatining asosiy cho'qqisi $f_0 \approx 1,8-2,0$ Hz diapazonda kuzatildi. Maksimal amplituda qiymati $A_0 \approx 7,0$ gacha yetgan bo'lib, bu barqaror hududda aniqlangan o'rtacha qiymatlardan ($A \approx 3,5-4,0$) sezilarli darajada yuqoridir (5-rasm).



5-rasm. I blok hududida H/V spektral nisbatining barqaror hudud bilan solishtirma tahlili.

Past chastota diapazonida (1,5-2,5 Hz) amplitudaning keskin oshishi qatlamning dinamik zaifligi va tebranish energiyasining selektiv kuchayishini ko'rsatadi. 4-10 Hz oralig'ida esa amplituda 2-2,6 atrofida barqarorlashgan, bu yuqori chastotalarda grunt qatlamlarining seysmik tebranishlarga nisbatan kamroq sezgir ekanligini bildiradi. I blokda kuzatilgan yuqori H/V cho'qqisi ushbu zonada elastik to'lqinlarning kuchli rezonans hodisasi mavjudligini hamda qatlamlarning keskin mexanik nomutanosiblikka ega ekanligini ko'rsatadi. Bu blok ko'chki ichida dinamik jihatdan eng zaif zonalardan biri hisoblanadi.

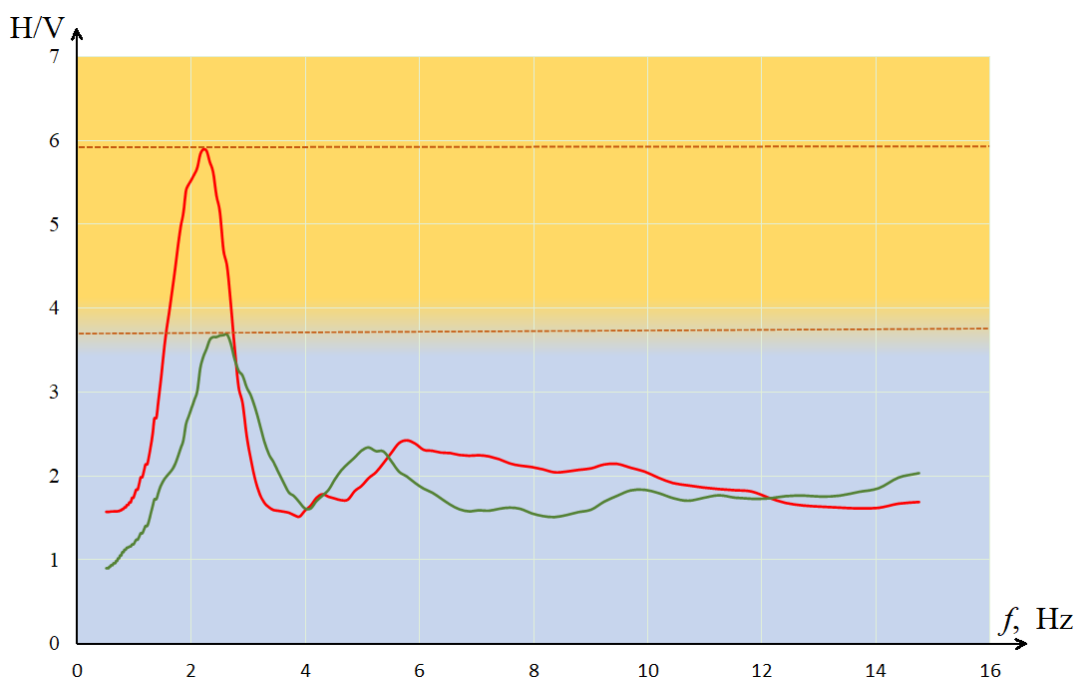
II blok bo'yicha natijalar. II blokda asosiy rezonans cho'qqisi $f_0 \approx 1,9-2,1$ Hz diapazonda aniqlanib, maksimal amplituda $A_0 \approx 6,2$ ni tashkil etdi. Bu qiymatlar II blokka nisbatan biroz past, ammo barqaror hududga nisbatan yuqori hisoblanadi. 3-6 Hz oralig'ida qo'shimcha nisbiy ko'tarilishlar kuzatiladi ($A \approx 2,2-2,6$), bu esa grunt qatlamlarining ko'p qatlamli tuzilishga ega ekanligini va ikkilamchi rezonans effektlari mavjudligini ko'rsatadi (6-rasm).



6-rasm. II blok hududida H/V spektral nisbatining barqaror hudud bilan solishtirma tahlili.

II blokda amplituda ko'rsatkichlarining I blokdan pastligi grunt muhitining nisbatan zichroq ekanligini anglatishi mumkin. Shunga qaramay, past chastota diapazonidagi kuchayish ko'chki massasining dinamik sezgirligini tasdiqlaydi.

III blok bo'yicha natijalar. III blokda asosiy rezonans chastotasi $f_0 \approx 2,1-2,3$ Hz diapazonda kuzatilib, maksimal amplituda $A_0 \approx 5,8-6,0$ ni tashkil etdi. Bu qiymat I va II bloklarga nisbatan pastroq bo'lib, dinamik kuchayish darajasining kamayganligini bildiradi (7-rasm).



7-rasm. III blok hududida H/V spektral nisbatining barqaror hudud bilan solishtirma tahlili.

4-12 Hz diapazonda H/V qiymatlari 1,6-2,0 oralig'ida saqlanib, spektral egri chiziq nisbatan silliq shaklga ega. Bu grunt qatlamining mexanik xossalari barqarorroq va qatlamlararo kontrast kamroq ekanligini ko'rsatadi. III blok ko'chki hududida nisbatan barqarorroq zona sifatida baholanishi mumkin, biroq past chastota diapazonidagi sezilarli cho'qqi hali ham dinamik zaiflik mavjudligini ko'rsatadi.

Bloklararo solishtirma tahlil. Bloklararo taqqoslash natijasida quyidagi munosabatlar aniqlandi:

- Rezonans chastotasi oshgan sari maksimal H/V amplituda kamayadi;
- Eng yuqori dinamik kuchayish I blokda kuzatilgan;
- II blok oraliq holatni egallaydi;
- III blok nisbatan barqarorroq spektral xususiyatga ega;
- Barcha bloklarda asosiy rezonans past chastota (≈ 2 Hz) diapazonda shakllangan.

Mazkur natijalar ko'chki massasi ichida energiya taqsimoti notekis ekanligini va ayrim zonalarda seysmik tebranishlarning kuchayishini ko'rsatadi. Past chastota diapazonida kuzatilgan yuqori amplitudalar ko'chki massasining qalin bo'shoq qatlamlardan tashkil topganligini anglatadi. Bu esa ko'chki hududida deformatsiya va qayta faollashish xavfi yuqori bo'lgan zonalarini aniqlash imkonini beradi.

Seysmik zaiflik indeksi (K_g) tahlili. Seysmik zaiflik indeksi (K_g) surilma hududida 10 dan 64 gacha bo'lgan keng diapazonda o'zgaradi. Eng yuqori qiymatlar I-blokning sharqiy chekkasida (nuqtalar 7-10 oralig'ida) kuzatilib, bu yerda K_g 35-64 oralig'iga yetadi. II-blokda K_g asosan 22-31 diapazonda, III-blokda esa 10-19 oralig'ida qayd etilgan. Tashqi barqaror zonada K_g qiymatlari 3,49-6,83 oralig'ida bo'lib, ko'chki ichidagi qiymatlardan bir necha baravar past. Maksimal K_g zonalar surilmaning I-blogida joylashgan bo'lib, bu hudud dinamik jihatdan eng zaif va energiya kuchayishi yuqori bo'lgan zona sifatida ajralib chiqadi. II-blok o'rtacha faollikni, III-blok esa nisbatan barqarorroq dinamik holatni namoyon etadi.

XULOSA

Yuqori-Turk ko'chkisi hududida olib borilgan mikroseysmik tadqiqotlar surilma massasining ichki dinamik tuzilmasini baholashda HVSR usulining yuqori informativlikka ega ekanligini tasdiqladi. Olingan natijalar ko'chki massivi ichida dinamik xususiyatlarning fazoviy jihatdan notekis taqsimlanganini, bloklar o'rtasida elastik parametrlar kontrasti mavjudligini va ayrim zonlarda seysmik energiyaning selektiv kuchayishi kuzatilishini ko'rsatdi. Spektral nisbat tahlili surilmaning ichki tuzilmasini aniqlash, rezonans xususiyatlarini belgilash hamda dinamik zaif zonalarini ajratishda samarali va iqtisodiy jihatdan maqbul usul hisoblanadi. Ushbu yondashuv an'anaviy muhandis-geologik va geodezik kuzatuvlarni to'ldiruvchi, ularning natijalarini chuqurlashtiruvchi vosita sifatida namoyon bo'ladi. Ko'chki hududida aniqlangan rezonans xususiyatlari qatlamlararo elastik nomutanosiblik va suv bilan to'yinuvchi bo'shoq gruntlarning mavjudligi bilan bevosita bog'liq bo'lib, bu omillar dinamik deformatsiyalanish jarayonlarining rivojlanishiga sharoit yaratadi. Mikroseysmik monitoringning asosiy afzalligi uning dala sharoitida tezkor, iqtisodiy samarali va invaziv bo'lmagan usul ekanligidir. Mazkur yondashuv ko'chki jarayonlarini erta bosqichda aniqlash, dinamik holatning vaqt bo'yicha o'zgarishini kuzatish hamda geodinamik barqarorlikni baholashda keng qo'llanishi mumkin. Yuqori-Turk ko'chkisi misolida olingan natijalar HVSR metodining murakkab geologik tuzilishga ega surilma hududlarida dinamik

faollikni baholashda ishonchli va ilmiy asoslangan vosita ekanligini ko'rsatadi. Ushbu yondashuv kelgusida ko'chki xavfini prognozlash, hududiy rejalashtirish hamda gidrotexnik inshootlar xavfsizligini ta'minlash jarayonlarida amaliy ahamiyat kasb etadi.

Ushbu maqola O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Seysmologiya instituti tomonidan amalga oshirilayotgan fundamental «Seysmik faol hududlarda turli darajadagi seysmik xatarni baholash va zilzila talafotlarini kamaytirishning ilmiy asoslarini ishlab chiqish», shuningdek, Innovatsion rivojlanish agentligi tomonidan moliyalashtirilgan amaliy loyihasi № **AL-8924073457**, «Kuchli zilzilalarda epitsentral zonalarda bino-inshootlarni shikastlanishini makroseysmik ma'lumotlar bazasi platformasini ishlab chiqish» loyihalari doirasida tayyorlandi.

ADABIYOTLAR

1. *Alonso-Pandavenes O., Bernal D., Torrijo F.J., Garzón-Roca J.* A Comparative Analysis for Defining the Sliding Surface and Internal Structure in an Active Landslide Using the HVSr Passive Geophysical Technique in Pujilí (Cotopaxi), Ecuador. *Land* 2023. - 12. - 961. <https://doi.org/10.3390/land12050961>
2. *Nakamura Y.* A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // *Q. Rep. Railw. Tech. Res.* - 1989. - 30. - 25-33.
3. *Konno K.; Ohmachi T.* Ground-Motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor // *Bull. Seismol. Soc. Am.* - 1998. - 88. - 228-241.
4. *SESAME Project.* Guidelines for the Implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation // *European Commission: Brussels, Belgium*, 2004. - 62 p.
5. *Wathelet M., Chatelain J.-L., Cornou C., Di Giulio G., Guillier B., Ohrnberger M., Savvaidis A.* Geopsy: a user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing // *Seismol. Res. Lett.* - 2020. - 91. - 1878-1889.
6. *Albarelo D., Lunedei E.* Alternative interpretations of horizontal to vertical spectral ratios of ambient vibrations: new insights from theoretical modeling // *Bull. Earthq. Eng.* - 2010. - 8. - 519-534.
7. *Del Gaudio V., Wasowski J., Muscillo S.* New developments in ambient noise analysis to characterise the seismic response of landslide-prone slopes // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* - 2013. - 13. - 2075-2087.
8. *Burjánek J., Gassner-Stamm G., Poggi V., Moore J.R., Fäh D.* Ambient vibration analysis of an unstable mountain slope // *Geophys. J. Int.* - 2010. - 180. - 820-828.
9. *Hussain Y., Martínez-Carvajal H., Condori C., Uagoda R., Cárdenas-Soto M., Cavalcante A.L.B., Da Cunha L.S., Martino S.* Ambient Seismic Noise: A Continuous Source for the Dynamic Monitoring of Landslides. *Terrae Didat.* - 2019. - 15, e019012.
10. *Jongmans D., Garambois S.* Geophysical Investigation of Landslides: A Review // *Bull. Société Géologique Fr.* - 2007. - 178. - 101-112.
11. *McCann D.M., Forster A.* Reconnaissance geophysical methods in landslide investigations // *Eng. Geol.* - 1990. - 29. - 59-78.
12. *Alonso-Pandavenes O., Torrijo F.J., Garzón-Roca J., Gracia A.* Early investigation of a landslide sliding surface by HVSr and VES geophysical techniques combined. A case study in guarumales (ecuador) // *Appl. Sci.* - 2023. - 13. - 1023.
13. *Ibragimov A.* Use HVSr Method at studying structure of landslides // *Geophys. Res. Abstr.* - 2010. - 12. - 6191.
14. *Ismailov V., Khusomiddinov S., Khusomiddinov A., Yodgorov S., Aktamov B., Avazov S.* Seismic risk assessment of Jizzakh region. *ICPPMS-2021, AIP Conference Proceedings 2432*, edited by J. Razzokov (AIP Publishing, Tashkent, 2022). - P. 030035-1 – 7.
15. *Ismailov V.A., Yodgorov Sh.I., Khusomiddinov A.S., Yadigarov E.M., Botirovich A.S., Aktamov B.U.* Geomechanics and Geoengineering. - 2023. - 18. - 1-21.
16. *Ismailov V.A., Yadigarov Sh.I., Khusomiddinov A.S., Yadigarov E.M., Aktamov B.U., Avazov Sh.B.* Problems of Engineering Seismology. - 2023. - 4. - 5-24.
17. *Ismailov V., Aktamov B., Allayev Sh.* Journal of Civil Protection. - 2020. - 3. - 305-313.
18. *Ismailov V.A., Yodgorov Sh.I., Khusomiddinov A.S., Yadigarov E.M., Aktamov B.U., Avazov Sh.B.* Nat. Hazards Earth Syst. Sci. - 2024. - 24. - 2133-2146.
19. *Ismailov V.A., Khusomiddinov A.S., Yodgorov Sh.I., Yadigarov E.M., Aktamov B.U.* NAS RK SGTs. - 2024. - 464. - 114-130.
20. *Yodgorov S., Aktamov B., Avazov S., Teshayeva R.* Seismic risk assessment for Ferghana region.

Presented on 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE FOR PHYSICS AND ADVANCE COMPUTATION SCIENCES: ICPAS2024, Baghdad, Iraq, 2025, с. 040013. doi: 10.1063/5.0265049.

21. *Ismailov V., Ibragimov R., Yodgorov S., Nurmatov U., Aktamov B.* Assessment of seismic hazard of the territory of Tashkent city as a basis for the development of simulation modeling of the consequences of strong earthquakes. Presented on 6TH INTERNATIONAL

CONFERENCE FOR PHYSICS AND ADVANCE COMPUTATION SCIENCES: ICPAS2024, Baghdad, Iraq, 2025, с. 040002. doi: 10.1063/5.0265039.

22. *Aktamov B., Yodgorov S., Avazov S.* Seismic risk assessment of residential buildings in the city of Jizzakh in terms of economic indicators. Presented on 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE FOR PHYSICS AND ADVANCE COMPUTATION SCIENCES: ICPAS2024, Baghdad, Iraq, 2025, с. 040011. doi: 10.1063/5.0265044.

Оценка динамической активности оползней на территории Ахангаранского водохранилища на основе микросейсмических исследований

**Ш.И. Ёдгоров, Н.М. Мухаммадкулов, Б.Б. Хайриддинов, Б.У. Актамов, Ш.Б. Авазов,
А.К. Кадырбаев, Ш.З. Абдушукуров**

Аннотация. На основе микросейсмических наблюдений дана комплексная оценка динамической активности оползневых масс в районе Верхне-Тюркского оползня. В результате проведенного спектрального анализа выявлено выраженное проявление резонансных свойств внутри оползня, селективное усиление энергии колебаний в низкочастотном диапазоне, а также значительные различия динамических показателей в разрезе блоков. Отмечено, что наличие контраста упругих параметров и межпластового дисбаланса внутри оползневого массива является причиной формирования динамически слабых зон. Полученные результаты свидетельствуют о неравномерности распределения энергии в оползневом поле и подтверждают относительно высокую динамическую активность в отдельных блоках. Исследования имеют важное научно-практическое значение для определения динамического состояния в районах оползней, выделения слабых участков и оценки геодинамической устойчивости.

Ключевые слова: Верхне-Тюркский оползень, сейсмометрические исследования, метод HVSR, резонансная частота (f_0), H/V, индекс уязвимости (Kg), оползневые блоки, динамическая активность.

Assessment of the dynamic activity of landscapes on the territory of the Akhangaran reservoir based on microseismic research

**Sh.I. Yodgorov, N.M. Muhammadkulov, B.B. Khairiddinov, B.U. Aktamov, Sh.B. Avazov,
A.K. Kadyrbaev, Sh.Z. Abdushukurov**

Abstract. In this article, a comprehensive assessment of the dynamic activity of the landslide mass in the territory of the Upper Turkic landslide was carried out based on microseismic observations. As a result of the conducted spectral analysis, a pronounced manifestation of resonant properties inside the avalanche, selective amplification of vibration energy in the low-frequency range, and a significant difference in dynamic parameters in the section of the blocks were revealed. It was noted that the presence of elastic parameter contrast and interlayer imbalance within the landslide mass leads to the formation of dynamically weak zones. The obtained results indicate uneven energy distribution in the landslide area, confirming the relatively high dynamic activity in some blocks. The research has important scientific and practical significance in determining the dynamic state of landslide areas, identifying weak sections, and assessing geodynamic stability.

Key words: Upper-Turkish landslide, seismometric studies, HVSR method, resonant frequency (f_0), H/V, weakness index (Kg), landslide blocks, dynamic activity.

УДК 699.841

ТОШКЕНТ ШАҲРИ ТУРАР-ЖОЙ ФОНДИНИНГ СИМУЛЯЦИОН МОДЕЛЛАР АСОСИДА ЭҲТИМОЛИЙ СЦЕНАРЛИ ЗИЛЗИЛАЛАР ИҚТИСОДИЙ ТАЛАФОТЛАРИНИ ТАҲЛИЛИ

Ш.И. Ёдгоров

Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси F.O.Мавлонов номидаги Сейсмология институти
sh.i.yodgorov@gmail.com

Аннотация. Ушбу мақолада Тошкент шаҳри ҳудудида турли катталиқдаги эҳтимолий сценарли зилзилалар параметрлари асосида замонавий рақамли симуляция ёндашуви орқали шаҳар ҳудудидаги турар-жой биноларига етган эҳтимолий зарарлар баҳоланди. Тадқиқотда сейсмик таъсирнинг тарқалиши, грунт шароити, бино турлари, иқтисодий қийматлари ва уларнинг конструктив хусусиятлари инобатга олинган ҳолда сценарийли баҳолашлар амалга оширилди. Тадқиқот натижаларига кўра, зилзиланинг талафотлари асосан қурилиш фондининг сейсмик заифлиги паст типларига мансуб, маҳаллий материаллардан қурилган, муҳандислик ечимлари етарлича таъминланмаган ва сейсмик меъёрлар тўлиқ қўлланилмаган турар-жой бинолари ҳисобланади.

Мақолада турар-жой биноларининг шикастланиш даражалари, эҳтимолий иқтисодий талафотлар ҳамда аҳоли учун хавф даражаси баҳоланиб, олинган натижалар 1966 йилдаги тарихий маълумотлар билан солиштирилди. Тадқиқот натижалари шаҳар ҳудудларида кучли зилзилалар оқибатларини прогноз қилиш ва сейсмик рискни камайтириш чора-тадбирларини ишлаб чиқишда муҳим илмий-амалий аҳамиятга эга.

Калит сўзлар: Тошкент зилзиласи, турар-жой фонди, конструкция, шикастланиш даражалари, иқтисодий талафот, сейсмик риск.

Кириш. Зилзилалар инсоният учун энг вайронкор табиий офатлардан бири бўлиб, уларнинг оқибатлари кўплаб қурбонлар ва улкан иқтисодий йўқотишлар билан ифодаланади. Масалан, 20-асрда 1 602 776 киши қурбон бўлган бўлса, 21-асрда 800 дан ортиқ кучли зилзилаларда 896 500 киши қурбон бўлган, 1 300 701 киши жарахотланган, 9 147 617 та бино-иншоотлар вайрон бўлган, 630,1 млрд. АҚШ доллари миқдорида иқтисодий талафот келтирган. 2010 йилдаги Гаити зилзиласида 316 мингдан ортиқ, 2023 йилги Қахрамонмараш (Туркия) зилзиласида 57 мингга яқин инсон ҳалок бўлган. Иқтисодий зарарлар ҳам жуда катта бўлиб, 2011 йил Япониядаги Тохоку зилзиласи ва цунамиси умумий ҳисобда 150 миллиард АҚШ долларида ортиқ зарар келтирган. Республикамиз ҳудудида тарихий талафотли зилзилалар бўлган, жумладан, 838 йилда Фарғона зилзиласида 14 000 киши, 1966 йилги Тошкент зилзиласида 10 киши қурбон бўлган (300 млн. АҚШ доллари миқдорида иқтисодий талафот) каби зилзилалар бунга мисол бўла олади. Шунингдек, ФВВ маълумотларида мамлакатимизда сўнгги 15 йил ичида 6 марта 6-8 балли кучли зилзилалар содир бўлган ва уларда жами 16 киши вафот этган ҳамда 54 киши турли жароҳатлар билан касалхонага ётқизилган. Жумладан, Кон зилзиласи – 2011-йил (8 балл), Туябўғиз зилзиласи – 2013-йил (7 балл), Маржонбулоқ зилзиласи – 2013-йил (8 балл), Китоб ва Бахмал зилзилалари – 2016-2017-йиллар (7 балл) ҳамда Бойсун зилзилалари – 2022-йил (6 балл) шулар жумласидандир. Зилзилалардан қўрилган иқтисодий зарар миқдори 84 млрд. сўмни ташкил қилган. Шу каби рақамлар зилзилаларнинг нафақат инсон ҳаёти, балки иқтисодий барқарорликка ҳам жиддий таҳдид солишини кўрсатиб, уларнинг оқибатларини олдиндан баҳолаш ва камайтириш бўйича илмий тадқиқотларнинг ўта муҳимлигини асослайди.

Ҳозирги кунда шаҳар ҳудудларида аҳоли зичлигининг ортиши, қурилишлар ҳажмининг жадал ўсиши ва сейсмик хавфли зоналарда жойлашган инфратузилманинг мураккаблашуви кучли зилзилалар оқибатларини олдиндан аниқ ва ишончли баҳолашни талаб этмоқда. Анъанавий ҳисоблаш усуллари реал шароитдаги кўп омилли таъсирларни тўлиқ инобатга ололмаслиги сабабли, биноларнинг шикастланиш даражаси, аҳоли йўқотишлари ва иқтисодий зарарларни комплекс баҳоловчи симуляцион моделларни ишлаб чиқиш ва қўллаш долзарб масалага айланди.

Шунинг учун мазкур тадқиқот шаҳарларда сейсмик рискни аниқ прогноз қилиш, ғавқулдда вазиятларга тайёргарликни кучайтириш ва эҳтимолий талафотларни камайитиришга қаратилган илмий асосланган ёндашувларни шакллантириш заруратини белгилайди.

Тошкент шаҳри ҳудудида эҳтимолий сценарли зилзилалар. Тошкент шаҳри ва унга туташ ҳудудларнинг сейсмик хавфини илмий асосда баҳолаш, аввало, ушбу ҳудуднинг сейсмотектоник шароитини аниқлашни талаб қилади. Чунки ер қобиғининг чуқур ва юзага яқин тузилмавий хусусиятлари, фаол ёриқлар тизими, неотектоник ҳаракатлар ҳамда сейсмоген зоналарнинг маконда жойлашуви шаҳар ҳудудидаги эҳтимолий сейсмик таъсир даражасини шакллантирувчи асосий омиллар ҳисобланади. Тошкент шаҳри жойлашган ҳудуд тектоник жиҳатдан мураккаб тузилган бўлиб, у Турон плитаси чекка қисми билан Чотқол-Қурама тоғли ўлкаси туташган зонада жойлашган. Мазкур ҳолат ҳудудда блокли-бурмали тузилмалар, чуқур узилмалар, флексуралли ўтишлар ва сейсмик жиҳатдан фаол зоналарнинг бир вақтнинг ўзида ривожланишига сабаб бўлган [1-4].

Тошкент шаҳри ва унга туташ ҳудудлар мураккаб сейсмотектоник шароитга эга бўлиб, бу шароит палеозой структуравий асосининг меросий тузилиши, неотектоник ва замонавий ҳаракатлар, фаол ёриқлар тизими ҳамда сейсмоген зоналарнинг ўзаро боғлиқлиги билан тавсифланади. Минтақада Каржантау ер ёриғи, Тошкентолди флексура-узилмали зонаси ва улар билан боғлиқ маҳаллий ёриқлар сейсмик хавфни шакллантирувчи асосий тузилмалар ҳисобланади. Ёриқларнинг кесишув тугунлари эса кучли зилзилалар шаклланиши эҳтимоли юқори бўлган участкалар сифатида қаралади. Шу муносабат билан, Тошкент шаҳри учун сейсмик хавфни баҳолаш ва ҳудудий сейсмик барқарорликни таъминлаш ишларида сейсмотектоник омилларни инобатга олиш мажбурий илмий шарт ҳисобланади [5-9].

Тошкент шаҳри ҳудудининг муҳандислик-геологик шароитлари сейсмик тўлқинлар тарқалиши ва трансформацияси хусусиятини белгилайдиган, шунингдек, сейсмик таъсирнинг фазовий нотекислигини шакллантирадиган асосий табиий омил сифатида тизимлаштирилган ва таҳлил қилинган. Шаҳарнинг замонавий геоморфологик тузилиши энг янги тектоник ҳаракатлар ҳамда узоқ давом этган эрозия ва аккумуляция жараёнларининг биргаликдаги таъсирига боғлиқ экани, бу эса морфометрик кўрсаткичлари ва рельефининг парчаланганлик даражаси билан фарқланадиган турли ёшдаги юзаларнинг шаклланишига олиб келган [10-13].

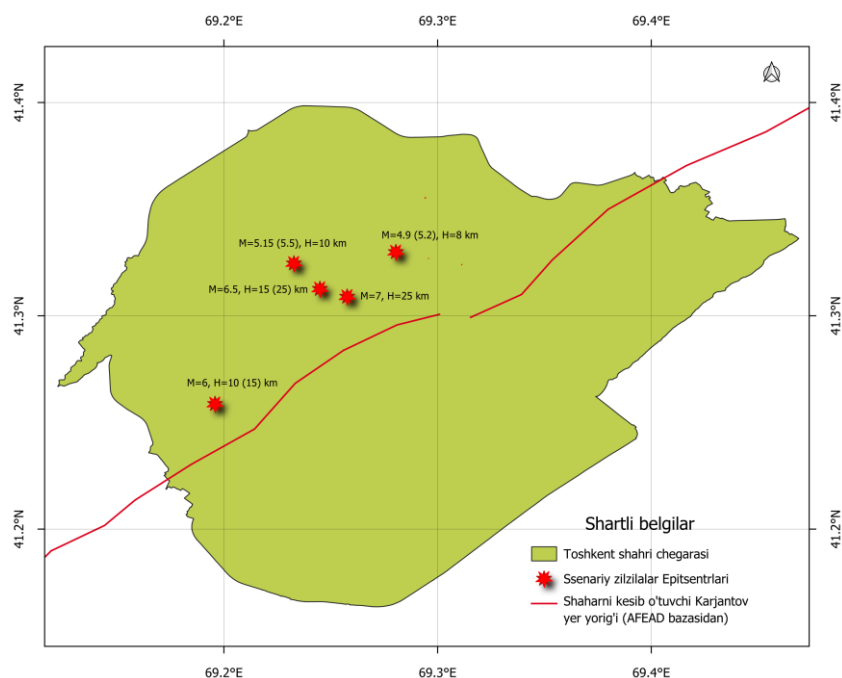
Зилзила вақтида ер юзасида кузатиладиган сейсмик таъсир даражаси нафақат зилзиланинг магнитудаси ва эпицентргача бўлган масофага, балки маҳаллий геологик ва грунт шароитларига ҳам боғлиқ. Маҳаллий грунт қатламларининг физик-механик хусусиятлари сейсмик тўлқинларнинг амплитудаси ва спектрал таркибига сезиларли таъсир кўрсатади.

Қаттиқ тоғ жинсларидан ташкил топган ҳудудларда сейсмик тебранишлар нисбатан кам амплитуда билан намоён бўлади. Аксинча, бўшоқ ва зичланмаган аллювиал ётқиқлардан иборат грунтларда сейсмик тўлқинлар кучайиши мумкин.

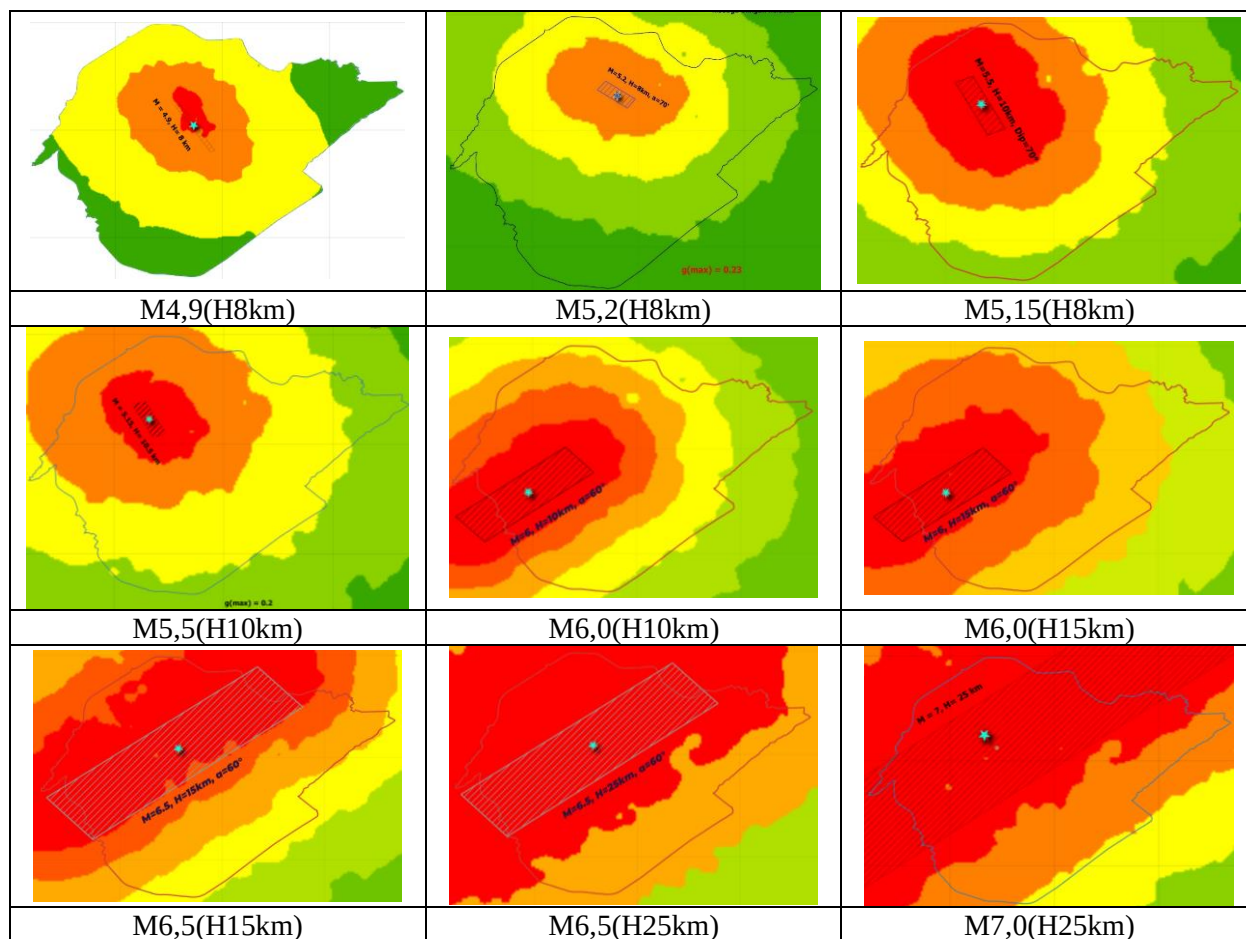
Грунт шароитини баҳолашда муҳим параметрлардан бири V_{s30} ҳисобланади. Бу параметр ер юзасидан 30 м чуқурликкача бўлган қатламлардаги кесилиш тўлқинлари тезлигининг ўртача қийматини ифодалайди. Тошкент шаҳри ҳудудида 722 та нуктада олиб борилган муҳандис-сейсмологик тадқиқотлар асосида ҳудудда 30 м чуқурликкача бўлган грунт кесимлари таҳлили асосида V_{s30} қийматлари ҳамда муҳандис-геологик маълумотлар асосида ҳудуднинг муҳандис-сейсмологик модели шакллантирилди [12].

Тошкент шаҳри ҳудудида эҳтимолий сценарли зилзилалар учун 5 та сейсмик ўчоқ илмий асосланди. Ва 9 та турли катталиқдаги $M_{4,9}$ (H8 km); $M_{5,2}$ (H8 km); $M_{5,15}$ (H8 km); $M_{5,5}$ (H10 km); $M_{6,0}$ (H10 km); $M_{6,0}$ (H15 km); $M_{6,5}$ (H15 km); $M_{6,5}$ (H25 km) ва $M_{7,0}$ (H25 km) эҳтимолий сценарли зилзилаларнинг рақамли симуляцион моделлаштирилди (1 ва 2 расмлар) [14].

Тошкент шаҳрининг турар-жой фонди. Тошкент шаҳридаги мавжуд турар-жой фонди ўзининг узоқ йиллик тарихий ривожланиш босқичларига эга бўлиб, у турли даврлардаги шаҳарсозлик сиёсатлари, қурилиш технологиялари ва архитектуравий ечимлар таъсирида шаклланган. Бу жараёнда биноларнинг конструктив хусусиятлари, материаллар таркиби ҳамда сейсмик бардошлик даражаси вақт ўтиши билан сезиларли даражада ўзгариб, бугунги кундаги турар-жой фондининг мураккаб ва типологик тузилишини юзага келтирган (жадвал).



1-расм. Тошкент шаҳри ҳудудида эҳтимолий сценарли zilzilalar эпизентрлари харитаси.
Figure 1. Map of potential scenario earthquake epicenters in Tashkent city.



2-расм. Тошкент шаҳри ҳудудида эҳтимолий сценарли zilzilalarнинг макросейсмик тарқалиши.
Figure 2. Macroseismic distribution of probable earthquake scenarios in Tashkent.

Турар-жой бинолари типологияси
Residential Building Typology

№ тип	Турар-жой бинолари типологияси	Норма	Қурилиш даври
TB1 ADO	Маҳаллий материаллардан (хом ғишт, гувала, пахса) якка тартибда, лойиҳа-смета ҳужжатларисиз қурилган 1-2 қаватли бинолар	-	1948 йилгача
TB2 URM1	Маҳаллий материаллардан (хом ғишдан) якка тартибда лойиҳа-смета ҳужжатларисиз қурилган 1-2 қаватли бинолар	СН-8-57	1948-1966
TB3 URM2	Қурилишда маҳаллий материаллардан (пишиқ ғишт) сейсмик меъёрлар асосида қурилган 1-2 қаватли бинолар	СНиП II-А.12-69	1966-2001
TB4 RM-L	Маҳаллий материаллардан (пишиқ ғишдан) сейсмик меъёрларга риоя қилган ҳолда қурилган 1-2 қаватли бинолар	ҚМҚ 2.01.03-96	2001 йилдан кейин
TB5 URM3	2-3 қаватли, ғишдан қурилган, кўп секцияли биноларда сейсмик мустаҳкамлаш чоралари қўрилмаган	СН-8-57	1940 йилдан кейин
TB6 URM4	3-5 қаватли, ғишдан қурилган, кўп секцияли бинолар сейсмик жиҳатдан мустаҳкамланмаган.		1966 йилгача
TB7 RM-H	4-5 қаватли зилзилабардошлик меъёрларига риоя қилинган ҳолда ғишдан қурилган кўп секцияли бино	СНиП II-А.12-69	1966 йилдан кейин
TB8 RCPC1	Зилзилабардошлик меъёрлари асосида қурилган 4-5 қаватли, йирик панелли, кўп секцияли бинолар	СНиП II-А.12-62	1956 йилдан кейин
TB9 RCPC2	Сейсмик меъёрлар асосида лойиҳалаштирилган 9 қаватли йирик панелли бинолар	СНиП II-А.12-81	1980 йилдан кейин
TB10 RCPC3	Сейсмик меъёрларга риоя этилган ҳолда қурилган 9-12 қаватли каркас-панелли бинолар		1980 йилдан кейин
TB11 RC1	Сейсмик меъёрлари асосида қурилган 16 қаватли монолит бинолар		1990 йилдан кейин
TB12 RCPC4	Сейсмик меъёрларга мувофиқ лойиҳалаштирилган блокли бинолар		1990 йилдан кейин
TB13 RC2	Сейсмик меъёрларига мос равишда қурилган 14 қаватли, монолит темир-бетон деворли бинолар	ҚМҚ 2.01.03-96	2001 йилдан кейин
TB14 RC3	Сейсмик меъёрларга мос равишда қурилган 14 қаватли каркасли бинолар		2001 йилдан кейин
TB15 RC4	Сейсмик меъёрлар асосида қурилган 16 қаватли монолит темир-бетон деворли бинолар		2001 йилдан кейин
TB16 RC5	Сейсмик меъёрлари асосида қурилган 16 қаватли каркасли бинолар		2001 йилдан кейин
TB17 RC6	Сейсмик меъёрларга риоя қилинган ҳолда қурилган 17 қаватли каркасли бинолар		2001 йилдан кейин
TB18 RC7	Сейсмик меъёрлари асосида қурилган 20 қаватли монолит-темирбетон уйлар		2001 йилдан кейин

Эҳтимолий талафотларни баҳолаш жараёнида турар-жой фонди типологиясининг ўрни ниҳоятда муҳим ҳисобланади, чунки биноларнинг конструктив ечими, қаватлилиги, қурилиш материаллари ва барпо этилган даври уларнинг сейсмик таъсирга чидамлилиқ даражасини белгилаб беради. Шу боис, турар-жой биноларини аниқ типологик гуруҳларга ажратиш орқали эҳтимолий шикастланиш даражасини аниқроқ баҳолаш, талафотларни ишончли прогноз қилиш ҳамда сейсмик рискни самарали бошқариш имконияти яратилади [15, 16].

Сейсмик фаол ҳудудларда жойлашган шаҳарлар учун зилзила хавфини баҳолашда биноларнинг сейсмик заифлигини аниқлаш муҳим аҳамиятга эга. Бино ва иншоотларнинг сейсмик заифлигини баҳолаш жараёнида уларнинг конструктив схемаси, қаватлар сони, қурилиш материаллари ва қурилган даври каби омиллар ҳисобга олинади.

Тадқиқот доирасида биноларнинг сейсмик заифлигини баҳолаш учун аналитик моделлаштириш усули қўлланилди. Ҳисоб-китоблар LIRA-SAPR дастурий мажмуаси ёрдамида бажарилди. Бинонинг ҳисоблаш модели чекли элементлар усули асосида тузилди. Асосий номаълумлар сифатида тугун нуқталарининг уч ўқ бўйича силжишлари ва бурчакли айланишлари қабул қилинди ва максимал горизонтал силжишлар, қаватлараро дрифт ва конструкциянинг умумий деформация шакллари аниқланди (3-6 расмлар).



ADO



URM1



URM2



RM-L



URM3



URM4



RM-H



RCPC1



RCPC2



RC1



RCPC3



RC2, RC3



RC4



RC5



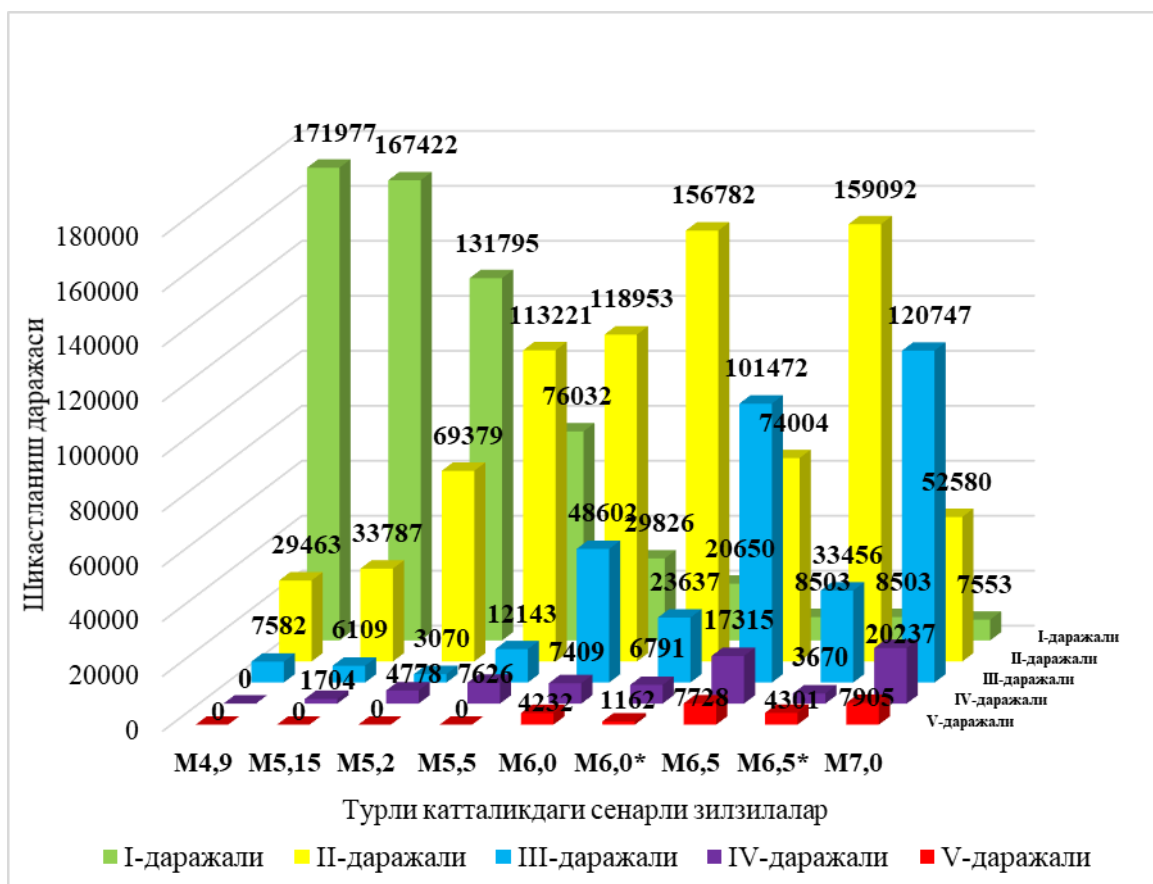
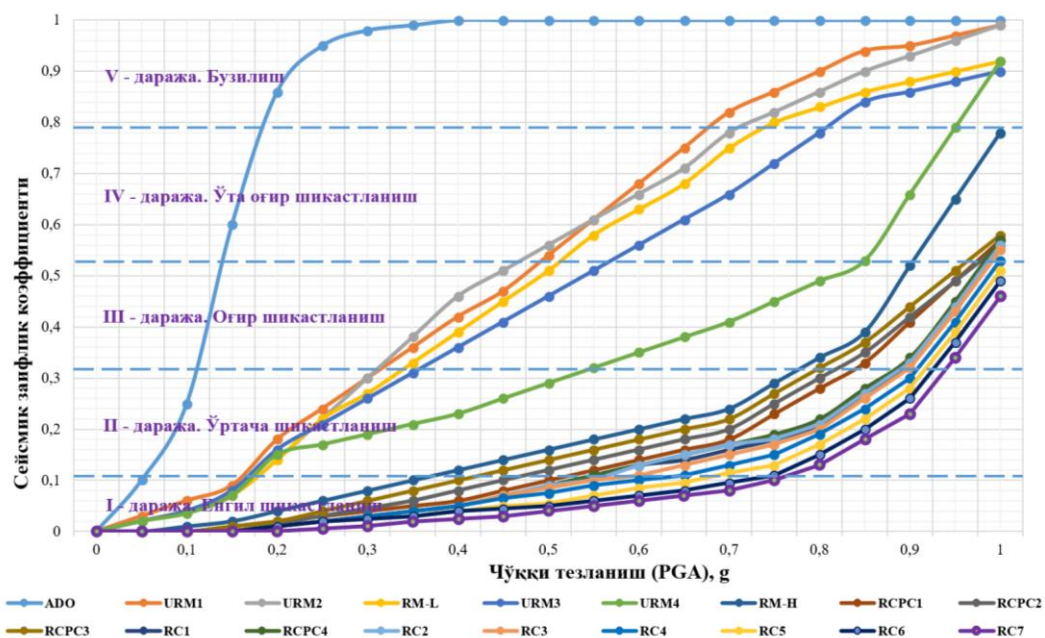
RC6

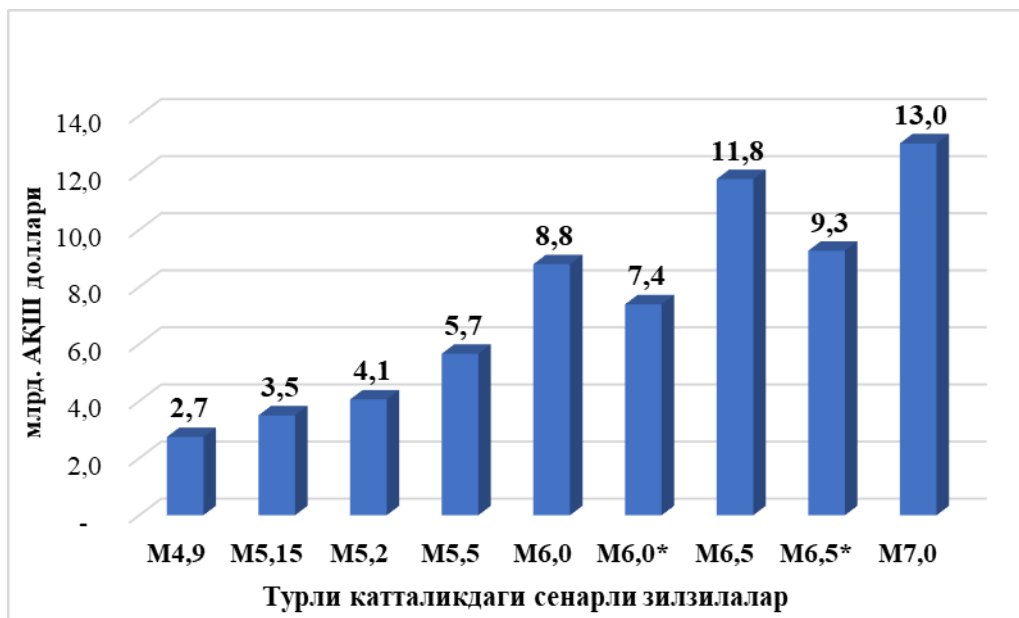


RC7

3-расм. Турар-жой бинолари типологик кўриниши.
Figure 3. Typological view of residential buildings.

Био ва иншоотларнинг шикастланиш даражаси макросейсмик шкалалар ва УМС-25 талаблари асосида баҳоланди. Шикастланиш даражалари 0 дан 5 гача бўлган шкала бўйича таснифланади: d0 – шикастланиш йўқ; d1 – енгил; d2 – ўртача; d3 – оғир; d4 – ўта оғир шикастланиш ва d5 – бузилиш. Ушбу тасниф биноларнинг техник ҳолатини баҳолаш ва эҳтимолий талафотларни прогноз қилиш имконини беради [17].





6-расм. Тошкент шаҳридаги турар-жой биноларининг бозор баҳоси бўйича иқтисодий таҳлили, млрд. АҚШ долларида.

Figure 6. Economic Analysis of the Market Value of Residential Buildings in Tashkent (in billions of US dollars).

Муҳокама. Олиб борилган сценарийли баҳолашлар Тошкент шаҳри турар-жой фондининг сейсмик таъсирга жавоби бир хил эмаслигини, балки ҳудуднинг муҳандислик-геологик шароити, қурилиш даври, конструктив ечими ва бино типологиясига кучли даражада боғлиқ эканини кўрсатди. Тадқиқотда 9 та турли магнитудали ва чуқурликдаги сценарийли зилзилалар учун бажарилган рақамли симуляциялар натижаларига кўра, шикастланиш даражалари ва иқтисодий талафотлар зилзиланинг фақат энергетик параметрлари билан эмас, балки маҳаллий грунт шароити ва қурилиш фондининг сейсмик заифлиги паст типлари билан ҳам белгиланади. Шу маънода, олинган натижалар шаҳар микёсида сейсмик рискнинг фазовий ва типологик фарқланишини аниқ очиб берди.

Ҳисоблашлардан кўриниб турибдики, нисбатан кичик магнитудали сценарийларда асосан енгил ва ўртача даражаларда шикастланиш кузатилади, аммо магнитуда ва интенсивлик ортиши билан II-III даражали шикастланишлар кескин ўсади, юқори сценарийларда эса IV-V даражали оғир шикастланишлар ҳам намоён бўлади. Бу ҳолат турар-жой фондида критик чегарадан кейин кескин ўсиш мавжудлигини кўрсатади, яъни маълум бир интенсивликдан кейин бино фондининг катта қисмида зарар тўпланиши жадаллашади. Масалан, келтирилган ҳисобий қаторларда M4,9 сценарийсида I-даражали шикастланиш устун бўлса, M6,0-M7,0 оралиғида II-III даражали шикастланишлар сони кескин ортиб, оғир шикастланиш ва бузилиш ҳолатлари ҳам кузатилади. Бу эса сейсмик рискни баҳолашда фақат максимал интенсивликни эмас, балки биноларнинг заифлик функцияларидаги нолиней ўтиш нуқталарини ҳам ҳисобга олиш зарурлигини англатади.

Натижаларнинг муҳим жиҳати шундаки, энг катта йўқотишлар янги ва баланд қаватли биноларда эмас, балки эски қурилиш фондига мансуб, маҳаллий материаллардан барпо этилган, муҳандислик лойиҳасисиз ёки сейсмик талаблар тўлиқ таъминланмаган биноларда шаклланиши кузатилди. Мақолада ажратилган ТВ1-ТВ6 каби типлар функционал жиҳатдан турар-жой фондининг энг заиф сегментини ташкил этади. Бу мантиқий: маҳаллий материалли, паст қаватли, аммо конструктив боғланишлари заиф биноларда пластик қайта тақсимланиш имкони чекланган, деворлар мўрт характерда ишлайди ва сейсмик таъсир пайтида шикастланиш тез йиғилади. Демак, Тошкент шаҳри учун асосий риск манбаи умумий қурилиш ҳажми эмас, балки сейсмик заиф типологияли биноларнинг катта улушидир.

Шу билан бирга, иктисодий талафотлар магнитуда бўйича тўғри чизикли тарзда ўсмайди, бу жуда муҳим нукта. Тадқиқот натижаларида иктисодий йўқотишлар М_{4,9} сценарийси учун 2,7 млрд. АҚШ доллари атрофида бўлса, М_{5,5} да 5,7 млрд., М_{6,0}(Н₁₀ km) да 8,80 млрд., М_{6,5}(Н₁₅ km) да 11,8 млрд. ва М_{7,0}(Н₂₅ km) да 13,0 млрд. АҚШ долларигача етади. Бироқ бир хил магнитудага якин бўлган сценарийларда ҳам чуқурлик ва эпицентрал жойлашув фарқи туфайли иктисодий йўқотишлар турлича чиққан. Масалан, М_{6,0}(Н₁₀ km) ва М_{6,0}(Н₁₅ km) сценарийлари орасида, шунингдек М_{6,5}(Н₁₅ km) ва М_{6,5}(Н₂₅ km) сценарийлари орасида сезиларли фарқ мавжуд. Бу факт сейсмик хавфни фақат магнитуда орқали ифодалаш етарли эмаслигини, сейсмик таъсирнинг маконда тарқалиши ва маҳаллий грунтларнинг сейсмик таъсирини кучайтиш омиллари ҳал қилувчи роль ўйнашини кўрсатади.

Тадқиқотда Vs30 параметри бўйича 722 та нуктадан олинган маълумотлар асосида муҳандис-сейсмологик модель шакллантирилгани натижаларнинг фазовий аниқлигини оширади. Мураккаб муҳандислик-геологик шароитга эга шаҳарда грунт қатламларининг локал хусусиятлари сейсмик тўлкинларнинг амплитудаси ва спектрал таркибини жиддий ўзгартиради. Бошқача айтганда, бир хил бино типи турли грунт шароитида турлича зарарланиши мумкин. Шу сабабли олинган натижалар қурилиш фондининг ўзи эмас, «бино-грунт-сценарий» тизими доирасида талқин қилиниши керак. Илмий жиҳатдан тадқиқотнинг асосий қиймати ҳам айнан шунда: риск биргина конструкция хусусиятининг эмас, балки кўп омилли ўзаро таъсирнинг натижаси сифатида кўрсатилган.

1966 йилги Тошкент zilzilasi параметрларини базавий сценарий сифатида қабул қилиш илмий ва амалий жиҳатдан асосли, чунки у шаҳар учун реал тарихий эталон вазифасини бажаради. Бироқ бу ерда бир нозик масала бор: тарихий zilzila шароити ва ҳозирги қурилиш фонди тўлиқ бир хил эмас. Шунинг учун 1966 йил параметрлари асосида олинган замонавий симуляцион натижаларни «тарихий воқеанинг айнан такрори» сифатида эмас, балки «шунга ўхшаш сейсмик таъсир ҳозирги шаҳар муҳитида қандай оқибат бериши мумкин» деган талқинда бериш тўғри бўлади. Чунки қурилиш меъёрлари, аҳоли зичлиги ва бозор қийматлари 1966 йилдан тубдан ўзгарган.

Тадқиқот натижалари амалиёт учун ҳам муҳим ҳулосалар беради. Биринчидан, сейсмик рискни пасайтиришда барча биноларга тенг ёндашув самарасиз; устувор чоралар энг заиф типларга қаратилган мақсадли дастурлар кўринишида бўлиши лозим. Иккинчидан, иктисодий талафотларни камайтиришда фақат янги қурилишни кучайтириш эмас, балки мавжуд эски турар-жой фондини инвентаризация қилиш, инструментал текширувдан ўтказиш ва босқичма-босқич мустаҳкамлаш муҳим. Учинчидан, ҳудудий режалаштиришда локал грунт шароити ҳисобга олинмаса, риск хариталари реал вазиятни тўлиқ акс эттирмайди. Демак, мақола натижалари фавқулудда вазиятлар режалаштируви, шаҳарсозлик сиёсатини янгилаш, суғурта моделлари ва реновация дастурлари учун тўғридан-тўғри қўлланилиши мумкин.

ХУЛОСА

Ушбу тадқиқотда Тошкент шаҳри турар-жой фонди учун 9 та эҳтимолий сценарийли zilzila асосида сейсмик шикастланиш ва иктисодий талафотлар рақамли симуляцион моделлар ёрдамида баҳоланди. Ҳисоблашларда zilzila параметрлари, маҳаллий грунт шароити, Vs30 бўйича муҳандис-сейсмологик маълумотлар, турар-жой фонди типологияси ва биноларнинг сейсмик заифлик функциялари комплекс ҳисобга олинди. Олинган натижалар Тошкент шаҳри ҳудудида сейсмик рискнинг фазовий ва конструктив жиҳатдан кескин нотекис тақсимланишини кўрсатди.

Тадқиқот натижаларига кўра, асосий сейсмик риск манбаи эски қурилиш фондига мансуб, маҳаллий материаллардан қурилган, муҳандислик ечимлари етарлича таъминланмаган ва сейсмик меъёрлар тўлиқ қўлланилмаган турар-жой бинолари ҳисобланади. Магнитуда ва интенсивлик ортиши билан шикастланиш даражаларида критик чегарадан кейин кескин ўсиш кузатилиб, юқори сценарийларда оғир шикастланиш ва бузилиш ҳолатлари кескин кўпайиши аниқланди.

Иқтисодий баҳолашлар сейсмик талафотлар магнитудага нисбатан тўғри чизикли эмаслигини, балки эпицентр жойлашуви, чуқурлик, грунт шароити ва турар-жой фонди таркибига кучли боғлиқ эканини кўрсатди. Сценарийлар бўйича умумий иқтисодий йўқотишлар 2,74 млрд. АҚШ долларида 13,03 млрд. АҚШ доллариғача ўзгариши аниқланди. Бу эса Тошкент шаҳри учун сейсмик рискни баҳолашда умумлашган ёндашув эмас, балки ҳудудий ва типологик аниқлаштирилган моделлардан фойдаланиш зарурлигини тасдиқлайди.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти шундаки, унинг натижалари шаҳар ҳудудларини сейсмик риск бўйича устуворлаштириш, сейсмик заиф турар-жой фондларини аниқлаш, реновация ва мустаҳкамлаш дастурларини ишлаб чиқиш, фавқулодда вазиятлар режалаштируви ҳамда эҳтимолий иқтисодий йўқотишларни камайтириш стратегияларини ишлаб чиқиш учун илмий асос бўлиб хизмат қилади.

АДАБИЁТЛАР

1. Ахмеджанов М.А., Борисов О.М., Ибрагимов Р.Н. и др. Основные структуры Приташкентского района // Ташкентское землетрясение. - Т., 1971. - С. 248-258 (in Russian).
2. Ланге К.О. Геоморфология и молодая тектоника Ташкентского сейсмического района // Ташкентское землетрясение. - Т., 1971. - С. 284-295 (in Russian).
3. Рыжков О.А., Ибрагимов Р.Н. и др. Тектоника Ташкентской Голодностепской предгорной олигоцен-антропогеновой впадины // Узб. геол. журн. - 1961. - № 5 (in Russian).
4. Ходжаев А.К. Палеосейсмология Чаткало-Кураминского региона. - Т.: Фан, 1985. - 140 с. (in Russian).
5. Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.А., Ибрагимов О.Р. Сейсмотектоника Узбекистана // Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане. - Т.: ГИДРОИНГЕО, 2002. - С. 43 (in Russian).
6. Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A. Complex of general seismic zoning maps OSR-2017 of Uzbekistan // Geodes. Geodynam. - 2020. - Vol. 11. - Is. 4. - P. 273-294. Doi: 10.1016/j.geog.2020.03.004
7. Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Ashurov S.H. Comparison of seismic hazard assessments obtained within the probabilistic and probabilistic-deterministic approaches for the territory of Uzbekistan // Seism. Instruments. - 2022. - Vol. 58. - № S1. P. 21-35. Doi: 10.3103/S0747923922070040
8. Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Ashurov S.H. Ranking of Seismic Intensity Attenuation Laws and Modeling of Seismic Sources for Seismic Hazard Assessment in Uzbekistan // Geodynamics & Tectonophysics. - 2024. - 15 (4), 0770. doi:10.5800/GT-2024-15-4-0770
9. Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A. Stress state of Uzbekistan's seismically active areas // Seism. Instruments. - 2020. - Vol. 56. - P. 679-700. Doi: <https://doi.org/10.3103/S0747923920060079>.
10. Ismailov V.A., Yodgorov Sh.I., Allayev Sh.B., Mamarozikov 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.org/10.1016/j.soildyn.2021.107045.
11. Ismailov V.A., Yodgorov Sh.I., Xusomiddinov A.S., Yadigarov E.M., Aktamov B.U., Avazov Sh.B. Regional seismic risk assessment based on ground conditions in Uzbekistan // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. - 2024. - 2133-2146, doi.org/10.5194/nhess-24-2133-2024.
12. Ismailov V.A., Yodgorov Sh.I., Xusomiddinov A.S., Mamarozikov T.U., Yadigarov E.M., Aktamov B.U., Allayev Sh.B., Teshayeva R.B. Seismic soil characterization of Tashkent using Vs30 mapping techniques // Journal of Applied Geophysics, 2025. - Vol. 239, August, 105719. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105719>.
13. Ismailov V.A., Yodgorov S.I., Xusomiddinov A.S., Yadigarov E.M., Botirovich A.S., Aktamov B.U. New classification of soils by seismic properties for the building code in Uzbekistan // Geomechanics and Geoengineering. - 2023. - 19(4). - P. 605-625. 10.1080/17486025.2023.2296975.
14. Xusomiddinov A.S., Yodgorov Sh.I., Sadirov F., Aktamov B.U., Avazov Sh. B. Estimation of the seismic intensity increments in Tashkent region // AIP Conference Proceedings 2432, 030035 (2022); doi.org/10.1063/5.0089662. Published Online: 16 June 2022.
15. Ismailov V.A., Ibragimov R.S., Yodgorov Sh.I., Nurmatov U.A., Aktamov B.U. Assessment of seismic hazard of the territory of tashkent city as a basis for the development of simulation modeling of the consequences of strong earthquakes // AIP Conf. Proc. 3 April 2025; 3265 (1): 040002. <https://doi.org/10.1063/5.0265039>

16. Mirzaev S., Ismailov V., Tulaganov B., Yodgorov Sh., Payzullaev A. Development of a simulation model to evaluate the economic impact of strong earthquakes on Tashkent // AIP Conf. Proc. 3 April 2025; 3265 (1): 030015. <https://doi.org/10.1063/5.0265178>

17. Vakhitkhan A. Ismailov, Chiara Scaini, Sharofiddin I. Yodgorov, Doston D. Jumaev, Bekzod U. Aktamov, Shukhrat B. Avazov, Azamjonov T. Asadbek. Seismic Risk Assessment of Tashkent's Residential Buildings Based on the 1966 Earthquake Scenario // Sci Rep (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-41798-4>

**Analysis of economic losses from probable scenario-based earthquakes
for the residential building stock of Tashkent city using simulation models
Sh.I. Yodgorov**

Abstract. In this article, the potential damage to residential buildings in the city of Tashkent was assessed through a modern digital simulation approach based on the parameters of various possible earthquake scenarios. The study conducted scenario-based assessments that took into account the propagation of seismic impact, ground conditions, building types, their economic value, and structural features. According to the research findings, earthquake damage predominantly affects residential buildings that are part of the seismically vulnerable building stock, constructed from local materials, lacking adequate engineering solutions, and not fully compliant with seismic codes.

The article assesses the damage levels of residential buildings, potential economic losses, and the degree of risk to the population, comparing the results with historical data from the 1966 earthquake. The findings of this research are of significant scientific and practical importance for forecasting the consequences of strong earthquakes in urban areas and for developing measures to mitigate seismic risk.

Key words: Tashkent earthquake, housing stock, structure, degrees of damage, economic damage, seismic risk.

**Анализ экономического ущерба от вероятных сценарных землетрясений
для жилищного фонда города Ташкента на основе симуляционных моделей
Ш.И. Ёдгоров**

Аннотация. С помощью современного подхода, основанного на цифровом моделировании, был оценён потенциальный ущерб жилым зданиям на территории Ташкента при различных сценариях землетрясений. В исследовании сценарные оценки выполнены с учётом распространения сейсмического воздействия, грунтовых условий, типов зданий, их экономической стоимости и конструктивных особенностей. Согласно результатам исследования, основной ущерб от землетрясений приходится на жилые здания, относящиеся к сейсмически уязвимым типам строительного фонда, построенные из местных материалов, с недостаточными инженерными решениями и без полного соблюдения сейсмических норм.

В статье оцениваются степени повреждения жилых зданий, возможные экономические потери и уровень риска для населения, а полученные результаты сравниваются с историческими данными о землетрясении 1966 года. Результаты исследования имеют важное научно-практическое значение для прогнозирования последствий сильных землетрясений в городских районах и разработки мер по снижению сейсмического риска.

Ключевые слова: Ташкентское землетрясение, жилищный фонд, конструкция, степени повреждения, экономический ущерб, сейсмический риск.

UO‘K 624.131:550.34

FARG‘ONA SHAHRI GRUNTLARINING MUHANDIS-SEYSMOLOGIK XUSUSIYATLARI VA «EUROCODE 8» BO‘YICHA TASNIFI

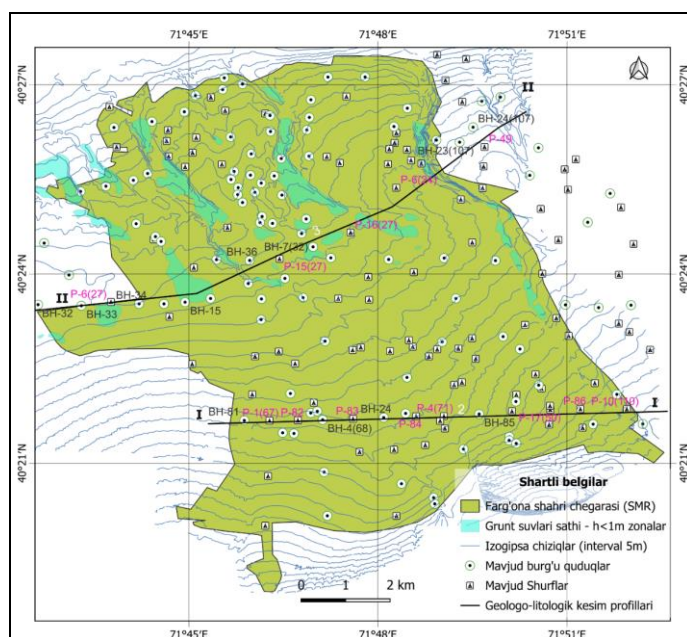
D.D. Jumayev

*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi, G‘.O. Mavlonov nomidagi Seysmologiya instituti,
Habib Abdullayev nomidagi Geologiya va geofizika instituti
E-mail: dostonbekjumayev777@gmail.com*

Annotatsiya. Ushbu maqolada Farg‘ona shahri hududining geologik va muhandislik-geologik o‘rganilganlik darajasi tahlil qilinib, so‘nggi yillarda o‘tkazilgan tadqiqotlar natijalari bilan boyitilgan holda gruntlarning «Eurocode 8» bo‘yicha tasnifi hamda ularning chuqurlik bo‘yicha seysmogeologik holati ko‘rib chiqilgan. Tahlil natijalariga ko‘ra, Farg‘ona shahri hududidagi gruntlarning turlari va ularning muhandis-seysmologik xususiyatlari aniqlangan. 1D vertikal profil asosida seysmogeologik kesim zamonaviy MASW usuli natijalari hamda mavjud burg‘u quduqlari ma‘lumotlari bilan to‘ldirilgan. Mualliflar tomonidan yer sirtiga yaqin joylashgan lyoss qatlamlarida ko‘ndalang seysmik to‘lqin tezligi (V_s) ning past qiymatlari (300–400 m/s) grunt toifalarini ajratishda sezilarli ta‘sir ko‘rsatmasligi ta‘kidlangan. Bunga asosiy sabab sifatida ushbu qatlamlarning qalinligi nisbatan kichikligi va «Eurocode 8» da nazarda tutilgan 30 m chuqurlik kesimi (V_{s30}) ning umumiy ko‘rsatkichiga ta‘siri cheklanganligi keltirilgan.

Kalit so‘zlar: Farg‘ona shahri, muhandislik-geologik sharoit, «Eurocode 8», seysmogeologik kesim, grunt klassifikatsiyasi.

Kirish. Farg‘ona shahri O‘zbekiston Respublikasining sharqiy qismida, Markaziy Osiyoning eng zich aholi yashaydigan va iqtisodiy jihatdan faol hududlaridan biri bo‘lgan Farg‘ona vodiysida joylashgan (1-rasm). Shahar hududining jadal o‘zlashtirilishi, turar joy va sanoat infratuzilmasining kengayishi, shuningdek hududning seysmik faol zonada joylashgani grunt sharoitlari, ularning muhandislik-geologik xossalari hamda maydonlarning muhandislik-qurilish jihatidan maqbulligini aniqlash talab etadi. Shu nuqtai nazardan, Farg‘ona shahri va unga tutash hududlarning geologik hamda muhandislik-geologik jihatdan tahlil qilish va gruntlarni klassifikatsiyalash ilmiy va amaliy jihatdan muhim ahamiyatga ega.



1-rasm. Tadqiqot hududi (Farg‘ona shahri) ning umumiy xaritasi.
Figure 1. General map of the study area (Fergana city).

Hududning muhandislik-geologik jihatdan o'rganilishida umumlashtirilgan xaritalar va maxsus tadqiqotlar muhim o'rin tutadi. Jumladan, V.V.Tolokovnikov, R.N.Sirsanova, I.S.Sidikov hamda boshqa mutaxassislar tomonidan turli miqyoslarda muhandislik-geologik xaritalar tuzilgan, Farg'ona botig'i va unga tutash hududlarda gruntlarning litologik tarkibi, qalinligi, muhandislik-geologik xossalari hamda o'zlashtirish sharoitlari yoritilgan [УЗНАШКЛИТИ, 2007; Захарова и др., 1970; Уломов и др., 1970]. Romanovskiy, Nalivkin, Vasilkovskiy [Васильковский, 1936], Shults, Popov, Mavlonov [Мавлянов, Нурматов, 1972], Islomov, Tetyuxin va boshqa olimlarning ishlari natijasida hududning geologik rivojlanish tarixi, to'rtlamchi davr cho'kindilarining tuzilishi hamda ularning muhandislik nuqtai nazaridan ahamiyatli xususiyatlari haqida muhim ilmiy ma'lumotlar to'plangan. Keyingi yillarda esa «O'zbekgidrogeologiya», «O'zshaharsozlik LITI» va boshqa tashkilotlar tomonidan Farg'ona shahri bosh rejasini asoslash, qurilish maydonlarini baholash hamda turli bino va inshootlarni loyihalash maqsadida keng ko'lamli muhandislik-geologik izlanishlar olib borilgan [Ибрагимов, 1971; ВСЕГИНГЕО, 1966].

Shunga qaramay, Farg'ona shahri hududining muhandislik-geologik o'rganilganlik tarixi ko'p bosqichli va boy ilmiy asosga ega bo'lsa-da, zamonaviy tadqiqot usullaridan foydalangan holda shahar hududining gruntlarining xalqaro kodlar asosida, jumladan «Eurocode 8» bo'yicha tasniflash masalasi ochiqlicha qolmoqda [CEN, 2004]. Ushbu klassifikatsiyalash, hozirda bo'lib turgan qurilishlarga jalb etilgan xorijiy qurilish tashkilotlari uchun va xalqaro qurilish tashkilotlari uchun loyihalar bajarayotgan loyihachi muhandislar uchun zaruriy ma'lumot bazasi bo'lib xizmat qiladi. Chunki, hozirda yangilangan Shaharsozlik Normalari va Qoidalari [ShNQ, 2025], xalqaro kodlarga moslashtirilgan tadqiqotlarni olib borishni talab etadi. Farg'ona shahri hududining «Eurocode 8» (EC8) asosida gruntlari klassifikatsiyasi aynan shu maqsadga erishish uchun xizmat qiladi.

Ushbu tadqiqotda gruntlarning EC8 asosida tasniflash barobarida, ularning chuqurlik bo'yicha xarakteristikasi mavjud burg'u quduq ma'lumotlari hamda zamonaviy MASW usuli [Park et al., 1999; 2007] tadqiqotlari natijalari asosida bayon etilgan.

Metodlar. Ushbu tadqiqotda Farg'ona shahri hududining muhandis-seysmologik sharoitlarini baholash uchun kompleks yondashuv qo'llanildi. Bunda gruntlarning seysmik xossalari «Eurocode 8» talablari asosida, MASW usuli natijalari hamda mavjud burg'u quduqlari ma'lumotlarini integratsiyalash orqali tahlil qilindi.

«Eurocode 8» asosida gruntlarni klassifikatsiyalash. «Eurocode 8» ning 1-qismi [CEN, 2004] gruntlarni tasniflashning nisbatan sodda va samarali tizimini (1-jadval) joriy etgan bo'lib, u asosan V_{s30} ko'rsatkichiga, ya'ni yer sirtidan pastga 30 m chuqurlikkacha bo'lgan qatlamlarda ko'ndalang (siljish) to'lqinlarining vaqt bo'yicha o'rtacha tezligiga asoslangan.

Shu bilan birga, muqobil parametrlar sifatida: standart penetratsiya sinovi (SPT) dagi zarbalar soni (N_{spt}), gruntning drenajsiz kesilish mustahkamligi (c_u) ni hisobga olish imkoniyati ham ko'zda tutilgan.

V_{s30} ko'rsatkichi birinchi marta Borchardt [Borchardt, 1992] tomonidan Loma Prieta zilzilasi vaqtida kuzatilgan grunt effektlari bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar natijasida taklif qilingan. Keyinchalik ushbu ko'rsatkich grunt kuchaytirish (site amplification) uchun bilvosita mezon (proxy) sifatida EC8 [CEN, 2004] dan tashqari bir qator boshqa seysmik me'yoriy hujjatlarda ham qabul qilingan, jumladan:

- BSSC (Baltic Sea Science Congress) (2015) – qoidalari;
- ASCE/SEI 7 (ASCE, 2010);
- Yangi Zelandiya standarti (NZS, 2004).

Yer osti qatlamlarining seysmik to'lqinlarni uzatish va kuchaytirishdagi roli zamonaviy seysmik xavf tahlillarida muhim ahamiyat kasb etadi. Yevropa Ittifoqi tomonidan ishlab chiqilgan va hozirda qo'llanilayotgan EC 8 (EN 1998-1) me'yoriy hujjatida, grunt sharoitlarining seysmik harakatga ta'siri, grunt kuchaytirish koeffitsienti – S orqali hisobga olinadi. Ushbu koeffitsient gruntning turiga qarab seysmik to'lqin harakatlarining kuchayishini ifodalaydi.

Tadqiqot hududining muhandis seysmologik sharoitlari. Farg'ona shahri va uning atrofi hududidagi to'rtlamchi davr yotqiziqlar neogen davriga mansub gillar va qumtoshlar ustida yaxlit qoplama sifatida yotadi. Ular genetik jihatdan allyuvial, allyuvial-prolyuvial va qisman antropogen turlarga mansub bo'lib, litologik tarkibi bo'yicha konglomeratlar, graviy-qumtoshlar, qumlar, lyossimon suglinoklar va supeslar bilan ifodalanadi. Ayrim joylarda, xususan adirolldi tekisliklarda, to'rtlamchi davr yotqiziqlarning qalinligi juda katta bo'lib, 400-700 m ga yetadi.

1-jadval

«Eurocode 8» bo'yicha gruntlarning seysmik jihatdan klassifikatsiyasi [CEN, 2004]

Таблица 1

Сейсмическая классификация грунтов по «Eurocode 8» [CEN, 2004]

Table 1

Seismic classification of soils according to Eurocode 8 [CEN, 2004]

Grunt turi	Stratigrafik profil tavsifi	V _{s30} (m/s)	N _{SPR} (zarba/30 sm)	c _u (kPa)
A	Qoyatosh jinsi yoki qoyatosh jinsiga o'xshash boshqa geologik hosila, yuzada ko'pi bilan 5 m gacha nisbatan bo'shoq qatlam mavjud bo'lishi mumkin	> 800	—	—
B	Juda zich qum, shag'al yoki juda qattiq gil yotqiziqlari; qalinligi kamida bir necha o'n metr bo'lib, chuqurlik bo'yicha mexanik xossalarning asta-sekin ortib borishi bilan tavsiflanadi	360-800	> 50	> 250
C	Zich yoki o'rtacha zich qum, shag'al yoxud qattiq gildan iborat chuqur yotqiziqlar; qalinligi bir necha o'n metrdan bir necha yuz metrgacha yetadi	180-360	15-50	70-250
D	Bo'shoq-o'rtacha zich, bog'lanishsiz gruntlar (yumshoq va o'zaro bog'lanishga ega ayrim qatlamlar bo'lishi yoki bo'lmasligi mumkin) yoki asosan yumshoqdan o'rtacha mustahkam holatgacha bo'lgan zarralari o'zaro bog'langan gruntlar	< 180	< 15	< 70
E	Yuzada Vs qiymatlari bo'yicha C yoki D turiga mansub bo'lgan, qalinligi taxminan 5 m dan 20 m gacha bo'lgan allyuvial qatlamlardan tashkil topgan grunt profili; uning ostida Vs > 800 m/s bo'lgan nisbatan qattiqroq qatlam yotadi	—	—	—
S1	Tarkibida yoki o'zida kamida 10 m qalinlikdagi, yuqori plastikli indeksiga (PI > 40) va yuqori namlikka ega yumshoq gilli/alevritli qatlamlar mavjud bo'lgan yotqiziqlar	< 100 (indikativ)	—	10-20
S2	Quyqalanuvchi gruntlar, sezgir gillar yoki A-E va S1 turlariga kirmaydigan boshqa har qanday grunt profili	—	—	—

Tadqiqotlar doirasida tog' jinslarining geologik-genetik komplekslari ajratilgan va ular zarrachalar o'rtasidagi bog'lanishning ustun xususiyatiga ko'ra muhandislik-geologik guruhlariga birlashtirilgan. Jumladan: sementlangan mayda va yirik bo'lakli jinslar, qumli-yirik bo'lakli jinslar, yirik bo'lakli-gilli jinslar, yirik bo'lakli jinslar va lyossimon jinslar.

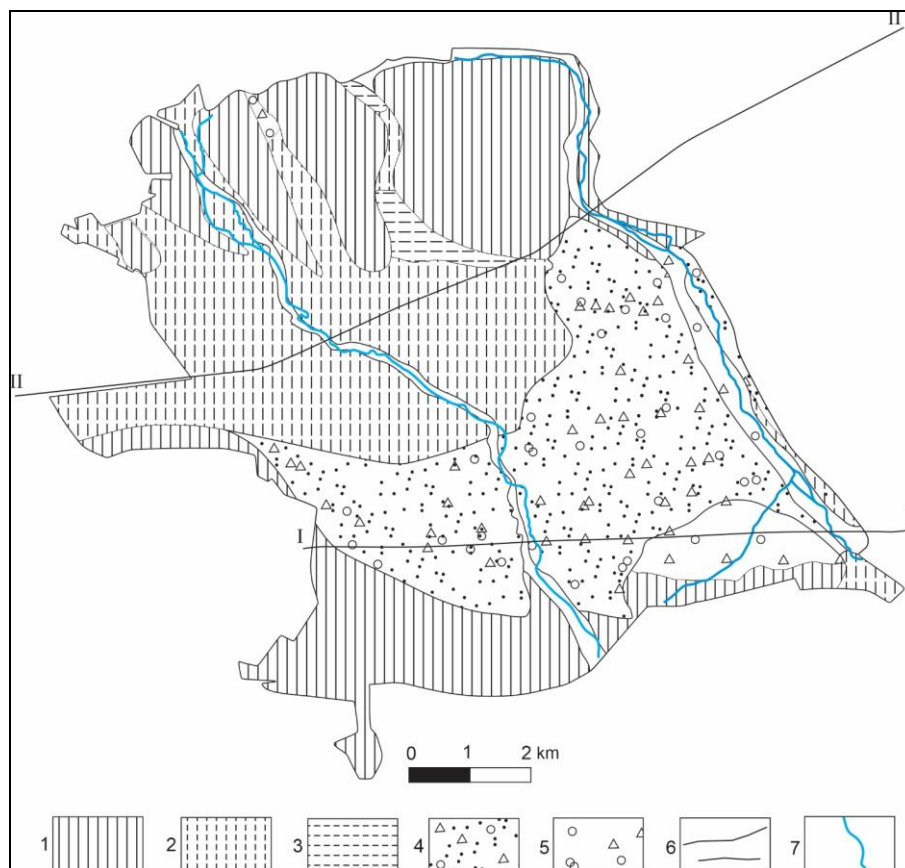
Mazkur klassifikatsiya asosida Farg'ona shahri hududining muhandislik-geologik xaritasi mikrohududlashtirish tadqiqotlari doirasida tuzilgan (2-rasm). Geologik-genetik komplekslar zarrachalar o'rtasidagi bog'lanish xususiyati, grunt suvlarining yotish chuqurligi, fizik-geologik va muhandislik-geologik jarayonlarning rivojlanishi bilan birgalikda muhandislik-geologik komplekslarga birlashtirilgan.

Quyida turli muhandislik-geologik guruhdagi tog' jinslarining tarqalish sharoitlari, tarkibi, holati va xossalari qisqacha bayon etiladi.

Sementlangan bo'lakli konglomeratlar. Allyuvial-prolyuvial kelib chiqishga ega bo'lgan, quyi to'rtlamchi davrning Sox kompleksi cho'kindi jinslar majmuasiga mansub. Ular Kapchig'ay, Kuvin va Pakana balandliklarining antiklinal tuzilmalarida tarqalgan. Konglomeratlar kam darajada dislokatsiyalangan bo'lib, ohak-gilli sement bilan mustahkam sementlangan. Ular turli kattalikdagi shag'allardan tashkil topgan bo'lib, tarkibida cho'kindi va magmatik jinslar, ayrim hollarda esa metamorfik jinslar uchraydi. Ularning zichligi 2,3-2,5 g/sm³, me'yoriy bosimga chidamliligi esa 6 kg/sm² ni tashkil etadi. Farg'ona shahrining janubi-g'arbiy qismida eroziya yuzasini tashkil etuvchi konglomeratlar sust sementlangan, sementi esa qumli tarkibga ega. Ushbu konglomeratlar yuzadan nuragan bo'lib, qalinligi 0,7 m gacha yetadigan qizil rangli nurash qobig'i bilan qoplangan. Bu joylarda konglomeratlar parchalangan, sement mustahkamligi pasaygan.

Qumli-yirik bo'lakli jinslar. Farg'ona shahrining janubiy qismida keng tarqalgan bo'lib, kenglik yo'nalishida cho'zilgan. Ular graviy-shag'alli, qum va graviy aralashmali yotqiziqlar bilan ifodalanadi. Ularning qalinligi 60-80 m ga yetadi. Graviy-shag'alli yotqiziqalarda 20 mm o'lchamli fraksiyalar ustun bo'lib, o'rtacha 40-45% ni tashkil etadi, eng kichik fraksiya 1,25 mm bo'lib, 0,5-8% oralig'ida o'zgaradi. Shag'allar yaxshi silliqlangan bo'lib, cho'kindi va magmatik jinslardan tashkil topgan. Ayrim hollarda yassi shaklli shag'allar uchraydi, ular qatlamlarda shimol tomonga og'ish burchagi bilan joylashgan, yotish yo'nalishi esa kenglik bo'ylab. To'ldiruvchi material turli kattalikdagi qum fraksiyalaridan iborat

bo'lib, grunt massasining o'rtacha 15-20% ini tashkil etadi. Ularning zichligi 1,9-2,2 g/sm³. Ushbu guruhga Toshkent kompleksi jinslari ham kiradi, ularning ruxsat etilgan kuchlanishi 4 kg/sm² ga teng.



2-rasm. Farg'ona shahri hududining muhandis-geologik xaritasi. 1 – bo'lakli sementlangan jinslar; 2 – lyossimon jinslar; 3 – botqoqlanish; 4 – qumli-gilli yirik bo'lakli jinslar; 5 – yirik bo'lakli jinslar; 6 – injener-geologik kesim; 7 – Farg'ona shahridagi kanal va daryolar.

Рис. 2. Инженерно-геологическая карта территории г. Ферганы.

Figure 2. Engineering-geological map of the Fergana city area.

Adirolldi tekislik hududida, adirlarning shimolida, Marg'ilon shahri atrofida, graviy-shag'alli yotqiziqlar kesimida to'ldiruvchi material qum-suglinok tarkibli bo'lib, suglinok materialning ko'plab yupqa qatlamlari va linzalari kuzatiladi. Bu holat cho'kindi to'planish sharoitlari bilan izohlanadi. Shu sababli mazkur hudud qumli-gilli yirik bo'lakli jinslar guruhiga kiritildi. Ularning qalinligi 80 m va undan ortiq bo'lib, yoshi o'rta-yuqori to'rtlamchi davrga mansub. Ushbu guruhga, shuningdek, Kuvin va Kapchig'ay adirlarining shimoliy yon bag'irlari etaklarida tarqalgan allyuvial-prolyuvial shleyf tasmasi ham kiradi. Ularning yoshi yuqori to'rtlamchi va hozirgi davr, qalinligi 10-20 m bo'lib, shag'al, chaqiq tosh, suglinok va supeslarning aralashmasidan iborat.

Yirik bo'lakli jinslar. Ushbu guruhga allyuvial, hozirgi davrga mansub shag'alli yotqiziqlar kiradi. Ular Isfayramsoy va Marg'ilonsoy daryolarining qayirlari va o'zanlarida tarqalgan, shuningdek Isfayramsoy daryosining yoyilma konusini tashkil etadi. Tarkibi bo'yicha cho'kindi va magmatik jinslar taxminan teng miqdorda uchraydi. Diametri 20-40 mm bo'lgan fraksiyalar ustun bo'lib, jins hajmi bo'yicha 60-70% ni tashkil etadi, ayrim hollarda 1 m dan ortiq bo'lgan toshlar ham uchraydi. Qumli-gilli to'ldirgichli shag'allar zichligi 1,7-1,9 g/sm³.

Lyossimon jinslar. Ushbu guruhga allyuvial va allyuvial-prolyuvial genezisga mansub lyossimon jinslar kiritilgan bo'lib, yoshi jihatidan ular Sirdaryo, Golodnostep va Toshkent cho'kindi majmui sikllariga mansub. Ularning zichligi 1,4-2 g/sm³.

Allyuvial lyossimon jinslar. Isfayramsoy va Marg‘ilansoy daryolarining qayirlarida hamda I va II qayir usti terrasalari yuzasida, shuningdek Satkak arigi vodiysida keng tarqalgan. Kompleksning tag qismida shag‘alli yotqiziqlar joylashgan bo‘lib, uning ustida suglinoklar, ayrim joylarda qum va mayda graviylarning yupqa qatlamlari va linzalari bilan almashib keladi. Ularning qalinligi 0,5-3 m ni tashkil etadi. Ularning zichligi $1,4-1,8 \text{ g/sm}^3$.

Allyuvial-prolyuvial lyossimon jinslar. Farg‘ona shahri va uning atrofidagi hududda keng tarqalgan bo‘lib, lyossimon suglinoklar va supeslar bilan ifodalanadi. Qalinligi Farg‘ona shahri hududida (Yarmoza adirlararo botiqligi) 0,5-12 m, Marg‘ilon shahri hududida (adiroldi tekislik) esa 2-7 m oralig‘ida o‘zgaradi. Lyossimon suglinok va supeslar kesimida qalinligi 0,1-1 m bo‘lgan qum va graviy linzalari hamda yupqa qatlamlari uchraydi. Ular qumli va gilli to‘ldiruvchiga ega bo‘lgan graviy-shag‘alli yotqiziqlar ustida joylashgan. Ularning zichligi $1,5-1,8 \text{ g/sm}^3$.

Quyida (3-rasmda), tadqiqot hududini kesib o‘tgan profillar (1, 2-rasmlar) bo‘yicha geologik-litologik kesim tuzilgan bo‘lib yuqorida tavsiflangan bo‘lakli jinslarning o‘zaro yotish sharoitini yaqqol o‘zida namoyon etadi.

Hududning eng ko‘p cho‘kkan qismlari Yarmoza botig‘i va adirolldi tekisligi bo‘lib, bu yerda to‘rtlamchi yotqiziqlarning qalinligi 1200 m gacha yetadi. Antiklinal tuzilmalarda esa ularning qalinligi 100 m dan ortiqni tashkil etadi. To‘rtlamchi davr jinslar konglomeratlar, graviy-shag‘alli jinslar, shag‘allar, qumlar, lyossimon suglinoklar va supeslar bilan ifodalanadi. Hududda allyuvial-prolyuvial va allyuvial genetik turlar keng tarqalgan bo‘lib, delyuvial va antropogen yotqiziqlar kam rivojlangan va faqat alohida uchastkalarda uchraydi.

Natijalar. Hududda tarqalgan tog‘ jinslarining tarkibi va fizik xossalari asosan tog‘ jinslarining EC8 [CEN, 2004] bo‘yicha qaysi toifaga mansubligi belgilab chiqildi (2-jadval). Bunda asosiy parameter sifatida, gruntidagi ko‘ndalang to‘lqin tarqalish tezligi (V_s) hamda Ismailov va boshqalar [Ismailov et al., 2024] tomonidan ishlab chiqilgan klassifikatsiyalash asos qilib olindi.

2-jadval

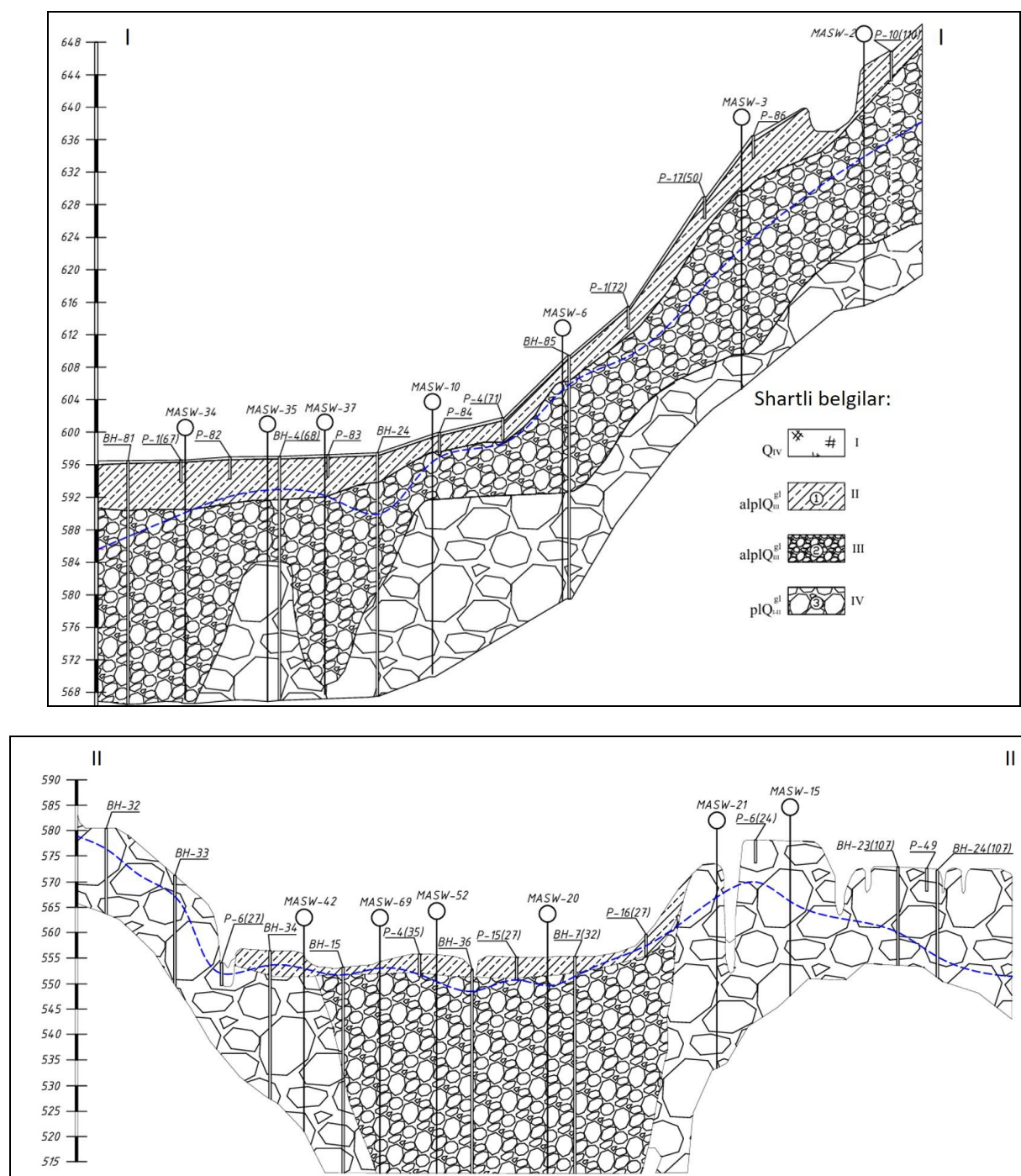
Tadqiqot hududida keng tarqalgan grunt turlarining seysmik xossalari va EC8 bo‘yicha mansubligi

Table 2

Seismic properties of widespread soil types in the study area and their classification according to EC8

Farg‘ona shahrida mavjud gruntlar	Seysmik xossasi		«Eurocode 8» bo‘yicha grunt tiplari
	ko‘ndalang to‘lqin tezligi, V_s , km/c	seysmik qattiqligi, $(V_s \cdot \rho)$	
Sementlangan bo‘lakli konglomeratlar	1,1-1,5	2,53-3,75	A
Bog‘lanmagan yirik bo‘lakli allyuvial valun-shag‘alli yotqiziqlar	1-1,1	1,90-2,42	A
Qumli-gilli to‘ldiruvchili shag‘alli gruntlar	0,9-1	1,53-1,90	B
Bog‘langan lyossimon jinslar: supes va suglinoklar	0,6-0,9	0,852-1,728	C, D
Lyossimon yotqiziqlar	0,3-0,4	0,39-0,72	D, E

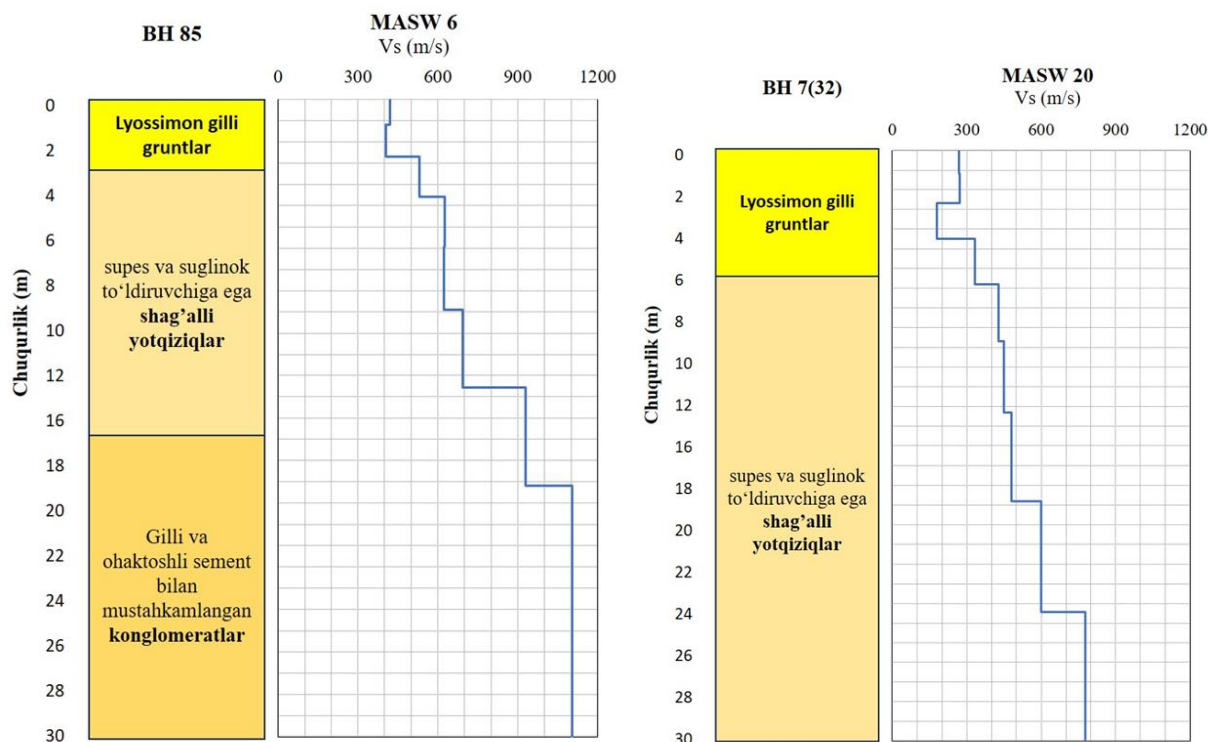
2-jadval natijalari, faqatgina bir jinsli gruntlar tarqalgan hudud uchun etalon sifatida olingan. Tabiiy sharoitda, ko‘p qatlamli muhitda gruntlarning EC8 bo‘yicha tabaqalash biroz qiyinlashadi. Shunday holatlarda, EC8 [CEN, 2004], eng avvalo ko‘ndalang to‘lqinlarning qatlamlardan o‘tish tezligining vaqt bo‘yicha o‘rtacha qiymatiga asoslanib tabaqalashni tavsiya etadi. Qatlamlarda o‘tishda ko‘ndalang to‘lqinlarning o‘rtacha tezligini topish uchun, har bir 1D profil uchun ko‘ndalang to‘lqinning chuqurlik bo‘yicha o‘zgarish qiymatlari kerak bo‘ladi.



3-rasm. Berilgan profililar bo'yicha geologik-litologik kesim (1-rasmga qarang). I – Tuproq-o'simlik qatlami; II – Lyossimon gilli gruntlar, supeslar va suglinoklar; III – supes va suglinok to'ldiruvchiga ega shag'alli yotqiziqlar; IV – Gilli va ohaktoshli sement bilan mustahkamlangan konglomeratlar.

Figure 3. Geological-lithological cross-section along the selected profiles (see Fig. 1).

Ushbu tadqiqot natijalari asosida, nafaqat 1D chuqurlik profili bo'yicha Vs ning tarqalish tezligi (MASW tadqiqotlari asosida), balki qatlamlar tarkibi ham burg'u quduq (1-rasm) ma'lumotlari asosida shakllantirildi (4-rasm).



4-rasm. MASW natijalari hamda burg'u quduqlari ma'lumotlariga asoslangan 1D grunt profili modeli.

Figure 4. 1D soil profile model based on MASW results and borehole data.

4-rasmda ko'rsatilganidek, burg'ulash qudug'i ma'lumotlari yer osti qatlamlarining o'rtacha chuqurligi bo'yicha MASW natijalarini umuman tasdiqlaydi, biroq yuza qismda va chuqurroq zonlarda ayrim tafovutlar kuzatiladi. Ushbu noaniqliklar, ayniqsa, birinchi va ikkinchi qatlamlar chegarasida yaqqol namoyon bo'ladi hamda, ehtimol, atrof-muhit omillari va texnogen shovqinlar ta'siri bilan izohlanadi. Kattaroq chuqurliklardagi noaniqliklar esa, asosan, MASW usulining sirt to'lqinlaridan foydalanish bilan bog'liq chuqurlik bo'yicha cheklanishlari bilan izohlanadi [Ismailov et al., 2025].

Muhokama. Ushbu tadqiqot natijalari Farg'ona shahri hududida gruntlarning muhandis-seysmologik xususiyatlari murakkab qatlamlanish va litologik tarkibning o'zgaruvchanligi bilan belgilanayotganini ko'rsatadi. Xususan, MASW natijalari va burg'u quduqlari ma'lumotlari asosida tuzilgan 1D kesimlar gruntlarning chuqurlik bo'yicha sezilarli heterogenligini tasdiqlaydi. Bu holat zamonaviy seysmologik tadqiqotlarda keng e'tirof etilgan bo'lib, grunt qatlamlarining notekisligi seysmik to'lqinlarning tarqalishi va kuchayishiga bevosita ta'sir ko'rsatishi qayd etilgan [Borcherdt, 1992].

Xalqaro tajribaga ko'ra, xususan «Eurocode 8» (EN 1998-1) hamda «ASCE 7» standartlarida gruntlarni tasniflashda asosiy parametr sifatida V_{s30} ko'rsatkichi qo'llaniladi. Biroq, so'nggi tadqiqotlar [Park et al., 1999; 2007; Ismailov et al., 2025] shuni ko'rsatadiki, ko'p qatlamli muhitlarda faqat V_{s30} ga asoslangan baholash gruntlarning haqiqiy dinamik xususiyatlarini to'liq aks ettira olmaydi. Ayniqsa, yuqori tezlikli qatlamlar ostida joylashgan past tezlikli yupqa qatlamlar mavjud bo'lganda, rezonans va lokal kuchayish effektlari yuzaga kelishi mumkin.

Mazkur tadqiqotda aniqlanganidek, yer yuzasiga yaqin joylashgan lyoss qatlamlarida V_s qiymatlari 300-400 m/s atrofida bo'lib, ular EC8 bo'yicha C yoki D toifadagi gruntlarga mos keladi. Biroq, ushbu qatlamlarning qalinligi nisbatan kichik bo'lganligi sababli, umumiy V_{s30} qiymatiga ta'siri cheklangan. Shu bilan birga, xalqaro tajriba shuni ko'rsatadiki, aynan shunday yupqa, past tezlikli qatlamlar seysmik tebranishlarning kuchayishida muhim rol o'ynashi mumkin (site amplification effect). Demak, faqat V_{s30} ga asoslanib yakuniy xulosa chiqarish ayrim hollarda soddalashtirilgan yondashuv bo'lib qoladi. Bundan tashqari, MASW usuli yordamida olingan natijalar va burg'u quduqlari ma'lumotlari o'rtasidagi tafovutlar geofizik metodlarning tabiiy cheklovlari bilan izohlanadi. Xalqaro

amaliyotda [Park et al., 1999; 2007] MASW usuli sirt to'liqlari asosida ishlagani sababli chuqurlik bo'yicha aniqligi kamayishi qayd etilgan. Shu sababli, geofizik va geologik ma'lumotlarni integratsiyalash eng ishonchli yondashuv sifatida qaraladi. Farg'ona shahri hududida gruntlar asosan A va B toifalarga mansub bo'lsa-da, ayrim hududlarda C toifaga yaqin sharoitlar ham uchraydi. Bu esa hududning seysmik javobi bir xil emasligini va lokal sharoitlarga bog'liqligini bildiradi. Xalqaro tajribaga ko'ra, bunday hududlarda mikrohududlashtirish ishlarini olib borish va gruntlarning dinamik parametrlarini batafsil baholash muhim hisoblanadi. Ushbu tadqiqot natijalari gruntlarning seysmik xususiyatlarini baholashda kompleks yondashuv zarurligini ko'rsatadi. Ya'ni, faqat normativ ko'rsatkichlarga (V_{s30}) emas, balki qatlamlanish, litologik tarkib va lokal geodinamik sharoitlarni ham hisobga olish zarur. Bu yondashuv xalqaro standartlar bilan uyg'un bo'lib, zamonaviy muhandis-seysmologik tadqiqotlarning asosiy yo'nalishlaridan biri hisoblanadi.

XULOSA

Farg'ona shahri hududida tarqalgan gruntlarning Ismailov va boshqalar [Ismailov et al., 2024] tomonidan taklif etilgan tavsiyalar asosida grunt turlari bo'yicha tasniflaganda, A-E turlarini uchratish mumkin bo'ladi. Ammo, chuqurlik bo'yicha qatlamlanishni hisobga olganda tezliklarning o'rtacha qiymatini hisobga kerak bo'ladi. Chunki, chuqurlik bo'yicha gruntlarning qatlamlanishi hamda qatlamlarning tarkibiy jihatdan turli ekanligi, EC8 da berilgan klassifikatsiya shartlariga mos kelmaydi. Chunki, EC8 gruntlarining o'zidan ko'ndalang hajmiy to'liqlarni o'tkazishining 30 m dagi o'rtacha qiymatiga asoslangan. Ushbu ortacha V_s qiymati 1-D kesimning ustki qismidan joy olgan lyosslarda 300-400 m/s bo'lsa, chuqurroqda joylashgan sementlangan konglomeratlarda 1000-1200 m/s ni tashkil etadi. Shunday bo'lsada, mavjud lyoss qatlamlarining yupqa qalinlikda ekanligi lyosslarning grunt toifasini belgilashdagi rolini kamaytiradi. Natijada, hududda tarqalgan gruntlarning EC8 bo'yicha asosan A va B hamda kam holatlarda C turi tarqalishini yuzaga keltirishi mumkin.

ADABIYOTLAR

1. Васильковский Н.П. К стратиграфии четвертичных отложений Ферганы // Мат-лы по геологии Средней Азии. - Т.: Изд-во Средне-Азиат., 1936.
2. Захарова А.И., Ибрагимов Р.Н., Матасова Л.М. Сейсмоструктура, сейсмичность и сейсмический режим Ферганской депрессии и её горного обрамления. - Т.: Институт сейсмологии АН РУз, 1970.
3. Ибрагимов Р.Н. Сейсмоструктура Ферганской впадины. - Т.: Фан, 1971.
4. Мавлянов Г.А., Нурматов А.Н. Четвертичные отложения Центральной Ферганы. - Т.: Фан, 1972.
5. Методические указания по составлению инженерно-геологических карт. - М.: ВСЕГИНГЕО, геологический факультет МГУ, 1966.
6. Отчёт об инженерно-геологических условиях г. Ферганы Ферганской области (для обоснования генерального плана). - Т.: УЗНАШКЛИТИ, 2007.
7. Уломов В.И., Ризниченко Ю.В., Захарова А.И. Разработка методики построения карт сотрясаемости территории Узбекистана. - Т.: Институт сейсмологии АН УзР, 1970.
8. ШНҚ 2.01.06-25. Сейсмик хуудларда баланд биноларни лойиҳалаш. - Т.: Ўзбекистон Республикаси Қурилиш ва уй-жой коммунал хўжалиги вазирлиги, 2025.
9. Borchardt R.D. Simplified site classes and empirical amplification factors for site-dependent code provisions // NCEER, SEAOC, BSSC Workshop. - Los Angeles: University of Southern California, 1992.
10. CEN. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings (EN 1998-1). - Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
11. Ismailov V.A., Yodgorov S.I., Khusomiddinov A.S., Yadigarov E.M., Botirovich A.S., Aktamov B.U. New classification of soils by seismic properties for the building code in Uzbekistan // Geomechanics and Geoengineering. - 2024. - Vol. 19. - № 4. - P. 605-625. <https://doi.org/10.1080/17486025.2023.2296975>
12. Ismailov V., Yodgorov S., Khusomiddinov A., Mamrozikov T., Yadigarov E., Aktamov B., Teshayeva R. Seismic soil characterisation of Tashkent using V_{s30}

mapping techniques // Journal of Applied Geophysics. - 2025. – Article 105719. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105719>

13. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves (MASW) // Geophysics. - 1999. - Vol. 64. - № 3. - P. 800-808.

14. Park C.B., Miller R.D., Xia J., Ivanov J. Multichannel analysis of surface waves (MASW) – active and passive methods // The Leading Edge. - 2007. - Vol. 26. - № 1. - P. 60-64. <https://doi.org/10.1190/1.2431832>

Инженерно-сейсмологические свойства грунтов города Ферганы и их классификация по «Eurocode 8»

Д.Д. Джумаев

Аннотация. Проанализирована степень геологической и инженерно-геологической изученности территории г. Ферганы. С учетом результатов исследований, проведенных в последние годы, рассмотрены классификация грунтов по «Eurocode 8» и их сейсмогеологическое состояние по глубине. По результатам анализа определены типы грунтов, распространенных на территории г. Ферганы, и их инженерно-сейсмологические свойства. На основе одномерного вертикального профиля сейсмогеологический разрез дополнен результатами современных исследований методом MASW, а также данными существующих буровых скважин. Авторами отмечено, что низкие значения скорости поперечных сейсмических волн (V_s) в приповерхностных лессовых слоях (300-400 м/с) не оказывают существенного влияния на выделение категорий грунтов. В качестве основной причины указывается относительно малая мощность этих слоев и ограниченное влияние на интегральный показатель 30-метрового разреза (V_{s30}), предусмотренный в «Eurocode 8».

Ключевые слова: город Фергана, инженерно-геологические условия, Eurocode 8, сейсмогеологический разрез, классификация грунтов.

Engineering-seismological properties of soils in Fergana city and their classification according to «Eurocode 8»

D.D. Jumaev

Abstract. This paper analyzes the level of geological and engineering-geological investigation of the territory of Fergana City and, incorporating the results of recent studies, examines the classification of soils according to Eurocode 8 and their seismogeological condition with depth. Based on the analysis, the soil types distributed within the territory of Fergana City and their engineering-seismological properties were identified. Using a one-dimensional vertical profile, the seismogeological section was supplemented with the results of modern MASW investigations as well as data from existing boreholes. The authors emphasize that the low shear-wave velocity (V_s) values observed in near-surface loess layers (300-400 m/s) do not significantly affect the delineation of soil categories. The main reason is that these layers are relatively thin, and their influence on the overall 30 m profile indicator (V_{s30}) adopted in Eurocode 8 is limited.

Key words: Fergana City, engineering-geological conditions, Eurocode 8, seismogeological section, soil classification.

УДК 550.34.012

ПРИМЕНЕНИЕ МГНОВЕННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭНТРОПИИ (ISED) ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ЗАШУМЛЁННОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Т.У. Мамарозиков^{1,2}, С.Б. Халбаев^{2,1}, Б.Г. Алимов¹, Т.С. Курбанов¹, Ж.З. Кодиров^{2,1}

¹Институт сейсмологии им. Г.О. Мавлонова АН РУз, Ташкент, Республика Узбекистан

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

E-mail: surathalbaev@gmail.com

Аннотация. Рассмотрено применение метода мгновенной спектральной энтропии (*Instantaneous Spectral Entropy Detection, ISED*) для автоматического детектирования микросейсмических событий на архивных записях локальной сети сейсмических станций, функционирующей в условиях высокой зашумлённости. Метод основан на анализе временной эволюции нормированной спектральной энтропии, вычисляемой по коротким временным окнам спектрограммы, и ориентирован на выявление изменений частотно-временной структуры сигнала, сопровождающих появление сейсмического события. Для формализации процедуры детектирования реализована гибридная схема *ISED–STA/LTA*, в которой алгоритм кратковременного и долговременного усреднения применяется к энтропийному признаку. Показано, что предложенный подход позволяет устойчиво выявлять события без предварительной фильтрации данных и может быть использован в автоматических системах мониторинга.

Ключевые слова: *ISED*, автоматическое детектирование, микросейсмические события, локальная сейсмическая сеть, зашумлённые записи, *STA/LTA*, временно-частотный анализ.

Введение. Автоматическое обнаружение сейсмических и микросейсмических событий является одной из ключевых задач инструментальной сейсмологии и систем мониторинга. Актуальность данной задачи обусловлена как ростом плотности сетей наблюдений, так и увеличением объёма регистрируемых данных. Для локальных сетей, особенно функционирующих в условиях высокой антропогенной нагрузки, характерны низкое отношение сигнал/шум и значительная доля слабых микросейсмических событий, что существенно осложняет применение классических алгоритмов детектирования.

Наиболее широко используемым методом автоматического обнаружения остаётся алгоритм отношения кратковременного и долговременного усреднения (*STA/LTA*), основанный на анализе изменений энергетических характеристик сигнала. Несмотря на простоту реализации и низкие вычислительные затраты, эффективность *STA/LTA* существенно снижается при работе с данными, характеризующимися низким отношением сигнал/шум и нестационарным фоновым шумом. В таких условиях выбор параметров окон усреднения и пороговых значений становится критически зависимым от конкретных условий регистрации, а универсальная параметризация оказывается невозможной. Кроме того, использование длительных окон долговременного усреднения приводит к систематической временной задержке оценки момента прихода фазы.

В связи с указанными ограничениями в последние годы активно исследуются альтернативные признаки, менее чувствительные к абсолютному уровню амплитуд сигнала. Одним из таких признаков является спектральная энтропия, характеризующая распределение энергии по частотам и отражающая степень упорядоченности спектральной структуры сигнала. Для сейсмических записей переход от фонового шума к волновому процессу сопровождается изменением спектрального распределения энергии, что приводит к характерной динамике спектральной энтропии. На основе данного свойства предложен метод мгновенной спектральной энтропии (*Instantaneous Spectral Entropy Detection, ISED*), показавший применимость для обнаружения микросейсмических событий в зашумлённых данных без обязательного предварительного фильтрования.

Параллельно с развитием классических методов в задачах автоматического детектирования широко применяются алгоритмы машинного обучения, включая глубокие нейронные сети. Несмотря на высокие показатели точности, данные методы требуют наличия

репрезентативных обучающих выборок и значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение в условиях локальных сетей с неоднородными характеристиками шума и ограниченным объёмом размеченных данных. В этой связи сохраняется интерес к гибридным алгоритмам, сочетающим физически интерпретируемые признаки с вычислительно простыми процедурами принятия решений.

В настоящей работе предлагается гибридный метод автоматического обнаружения микросейсмических событий, основанный на анализе временной эволюции нормализованной спектральной энтропии в сочетании с алгоритмом *STA/LTA*, применяемым к энтропийному временному ряду. В отличие от классической реализации, *STA/LTA* используется не для амплитудных характеристик сигнала, а для детектирования изменений в информационной структуре спектра. Для определения окончания события реализован адаптивный критерий, основанный на восстановлении базового уровня спектральной энтропии, что позволяет снизить влияние кратковременных флуктуаций и избежать искусственного дробления событий.

Метод апробирован на непрерывных записях локальной сети сейсмических станций, функционирующей в условиях повышенного уровня шума и высокой плотности микросейсмических событий. Предварительные исследования, выполненные с использованием классического *STA/LTA*, показали ограниченную эффективность амплитудно-ориентированного детектирования в рассматриваемых условиях и послужили основанием для выбора энтропийного признака в качестве основного детектирующего параметра. Цель настоящей работы – оценка применимости предложенного подхода для автоматического обнаружения микросейсмических событий и анализ его устойчивости при работе с зашумлёнными данными локальных сетей.

Материалы и методы.

Используемые сейсмические записи и условия анализа

В работе использовались архивные сейсмические записи локальной сети наблюдений, включающей девять стационарных станций. Анализ выполнялся по данным отдельных станций без применения сетевых процедур ассоциации событий.

Исходный набор данных представлен в виде отдельных временных фрагментов архивных записей. Длительность фрагментов и качество записей варьировали в зависимости от станции и условий регистрации. В анализируемых записях присутствуют как интервалы фонового шума, так и фрагменты, содержащие сейсмические события.

Для анализа использовались временные ряды скоростей колебаний, зарегистрированные на вертикальной компоненте. Обработка всех записей выполнялась с использованием единых параметров, что обеспечивало сопоставимость результатов при применении различных алгоритмов автоматического обнаружения.

Анализируемые записи характеризуются неоднородным уровнем фонового шума, обусловленным условиями установки станций и локальными источниками помех. В ряде случаев амплитуда полезного сигнала сопоставима с уровнем шума, что существенно усложняет задачу автоматического выявления момента начала события.

Базовый алгоритм автоматического обнаружения: *STA/LTA*

Для автоматического обнаружения сейсмических событий в непрерывных записях локальной сети в качестве базового детектора был использован классический алгоритм отношения кратковременного и долгосрочного усреднения (*STA/LTA*), широко применяемый в задачах первичного выявления сейсмических сигналов [1-3]. Алгоритм реализуется для одиночных временных рядов и ориентирован на регистрацию резких изменений амплитудных характеристик сигнала относительно фонового уровня.

В рамках метода для временного ряда $x(t)$ вычисляются два скользящих средних значения амплитудной или энергетической характеристики сигнала: кратковременное усреднение (*STA*) и долгосрочное усреднение (*LTA*). Кратковременное окно T_{STA} выбирается таким образом, чтобы быть чувствительным к быстрому росту энергии, характерному для прихода сейсмических фаз, тогда как долгосрочное окно T_{LTA} обеспечивает оценку текущего уровня фонового шума. В дискретном виде значения усреднений могут быть записаны как:

$$STA(n) = \frac{1}{N_{STA}} \sum_{k=n-N_{STA}}^n |x(k)|, LTA(n) = \frac{1}{N_{LTA}} \sum_{k=n-N_{LTA}}^n |x(k)|, \quad (1)$$

где N_{STA} и N_{LTA} – длины окон усреднения в отсчётах, соответствующие временам T_{STA} и T_{LTA} .

Детекторная функция определяется как отношение этих величин:

$$R(n) = \frac{STA(n)}{LTA(n)}, \quad (2)$$

и момент превышения заданного порогового значения R_{tr} интерпретируется как возможное начало сейсмического события. Для определения окончания события используется условие снижения значения $R(n)$ ниже более низкого порога отпускания, что позволяет избежать множественных срабатываний на одном и том же сигнале [1, 2].

Качество работы алгоритма STA/LTA в существенной степени определяется выбором длительностей окон усреднения и пороговых значений. Слишком короткое окно LTA приводит к потере устойчивости оценки фоновый уровня, тогда как чрезмерно длинное окно увеличивает задержку детекции и снижает чувствительность алгоритма к слабым событиям.

Методика автоматического обнаружения на основе мгновенной спектральной энтропии

В основе рассматриваемой методики лежит анализ изменений спектральной структуры сейсмического сигнала, возникающих при переходе от фоновый шума к сейсмическому событию. В классических алгоритмах автоматического обнаружения, таких как STA/LTA , решение о наличии события принимается на основе роста амплитуды или энергии сигнала относительно фоновый уровня [1-3]. Подобный подход показал высокую эффективность при умеренных уровнях шума, однако в условиях слабых микросейсмических сигналов и нестационарного шумовый фона его применимость оказывается ограниченной, что стимулировало развитие альтернативных признаков обнаружения, основанных на анализе частотно-временных характеристик сигнала [4-7].

Метод мгновенной спектральной энтропии использует представление спектральной мощности сигнала в виде нормированного распределения по частотам, что позволяет трактовать спектр как вероятностную меру и применять формализм информационной теории. Для каждого временного среза спектрального представления формируется распределение:

$$p(t, f) = \frac{S(t, f)}{\sum_f S(t, f)}, \quad (3)$$

где $S(t, f)$ – спектральная мощность сигнала. На его основе вычисляется спектральная энтропия Шеннона:

$$H(t) = - \sum_f p(t, f) \ln p(t, f), \quad (4)$$

характеризующая степень концентрации или рассеяния энергии в частотной области. Для устранения зависимости от числа частотных компонент используется нормированная форма энтропии:

$$H_n(t) = \frac{H(t)}{\ln N_f}, \quad (5)$$

где N_f – количество частотных бинов в заданном диапазоне [4, 5].

С точки зрения физической интерпретации, спектральная энтропия отражает степень структурированности спектра. В условиях фоновый шума энергия сигнала, как правило,

распределена относительно равномерно по частотам, что соответствует высоким значениям энтропии. Появление сейсмического события сопровождается формированием выраженной частотной структуры, связанной с доминированием определённых мод колебаний, что приводит к изменению распределения спектральной мощности и, соответственно, энтропии [4, 5]. Таким образом, изменение энтропии во времени может рассматриваться как индикатор перехода от шумового режима к волновому процессу.

Для учёта временной изменчивости фоновых условий вводится оценка базового уровня спектральной энтропии, вычисляемая по скользящему временному окну, превышающему характерную длительность анализируемых сигналов. Отклонение текущего значения энтропии от этого уровня:

$$\Delta H(t) = H_n(t) - H_{base}(t) \quad (6)$$

используется в качестве первичного признака обнаружения. Такой подход позволяет рассматривать событие не как абсолютное превышение фиксированного порога, а как относительное изменение спектральной структуры сигнала на фоне локального шума, что принципиально отличает энтропийный метод от энергетических алгоритмов [4].

Для формализации процедуры автоматического обнаружения временной ряд нормированной спектральной энтропии анализируется с использованием модифицированной схемы *STA/LTA*, в которой роль характеристической функции выполняет $H_n(t)$. В отличие от классического *STA/LTA*, применяемого к амплитудным или энергетическим характеристикам [1-3], данный вариант реагирует на изменение формы спектра, а не на рост энергии. Подобное сочетание энтропийного признака с адаптивным пороговым критерием позволяет унифицировать процедуру обнаружения и обеспечить сопоставимость результатов с традиционными алгоритмами, широко используемыми в сейсмологической практике [4, 6].

Момент начала события определяется устойчивым изменением энтропийного показателя относительно фонового уровня, зафиксированным в течение заданного временного интервала. Завершение события устанавливается по возврату энтропии к фоновым значениям либо по снижению энтропийного *STA/LTA* ниже порога отпускания, что позволяет корректно определить временные границы сигнала и избежать его искусственного дробления. Следует отметить, что в отличие от энергетических методов, ориентированных на максимум амплитуды, энтропийный подход чувствителен к ранним стадиям формирования спектральной структуры сигнала, что делает его перспективным для задач фазовой идентификации и анализа слабых событий [4, 5, 7].

Результаты.

Оценка работы алгоритма *STA/LTA*

В рамках апробации особое внимание уделялось этапу предобработки, в частности, выбору полосы частот, в которой алгоритм демонстрирует наибольшую устойчивость. Анализ показал, что использование полосовой фильтрации в диапазоне 0,8-16 Гц позволяет существенно снизить влияние низкочастотных трендов и высокочастотных шумовых компонентов, не затрагивая при этом основную энергетическую часть микросейсмических сигналов. Данная полоса частот использовалась далее, как базовая для всех расчётов *STA/LTA*.

Апробация алгоритма осуществлялась в виде последовательного перебора параметров, включающего варьирование длительности окон кратковременного и долговременного усреднений, а также порогового значения отношения *STA/LTA*. В расчётах рассматривались значения T_{STA} в диапазоне 0,4-0,8 с и T_{LTA} в диапазоне 20-60 с. Пороговое значение отношения *STA/LTA* изменялось в интервале 2,6-3,6. Для каждого набора параметров алгоритм применялся к непрерывным участкам записи, после чего анализировались результаты детектирования.

Валидация реализации *STA/LTA* выполнялась на выборке из 214 сейсмических событий, отобранных по данным каталога локальной сети. В качестве эталонной разметки использовались результаты ручной обработки записей, включающей визуальное обнаружение событий и ручную пикировку фаз. Каталогные времена прихода рассматривались как опорные при оценке корректности автоматического детектирования.

В результате последовательного перебора параметров установлено, что наилучшие результаты детектирования для рассматриваемых данных достигаются при использовании следующей конфигурации алгоритма: длительность окна кратковременного усреднения

$STA = 0,6$ с, длительность окна долговременного усреднения $LTA = 25$ с, пороговое значение отношения $STA/LTA = 3,3$. Указанная параметризация обеспечивала наиболее устойчивую работу алгоритма на непрерывных интервалах записи и использовалась далее при оценке качества детектирования. Пример работы алгоритма STA/LTA для выбранной конфигурации параметров и полосы частот приведён на рис. 1.

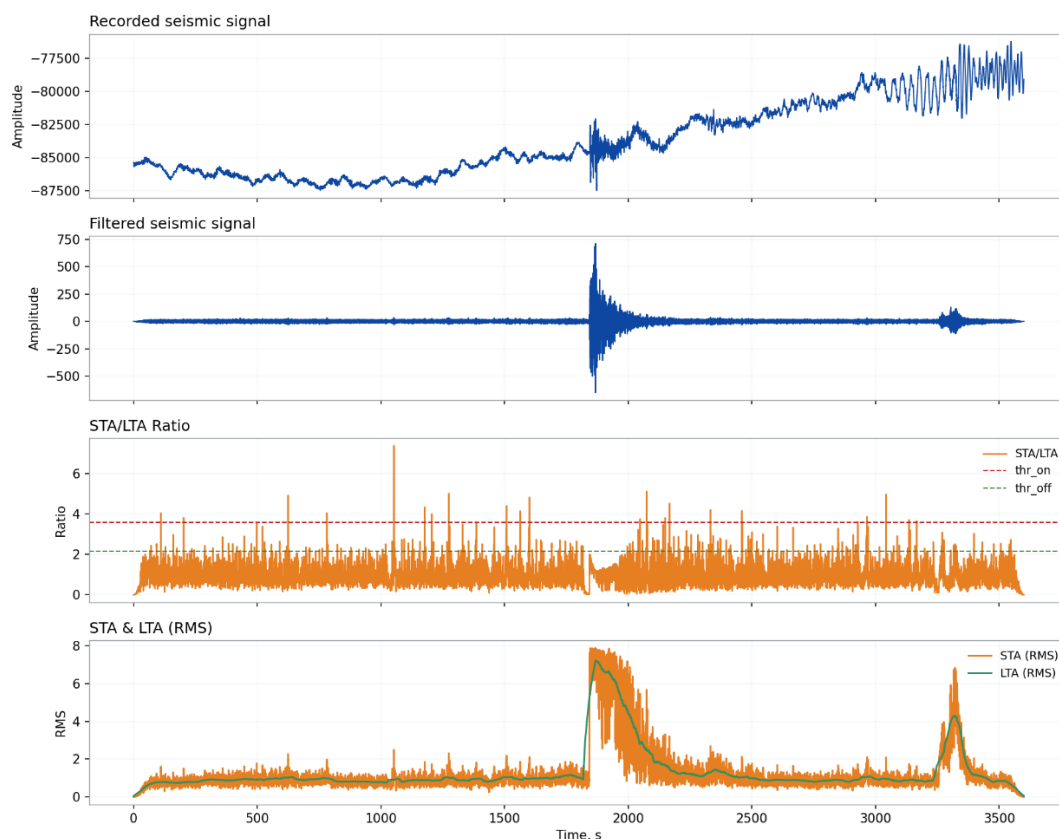


Рис. 1. Пример работы алгоритма STA/LTA на часовом фрагменте записи вертикальной компоненты.
Fig. 1. Example of the STA/LTA algorithm applied to a one-hour segment of the vertical component recording.

Анализ метрик качества показал, что даже при оптимальной параметризации алгоритм STA/LTA демонстрирует ограниченные значения точности и полноты, характерные для амплитудно-ориентированных детекторов в зашумлённых условиях. Снижение порогового значения приводит к росту полноты за счёт увеличения числа ложных срабатываний, тогда как более строгие параметры сопровождаются пропуском слабых микросейсмических событий.

Выявленные ограничения амплитудного детектирования обосновывают целесообразность использования гибридных подходов автоматического обнаружения, сочетающих классические методы STA/LTA с дополнительными информативными признаками, обладающими меньшей чувствительностью к нестационарным шумовым условиям.

Применение метода $ISED$

Для оценки применимости и эффективности метода автоматического обнаружения на основе мгновенной спектральной энтропии ($ISED$) были использованы архивные сейсмические записи локальной сети наблюдений, характеризующиеся неоднородным уровнем фонового шума и различной выраженностью полезных сигналов. Такие условия типичны для локального мониторинга и представляют наибольшую сложность для классических энергетических алгоритмов автоматического детектирования.

Как следует из анализа, представленного на рис. 2, появление сейсмического события сопровождается не только ростом амплитуды сигнала, но и выраженной перестройкой его частотно-временной структуры. Эта перестройка отражается в динамике нормированной мгновенной спектральной энтропии, которая демонстрирует отчётливое отклонение от фонового уровня уже на ранней стадии формирования волнового процесса. В условиях, когда амплитуда полезного сигнала сопоставима с уровнем шума, энтропийный показатель сохраняет чувствительность к началу события за счёт реакции на изменение спектральной организации сигнала.

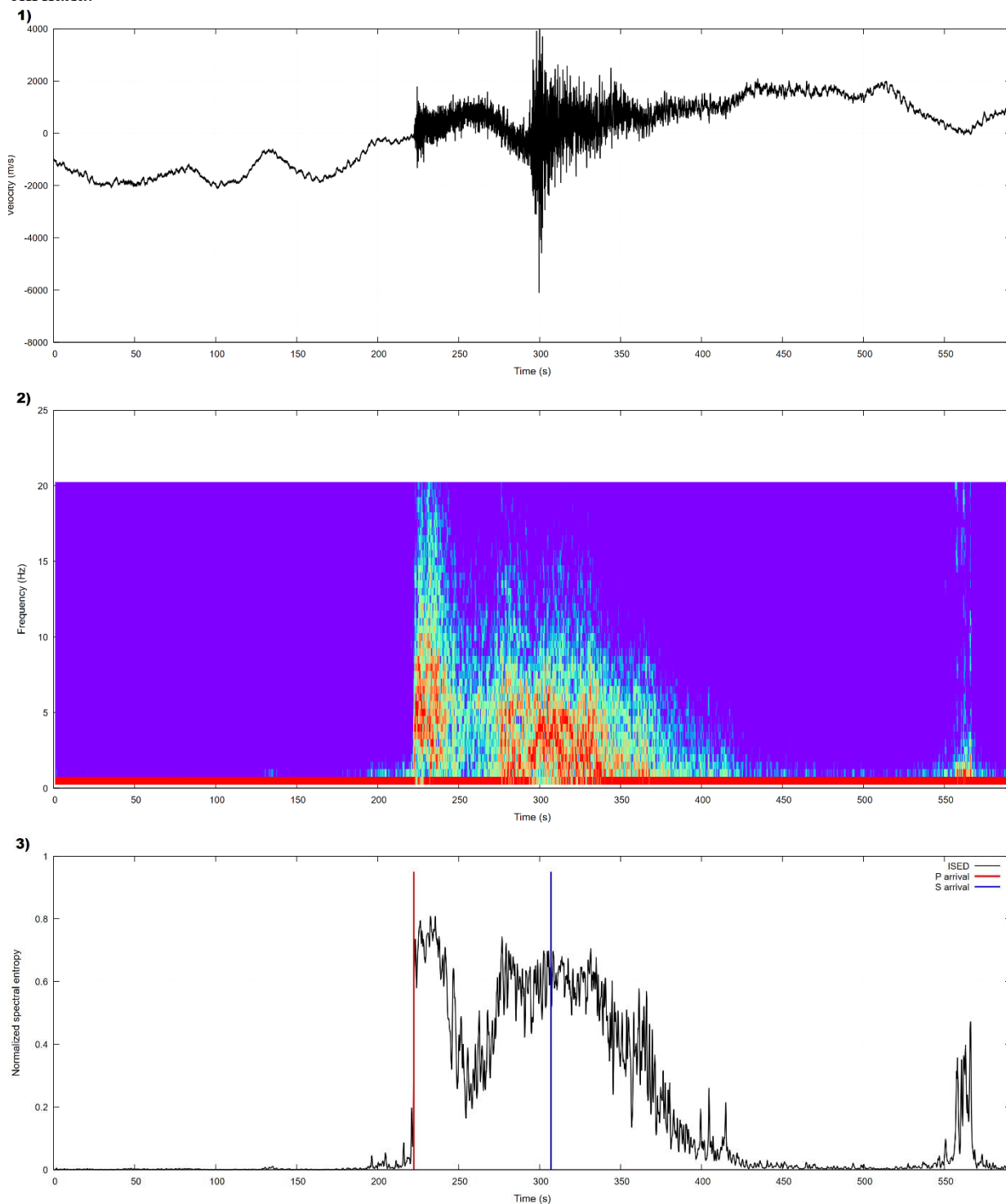


Рис. 2 Иллюстрация работы метода мгновенной спектральной энтропии на реальной сейсмической записи: 1 – временной ряд вертикальной компоненты сейсмического сигнала; 2 – соответствующая спектрограмма; 3 – нормированная мгновенная спектральная энтропия с отмеченными моментами прихода *P*- и *S*-волн, определёнными методом *ISED*.

Fig. 2. Illustration of the instantaneous spectral entropy method applied to a real seismic record: 1 – time series of the vertical component of the seismic signal; 2 – the corresponding spectrogram; 3 – normalized instantaneous spectral entropy with the *P*- and *S*-wave arrival times identified using the *ISED* method.

На рис. 3 показан полосно-фильтрованный (4-7 Гц) фрагмент вертикальной компоненты сейсмической записи с отмеченными моментами прихода P - и S -волн, определёнными методами $ISED$ и STA/LTA . В рассматриваемом примере алгоритм STA/LTA фиксирует приход P -волны на более раннем участке записи, соответствующем кратковременному увеличению амплитуды сигнала на фоне шума.

Отметка прихода P -волны, полученная методом $ISED$, расположена в моменте, предшествующем формированию основного амплитудного максимума сигнала. Аналогичное различие наблюдается и при определении прихода S -волны: отметка STA/LTA соответствует более раннему амплитудному всплеску, тогда как отметка $ISED$ приурочена к началу основного высокоамплитудного участка записи.

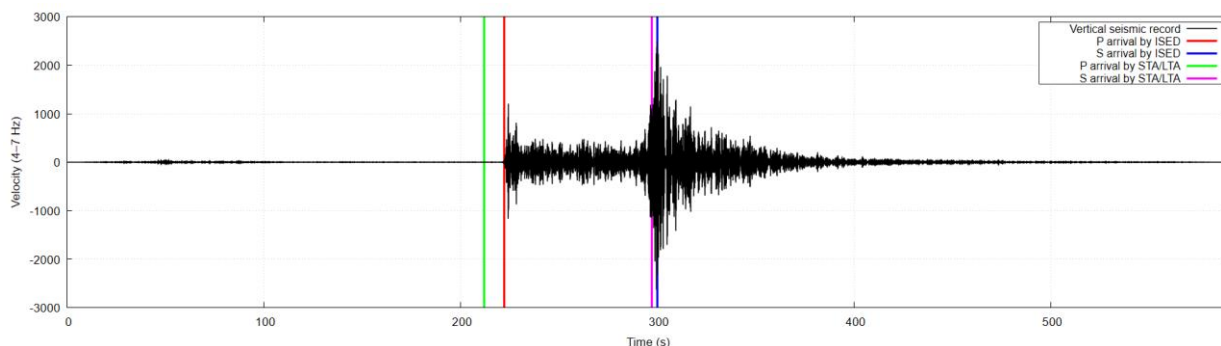


Рис. 3. Сравнение определения моментов прихода P - и S -волн методами мгновенной спектральной энтропии ($ISED$) и STA/LTA на полосно-фильтрованной (4–7 Гц) вертикальной компоненте сейсмической записи.

Fig. 3. Comparison of P - and S -wave arrival time picking using the instantaneous spectral entropy ($ISED$) and STA/LTA methods on the band-pass-filtered (4–7 Hz) vertical component of the seismic record.

Обсуждение и выводы. В работе рассмотрен метод детектирования микросейсмических событий на основе мгновенной нормированной спектральной энтропии ($ISED$), применяемый совместно с классическим алгоритмом STA/LTA . Результаты показывают, что использование энтропийных характеристик позволяет повысить чувствительность обнаружения событий в условиях интенсивного и нестационарного фонового шума. В отличие от амплитудных критериев, спектральная энтропия реагирует на изменение частотной структуры сигнала, что обеспечивает более раннее выявление начала сейсмического события, включая слабые микрособытия.

Применение гибридного подхода $ISED$ – STA/LTA способствует более устойчивому выделению событий и снижает вероятность их фрагментации. Метод продемонстрировал способность корректно определять границы событий без обязательного предварительного полосового фильтрации, что упрощает автоматическую обработку и повышает универсальность алгоритма при работе с различными типами записей. Полученные результаты подтверждают практическую применимость $ISED$ как эффективного признака для автоматического мониторинга локальной сейсмичности.

Вместе с тем установлено, что эффективность метода зависит от параметров временно-частотного анализа и выбора частотного диапазона, что требует адаптации алгоритма к конкретным условиям регистрации. Кроме того, анализ выполнялся преимущественно на данных одиночных станций, что ограничивает возможности снижения ложных срабатываний за счёт пространственной корреляции. При резких изменениях спектральных характеристик шума возможны ложные отклики энтропийного показателя, однако данное ограничение может быть уменьшено при использовании дополнительных критериев подтверждения события.

Применение мгновенной нормированной спектральной энтропии в сочетании с STA/LTA – это перспективный и вычислительно доступный подход для автоматического обнаружения микросейсмических событий. Дальнейшее развитие метода целесообразно связать с адаптивным подбором параметров, расширением на многостанционные конфигурации и интеграцией с алгоритмами точного пикирования фаз, что позволит повысить надёжность детектирования и качество формируемых сейсмических каталогов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Allen R.V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1978. - Vol. 68. - № 5. - P. 1521-1532.
2. Baer M., Kradolfer U. An automatic phase picker for local and teleseismic events // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1987. - Vol. 77. - № 4. - P. 1437-1445.
3. Trnkoczy A. Understanding and setting STA/LTA trigger algorithm parameters for the K2 // Application Note No. 41. - Kinematics, 1998.
4. da Silva S.L.E.F., Corso G. Microseismic event detection in noisy environments with instantaneous spectral Shannon entropy // Physical Review E. - 2022. - Vol. 106. Art. 014133. DOI: 10.1103/PhysRevE.106.014133.
5. Skabylov A., Agishev A., Zhexabay D., Ibraimov M., Khokhlov S., Maksutova A. The application of spectral entropy to P-wave detection in continuous seismogram analysis // Applied Sciences. - 2025. - Vol. 15. - № 15. - Art. 8718. DOI: 10.3390/app15158718.
6. Fang Z., Cheng H., Wang X., Luo C. Research on STA/LTA microseismic arrival time-picking method based on variational mode decomposition // Applied Sciences. - 2025. - Vol. 15. - Art. 13220. DOI: 10.3390/app152413220.
7. Ho L.M., Walter J.I., Hansen S.E., Sánchez-Roldán J.L., Peng Z. Evaluating automated seismic event detection approaches: An application to Victoria Land, East Antarctica // Journal of Geophysical Research: Machine Learning and Computation. - 2024. - Vol. 1. - e2024JH000185. DOI: 10.1029/2024JH000185.
8. Anikiev D., Birnie C., bin Waheed U., Alkhalifah T., Gu C., Verschuur D. J., Eisner L. Machine learning in microseismic monitoring // Earth-Science Reviews. - 2023. - Vol. 239. - Art. 104371. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104371.
9. Sotolongo-Costa O., Mora-Ramos M. Role of non-extensivity q-parameter in tectonic seismic forecasting // arXiv preprint. - 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2508.04932.

Yuqori shovqinli lokal seysmik stansiyalar tarmog'i sharoitida mikroseysmik hodisalarni detektorlash uchun oniy spektral entropiya (ISED) usulini qo'llash

T.U. Mamarazikov, S.B. Xalbayev, B.G. Alimov, T.S. Kurbanov, J.Z. Kodirov

Annotatsiya. Mazkur ishda yuqori shovqinli sharoitlarda faoliyat yurituvchi lokal seysmik stansiyalar tarmog'ining arxiv yozuvlarida mikroseysmik hodisalarni avtomatik detektorlash uchun oniy spektral entropiya usuli (Instantaneous Spectral Entropy Detection, ISED) qo'llanilishi ko'rib chiqilgan. Ushbu usul qisqa vaqtli spektral oynalar asosida hisoblangan normallashtirilgan spektral entropiyaning vaqt bo'yicha evolyutsiyasini tahlil qilishga asoslanadi va seysmik hodisa paydo bo'lishi bilan bog'liq bo'lgan chastota-vaqt tuzilmasidagi o'zgarishlarni aniqlashga yo'naltirilgan. Detektorlash jarayonini formalashtirish maqsadida ISED–STA/LTA gibril sxemasi ishlab chiqilgan bo'lib, unda qisqa va uzoq muddatli o'rtachalash algoritmi entropiya belgisiga tatbiq etiladi. Taklif etilgan yondashuv dastlabki ma'lumotlarni oldindan filtrlashsiz ham seysmik hodisalarni barqaror aniqlash imkonini berishi va avtomatik seysmik monitoring tizimlarida qo'llanishi mumkinligi ko'rsatib berilgan.

Kalit so'zlar: ISED, avtomatik detektorlash, mikroseysmik hodisalar, lokal seysmik tarmoq, shovqinli yozuvlar, STA/LTA, vaqt–chastota tahlili.

Application of Instantaneous Spectral Entropy (ISED) for Microseismic Event Detection in Highly Noisy Local Seismic Network Conditions

T.U. Mamarazikov, S.B. Khalbayev, B.G. Alimov, T.S. Kurbanov, J.Z. Kodirov

Abstract: This paper investigates the application of the Instantaneous Spectral Entropy Detection (ISED) method for the automatic detection of microseismic events in archival records of a local seismic station network operating under high-noise conditions. The method is based on the analysis of the temporal evolution of normalized spectral entropy calculated over short-time windows of the spectrogram and is aimed at identifying changes in the time–frequency structure of the signal associated with the occurrence of seismic events. To formalize the detection procedure, a hybrid ISED–STA/LTA scheme is implemented, in which the short-term and long-term averaging algorithm is applied to the entropy-based feature. The results demonstrate that the proposed approach enables robust event detection without prior data filtering and can be effectively used in automated seismic monitoring systems.

Key words: ISED, automatic detection, microseismic events, local seismic network, noisy records, STA/LTA, time–frequency analysis.

УДК 550.34

**СОВРЕМЕННАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ И РИСКА:
НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ДИСКУССИОННЫЕ ВОПРОСЫ**

*(по материалам секции S10 «Seismic Hazard and Risk Assessment»
16-й Генеральной Ассамблеи Азиатской Сейсмологической Комиссии,
25-30 апреля 2026 г., Ташкент)*

Т.Л. Ибрагимова

*Институт сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан
tam.anay@yahoo.com*

Аннотация. Рассматривается экспертный анализ тенденций трансформации методов оценки сейсмической опасности и риска, выявленных в ходе работы секции S10 «Seismic Hazard and Risk Assessment» 16-й Генеральной Ассамблеи Asian Seismological Commission (ASC-2026, Ташкент). Показано, что сейсмология переживает переход от традиционных схем сейсмического районирования к комплексным риск-ориентированным моделям, интегрирующим вероятностные методы, сценарное моделирование, цифровой мониторинг, анализ уязвимости и оценку последствий землетрясений. Выделены ключевые направления трансформации современной парадигмы оценки сейсмической опасности и риска: развитие вероятностного анализа и логических деревьев, усиление роли локальных грунтовых условий, переход к моделированию на уровне городов, цифровизация систем мониторинга и внедрение технологий искусственного интеллекта, формирование в Центральной Азии новой региональной платформы исследований сейсмического риска и интеграции трансграничных систем мониторинга.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, сейсмический риск, PSHA, логическое дерево, микрорайонирование, сценарное землетрясение, сильные движения грунта, Vs30, цифровой мониторинг, искусственный интеллект, Центральная Азия.

Введение. Оценка сейсмической опасности на протяжении многих десятилетий являлась одной из ключевых задач сейсмологии и сейсмостойкого строительства. Формирование современных подходов к анализу сейсмической опасности связано прежде всего с развитием вероятностных методов оценки сейсмического воздействия, заложенных в классической работе С.Сорнелла [Cornell, 1968] и позднее развитых в исследовании Р.МакГуайра [McGuire, 2004]. Вероятностный анализ сейсмической опасности (PSHA) стал методологической основой большинства нормативных систем сейсмического районирования и инженерной оценки воздействий.

В течение длительного времени основное внимание уделялось построению карт общего сейсмического районирования, определению вероятностей превышения нормативных параметров движения грунта и разработке расчетных моделей сейсмических воздействий. Однако в последние десятилетия развитие урбанизированных территорий, усложнение инфраструктурных систем и рост потенциального социально-экономического ущерба от землетрясений привели к существенному расширению самой концепции сейсмической опасности: исследования все чаще ориентированы не только на расчет параметров движения грунта, но и на оценку уязвимости сооружений, сценариев разрушений и последствий землетрясений [Bommer, Scherbaum, 2008; Silva et al., 2020; Hoyos, Hernandez, 2022 и др.].

Дополнительный импульс развитию этих подходов дали исследования в области логических деревьев, эпистемических неопределенностей, сценарного моделирования землетрясений, анализа сильных движений грунта и локальных грунтовых условий [Kotha et al., 2017; Poudel et al., 2023]. В результате сейсмология постепенно переходит от традиционных схем нормативного районирования к комплексным риск-ориентированным

моделям, интегрирующим вероятностный анализ, физическое моделирование, инженерную оценку уязвимости, цифровой мониторинг и методы искусственного интеллекта.

Особенно актуальны данные процессы для стран Центральной Азии, относящихся к числу наиболее сейсмоактивных внутриконтинентальных регионов Евразии. Высокая концентрация населения и инфраструктуры в крупных городах региона, сложные инженерно-геологические условия, наличие активных разломов и трансграничный характер крупнейших сейсмоактивных зон требуют развития подходов к оценке опасности и риска, основанных на интеграции региональных и международных научно-методических решений.

Важной площадкой обсуждения актуальных тенденций развития сейсмологии стала 16-я Генеральная Ассамблея Азиатской Сейсмологической Комиссии (ASC-2026), состоявшаяся в Ташкенте 25-30 апреля 2026 г. Особый интерес представляет секция S10 «Seismic Hazard and Risk Assessment», объединившая исследования, посвященные вероятностному анализу сейсмической опасности, сценарному моделированию землетрясений, локальным грунтовым условиям, оценке уязвимости и риска, моделированию сильных движений грунта и цифровым технологиям мониторинга.

Цель настоящей работы состоит в выявлении и анализе основных тенденций развития подходов к оценке сейсмической опасности и риска на основе материалов секции S10 ASC-2026, одним из модераторов которой являлся автор статьи.

Материалы и методы исследования. В рамках анализа были рассмотрены материалы как непосредственно включенные в секцию S10, так и отдельные работы из смежных секций, затрагивающие вопросы оценки сейсмической опасности, сейсмического риска, сильных движений грунта, цифрового мониторинга, применения методов искусственного интеллекта и пространственного моделирования (всего порядка 40 докладов и постеров). Действительно, исследования сейсмической опасности и риска носят междисциплинарный характер и развиваются на стыке инженерной сейсмологии, геофизики, геодинамики, цифрового мониторинга и анализа больших данных.

Методологической основой работы являлся сравнительно-аналитический обзор представленных материалов. Анализ проводился не на уровне детального рецензирования отдельных исследований, а на уровне выявления общих научных тенденций, методологических подходов и дискуссионных направлений развития оценки сейсмической опасности и риска. Сборник рефератов Ассамблеи [www.asc2026.uz] отражает широкий спектр исследований, различающихся по уровню детализации, используемым методикам и степени практической реализации. В связи с этим выводы настоящей работы направлены прежде всего на выявление доминирующих научных тенденций и концептуальных изменений в современной сейсмологии, а не на сопоставление точности отдельных моделей или результатов конкретных исследований.

Тематическая структура секции S10 представлена исследованиями нескольких устойчивых тематических направлений, отражающих трансформацию подходов к оценке сейсмической опасности и риска. Содержание секции демонстрирует постепенный переход от традиционного нормативного районирования к комплексным риск-ориентированным моделям, объединяющим вероятностный анализ, физическое моделирование, инженерную оценку уязвимости, локальные грунтовые условия и цифровые технологии мониторинга.

Основные тенденции развития современных подходов к оценке сейсмической опасности и риска

Развитие вероятностного анализа сейсмической опасности (PSHA) и логических деревьев. Одним из ключевых направлений, представленных в материалах секции S10 ASC-2026, остается развитие вероятностного анализа сейсмической опасности (PSHA), который продолжает рассматриваться как базовая методологическая основа нормативной оценки сейсмических воздействий. Нынешние исследования развивают классические подходы

[Cornell, 1968; McGuire, 2004], однако одновременно демонстрируют существенное усложнение структуры PSHA.

В ряде докладов PSHA использовался для расчета кривых опасности, унифицированных спектров опасности (UHS), спектральных ускорений и вероятностей превышения расчетных уровней воздействий для различных регионов и инженерных объектов [Shanker, Soni, 2026; Murodkulov, 2026; Poggi et al., 2026]. Одновременно PSHA все чаще рассматривают не как статическую нормативную процедуру, а как систему вероятностного описания множества допустимых сценариев с учетом неопределенностей моделей. Значительное внимание уделялось анализу эпистемических неопределенностей, использованию логических деревьев и оценке чувствительности результатов к выбору моделей источников, законов затухания и параметров сейсмичности. В работах, посвященных Узбекистану и Центральной Азии [Ibragimov et al., 2026], подчеркивается, что именно неопределенность параметров активных разломов, ограниченность длинных инструментальных рядов и неоднородность исторических каталогов существенно влияют на устойчивость результатов PSHA. На наш взгляд, анализ докладов свидетельствует, что неопределенности постепенно начинают рассматриваться не как «нежелательная погрешность», а как неотъемлемая часть оценки опасности [Mirzaev et al., 2026; Changlong et al., 2026].

Сценарное моделирование землетрясений. По материалам секции S10 можно проследить постепенное усиление роли сценарного моделирования землетрясений как дополнения к классическому PSHA. Если вероятностный анализ ориентирован преимущественно на усредненные характеристики опасности, то сценарный подход позволяет описывать физически реалистичные разрушительные землетрясения и их последствия для конкретных территорий и объектов, например, для Ташкента [Mirzaev et al., 2026] данная тенденция проявилась в выборе сценарных землетрясений и оценке проектных параметров сильных движений, продемонстрировав переход от абстрактных нормативных параметров к физически интерпретируемым сценариям потенциальных разрушительных событий.

Параллельно усиливается интеграция вероятностных и сценарных подходов. Современный PSHA все чаще дополняется деагрегацией опасности, позволяющей выделять доминирующие сценарии землетрясений, определяющие расчетные уровни воздействий [Mirzaev et al., 2026; Zhang et al., 2026a, 2026b]. Подобная интеграция отражает общий переход сейсмологии от статистического описания опасности к моделированию потенциальных последствий землетрясений. Особое значение сценарное моделирование приобретает для крупных урбанизированных территорий Центральной Азии, где высокая плотность застройки и сложные инженерно-геологические условия требуют перехода от региональных оценок к площадному моделированию воздействий.

Локальные грунтовые условия и микрорайонирование. Одной из наиболее устойчивых тенденций оценки сейсмической опасности, по-видимому, является усиление внимания к локальным грунтовым условиям и их влиянию на параметры ожидаемых сейсмических воздействий, что соответствует актуальным международным исследованиям [Kotha et al., 2017]. В материалах секции значительное место уделено определению параметра $Vs30$, моделированию локального отклика грунтов и сопоставлению различных подходов к учету грунтовых эффектов. В частности, сравнительному анализу трех подходов к учету локальных грунтовых условий при оценке опасности [Jumaev, Ismailov, 2026], взаимосвязи рельефа и $Vs30$ в вулканических районах Армении [Zhou et al., 2026].

Характерно, что параметр $Vs30$ постепенно приобретает статус одного из центральных элементов модели опасности. Одновременно возрастает роль методов пространственного картирования $Vs30$, включая микротреморные исследования, MASW, HVSR и использование данных дистанционного зондирования, что особенно необходимо для крупных городов Центральной Азии, расположенных в межгорных впадинах и на мощных осадочных толщах.

Важным направлением является и развитие городского микрорайонирования, постепенный переход от региональных оценок опасности к детализированным моделям городской среды [Chimed, Munkhjargal, 2026].

Переход от оценки опасности к оценке риска. Представляется, что одной из наиболее существенных тенденций современной сейсмологии является постепенный переход от оценки собственно сейсмической опасности к оценке сейсмического риска и последствий землетрясений. Традиционный подход был ориентирован главным образом на определение вероятности превышения заданных параметров движения грунта – прежде всего PGA или интенсивности. Такая модель долгое время оставалась достаточной для нормативного проектирования. Однако PGA не способен адекватно характеризовать воздействие на сооружения с различными собственными периодами колебаний [Shanker, Soni, 2026; Pavlenko, Pavlenko, 2026]. Сам по себе уровень ускорений еще не определяет масштаб потенциальных последствий землетрясения. Материалы секции S10 показывают, что современные исследования все чаще ориентированы уже не только на параметры движения грунта, но и на уязвимость сооружений, инфраструктуры и урбанизированных территорий.

Данная тенденция отчетливо прослеживается в работах, посвященных оценке городского риска на основе EMS-98 [Tulaganov et al., 2026], уязвимости транспортной инфраструктуры [Mansurov, 2026] и оценке уязвимости существующих жилых зданий Ташкента [Avazov, Azamjonov, 2026].

Фактически сейсмология постепенно переходит от «оценки воздействия» к «оценке последствий». При этом риск начинает рассматриваться как результат взаимодействия трех основных факторов: уровня сейсмического воздействия, уязвимости сооружений и социально-экономической экспозиции. В этом отношении особенно показателен опыт оперативной оценки ущерба, представленный турецкими исследователями [Aktuğ et al., 2026], где модели сейсмических воздействий интегрируются с базами данных зданий, функциями уязвимости и GIS-системами. Подобные исследования отражают актуальный глобальный тренд сейсмологии, связанный с формированием систем комплексного управления сейсмическим риском.

Развитие моделей сильных движений грунта. Существенные изменения происходят и в области моделирования сильных движений грунта. Если ранее основным инструментом оценки воздействий являлись преимущественно эмпирические GMPE-зависимости, то текущие исследования демонстрируют постепенный переход к более физически обоснованным моделям волнового поля. В материалах секции активно обсуждались вопросы 3D-моделирования волнового поля, широкополосного моделирования сейсмических воздействий, гибридных методов расчёта, подхода NDSHA (Neo-Deterministic Seismic Hazard Assessment), в рамках которого оценка опасности основана не только на вероятностных зависимостях, но и на физическом моделировании реалистичных сценариев землетрясений и волнового поля, а также сценарного моделирования землетрясений [Kossobokov et al., 2026; Zhang et al., 2026; Wang, 2026; Li et al., 2026]. Это свидетельствует о постепенном переходе от статистического описания движений к физическому моделированию процесса распространения волн. Особенно важным данный переход становится для крупных городов, расположенных в сложных геологических условиях, где одномерные модели уже недостаточны.

Параметры сильных движений в ближней и дальней зонах, а также развитие региональных баз сильных движений для Центральной Азии, в частности, сравнение этих параметров в ближней и дальней зоне [Erteleva, 2026], создание базы сильных движений Центральной Азии и гармонизация моделей опасности Казахстана с Eurocode [Silacheva et al., 2026] также обсуждались в материалах секции.

Без развития региональных баз сильных движений невозможна адаптация GMPE-моделей и корректная калибровка параметров воздействий для конкретных тектонических условий, и материалы ASC-2026 демонстрируют, что Центральная Азия постепенно

формирует собственную научно-методическую инфраструктуру в области исследования сильных движений грунта.

В целом исследования, представленные в секции S10, отражают формирование новой междисциплинарной парадигмы оценки сейсмической опасности, основанной на интеграции вероятностного моделирования, сценарного анализа, инженерной оценки риска, цифрового мониторинга и моделей сильных движений грунта.

Обсуждение и выводы Современное развитие методов оценки сейсмической опасности сопровождается не только существенным усложнением моделей, но и сохранением ряда фундаментальных методологических проблем. Это касается как ограничений вероятностного анализа сейсмической опасности (PSHA), так и вопросов применимости сценарных подходов, устойчивости логических деревьев, интерпретации AI-моделей и физической обоснованности схем параметризации сейсмических источников.

Ограничения PSHA: несмотря на широкое распространение PSHA как базового инструмента нормативной оценки сейсмических воздействий, материалы секции показывают, что результаты вероятностного анализа существенно зависят от исходных предположений моделей. Данная проблема особенно отчетливо проявляется в исследованиях, посвященных эпистемическим неопределенностям и логическим деревьям. Наиболее показательной в этом отношении является работа, посвященная анализу чувствительности результатов PSHA в Узбекистане к эпистемическим неопределенностям [Ibragimov et al., 2026]. Исследование демонстрирует, что вариации моделей источников, законов затухания и параметров сейсмичности способны существенно изменять итоговые уровни расчетной опасности. Подобные результаты соответствуют более широким международным дискуссиям о роли неопределенностей в PSHA [Bommer, Scherbaum, 2008]. Неопределенность является не временным недостатком данных, а фундаментальным свойством оценки сейсмической опасности. При этом увеличение сложности моделей и числа ветвей логических деревьев далеко не всегда приводит к повышению надежности результатов. Напротив, чрезмерное усложнение моделей может создавать иллюзию высокой точности при фактическом росте диапазона неопределенности. Для Центральной Азии данная проблема приобретает особое значение вследствие ограниченности длинных инструментальных рядов, неоднородности исторических каталогов и недостаточной изученности активных разломов. В этих условиях даже небольшие изменения исходных предположений способны приводить к существенным вариациям результатов PSHA.

Дискуссия о площадных и разломно-ориентированных моделях источников: одним из наиболее дискуссионных вопросов современной оценки опасности остается параметризация сейсмических источников. Традиционные площадные модели продолжают широко использоваться благодаря относительной простоте реализации и возможности работы в условиях ограниченной информации. Однако последние исследования все чаще указывают на недостаточную физическую обоснованность данного подхода, о пределах применимости площадных моделей для регионов со сложной активной тектоникой и неоднородной структурой сейсмичности [Tatevossian et al., 2026]. Параллельно возрастает интерес к разломно-ориентированным моделям, позволяющим более физически обоснованно описывать потенциальные очаговые зоны. Однако их использование также сталкивается с существенными ограничениями, связанными с недостатком палеосейсмологических, геодезических и геоморфологических данных. Особенно актуальна данная проблема для Центральной Азии, где многие активные разломы остаются недостаточно изученными [Bykova, Tatevossian, 2026].

Соотношение вероятностных и сценарных подходов: анализ докладов секции S10 демонстрирует продолжающуюся дискуссию относительно соотношения вероятностных и сценарных методов оценки опасности. Классический PSHA обеспечивает нормативную сопоставимость результатов и удобен для инженерного проектирования, однако часто плохо отражает физическую структуру конкретных разрушительных землетрясений. В свою очередь

сценарное моделирование позволяет формировать физически интерпретируемые картины воздействий и последствий [Mirzaev et al., 2026]. Однако сценарный подход также обладает существенными ограничениями, поскольку результаты во многом зависят от выбора конкретного сценария и параметров моделирования. Фактически, наука находится в поиске компромисса между статистической устойчивостью вероятностных моделей и физической реалистичностью сценарных подходов. При этом единая методология интеграции PSHA и сценарного моделирования пока окончательно не сформирована.

Ограничения современных моделей сильных движений: серьезные дискуссии сохраняются и в области моделирования сильных движений грунта. На протяжении длительного времени основным инструментом оценки воздействий оставались эмпирические GMPE-зависимости. Однако новые исследования все чаще указывают на ограничения такого подхода, особенно для сложных геологических условий и ближних зон, поскольку характер волнового поля существенно меняется в зависимости от положения площадки относительно очага землетрясения [Erteleva, 2026]. Это свидетельствует о необходимости более физически обоснованного моделирования сильных движений.

Дополнительной проблемой для Центральной Азии остается ограниченность региональных баз сильных движений. Хотя в данном направлении и имеется прогресс [Silacheva et al., 2026], региональная наблюдательная база по-прежнему существенно уступает наиболее изученным сейсмоактивным регионам мира.

Ограничения AI-подходов и цифровых моделей: существенное внимание в настоящее время уделяется применению искусственного интеллекта и методов машинного обучения. Однако материалы Ассамблеи показывают, что большинство AI-моделей по-прежнему опирается преимущественно на статистические зависимости в обучающих выборках, и поэтому в регионах с ограниченными каталогами землетрясений и неоднородными системами наблюдений AI-модели могут демонстрировать высокую точность на локальных обучающих выборках, но обладать низкой устойчивостью при переносе на другие территории или новые типы событий. Кроме того, автоматизация анализа больших массивов данных создает опасность подмены физически интерпретируемых моделей статистическими корреляциями, не имеющими достаточного геофизического обоснования.

Переход от оценки опасности к оценке риска, новые неопределенности: материалы секции S10 показывают, что современная сейсмология постепенно переходит от оценки параметров воздействия к моделированию последствий землетрясений [Tulaganov et al., 2026; Mansurov, 2026; Avazov, Azamjonov, 2026]. Однако подобный переход сопровождается появлением новых источников неопределенности. Вместе с тем достоверность подобных моделей существенно зависит от качества баз данных сооружений, полноты информации о конструктивных типах зданий и корректности используемых функций уязвимости.

Для стран Центральной Азии данная проблема особенно актуальна вследствие неоднородности городской застройки, ограниченности инженерных баз данных и наличия значительного числа существующих зданий, не соответствующих актуальным сейсмостойким требованиям.

Таким образом, по материалам секции S10 ASC-2026 можно сделать вывод о том, что современная оценка сейсмической опасности и риска находится в состоянии активного методологического развития. С одной стороны, наблюдается существенный прогресс в области перехода от традиционных схем нормативного районирования к комплексным риск-ориентированным моделям, объединяющим вероятностный анализ (PSHA), сценарное моделирование землетрясений, анализ сильных движений грунта, локальные грунтовые условия, оценку уязвимости и цифровые технологии мониторинга, ориентируясь не только на расчет параметров сейсмического воздействия, но и на оценку потенциальных последствий землетрясений для урбанизированных территорий и критически важной инфраструктуры. С другой стороны, рост сложности моделей сопровождается увеличением числа неопределенностей и сохраняет необходимость критического подхода к интерпретации

результатов, особенно при их практическом использовании в инженерных и нормативных приложениях.

Для Центральной Азии данные проблемы имеют особое значение вследствие сложной тектоники региона, ограниченности длинных инструментальных рядов и высокой уязвимости быстро развивающихся городских территорий. В этих условиях формирование региональной платформы исследований сейсмического риска, основанной на интеграции мониторинга, баз сильных движений и междисциплинарных подходов, становится одним из ключевых направлений дальнейшего развития современной оценки сейсмической опасности и риска региона.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Bommer J.J., Scherbaum F. The Use and Misuse of Logic Trees in Probabilistic Seismic Hazard Analysis // *Earthquake Spectra*. 2008. - 24(4). - 997-1009. <https://doi.org/10.1193/1.2977755>
2. Cornell C. A. Engineering Seismic Risk Analysis // *Bull. Seism. Soc. Am.* - 1968. - 58. - 1583-1606.
3. Kotha S.R., Bindi D., Cotton F. From Ergodic to Region- and Site-Specific Probabilistic Seismic Hazard Assessment // *Earthquake Spectra*. - 2017. - 3(4). - 1433-1453 DOI: 10.1193/081016EQS130M
4. McGuire R.K. Seismic Hazard and Risk Analysis // Ed. by M. S. Agabian, EERI Publ., Earthquake Engineer. Res. Inst., Oakland, California, USA, 2004.
5. Hoyos M.C., Hernandez A.F. Seismic Risk Assessment of Multiple Cities: Biases in the Vulnerability Derivation Methods for Urban Areas with Different Hazard Levels // *Frontiers in Earth Science*. 2022. - V.10:910118. doi: 10.3389/feart.2022.910118
6. Poudel A., Pitilakis K., Silva V., Rao A. Infrastructure seismic risk assessment: an overview and integration to contemporary open tool towards global usage // *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2023. - 21(7). - 1-26. DOI: 10.1007/s10518-023-01693-z
7. Silva V., Amo-Oduro D., Calderon A., Costa C., Dabbeek J., Despotaki V., Martins L., Paganí M., Rao A., Simionato M., Viganò D., Yepes-Strada C., Acevedo A., Crowley H., Horspool N., Jaiswal K., Journeay M., Pittore M. Development of a global seismic risk model // *Earthquake Spectra*. - 2020. - 36(S1). - 372-394.
8. Электронный ресурс: www.asc2026.uz - Материалы секции S10 «Seismic Hazard and Risk Assessment» 16th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tashkent, 2026.
9. Akgün A., Aktuğ B., Tatar O., Türkoğlu M., Köksal T. Rapid Loss and Damage Assessment Analysis at Afad. - P. 163.
10. Avazov Sh.B., Azamjonov A.T. A Comparative Analysis of Methods for Assessing the Seismic Vulnerability of Existing Residential Buildings in Tashkent City. - P. 177.
11. Bykova V., Tatevossian R. Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis: Can We Use it in Regions Without Known Active Faults. - P. 180.
12. Changlong L., Guangyin X., Jinchun L., Chao X., Liang X., Zengping W., Hua P., Changsheng J., Sen Q. Study and Application on Seismic Hazard and Risk Assessment in the Belt and Road Area. - P. 169.
13. Chimed O., Munkhjargal D. Seismic Microzonation Study of Dalanzadgad City, Southern Mongolia. - P. 172.
14. Erteleva O. Strong Ground Motions Parameters: Far-Field Vs. Near-Field. - P. 173.
15. Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Ashurov S.X. Sensitivity Analysis of Probabilistic Seismic Hazard Assessment Results in Uzbekistan with Respect to Epistemic Uncertainties. - P. 174.
16. Jumaev D., Ismailov V. Influence of Local Soil Conditions on Seismic Hazard Estimates: Comparative Analysis of Three Ground Response Approaches. - P. 165.
17. Kossobokov V., Nekrasova A., Panza G.F. Global Maps of the Seismic Hazard. - P. 182.
18. Li Z., Ji Z., Miyake H., Sun J., Gao M., Ding Y., Luo Q. Broadband Ground Motion Simulation of the 2013 Lushan Earthquake Considering Source Uncertainties and Small Earthquake Diversity. - P. 188.
19. Mansurov A. Methods for Assessing the Seismic Vulnerability of Road and Railway Infrastructure. - P. 161.
20. Mirzaev S.Z., Ismailov V.A., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Ashurov S.H. Selection of Scenario Earthquakes and Estimation of Design Groundmotion Parameters for Tashkent City (Uzbekistan). - P. 176.
21. Murodkulov Sh.Ya. Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) of the Hujand Area. - P. 178.
22. Pavlenko V., Pavlenko O. Seismic Hazard Maps for the North Caucasus in Terms of Physical Ground Motion Parameters. - P. 183.
23. Poggi V., Parolai S., Silacheva N., Tyagunov S., Abdrakhmatov K., Ismailov V., Ibragimov R. Probabilistic earthquake hazard and risk assessment of Uzbekistan. - P. 231.
24. Shanker D., Soni K. Performance-Based Seismic Design Inputs for Northeast India: PSHA and UHS for Eight States. - P. 166.

25. *Silacheva N., Danabayeva A., Stepanenko N.* Kazakhstan's Transition to a Seismic Hazard Model Harmonized with the Eurocode. - P. 170.
26. *Silacheva N., Herrera C., Onur T., Hakimov F., Frolova A., Sokolova I., Gök R., Chiang A.* Strong Ground Motion Database in Central Asia. - P. 171.
27. *Tatevossian R., Ponomarev A., Beloslyudtsev O., Bykova V., Stroganova S.* On the Applicability of the Concept of Areal Source Model for Seismic Hazard Assessment. - P. 175.
28. *Tulaganov B., Mirzaev S., Baymatov Sh., Rashidov J., Samiyeva Sh.* Improved Seismic Risk Assessment of Urban Buildings Based on the EMS-98 Framework. - P. 164.
29. *Wang Yi.* A Regional-Scale Hybrid Modeling Approach for 3D Broadband Wavefield Modeling. - P. 186.
30. *Zhang Y., Romanelli F., Vessia G., Jiang Ch., Peresan A., Panza G.* Evaluating Three-Dimensional Seismic Response: Validation of Analytical Modeling and Application to the 2014 Ludian MW 6.1 Earthquake, Southwest China. - P. 184.
31. *Zhang Y., Rugarli P., Panza G.* The Definition of Mdesign for Engineering Applications of Neodeterministic Seismic Hazard Assessment (NDSHA) Within the China Seismic Experimental Site (CSES). - P. 185.
32. *Zhou J., Karapetyan J., L.Li, Wang Y., Wang Ch., Tian X.* Topographic Slope-VS30 Relationship in Volcanic Terrain and Vs30 Map of Armenia. - P. 168.

MODERN SEISMIC HAZARD AND RISK ASSESSMENT: NEW TRENDS AND DEBATABLE ISSUES
(Based on the materials of Session S10 «Seismic Hazard and Risk Assessment» of the 16th General Assembly of the Asian Seismological Commission, April 25-30, 2026, Tashkent)

T.L. Ibragimova

Abstract. The article presents an expert analysis of the transformation trends in seismic hazard and risk assessment methods identified during the activities of Session S10 «Seismic Hazard and Risk Assessment» at the 16th General Assembly of the Asian Seismological Commission held in Tashkent. It is shown that seismology is undergoing a transition from traditional seismic zoning approaches toward integrated risk-oriented models that combine probabilistic methods, scenario-based modeling, digital monitoring, vulnerability analysis, and earthquake consequence assessment. The key directions of the ongoing transformation in the contemporary paradigm of seismic hazard and risk assessment are identified, including the development of probabilistic analysis and logic-tree approaches, the increasing importance of local site conditions, the transition to urban-scale modeling, the digitalization of monitoring systems and the implementation of artificial intelligence technologies, as well as the emergence in Central Asia of a new regional platform for seismic risk research and the integration of transboundary monitoring systems.

Key words: seismic hazard, seismic risk, PSHA, logic tree, microzonation, scenario earthquake, strong ground motion, Vs30, digital monitoring, artificial intelligence, Central Asia.

SEYSMIK XAVF VA RISKNI ZAMONAVIY BAHOLASH: YANGI TENDENSIYALAR VA MUNOZARALI MASALALAR
(Asian Seismological Commission 16-Bosh Assambleyasining S10 «Seismic Hazard and Risk Assessment» seksiyasi materiallari asosida, 2026-yil 25-30-aprel, Tashkent)

T.L. Ibragimova

Annotatsiya. Maqolada Asian Seismological Commissionning 16th General Assembly of the Asian Seismological Commission doirasida tashkil etilgan S10 «Seismic Hazard and Risk Assessment» seksiyasi faoliyati davomida aniqlangan seysmik xavf va riskni baholash usullarining transformatsiya tendensiyalariga ekspert tahlili keltirilgan. Zamonaviy seysmologiya an'anaviy seysmik rayonlashtirish yondashuvlaridan ehtimollik usullari, stsenariyli modellashtirish, raqamli monitoring, zaiflik tahlili va zilzila oqibatlarini baholashni integratsiyalovchi kompleks riskga yo'naltirilgan modellarga o'tish jarayonini boshdan kechirayotgani ko'rsatilgan. Seysmik xavf va riskni baholashning zamonaviy paradigmasi transformatsiyasining asosiy yo'nalishlari sifatida ehtimollik tahlili va logic tree yondashuvlarining rivojlanishi, mahalliy grunt sharoitlari rolini kuchayishi, shahar miqyosidagi modellashtirishga o'tish, monitoring tizimlarini raqamlashtirish va sun'iy intellekt texnologiyalarini joriy etish, shuningdek, Markaziy Osiyoda seysmik risk tadqiqotlari va transchegaraviy monitoring tizimlari integratsiyasi bo'yicha yangi mintaqaviy platformaning shakllanishi ajratib ko'rsatilgan.

Kalit so'zlar: seysmik xavf, seysmik risk, PSHA, logic tree, mikrorayonlashtirish, stsenariyli zilzila, kuchli grunt tebranishlari, Vs30, raqamli monitoring, sun'iy intellekt, Markaziy Osiyo.

UO‘K 627.8+624.131, 528.7, 550.34

**SUV OMBORLARI TO‘G‘ONLARINING KUCHLANGANLIK-DEFORMATSIYA HOLATINI
RADIOLOKATSION KOSMIK MONITORING ASOSIDA BAHOLASH
(SURXON SUV OMBORI TO‘G‘ONI MISOLIDA)****Bekmirzayev D.A., Nabiyeu S.N.**Fanlar akademiyasining M.T.O‘rozboyev nomidagi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi
instituti (Toshkent, O‘zbekiston)

Fanlar akademiyasining G‘.O.Mavlonov nomidagi Seysmologiya instituti (Toshkent, O‘zbekiston)

Annotatsiya Maqolada suv omborlari to‘g‘onlarining deformatsiya, siljish va cho‘kish dinamikasini radar kosmik monitoringi (InSAR) ma’lumotlari asosida baholash metodikasi hamda uning Surxon suv ombori to‘g‘oniga tatbiq etilishi natijalari keltirilgan. O‘zbekistonda suv omborlarida seysmologik kuzatuvlarni yuritishning yagona tizimi va “Suv omborlarida seysmologik kuzatuvlarni yuritish elektron platformasi” ishga tushirilgan bo‘lib, u kuchli zilzila sodir bo‘lganda to‘g‘onlarning holatini tezkor baholash imkonini beradi. Sentinel-1 sun‘iy yo‘ldoshi radar tasvirlarini interferometrik qayta ishlash asosida 2017-yil 9-yanvardan 2023-yil 27-dekabrgacha bo‘lgan davrda Surxon suv ombori to‘g‘oni va unga tutash hududning siljishlari tahlil qilindi. Kuzatuv davrida cho‘kish va ko‘tarilishning maksimal qiymatlari mos ravishda $-7,96$ sm ($-79,6$ mm) va $+86,8$ mm ni, gorizonta siljishning maksimal qiymatlari $-102,0$ mm va $+110,7$ mm ni tashkil etdi. O‘rtacha vertikal va gorizonta siljishlar mos ravishda $-0,6$ mm va $-0,5$ mm ga teng. To‘g‘ondagi siljishlarning mavsumiy o‘zgarishi suv omboridagi suv sathi bilan bevosita bog‘liqligi, deformatsiyalar elastik xarakterga ega ekanligi va uzoq muddatli xavfli trend kuzatilmagani aniqlandi. 2025-yil 3-noyabrda Afg‘onistonda sodir bo‘lgan $M = 6,8$ magnitudali kuchli zilzila to‘g‘onda faqat submillimetrl qisqa muddatli dinamik siljish hosil qilganini ko‘rsatdi. Taklif etilgan yondashuv ochiq sun‘iy yo‘ldosh ma’lumotlariga asoslangan arzon va takrorlanuvchan monitoring vositasi sifatida boshqa suv omborlari to‘g‘onlariga ham qo‘llanilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: radiolokatsion kosmik monitoringi, interferometriya (InSAR), suv ombori to‘g‘oni, deformatsiya, siljish va cho‘kish dinamikasi, suv sathi, zilzila, seysmik xavfsizlik.

Kirish. So‘nggi yillarda xorijiy mamlakatlarda sodir bo‘layotgan kuchli zilzilalar va tektonik plitalar siljishi natijasida yuzaga kelayotgan turli talafotlar mamlakatimizda seysmik xavfsizlikni ta‘minlash borasidagi ishlarni jadallashtirish hamda sohaga zamonaviy yondashuvlarni joriy etishni taqozo etmoqda. Shu bois kuchli zilzilalar sodir bo‘lganda ularning suv omborlari to‘g‘onlariga ta‘sirini va to‘g‘onlarning konstruktiv butunligini uzluksiz nazorat qilib borish, to‘g‘onlarning kuchlanish-deformatsiya holatini zamonaviy texnologiyalar va uskunalar yordamida baholash amaliyotini keng joriy etish muhim ahamiyatga ega.

Shu munosabat bilan O‘zbekistonda mavjud suv omborlari to‘g‘onlarining konstruktiv mustahkamligini doimiy nazorat qilish maqsadida suv omborlarida seysmologik kuzatuvlarni yuritishning yagona tizimi yaratilgan. Xususan, Favqulodda vaziyatlar vazirligining Seysmoprognoztik monitoring respublika markazi suv omborlari to‘g‘onlarida seysmologik va seysmometrik kuzatuvlarni olib borish, suv omborlarini to‘ldirish bilan bog‘liq zilzilalarni kuzatish hamda suv omborlarini to‘ldirish va ulardan foydalanish jarayonida seysmik rejim o‘zgarishlarini baholash uchun mas‘ul etib belgilangan. Bundan tashqari, «Suv omborlarida seysmologik kuzatuvlarni yuritish elektron platformasi» (keyingi o‘rinlarda – elektron platforma) ishga tushirilgan.

Seysmologik va seysmometrik kuzatuvlar yo‘lga qo‘yilgan suv omborlari to‘g‘onlarida MSK-64 shkalasi bo‘yicha 5 ball va undan yuqori kuchga ega zilzila qayd etilganda:

a) Seysmoprognoztik monitoring respublika markazi tomonidan seysmologik va seysmometrik kuzatuv ma’lumotlari zudlik bilan elektron platformaga joylashtiriladi;

b) suv omborlari uchun mas‘ul tashkilotlar zilzilaning cho‘kish, siljish, yoriq hosil bo‘lishi va filtratsiya rejimining o‘zgarishi kabi salbiy oqibatlarini zudlik bilan aniqlab, ma’lumotlarni elektron platformaga kiritadi;

c) Fanlar akademiyasi uch kun ichida elektron platformaga kiritilgan ma’lumotlar asosida suv omborlari to‘g‘onlarining dinamik xossalarni o‘rganadi va ularning kuchlanish-deformatsiya holatini baholaydi, tegishli chora-tadbirlar ko‘rish bo‘yicha xulosalarni platformaga kiritadi;

d) elektron platformaga kiritilgan xulosalarda favqulodda vaziyat yuzaga kelishi ko'rsatilgan taqdirda, suv omborlari uchun mas'ul tashkilotlar Favqulodda vaziyatlar vazirligi, Fanlar akademiyasi va mahalliy hokimiyat organlari bilan birgalikda zudlik bilan tegishli chora-tadbirlar dasturini ishlab chiqadi va amalga oshiradi [1].

Hozirgi kunda O'zbekiston va jahonning yetakchi olimlari tomonidan ushbu yo'nalishda samarali tadqiqotlar olib borilmoqda.

Sultanov va Umarxonov [2] grunt namligini hisobga olgan holda grunt to'g'onlarning kuchlanish-deformatsiya holatini tahlil qilgan;

Umarxonov va Loginov [3] suv bosimini hisobga olgan holda Chorvoq to'g'onining kuchlanish-deformatsiya holatini o'rgangan.

Rashidi va boshqalar [4] ko'tarma to'g'onning qurilish va birinchi to'ldirish davridagi sonli tahlili va monitoringini bajargan;

Wei va boshqalar [5] baland grunt yadroli to'g'onning statik va dinamik tahlilida umumlashgan plastiklik modelini qo'llagan;

Qi va boshqalar [6] grunt to'g'onning suyulishi va seysmik ishlashini samarali kuchlanishlar modeli asosida tahlil qilgan. Transport infratuzilmasi obyektlarini monitoring qilish va modellash tirish bo'yicha ishlar ham tizimli yo'lga qo'yilgan.

Biroq keltirilgan tadqiqotlarning aksariyatida sun'iy yo'ldosh asosidagi deformatsiya monitoringi, odatda, tavsifiy tarzda bayon etiladi va ko'p yillik kuzatuv ma'lumotlari to'g'onning ekspluatatsion yuklamalari bilan miqdoriy bog'lanmaydi.

Suv omborlari to'g'onini zilzilabardoshligini radiolokatsion kosmik suratlarni interferometrik qayta ishlash va natijalarni tahlil qilish metodologiyasi orqali Differensial sun'iy yo'ldosh interferometriyasi (InSAR) kosmik mikroto'liqlik sensorlar tomonidan kuzatilganda katta to'g'onlarning ustki (tashqi qismi) siljishi va cho'kishini kuzatishga yordam berdi. Ushbu usullarning birinchi eksperimental qo'llanilishidan boshlab, SAR ma'lumotlar arxivlaridan foydalangan holda retrospektiv tahlil qilish uchun uzoq muddatli kuzatuvlar seriyasini amalga oshirish bilan aniqlik va ishlov berish parametrlari yaxshilandi va kengaytirildi [7].

Mazkur ishda to'g'onning siljishi va cho'kishini kuzatish uchun differensial radar interferometriyasi ma'lumotlari va yerdagi instrumental o'lchov ma'lumotlari tahlil qilindi. Natijalar yakunida InSAR metodlari va geodezik o'lchash ma'lumotlari o'rtasida yuqori bog'liqlik aniqlandi. Sun'iy yo'ldosh har gal belgilangan obyekt ustidan uchib o'tganda ma'lumotlarni qayd etib boradi, natijalar esa bu ma'lumotlar asosida analitik hisoblarga asoslangan holda olinadi [7].

Ushbu texnologiya boshqa davlatlar amaliyotida ham keng qo'llaniladi. Xitoyning Shuibuya to'g'onining sirt deformatsiyasini kuzatish uchun InSAR ko'p yillik vaqt seriyasidan foydalanilgan holda retrospektiv analizi tahlil qilingan. Natijada InSAR va an'anaviy kuzatuvlar o'rtasidagi farq 0,93 koeffitsiyentdan yuqori korrelyatsiya aniqlanib, InSAR usulining ishonchliligini tasdiqlagan.

Interferometriya natijasida olingan deformatsiyalar tarixi joydagi geodezik kuzatuvlar bilan tasdiqlangan. InSAR natijalari to'g'on deformatsiyasini keng maydonda, jumladan, unga yondosh bo'lgan hududlarni kuzatish, to'g'onning butun yuzasi hamda unga tutash hududda uzluksiz o'rganish imkonini beradi, bu esa to'g'onning deformatsiyasi haqida aniq tasavvur paydo bo'lishiga imkon beradi [7].

Ushbu maqolaning **maqsadi** – elektron platforma va Sentinel-1 radar tasvirlarini interferometrik qayta ishlash (InSAR) ma'lumotlari asosida Surxon suv ombori to'g'onining ko'p yillik deformatsiya, siljish va cho'kish dinamikasini miqdoriy baholash hamda siljishlarning suv omboridagi suv sathi bilan bog'liqligini aniqlashdan iborat.

Usullar. Sun'iy yo'ldosh radar interferometriyasi (InSAR) yer yuzasi siljishini sun'iy yo'ldoshning ko'rish yo'nalishi (LOS – line-of-sight) bo'yicha proyeksiyada o'lchaydi. LOS siljish d_{LOS} yer yuzasining uch o'lchovli siljish komponentlari bilan quyidagi ifoda orqali bog'lanadi [8]:

$$d_{LOS} = -u_E \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + u_N \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + u_U \cdot \cos\theta \quad (1)$$

bu yerda: d_{LOS} – LOS bo'yicha siljish [mm], musbat qiymat sun'iy yo'ldoshga yaqinlashishni (ko'tarilishni) bildiradi; u_E , u_N , u_U – siljishning sharqiy, shimoliy va vertikal (yuqoriga) komponentlari [mm]; θ – vertikaldan o'lchanadigan tushish burchagi [gradus], Surxon hududi uchun Sentinel-1 da $\theta \approx$

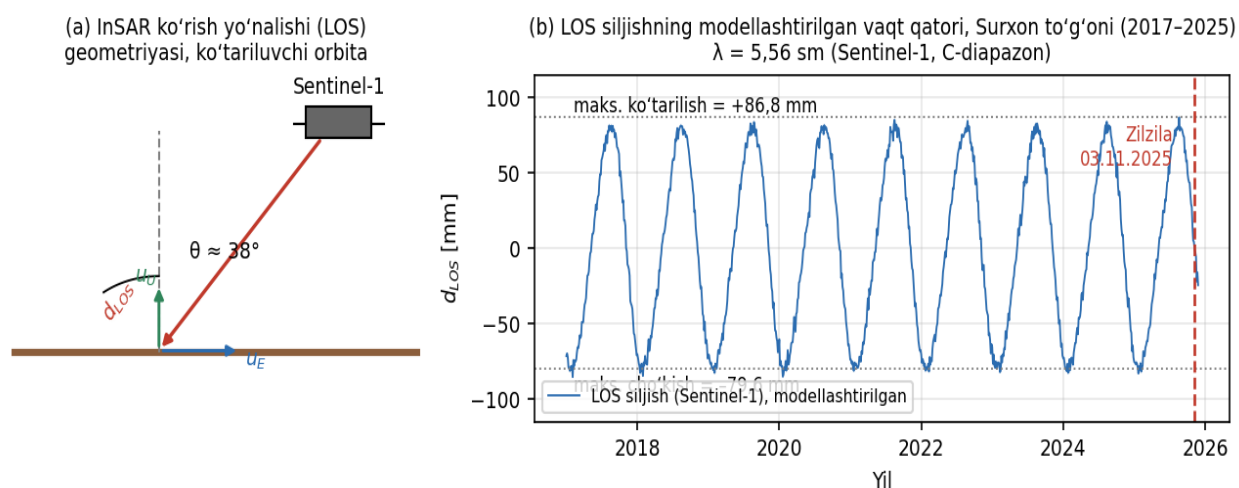
33–43°; φ – sun'iy yo'ldosh parvoz azimuti [gradus], Sentinel-1 ko'tariluvchi orbitasi uchun taxminan 349°.

Sun'iy yo'ldosh tomonidan qayd etiladigan interferometrik faza farqi $\Delta\varphi$ LOS siljishga to'g'ridan-to'g'ri proporsional:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot d_{\text{LOS}} \quad (2)$$

bu yerda: λ – radar to'lqin uzunligi [m], Sentinel-1 C-diapazoni uchun $\lambda = 0,0556$ m (5,56 sm), bu har bir 2π faza sikliga $\lambda/2 = 2,78$ sm sezgirlikni ta'minlaydi; $\Delta\varphi$ – ikki radar tasviri orasidagi interferometrik faza farqi [rad].

To'liq kuzatuv davri (2017-yil yanvar – 2023-yil dekabr) uchun Surxon to'g'onida kuzatilgan maksimal LOS siljish qiymatlari –79,6 mm (cho'kish) va +86,8 mm (ko'tarilish) bo'lib, ular mos ravishda taxminan –18,0 rad va +19,6 rad faza o'zgarishlariga to'g'ri keladi. Mavsumiy faza tebranishlari suv omboridagi suv sathi tebranishlari bilan bevosita korrelyatsiyalanadi, bu esa kuzatilayotgan siljishlarning gidrostatik yuklama tabiatini tasdiqlaydi (1-rasm).

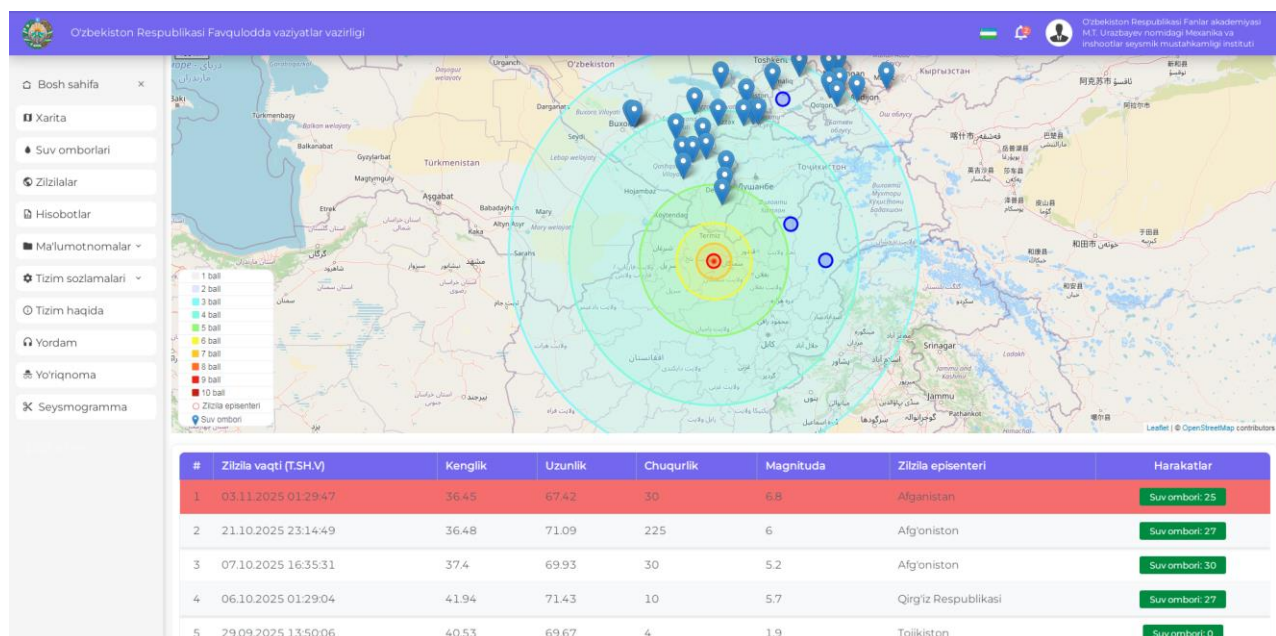


1-rasm. (a) Sentinel-1 ko'tariluvchi orbitasi uchun InSAR ko'rish yo'nalishi geometriyasi ($\theta \approx 38^\circ$) va siljish komponentlarining dekompozitsiyasi; (b) Surxon to'g'onidagi LOS siljishlarning suv sathi bilan bog'liq mavsumiy tebranishlari (2017–2025).

Natijalar. 2025-yil 3-noyabr kuni Toshkent vaqti bilan soat 01:29 da (2-noyabr, 20:29 UTC) Afg'onistonda (koordinatalari: 36,45; 67,42) magnitudasi $M = 6,8$, o'choq chuqurligi $H = 30$ km bo'lgan kuchli zilzila sodir bo'ldi. Episentrdagi seziluvchanlik 7–8 ballni tashkil etgan. Zilzila parametrlari Surxondaryo, Qashqadaryo, Samarqand va Jizzax viloyatlarida joylashgan 37 ta seysmik stansiya yordamida aniqlandi. Ushbu zilzila jami 167 ta stansiya tomonidan qayd etilgan [8].

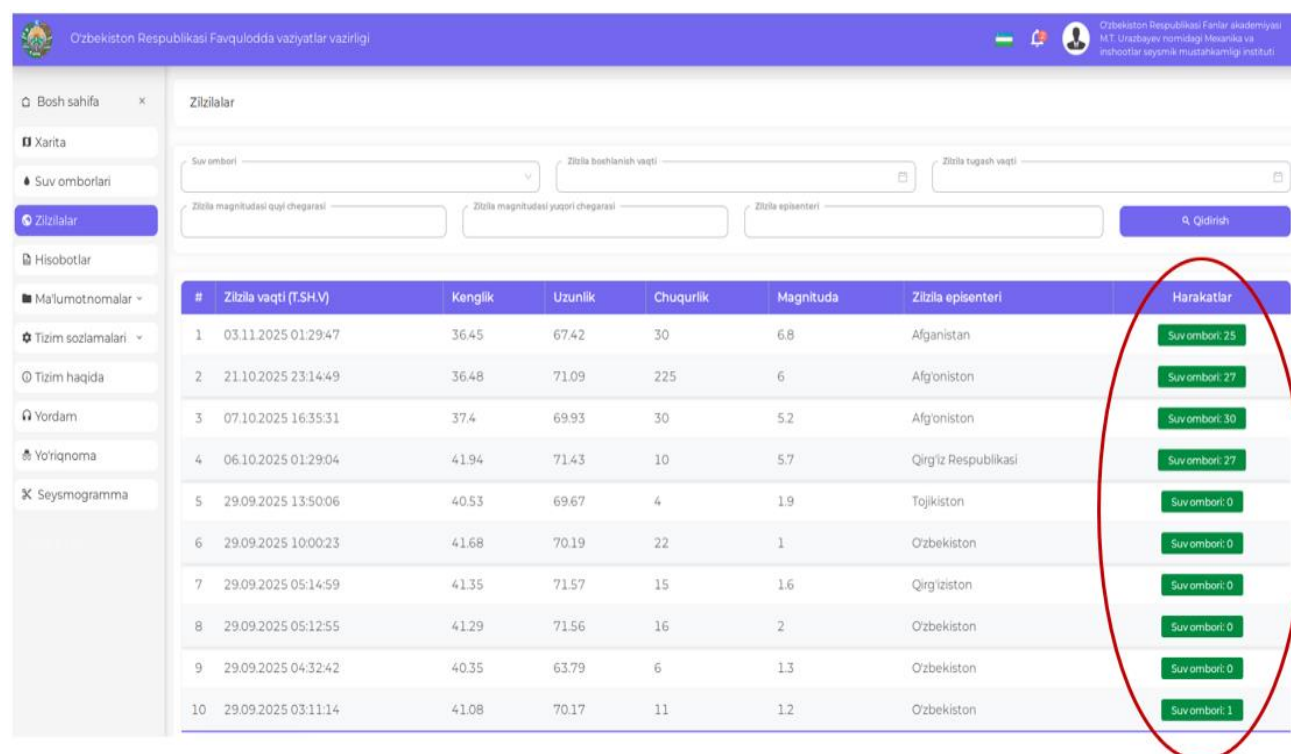
Zilzila O'zbekiston Respublikasi hududining Surxondaryo viloyatida – 5 ball (90 km), Qashqadaryo viloyatida – 3–4 ball (302 km), Samarqand viloyatida – 3 ball (358 km), Jizzax viloyatida – 3 ball (410 km), Navoiy viloyatida – 3 ball (444 km), Buxoro viloyatida – 3 ball (451 km), Sirdaryo viloyatida – 3 ball (464 km), Toshkent shahrida – 2–3 ball (557 km), Farg'ona viloyatida – 2–3 ball (579 km) bilan sezilgan.

Sodir bo'lgan kuchli zilzilalar elektron platformada avtomatik ravishda aks ettiriladi va tezkor tahlil hamda baholash uchun foydalaniladi (2-rasm).



2-rasm. 2025-yil 3-noyabrda Afg'onistonda qayd etilgan kuchli zilzilaning elektron platformadagi ko'rinishi.

Elektron platforma, shuningdek, O'zbekiston va unga chegaradosh hududlarda sodir bo'layotgan zilzilalar respublikadagi qancha suv ombori to'g'oniga ta'sir ko'rsatayotganini ko'rish imkonini ham beradi (3-rasm). Ushbu kuchli zilzila O'zbekiston hududidagi 25 ta suv ombori to'g'oniga turli darajada ta'sir ko'rsatdi.



3-rasm. Zilzilalarning O'zbekiston hududidagi suv omborlari to'g'onlariga ta'siri.

Xususan, Pachkamar suv ombori to'g'oni 4,8, Degrez suv ombori to'g'oniga 5,2 va Surxon suv ombori to'g'oniga 5,5 magnituda bilan sezilgan (4-rasm).

O'zbekiston Respublikasi Favqulodda vaziyatlar vazirligi

Suv omborlari ro'yhati - / Magnituda-6.8 / Chuqurlik - 30 / Zilzila vaqti (T.SHV) - 03.11.2025 01:29:47 / Zilzila episentri - Afganistan

Suv ombori

Qidirish

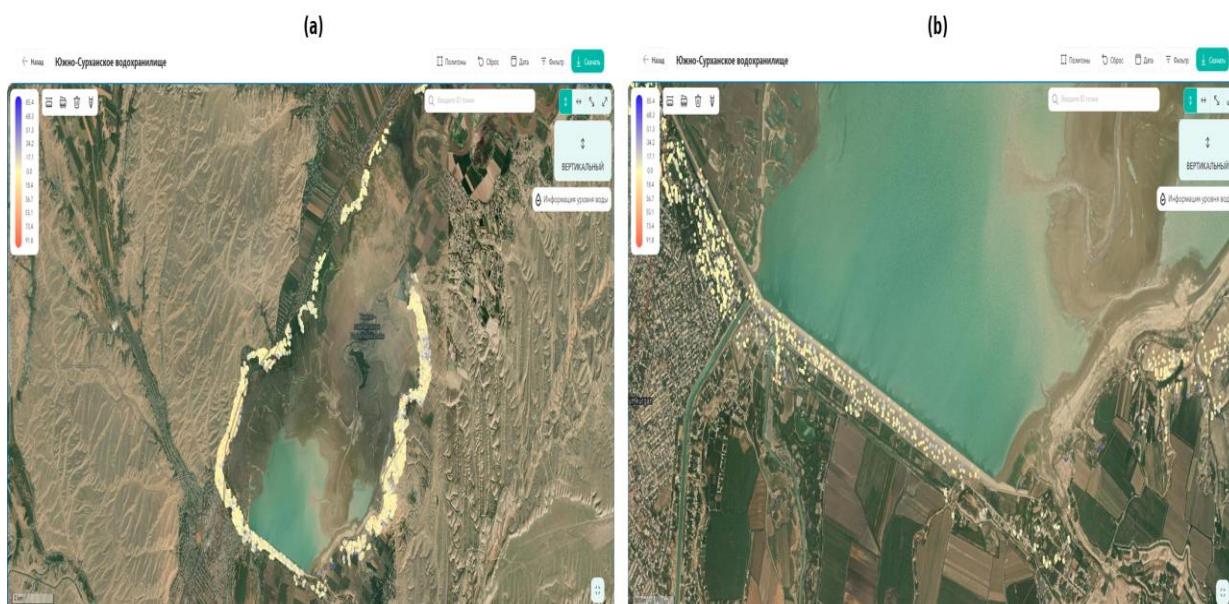
#	Suv omborlari nomi	Tegishli tashkilot nomi	Kenglik / Uzunlik	Ta'sir ball	Ta'sir radiusi (km)	Harakatlar
1	Sarmich sel	O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi	36.45 / 67.42	4.1	403.38	✕ 📍 📏 🔄 🌐
2	Talimarjon	O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi	36.45 / 67.42	3.9	439.56	✕ 📍 📏 🔄 🌐
3	Degrez	O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi	36.45 / 67.42	5.2	195.38	✕ 📍 📏 🔄 🌐
4	Pachkamar	O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi	36.45 / 67.42	4.8	248.84	✕ 📍 📏 🔄 🌐
5	Rezaksoy	O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi	36.45 / 67.42	3.6	560.55	✕ 📍 📏 🔄 🌐
6	Jlyadiso'y	O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi	36.45 / 67.42	3.6	560.55	✕ 📍 📏 🔄 🌐
7	To'sinsoy	O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi	36.45 / 67.42	4.0	414.36	✕ 📍 📏 🔄 🌐
8	Xujamushkent	O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi	36.45 / 67.42	4.1	398.30	✕ 📍 📏 🔄 🌐
9	Janubiy Surxon	O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi	36.45 / 67.42	5.5	159.04	✕ 📍 📏 🔄 🌐
10	Toshkent	O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi	36.45 / 67.42	3.7	504.55	✕ 📍 📏 🔄 🌐

1-10 / Jami: 25

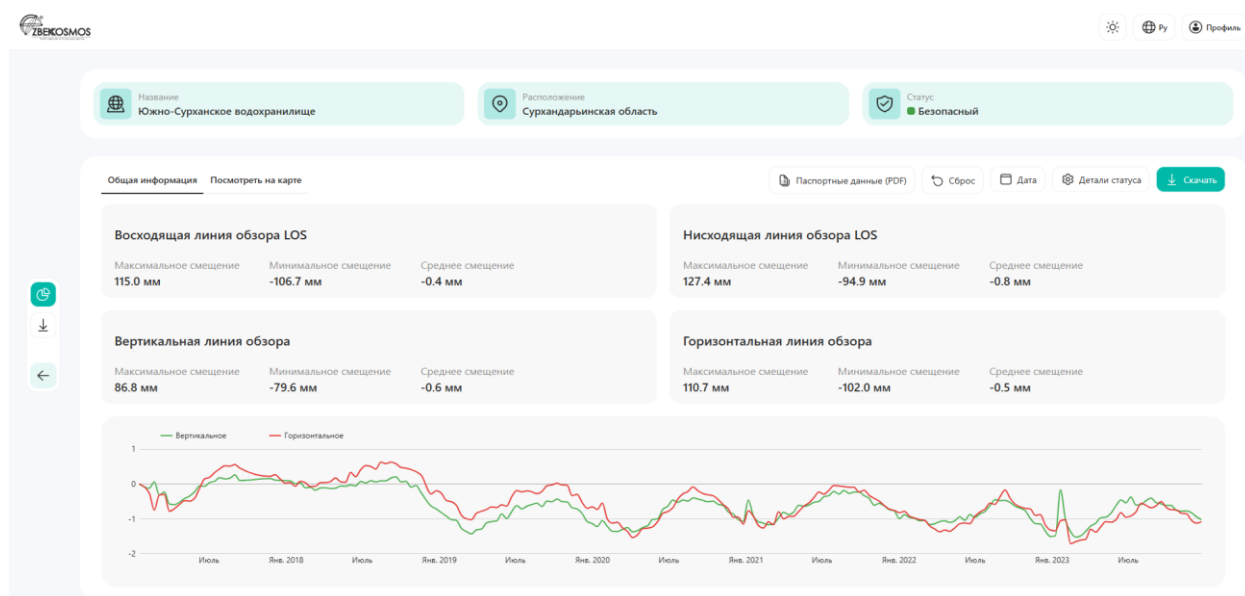
« < 1 2 3 > »

4-rasm. 2025-yil 3-noyabrda Afg'onistonda sodir bo'lgan kuchli zilzilaning O'zbekiston hududidagi suv omborlari to'g'onlariga ta'siri.

Ushbu maqolada zilzilaning Surxon suv ombori to'g'oniga ta'siri ko'rib chiqiladi. Surxon suv ombori Surxondaryo viloyatining 7 balli seysmik hududida joylashgan bo'lib, 1958–1967-yillarda qurilgan va 1967-yilda foydalanishga topshirilgan. Suv omborining sig'imi 800 mln m³ ni tashkil etadi. Ushbu suv ombori to'g'onining kosmik monitoringi 2017-yildan buyon sun'iy yo'ldosh tasvirlarini interferometrik qayta ishlash asosida olib borilmoqda. Quyida sun'iy yo'ldosh monitoringi orqali olingan Surxon suv omborining tasviri keltirilgan (5-rasm).

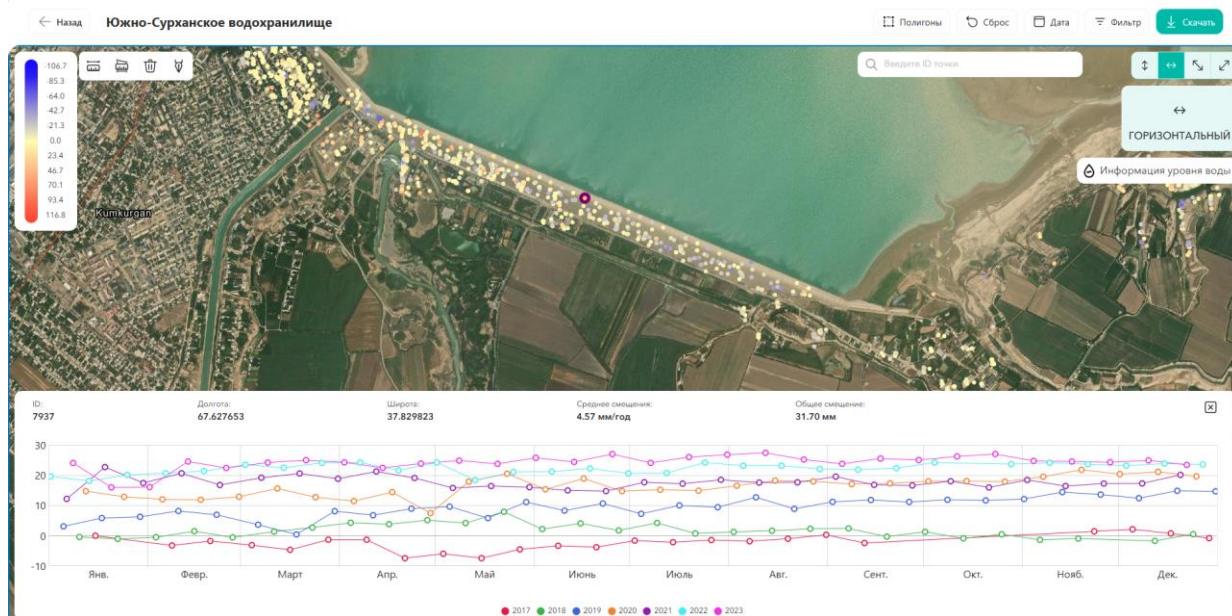


5-rasm. Sun'iy yo'ldosh monitoringi orqali olingan Surxon suv omborining tasvirlari: (a) va (b). Kuzatuv davrida (to'g'on va unga tutash hudud bo'yicha) cho'kish va ko'tarilishning maksimal qiymatlari mos ravishda – 79,6 mm va 86,8 mm ni, kuzatuv davridagi o'rtacha vertikal siljish –0,6 mm ni tashkil etdi (6-rasm). Kuzatuv davrida gorizont siljishning maksimal qiymatlari (to'g'on va tutash hudud bo'yicha) mos ravishda –102,0 mm va 110,7 mm, o'rtacha gorizont siljish esa –0,5 mm ga teng bo'ldi (6-rasm). Kuzatuv davrida vertikal va gorizont siljishlarning (to'g'on va tutash hudud bo'yicha) o'zgarish grafiklari 6-rasmning quyi qismida keltirilgan.

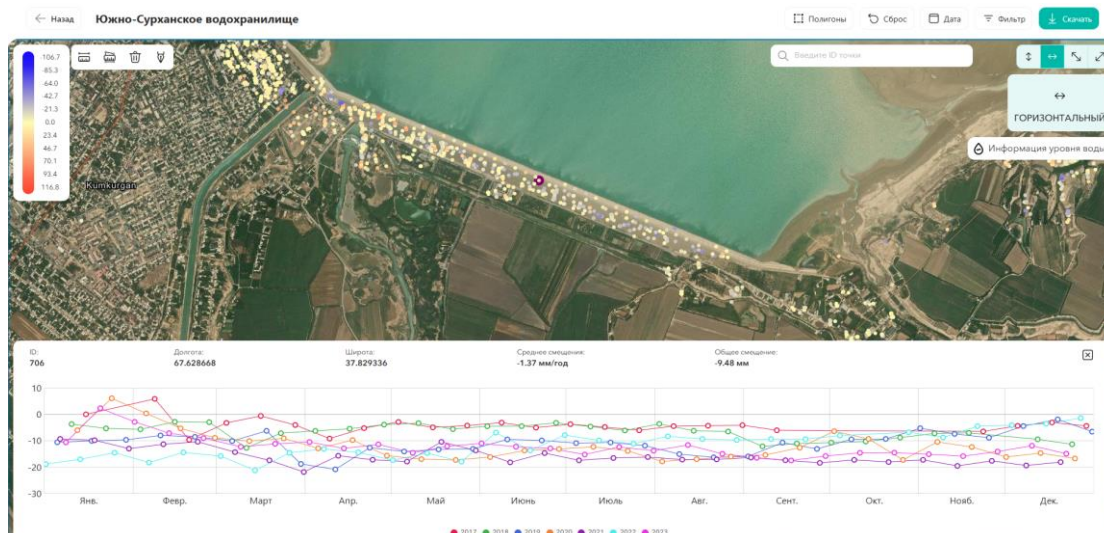


6-рasm. Surxon suv ombori to'g'onining umumiy ko'rsatkichlari.

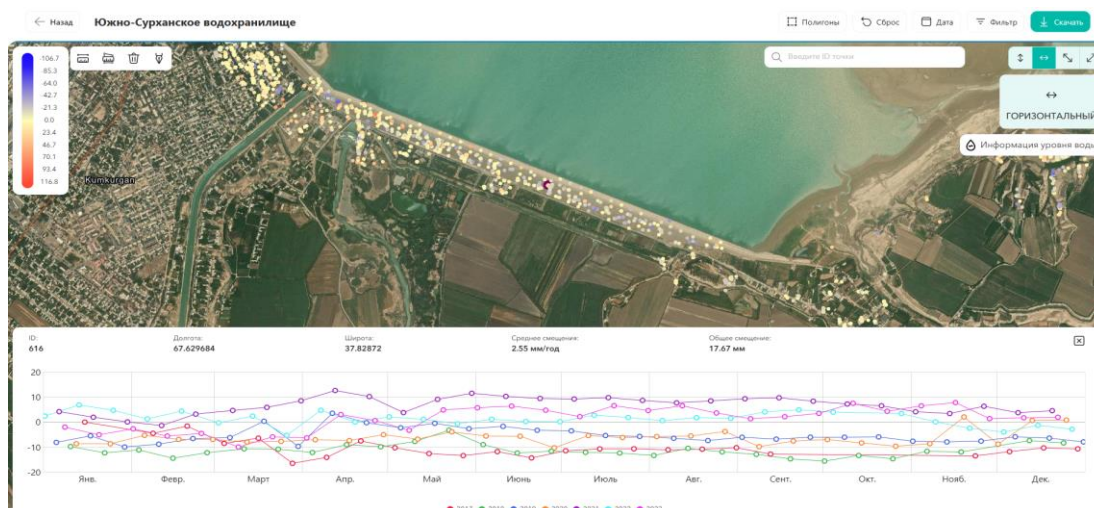
Kuzatuv davrida to'g'onning ID raqamlari bo'yicha qayd etilgan nuqtalarining gorizont va vertikal siljish ma'lumotlarini platformaning o'zida (7–14-rasmlar) yoki ma'lumotlar faylini yuklab olish orqali (15–22-rasmlar) ko'rish mumkin. Har bir aniq nuqta uchun uning joylashuvi (uzunlik va kenglik), o'rtacha yillik siljishi hamda birinchi syomkaga (2017-yil 9-yanvar) nisbatan umumiy siljishi haqidagi ma'lumotlar mavjud. Misol tariqasida to'g'onda joylashgan, gorizont siljishga ega bir nechta nuqtalar bo'yicha ekran tasvirlari keltirilgan (7–10-rasmlar).



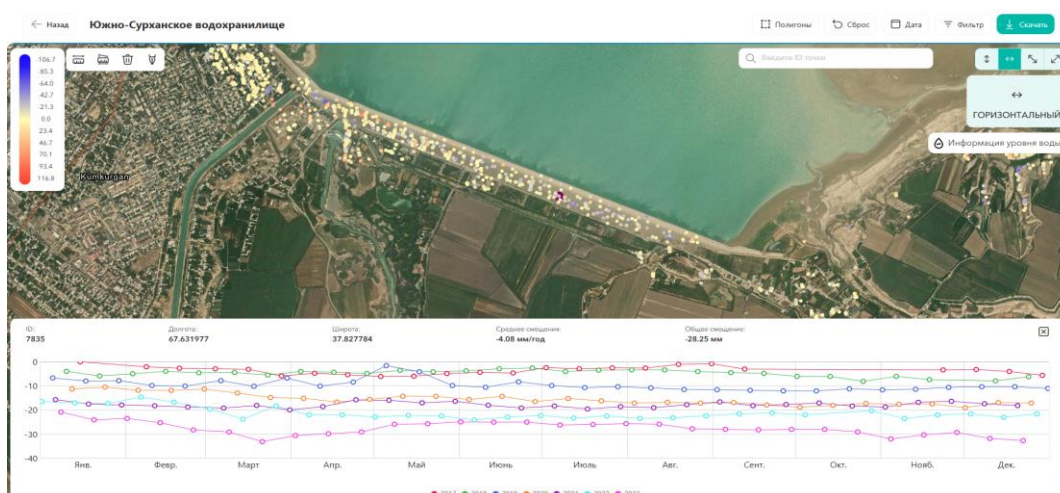
7-рasm. To'g'onda joylashgan ID 7937 nuqtada butun kuzatuv davri uchun 31,70 mm gorizont siljish qayd etilgan.



8-rasm. To'g'onda joylashgan ID 706 nuqtada butun kuzatuv davri uchun – 9,48 mm gorizontall siljish qayd etilgan.



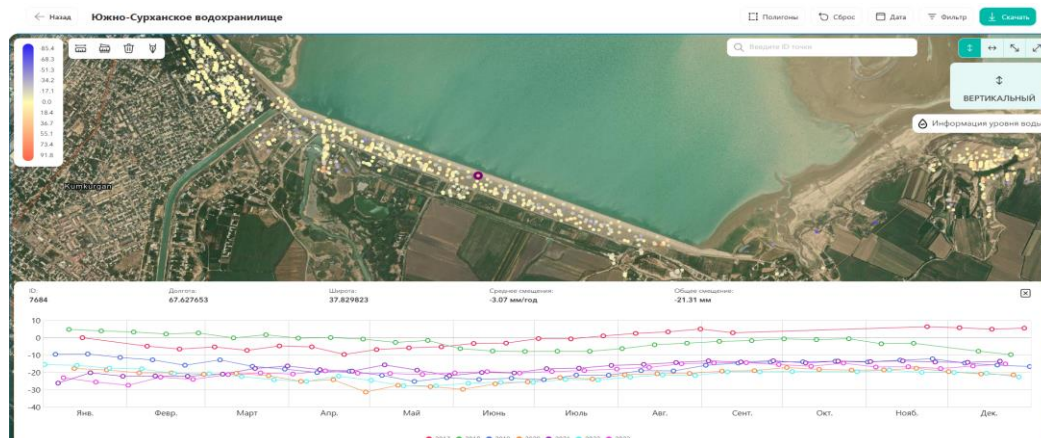
9-rasm. To'g'onda joylashgan ID 616 nuqtada butun kuzatuv davri uchun 17,48 mm gorizontall siljish qayd etilgan.



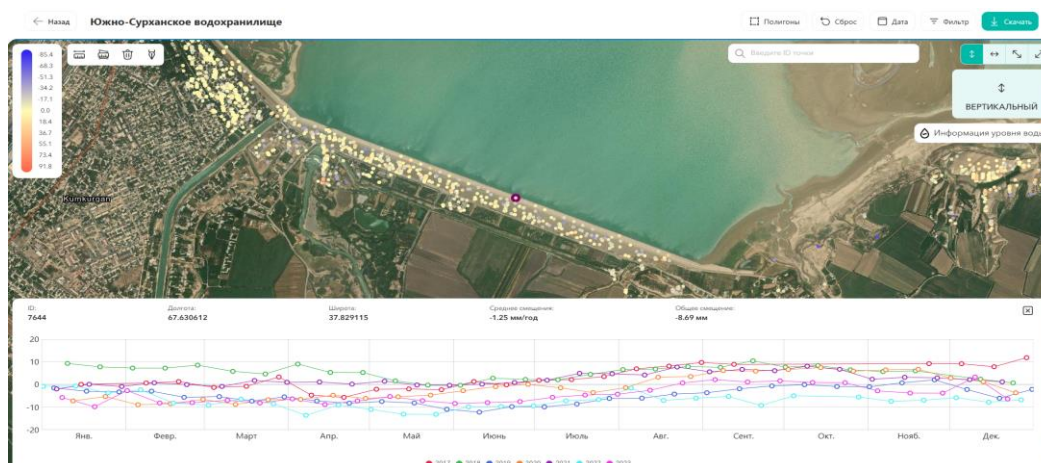
10-rasm. To'g'onda joylashgan ID 7835 nuqtada butun kuzatuv davri uchun – 28,25 mm gorizontall siljish qayd etilgan.

Shunday qilib, ID 7937, 706, 616 va 7835 nuqtalarning kuzatuv davridagi umumiy gorizontall siljishlari mos ravishda 31,70 mm, -9,48 mm, 17,48 mm va -28,25 mm ni tashkil etadi. Nuqtalarning sharqqa va g'arbga siljishi mos ravishda musbat va manfiy ishoralar bilan ko'rsatiladi.

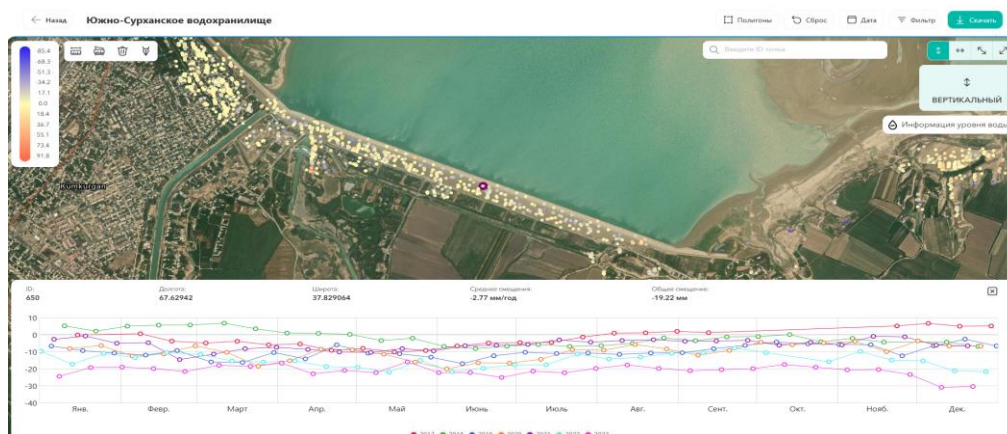
Xuddi shunday, to'g'ondagi vertikal siljishga ega bir nechta nuqtalar bo'yicha ham ekran tasvirlari keltirilgan (11–14-rasmlar).



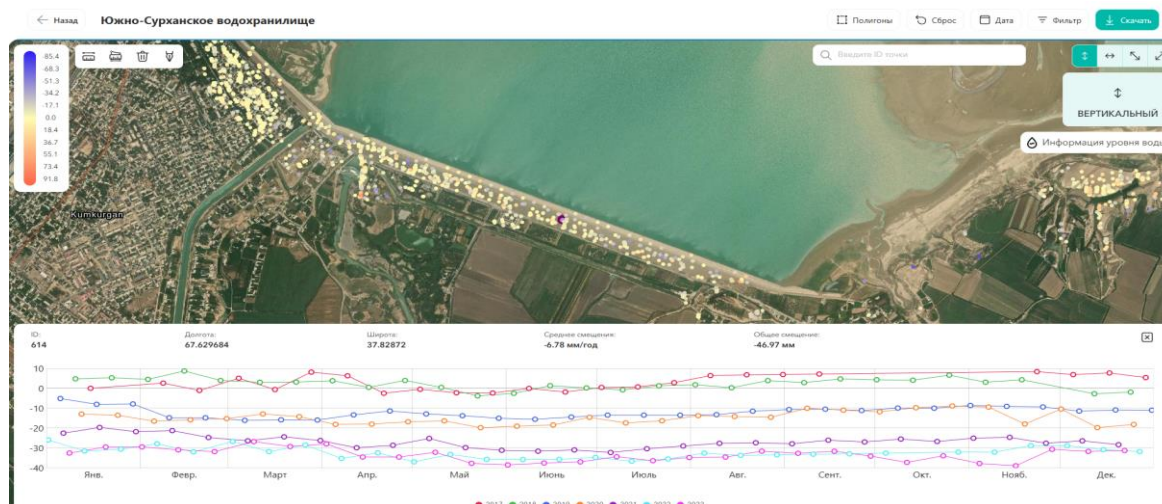
11-rasm. To'g'onda joylashgan ID 7684 nuqtada butun kuzatuv davri uchun – 21,31 mm vertikal siljish qayd etilgan.



12-rasm. To'g'onda joylashgan ID 7644 nuqtada butun kuzatuv davri uchun – 8,69 mm vertikal siljish qayd etilgan.



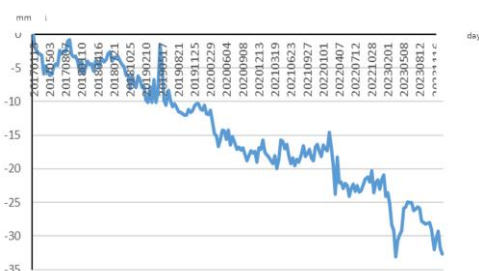
13-rasm. To'g'onda joylashgan ID 650 nuqtada butun kuzatuv davri uchun – 19,22 mm vertikal siljish qayd etilgan.



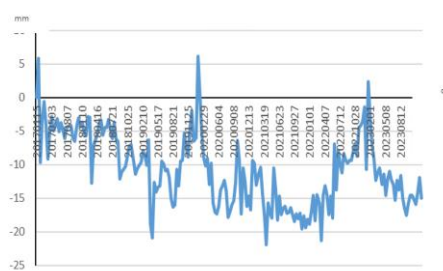
14-rasm. To‘g‘onda joylashgan ID 614 nuqtada butun kuzatuv davri uchun – 6,78 mm vertikal siljish qayd etilgan.

Shunday qilib, ID 7684, 7644, 650 va 614 nuqtalarning kuzatuv davridagi umumiy vertikal siljishlari mos ravishda –21,31 mm, –8,69 mm, –19,22 mm va –6,78 mm ni tashkil etdi. Nuqtalarning cho‘kish yoki ko‘tarilishi mos ravishda manfiy yoki musbat ishoralar bilan ko‘rsatiladi. Ko‘rib chiqilayotgan nuqtaning kuzatuv davridagi vertikal siljish grafiklari oynaning quyi qismida keltirilgan bo‘lib, ular nuqta qiymatining vaqt bo‘yicha o‘zgarish yo‘nalishi va dinamikasini tavsiflaydi.

Nuqtalarning ID raqamlari bo‘yicha kuzatuv davridagi gorizont va vertikal siljishlarini yuklab olingan ma‘lumotlar faylida ham ko‘rish mumkin. Har bir aniq nuqta uchun butun kuzatuv davri bo‘yicha siljish grafisini qurish mumkin (15–22-rasmlar).



15-rasm. ID 7835 nuqta gorizont siljishining kuzatuv davridagi o‘zgarish grafigi.



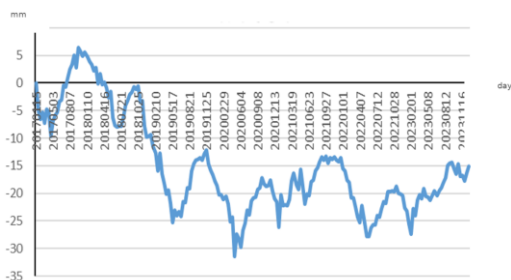
16-rasm. ID 706 nuqta gorizont siljishining kuzatuv davridagi o‘zgarish grafigi.



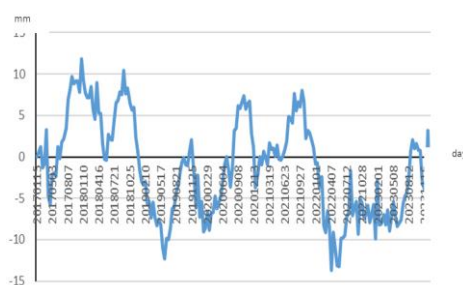
17-rasm. ID 616 nuqta gorizont siljishining kuzatuv davridagi o‘zgarish grafigi.



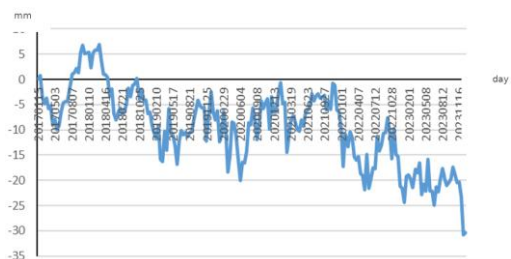
18-rasm. ID 616 nuqta gorizont siljishining kuzatuv davridagi o‘zgarish grafigi.



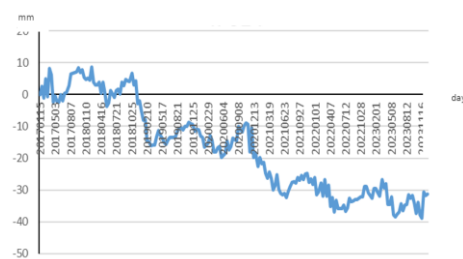
19-rasm. ID 7984 nuqta vertikal siljishining kuzatuv davridagi o'zgarish grafigi.



20-rasm. ID 7644 nuqta vertikal siljishining kuzatuv davridagi o'zgarish grafigi.

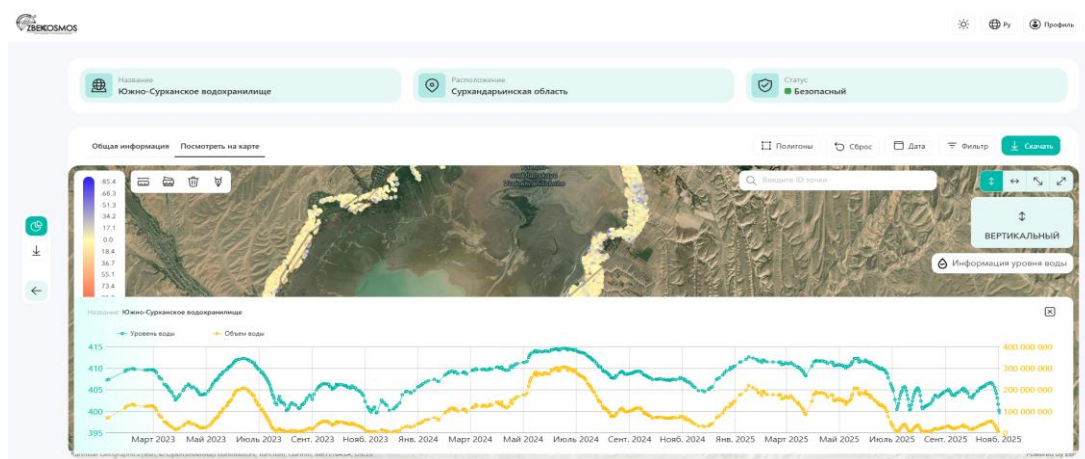


21-rasm. ID 650 nuqta vertikal siljishining kuzatuv davridagi o'zgarish grafigi.



22-rasm. ID 614 nuqta vertikal siljishining kuzatuv davridagi o'zgarish grafigi.

15–22-rasmlarda aniq nuqtalarning gorizontal va vertikal siljishlarining 2023-yil davomidagi vaqt bo'yicha o'zgarish grafiklari keltirilgan. Suv omboridagi suv sathi to'g'risidagi ma'lumot 2023-yil yanvardan 2025-yil oktabrgacha bo'lgan davr uchun keltirilgan (23-rasm).



23-rasm. Suv ombori suv sathining holati.

Suv omborlari radar sun'iy yo'ldosh monitoringi tasvirlarini interferometrik qayta ishlash va tahlil qilish natijalari kuzatilgan davrda to'g'onlar siljishining suv omboridagi suv sathiga bog'liq ekanligini ko'rsatdi.

Demak, doimiy sun'iy yo'ldosh monitoringi tizimi suv ombori to'g'onidagi siljish ko'rsatkichlarini (gorizontal va vertikal) nazorat qilish va joriy vaziyatni baholash imkonini beradi. Ushbu suv ombori to'g'onining sun'iy yo'ldosh monitoringi 2017-yil 9-yanvardan 2023-yil 27-dekabrgacha olib borilgan.

Bundan tashqari, Surxon suv omborida zamonaviy yuqori sezgirlikdagi seysmik stansiyalar o'rnatilgan bo'lib, ular zilzilalarning to'g'onga ta'sirini real vaqt rejimida instrumental kuzatib boradi. 2025-yil 3-noyabrdagi zilzila bo'yicha elektron platforma ma'lumotlariga ko'ra, 6 ta akselerometr dan uch yo'nalishda yozuvlar olingan, jami 18 ta akselerogramma qayd etilgan.

Natijalar tahlili va muhokamasi

23-rasmda ko'rsatilganidek, 2023-yilda suv omboridagi suv sathi barqaror bo'lgan yoki ortgan (yoki kamaygan). Yuk (suv sathi) kamayganda (mart, iyun o'rtasidan iyul o'rtasigacha, oktabr) to'g'onning gorizont siljishi kamayadi (to'g'on g'arbga siljiydi), yuk (suv sathi) ortganda esa (may – iyun o'rtasi, sentabr, dekabr) to'g'onning siljishi ortadi (to'g'on sharqqa siljiydi), bu 15–18-rasmlarda keltirilgan 2023-yilgi gorizont siljish ko'rsatkichlariga mos keladi.

Shuningdek, 19–22-rasmlarda keltirilgan grafiklardan ko'rinib turibdiki, yuk (suv sathi) kamayganda (mart, iyun o'rtasidan iyul o'rtasigacha, oktabr) vaqt oralig'ining qisqaligi tufayli suv sathi bilan bog'liq vertikal siljishlarda aniq trend kuzatilmaydi. Yuk (suv sathi) ortganda esa (may – iyun o'rtasi, sentabr, dekabr) to'g'onning vertikal siljishi kamayadi (to'g'on cho'kadi), bu 2023-yilgi vertikal siljish ko'rsatkichlariga mos keladi [8]. Ayni paytda nuqtalarning siljishi mavsumiy tarzda ro'y beradi: maksimal mutlaq qiymatlar, ya'ni ko'tarilish va cho'kish cho'qqilari suv ombordagi suv hajmi o'zgaradigan bahor-yoz fasllariga to'g'ri keladi.

InSAR va instrumental seysmik ma'lumotlar tubdan farq qiluvchi vaqt masshtablarida ishlaydi va turli fizik hodisalarni qayd etadi. InSAR siljishlari (2017–2023-yillar uchun mavsumiy amplitudalar vertikal bo'yicha $\pm 86,8$ mm va gorizont bo'yicha $\pm 110,7$ mm gacha) suv omborini to'ldirish–bo'shatish sikli bilan boshqariladigan kvazistatik deformatsiyalar bo'lib, ularning xarakterli davri oylar bilan o'lchanadi: suv sathi mavsumiy ko'tarilib-pasayishi bilan to'g'on tanasi va zaminiga tushuvchi gidrostatik yuklama o'zgaradi va sekin, qaytar elastik deformatsiya hosil bo'ladi. 2025-yil 3-noyabrdagi zilzila davomida akselerometrlar qayd etgan siljishlar (gorizont 0,16 mm, vertikal 0,15 mm) esa seysmik to'lqinlar o'tishi natijasida hosil bo'lgan, xarakterli davri soniyalar bilan o'lchanadigan dinamik tranzient siljishlardir.

Bu ikki rejim bir-biriga zid emas, balki bir-birini to'ldiradi. InSAR yozuvi to'g'onning uzoq muddatli bazaviy xatti-harakatini belgilaydi va to'g'on o'zining asosiy yuklamasi (suv ombori) ta'sirida qaytar va oldindan aytib bo'ladigan tarzda deformatsiyalanishini tasdiqlaydi; o'rtacha siljishning nolga yaqinligi (–0,6 mm va –0,5 mm) buzilishga olib boruvchi uzoq muddatli trend mavjud emasligini ko'rsatadi.

Ushbu bazaviy fonda kuchli mintaqaviy zilzila ham to'g'onga faqat submillimetrlil tranzient qo'shimcha kiritganini instrumental yozuvlar ko'rsatadi – bu to'g'on xavfsiz tarzda qabul qilib kelayotgan odatiy mavsumiy harakatlardan taxminan ikki-uch marta kichikdir. Ikki ma'lumotlar to'plamining birgalikdagi talqini har biri alohida to'liqroq xavfsizlik ma'lumotlarini beradi. Sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari uzoq muddatli konstruktiv barqarorlikni, instrumental ma'lumotlar esa dinamik seysmik bardoshlilikni tasdiqlaydi [9].

Suv ombori tomonidan qo'zg'atilgan seysmiklik (reservoir-triggered seismicity) masalasiga kelsak, 2025-yil 3-noyabrdagi hodisa Afg'onistonda joylashgan uzoq maydonli tektonik zilzila (episentral masofa $\Delta \approx 146$ km, o'choq chuqurligi 30 km) bo'lib, suv ombori qo'zg'atgan hodisa emas: bunday hodisalar odatda suv omboridan bir necha kilometr radiusda va sayoz chuqurlikda ro'y beradi. InSAR yozuvi ham faqat elastik mavsumiy deformatsiyani ko'rsatadi va suv ombori yuklamasidan kuchlanish to'planishini bildiruvchi tezlashuvchi trend kuzatilmaydi.

Amaliy nuqtayi nazardan, namoyish etilgan ish tartibi – milliy elektron platformada zilzilani avtomatik aniqlash, ochiq Sentinel-1 InSAR ma'lumotlarini qayta ishlash va siljish ko'rsatkichlarini tezkor baholash – 2025-yil 3-noyabrdagi zilzila ta'sirida bo'lgan 25 ta suv ombori to'g'onini zilziladan keyingi tezkor skriningdan o'tkazishga va umuman seysmik faol hududlardagi istalgan monitoring qilinayotgan to'g'onga qo'llanilishi mumkin. Usul erkin foydalaniladigan sun'iy yo'ldosh ma'lumotlariga tayanishi sababli, mavjud seysmik stansiyalardan tashqari qimmat maxsus asbob-uskunalarni talab qilmaydigan arzon va takrorlanuvchan xavfsizlikni baholash vositasini taqdim etadi.

Xulosa

Favqulodda vaziyatlar vazirligining Seysmoprognoztik monitoring markazi tomonidan elektron platformaga 25 ta to'g'on bo'yicha ma'lumotlar joylashtirilgan. Ulardan 22 tasida zilzila kuchi MSK shkalasi bo'yicha 5 balldan past bo'lgan. Qolgan 3 ta to'g'ondan (Degrez, Surxon va To'palang) sun'iy yo'ldosh (radar kosmik) monitoringi faqat Surxon va To'palang to'g'onlarida olib borilgan.

Radar kosmik monitoringi sun'iy yo'ldosh tasvirlarini interferometrik qayta ishlash orqali yer yuzasidagi deformatsiya, siljish va cho'kish dinamikasini aniqlash, shuningdek, suv omborlari to'g'onlarining dinamik xossalari o'rganish va ularning kuchlanish-deformatsiya holatini baholash imkonini beradi. Janubiy Surxon to'g'oni bo'yicha kosmik monitoring ma'lumotlarining tahlili shuni ko'rsatdiki, elektron platformada joylashtirilgan ma'lumotlarga ko'ra, monitoring 2023-yil dekabrgacha olib borilgan.

Kuzatuv davrida (to'g'on va tutash hudud bo'yicha) cho'kish va ko'tarilishning maksimal qiymatlari mos ravishda $-79,6$ mm va $+86,8$ mm ni, gorizontal siljishning maksimal qiymatlari $-102,0$ mm va $+110,7$ mm ni tashkil etdi; o'rtacha vertikal va gorizontal siljishlar mos ravishda $-0,6$ mm va $-0,5$ mm ga teng. Siljishlar mavsumiy xarakterga ega bo'lib, ko'tarilish va cho'kish cho'qqilari suv hajmi o'zgaradigan bahor-yoz fasllariga to'g'ri keladi va suv sathi bilan bevosita bog'liq; deformatsiyalar qaytar (elastik) bo'lib, uzoq muddatli xavfli trend kuzatilmaydi.

2025-yil 3-noyabrda Afg'onistonda sodir bo'lgan kuchli zilzila ($M = 6,8$) to'g'onda faqat submillimetrlil (gorizontal $0,16$ mm, vertikal $0,15$ mm) qisqa muddatli dinamik siljish hosil qildi, bu odatiy mavsumiy harakatlardan ikki-uch tartib kichikdir. Ko'p yillik sun'iy yo'ldosh va qisqa muddatli instrumental ma'lumotlar to'plamlarining birgalikdagi talqini to'g'on xavfsizligining to'liq manzarasini beradi va arzon, takrorlanuvchan metodika sifatida seysmik faol hududlardagi boshqa suv omborlari to'g'onlariga ham tatbiq etilishi mumkin. Kelgusida uzluksiz InSAR va akselerometrik monitoringni davom ettirish hamda ishlab chiqilgan yondashuvni milliy platformada qayd etilgan boshqa suv omborlari to'g'onlariga tizimli qo'llash maqsadga muvofiqdir.

Adabiyotlar

1. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining «Aholi va hududlarning seysmik xavfsizligi tizimini yanada takomillashtirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida»gi 2023-yil 16-maydagi PQ-158-son qarori.
2. Sultanov K., Umarchonov S.I. Stress-strain state of earth dams considering soil moisture // AIP Conference Proceedings. 2026. Vol. 3405, No. 1. Art. no. 440001. doi: 10.1063/12.0043312.
3. Umarchonov S.I., Loginov P.V. Study of the stress-strain state of the Charvak dam taking into account water pressure // Problems of Mechanics. 2025. No. 3. Pp. 18–24.
4. Rashidi M., Heidar M., Azizyan G. Numerical analysis and monitoring of an embankment dam during construction and first impounding (Case study: Siah Sang Dam) // Scientia Iranica. 2018. Vol. 25, No. 2. Pp. 505–516. doi: 10.24200/sci.2017.4181.
5. Wei K., Chen S., Li G., Han H. Application of a generalised plasticity model in high earth core dam static and dynamic analysis // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2020. Vol. 24. Pp. 979–1012. doi: 10.1080/19648189.2018.1437777.
6. Qi C., Lu W., Wu J., Liu X. Application of effective stress model to analysis of liquefaction and seismic performance of an earth dam in China // Mathematical Problems in Engineering. 2015. Vol. 2015. Art. no. 404712. Pp. 1–7. doi: 10.1155/2015/404712.
7. Yasir Al-Husseinawi. Spaceborne InSAR for Dam Stability // Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Newcastle University, April 2019.
8. Seysmoprognoztik monitoring respublika markazining rasmiy veb-sayti. 2025. URL: <https://www.seismo.uz> (murojaat sanasi: 15.01.2026).
9. O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining «Suv omborlari to'g'onlarining seysmik mustahkamligini uzluksiz radar kosmik monitoringi tizimini joriy etish to'g'risida»gi 2024-yil 11-oktabrdagi 666-son qarori.

Bekmirzayev D.A., Nabiye S.N.

Assessment of reservoir dam deformations based on radar space monitoring (case of the Surkhan reservoir dam)

Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T.Urazbaev (Tashkent, Uzbekistan)

G.O.Mavlyanov Institute of Seismology, Academy of Sciences of Uzbekistan (Tashkent, Uzbekistan)

Abstract The article presents a methodology for assessing the deformation, displacement and subsidence dynamics of reservoir dams on the basis of radar space monitoring (InSAR) data, and the results of its application to the earthfill dam of the Surkhan reservoir. In Uzbekistan, a unified system of seismological observations at reservoirs and the “Electronic Platform for Conducting Seismological Observations at Reservoirs” have been put into operation, allowing a rapid assessment of the state of dams after strong earthquakes. Based on the interferometric processing of Sentinel-1 satellite radar images, the displacements of the Surkhan reservoir dam and the adjacent area were analysed for the period from January 9, 2017 to December 27, 2023. During the observation period, the maximum subsidence and uplift were -79.6 mm and $+86.8$ mm respectively, and the maximum horizontal displacements were -102.0 mm and $+110.7$ mm; the average vertical and horizontal displacements were -0.6 mm and -0.5 mm. It is established that the seasonal variation of the dam displacements is directly related to the water level in the reservoir, the deformations are reversible (elastic) in nature, and no long-term hazardous trend is observed. It is shown that the strong $M = 6.8$ earthquake that occurred in Afghanistan on November 3, 2025 produced only a sub-millimetre short-term dynamic displacement of the dam. The proposed approach, based on freely available satellite data, can be applied as a low-cost and replicable monitoring tool for other reservoir dams. **Keywords:** radar space monitoring, interferometry (InSAR), reservoir dam, deformation, displacement and subsidence dynamics, water level, earthquake, seismic safety.

Бекмирзаев Д.А., Набиев С.Н.

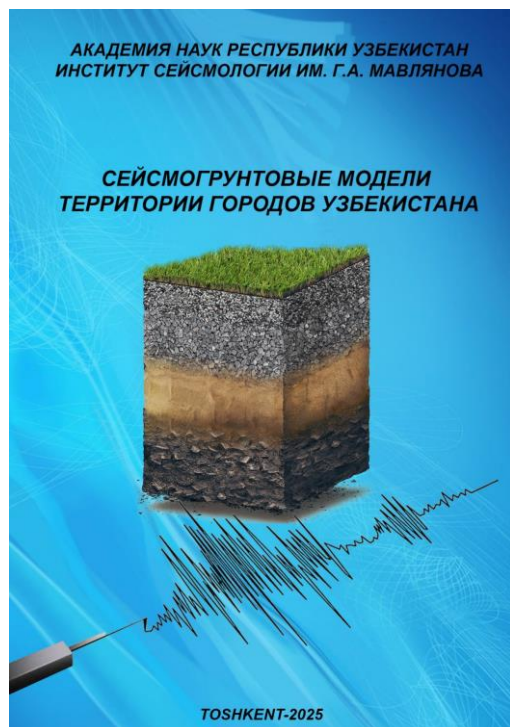
Оценка напряженно-деформационный состояние плотин водохранилищ на основе радиолокационного космического мониторинга (на примере плотины сурханского водохранилища)

Институт механики и сейсмостойкости сооружений имени М.Т.Уразбаева (Ташкент, Узбекистан)

Институт сейсмологии имени Г.О.Мавлянова АН РУз (Ташкент, Узбекистан)

Аннотация: В статье представлена методика оценки динамики деформаций, смещений и осадок плотин водохранилищ на основе данных радарного космического мониторинга (InSAR) и результаты её применения к грунтовой плотине Сурханского водохранилища. В Узбекистане введены в действие единая система сейсмологических наблюдений на водохранилищах и «Электронная платформа ведения сейсмологических наблюдений на водохранилищах», позволяющие оперативно оценивать состояние плотин после сильных землетрясений. На основе интерферометрической обработки радарных снимков спутника Sentinel-1 проанализированы смещения плотины Сурханского водохранилища и прилегающей территории за период с 9 января 2017 года по 27 декабря 2023 года. За период наблюдений максимальные значения осадки и поднятия составили $-79,6$ мм и $+86,8$ мм, максимальные горизонтальные смещения $-102,0$ мм и $+110,7$ мм; средние вертикальное и горизонтальное смещения равны $-0,6$ мм и $-0,5$ мм соответственно. Установлено, что сезонное изменение смещений плотины непосредственно связано с уровнем воды в водохранилище, деформации носят обратимый (упругий) характер, а долгосрочный опасный тренд не наблюдается. Показано, что сильное землетрясение магнитудой $M = 6,8$, произошедшее 3 ноября 2025 года в Афганистане, вызвало лишь субмиллиметровое кратковременное динамическое смещение плотины. Предложенный подход, основанный на свободно доступных спутниковых данных, может применяться как недорогой и воспроизводимый инструмент мониторинга для других плотин водохранилищ.

Ключевые слова: радарный космический мониторинг, интерферометрия (InSAR), плотина водохранилища, деформация, динамика смещений и осадок, уровень воды, землетрясение, сейсмическая безопасность.



**В.А.Исмаилов, Ш.И.Ёдгоров, Б.У.Актамов,
Э.М.Ядигаров, Р.Б.Тешаева**

**СЕЙСМОГРУНТОВЫЕ МОДЕЛИ НА
ТЕРРИТОРИИ ГОРОДОВ УЗБЕКИСТАНА. -
Т.: Umid Design, 2025. - 177 с.**

Monografiyaning umumiy mazmuni

Mazkur monografiya «O'zbekiston shaharlari hududlarining seysmogrunt modellari» mavzusiga bag'ishlangan bo'lib, unda shahar hududlarida seysmik ta'sirni baholashda mahalliy grunt sharoitlarining o'zni, seysmik to'lqinlarning grunt qatlamlari orqali tarqalishi, ularning yer yuzasida kuchayishi yoki susayishi hamda bu jarayonlarni modellashtirish masalalari yoritilgan. Monografiyada seysmogrunt modeli tushunchasi, uni ishlab chiqish metodologiyasi, qurilish maydonchalari va shahar miqyosida seysmik mikrohududlashtirish ishlaridagi amaliy ahamiyati keng tahlil qilingan.

Ishning asosiy g'oyasi shundan iboratki, seysmik xavfni baholashda faqat umumiy seysmik rayonlashtirish yoki hududning boshlang'ich balligiga tayanish yetarli emas. Chunki zilzila ta'siri bir xil magnituda va masofada ham turli grunt sharoitlarida turlicha namoyon bo'ladi. Monografiyada Toshkent, Gazli, Nazarbek, Pop, Marjonbuloq, Boysunskiy va boshqa zilzilalar misolida mahalliy grunt sharoitlari makroseysmik effektga sezilarli ta'sir ko'rsatishi qayd etilgan. Shu sababli mualliflar seysmik ta'sirni aniqroq baholash uchun grunt qatlamlarining fizik-mexanik, geologik va dinamik xususiyatlarini hisobga oluvchi seysmogrunt modellari zarurligini asoslaydi.

Monografiyada seysmogrunt modellarini ishlab chiqish uchun zarur bo'lgan asosiy parametrlar sifatida grunt qatlamlarining qalinligi, zichligi, P va S to'lqinlar tezligi, Vs30 ko'rsatkichi, yutilish xususiyatlari, grunt yer ostisuvlari sathi, rezonans chastotasi va qatlamlarning geologik tuzilishi ko'rib chiqiladi.

Monografiyaning amaliy qismi O'zbekiston shaharlari hududlarida seysmogrunt modellari asosida seysmik xavfsizlikni oshirish masalalariga qaratilgan. Unda seysmogrunt modellari shaharsozlik rejalashtirishida, qurilish me'yorlarini takomillashtirishda, muhandislik-geologik izlanishlarda, seysmik mikrohududlashtirish xaritalarini tuzishda va seysmik xavf yuqori bo'lgan zonalarini ajratishda muhim vosita sifatida ko'rsatiladi.

Monografiyaning muhim natijalaridan biri shundaki, unda seysmik ta'sirni faqat «ball» yoki grunt kategoriyasi orqali baholash yondashuvi yetarli emasligi ko'rsatiladi. Buning o'rniga geofizik jihatdan asoslangan parametrlar – tezlanish, spektral tezlanish, chastota-amplituda xususiyatlari, Vs30, gruntning rezonans javobi va seysmik to'lqinlarning qatlamlar bo'yicha o'zgarishini hisobga olish zarurligi asoslanadi. Bu yondashuv seysmik mikrohududlashtirish sifatini oshiradi va qurilish obyektlari uchun xavfsizroq loyihaviy yechimlar ishlab chiqishga xizmat qiladi.

Umuman olganda, monografiya O'zbekiston shaharlarida seysmik xavfni baholashda mahalliy grunt sharoitlarini chuqur hisobga olish zarurligini ilmiy asoslab beradi. Unda keltirilgan nazariy yondashuvlar, hisoblash usullari va amaliy tavsiyalar shaharsozlik, seysmik mikrohududlashtirish, geotexnika, seysmik xavfsizlik va zilzilabardosh qurilish sohalari uchun muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega. Monografiya talaba va magistrilar, muhandis-geologlar, seysmologlar, geotexnik mutaxassislar hamda seysmik xavfsizlik bilan shug'ullanuvchi ilmiy xodimlar uchun foydali manba hisoblanadi.

**С.З.Мирзаев, В.А.Исмаилов, Ш.И.Ёдгоров, Б.У.Актамов, Ш.Б.Авазов, Р.С.Ибрагимов,
Т.Л.Ибрагимова, Т.У.Мамарозиқов, С.Х.Ашуров, Д.Д.Жумаев, А.С.Ювмитов, Б.А.Туляганов,
А.Т.Хотамов, В.А.Кондратьев, С.А.Тягунов, М.А.Мирзаев, Э.М.Ядигаров, Р.Б.Тешаева,**

*У.А.Нурматов, Ю.М.Садиков, Н.А.Нишонов, Н.М.Мухаммадкулов, Ф.Х.Садиров,
А.Т.Азамжонов, Б.Б.Хайридинов, А.А.Турсунбоев, А.С.Хусамиддинов, Ж.Ш.Бозоров,
Д.Д.Юсупов, Н.Ф.Исламова*

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ СЦЕНАРНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ТАШКЕНТА НА ОСНОВЕ СИМУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ. -

Т.: Umid Design, 2026. - 356 с.



На основе анализа и оценки комплекса показателей, характеризующих геолого-тектоническое строение сейсмогенных слоёв земной коры и уровень сейсмической опасности, в книге представлена методология выбора сценарного землетрясения как на территории города, так и за её пределами. С использованием законов затухания сейсмических волн и моделей реакции грунтов верхних слоёв выполнена количественная оценка параметров сейсмического воздействия на здания и сооружения.

С учётом многообразия конструктивных решений существующих зданий на территории города разработана геоинформационная платформа, в которой обобщены результаты оценки степени повреждения зданий при воздействии сценарных землетрясений. Кроме того, определены функции сейсмической уязвимости для выделенных типов зданий. Рассмотрены основные факторы,

влияющие на уровень сейсмической уязвимости, и проанализированы существующие методы её количественной оценки, включая матрицы вероятности повреждений, графические зависимости и функции сейсмической уязвимости.

В книге подробно изложена научно обоснованная методология разработки симуляционной модели сценарного землетрясения, а также представлены результаты её тестовой апробации при заданных параметрах сценарного события на территории города Ташкента.

Книга предназначена для инженеров-сейсмологов, инженеров-строителей, а также руководящих специалистов в сфере обеспечения сейсмической безопасности. Издание может использоваться в качестве учебного пособия для магистрантов и докторантов соответствующих направлений подготовки.

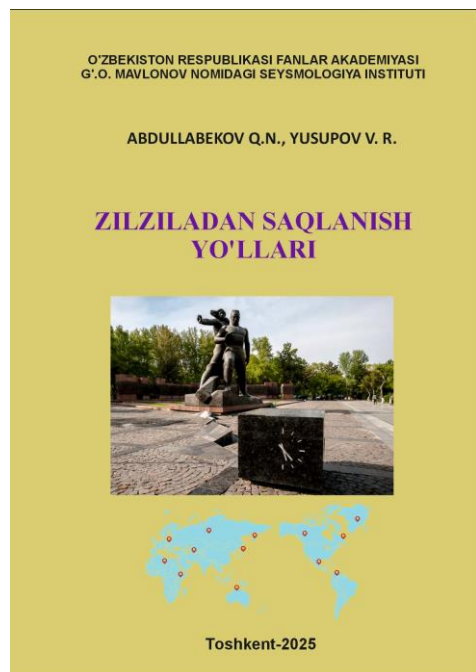
В книге представлены результаты научно-исследовательского проекта № ALM-202311142839 на тему: «Создание, цифровой симуляционной модели, позволяющей оценить экономические последствия сильных землетрясений на территории Ташкента», финансируемого Агентством инновационного развития Республики Узбекистан и Фондом поддержки сферы сейсмологии, обеспечения сейсмостойкости сооружений и сейсмической безопасности в течение 2024-2025 гг.

Q.N.Abdullabekov, V.R.Yusupov

ZILZILADAN SAQLANISH YO'LLARI. -

T.: Umid design, 2025. - 172 b.

Q.N. Abdullabekov va V.R. Yusupov tomonidan yozilgan «Zilziladan saqlanish yo'llari» ilmiy ommabop kitobi seysmologiya, geologiya va tabiiy ofatlar xavfsizligi sohasiga bag'ishlangan ilmiy-ommabop asar bo'lib, unda zilzilalarning kelib chiqishi, rivojlanish qonuniyatlari, ularning jamiyat va iqtisodiyotga ta'siri hamda seysmik xavfni kamaytirish bo'yicha muhim ma'lumotlar jamlangan.



Asarda, avvalo, Yer sayyorasining ichki tuzilishi, litosfera plitalarining harakati va tektonik jarayonlar haqida ma'lumot beriladi. Mualliflar zilzilalarning paydo bo'lish mexanizmlarini tushuntirib, yer qobig'ida to'plangan kuchlanishlarning ma'lum nuqtalarda uzilishlar hosil qilishi natijasida seysmik to'lqinlar vujudga kelishini ilmiy asosda yoritadilar. Shuningdek, zilzilalarning o'choq (gipotsentr) va epitsentr tushunchalari, seysmik to'lqinlarning turlari hamda ularning tarqalish xususiyatlari haqida batafsil ma'lumotlar keltirilgan.

Kitobning muhim jihatlaridan biri zilzilalarning turlari va ularning kelib chiqish sabablarini keng yoritganidir. Mualliflar tektonik, vulqon, ko'chki va texnogen zilzilalar haqida ma'lumot berib, ularning bir-biridan farqli jihatlarini tushuntiradilar. Ayniqsa, Markaziy Osiyo va O'zbekiston hududida kuzatiladigan tektonik zilzilalarning xususiyatlari, mintaqaning seysmotektonik holati hamda tarixiy kuchli zilzilalar misolida mavzu yoritilgan. O'zbekiston va unga qo'shni hududlarning seysmik faolligi haqida alohida ma'lumotlar berilgan. Respublika hududining seysmik rayonlashtirish xaritalari, faol tektonik yoriqlar va zilzila

o'choqlari joylashgan hududlar tavsiflangan. Mualliflar Toshkent, Andijon, Farg'ona, Gazli va boshqa hududlarda sodir bo'lgan yirik zilzilalarning oqibatlarini tahlil qilib, ulardan chiqarilgan ilmiy va amaliy xulosalarni bayon etilgan.

Kitobda zilzilalarni o'rganish va kuzatish usullariga ham katta e'tibor qaratilgan. Zamonaviy seysmologik stansiyalar, seysmograflar, geofizik monitoring tizimlari va sun'iy yo'ldosh texnologiyalaridan foydalanish imkoniyatlari haqida ma'lumotlar berilgan. Seysmik ma'lumotlarni yig'ish, qayta ishlash va tahlil qilish usullari oddiy va tushunarli tarzda izohlangan. Shuningdek, geologik, geofizik va geodezik kuzatuvlarning zilzilalarni o'rganishdagi ahamiyati ko'rsatib berilgan.

Zilzila darakchilari va zilzilalarni oldindan aytib berish masalasiga ham to'xtalib yer osti suvlarining kimyoviy tarkibidagi o'zgarishlar, elektromagnit maydon anomaliyalari, geodezik deformatsiyalar, gaz ajralishlari va boshqa ehtimoliy darakchilar haqida ma'lumotlar keltiriladi. Shu bilan birga, zilzilalarni aniq vaqt, joy va magnituda bo'yicha prognoz qilish hanuzgacha dunyo ilm-fanining eng murakkab muammolaridan biri ekanligi ta'kidlanadi. Zilzilalarning inson hayoti va iqtisodiyotga ta'siri keng yoritilgan. Kuchli zilzilalar natijasida yuzaga keladigan qurbonlar, moddiy zararlar, transport va kommunikatsiya tizimlarining ishdan chiqishi, ishlab chiqarishning to'xtashi hamda ekologik muammolar misollar asosida tushuntirilgan. Dunyoning turli mamlakatlarida sodir bo'lgan yirik zilzilalar oqibatlari tahlili orqali tabiiy ofatlarning jamiyat rivojlanishiga ta'siri ko'rsatib berilgan.

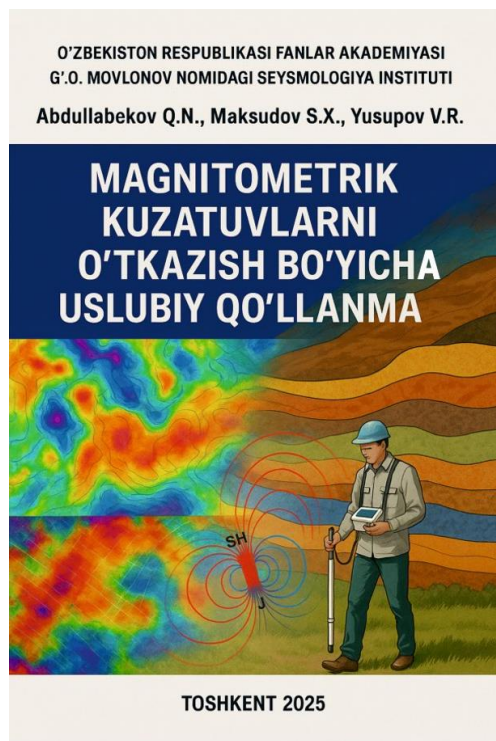
Kitobning eng amaliy ahamiyatga ega qismlaridan biri zilziladan saqlanish va uning oqibatlarini kamaytirish bo'yicha tavsiyalarni o'z ichiga oladi. Seysmik xavfsizlikni ta'minlashda zamonaviy qurilish me'yorlariga rioya qilish, zilzilabardosh bino va inshootlar qurish, mavjud obyektlarni mustahkamlash zarurligini ta'kidlangan.

Aholining zilzila paytidagi harakatlari ham kitobda batafsil yoritilgan. Zilzila vaqtida bino ichida, ko'chada yoki transport vositasida bo'lgan shaxslarning qanday harakat qilishi kerakligi bosqichma-bosqich tushuntirilgan.

Abdullabekov Q.N., Maksudov S.X., Yusupov V.R.

MAGNITOMETRIK KUZATUVLARNI O'TKAZISH BO'YICHA USLUBIY QO'LLANMA. - T.: Biznes Poligraf, 2025. - 14 b.

«Magnitometrik kuzatuvlarni o'tkazish bo'yicha uslubiy qo'llanma» O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi G'.O. Mavlonov nomidagi Seysmologiya instituti olimlari Q.N. Abdullabekov, S.X. Maksudov va V.R. Yusupov tomonidan tayyorlangan bo'lib, 2025-yilda Toshkent shahrida nashr etilgan. Mazkur qo'llanma seysmologiya, geofizika va seysmoprognoztik monitoring sohalarida faoliyat yuritayotgan mutaxassislar uchun amaliy va ilmiy ahamiyatga ega bo'lgan metodik manba hisoblanadi.



Qo'llanmaning asosiy maqsadi O'zbekistonning seysmik faol hududlarida Yer magnit maydonining o'zgarishlarini kuzatish, qayd etish va tahlil qilish bo'yicha yagona metodik yondashuvni shakllantirishdan iborat. Bugungi kunda zilzilalarni oldindan prognoz qilish va seysmik xavfni baholash jahon seysmologiyasining eng murakkab va dolzarb muammolaridan biri hisoblanadi. Shu sababli elektromagnit maydon parametrlari o'zgarishlariga asoslangan zilzila darakhchilarini aniqlash bo'yicha tadqiqotlar alohida ahamiyat kasb etmoqda. Qo'llanmada aynan shu yo'nalishdagi kuzatuvlarni tashkil etish va amalga oshirishning nazariy hamda amaliy asoslari bayon qilingan.

Kitobda avvalo Yer magnit maydonining fizik mohiyati, uning tabiiy va texnogen omillar ta'sirida o'zgarish xususiyatlari haqida ma'lumot berilgan. Magnit maydondagi anomal o'zgarishlarning geodinamik jarayonlar, tektonik harakatlar va zilzilalarga tayyorgarlik jarayonlari bilan bog'liqligi ilmiy manbalar asosida yoritilgan. Shuningdek, magnit maydon kuzatuvlari orqali seysmik jarayonlarning rivojlanishini baholash imkoniyatlari ham ko'rib chiqilgan.

Qo'llanmaning muhim jihatlaridan biri magnitometrik kuzatuv punktlarini tanlash masalalariga bag'ishlanganidir. Unda statsionar magnitometrik stansiyalarni joylashtirish

uchun geologik, tektonik va geofizik mezonlar keltirilgan. Kuzatuv nuqtalarini tanlashda sanoat shovqinlari, elektr uzatish tarmoqlari, temir yo'llar va boshqa texnogen manbalarining ta'sirini minimallashtirish zarurligi alohida ta'kidlangan. Bu esa olinadigan ma'lumotlarning ishonchliligini oshirishga xizmat qiladi.

Profillar bo'yicha qayta o'lchov ishlarini tashkil etish va amalga oshirish metodikasi batafsil tavsiflangan. Magnit maydon parametrlari bo'yicha dala kuzatuvlarini o'tkazish tartibi, o'lchovlar oralig'i, takroriy kuzatuvlarning davriyligi hamda ma'lumotlarni qayta ishlash usullari bosqichma-bosqich bayon etilgan. Ushbu tavsiyalar geofizik tadqiqotlarning aniqligi va takrorlanuvchanligini ta'minlashga yordam beradi.

Qo'llanmada magnitometrlarning texnik holatini nazorat qilish va ularning ishlash sifatini tekshirish usullariga ham katta e'tibor qaratilgan. Asboblarni kalibrlash, kuzatuv natijalaridagi xatoliklarni aniqlash va bartaraf etish bo'yicha amaliy ko'rsatmalar berilgan. Bu esa uzoq muddatli monitoring ma'lumotlarining sifatini saqlash va tahlil natijalarining ishonchliligini oshirish uchun muhim ahamiyatga ega. O'zbekiston hududining geologik-tektonik va geofizik xususiyatlari hisobga olingan holda magnitometrik monitoringni tashkil etish bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqilgan. Respublikamizning seysmik faol hududlarida kuzatiladigan elektromagnit anomalialar, ularning ehtimoliy sabablari va zilzilalar bilan bog'liqligi misollar orqali tushuntirilgan. Olingan ma'lumotlarni kompleks tahlil qilish hamda boshqa seysmoprognoztik parametrlar bilan taqqoslash usullari ham keltirilgan.

Mazkur uslubiy qo'llanma O'zbekiston Respublikasi Favqulodda vaziyatlar vazirligi Seysmoprognoztik monitoring Respublika markazi, Seysmologiya instituti hamda geofizik kuzatuvlar olib boruvchi boshqa tashkilotlar faoliyatida amaliy qo'llash uchun mo'ljallangan.

Хусомиддинов Сабриддин Самарович хотирасига

(1946 йил 14 июл – 2026 йил 7 март)



2026 йил 7 мартда Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ф.О.Мавлонов номидаги Сейсмология институтининг собиқ директори, сейсмология ва сейсмометрия, зилзилалар ўчоқларини тайёрланиш жараёнларини Ернинг табиий электромагнит майдони импульслари ва ионосфера майдонида намоён бўлиши соҳасида етакчи мутахассис, Ўзбекистонда сейсмоионосфера ва табиий электромагнит импульслари тадқиқотларини ташкил этувчиси, физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим Сабриддин Самарович Хусомиддинов вафот этди.

Сабриддин Самарович Хусомиддинов 1946 йил 14 июлда Паркент шаҳрида зиёлилар оиласида туғилди. 1964 йилда ўрта мактабни тугатгач меҳнат фаолиятини Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институти лаборанти лавозимида. 1965-1970 йилларда Тошкент электротехника алоқа институтида (ҳозирги Тошкент ахборот технологиялари университети) ўқиди ва радиоалоқа муҳандиси мутахассислигига эга бўлди. 1974-1972 йилларда ҳарбий хизматда бўлди. С.С.Хусомиддинов 1972 йилдан то вафотига қадар Сейсмология институтида катта муҳандис, кичик илмий ходим, катта илмий ходим, Комплекс экспедиция бош геофизиги, етакчи илмий ходим, Янгибозор магнит-ионосфера обсерваторияси мудир, директорнинг илмий ишлар бўйича ўринбосари, институт директори лавозимларида фаолият юритди.

С.С.Хусомиддинов меҳнат фаолиятидан узилмаган ҳолда 1980 йил Россия Фанлар академиясининг Ер физикаси институтида «Электромагнит майдонлар ва ионосферани зилзила билан боғлиқ хусусиятлари» мавзусида физика-метематика фанлари номзоди диссертациясини, 1991 йилда эса Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ф.О.Мавлонов номидаги Сейсмология институтида «Ўзбекистоннинг сейсмик фаол зоналарида геофизик майдонларнинг аномал ўзгаришлари қонуниятлари» мавзусида докторлик диссертациясини ҳимоя қилган.

С.С.Хусомиддинов Ўзбекистонда ионосфера ва табиий электромагнит майдон импульслари усуллари билан зилзилаларни прогноз қилишда фойдаланишнинг илмий-услубий асосларини яратишда ва амалиётга татбиқ этган, геодинamik полигонларда табиий электромагнит майдон импульслари кузатувларини ташкил этиш, олинган маълумотларни қайта ишлаш, улардаги даракчи сифатидаги ўзгаришларни ажратиш олишни илмий асосларини яратган.

Сабриддин Самаровичнинг илмий ва ташкилотчилик салоҳияти Ўзбекистонда сейсмология соҳасини ривожлантириш бўйича давлатимиз раҳбарияти томонидан қабул қилинган қатор қарор ва фармонларни тайёрлашда кўринди. Унинг бевосита раҳбарлигида қуйидаги ҳужжатлар тайёрланди: Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг № 38-Ф-сонли «Ўзбекистон Республикаси аҳолиси ва ҳудудини табиий ва техноген характердаги фавқулодда ҳодисалардан ҳимоя қилиш концепциясини ишлаб чиқиш тўғрисида»ги Қарори, 2007 йил 3 апрелдаги «Фавқулодда вазиятларни башорат қилиш ва олдини олиш бўйича Давлат дастурини тасдиқлаш тўғрисида»ги 71-сонли қарори, 2009 йил 9 июлдаги «ЎЗР Фанлар академияси Сейсмология институти сейсмологик станцияларининг моддий техника базасини такомиллаштириш тўғрисида»ги 191-сонли қарори, 2011 йил 19 июлдаги «Аҳолини зилзилалар оқибатида юзага келган фавқулодда вазиятларда (табиий ва техноген тусдаги) ҳаракат қилишга тайёрлаш комплекс дастурини тасдиқлаш тўғрисида»ги 208-сонли қарори, 2011 йил 24 августдаги «Ўзбекистон Республикаси Фавқулодда вазиятларнинг олдини олиш

ва ҳаракат қилиш давлат тизимини янада такомиллаштириш тўғрисида»ги 242-сонли қарори, шунингдек Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 9 августдаги «Сейсмология, сейсмик чидамли қурилиш ҳамда Ўзбекистон Республикаси аҳолиси ва ҳудудининг сейсмик хавфсизлиги соҳасида илмий тадқиқотлар олиб боришни такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорини тайёрлаш, қабул қилиниши ва уларни бажарилишида фаол иштирок этган.

Унинг бевосита иштирокида ва раҳбарлигида Ўзбекистондаги аналог сейсмик станциялар замонавий рақамли сейсмик станцияларга алмаштирилди, маълумотларни йиғиш, таҳлил қилиш билан шуғулланувчи махсус Ахборот-таҳлил маркази ташкил этилди, Ўзбекистон Республикаси Фавқулодда вазиятлар вазирлиги билан алоқалар янги поғонага кўтарилди. ЎзР ФВВ Фуқаро муҳофазаси институтида «Сейсмология тарихи» музейини ташкил этилишига салмоқли хисса қўшди.

С.С.Хусомиддинов ЎзР ФА Сейсмология институти ҳузуридаги «Геофизика. Фойдали қазилмаларни қидиришнинг геофизик усуллари» ихтисослигидан докторлик диссертацияларини ҳимоя қилиш бўйича Ихтисослаштирилган илмий кенгаш, Халқаро геофизика қўмитасининг ионосфера секцияси аъзоси, ионосферани вертикал зондлаш услубида кузатишларни Марказий Осиё бўйича координатори, бир неча халқаро планетар геофизик дастурларининг иштирокчиси, 1989-1992 йилларда «Зилзила ва у билан боғлиқ ҳодисалар» – собик иттифоқ дастурининг Марказий Осиё бўйича илмий раҳбари ва масъул ижрочиси бўлган.

С.С.Хусомиддинов илмий раҳбарлигида 1та фан доктори, 2та фан номзоди диссертациялари ҳимоя қилинган.

С.С.Хусомиддинов 200 дан ортиқ илмий ишлар, жумладан, 5 та монография, 10та ихтиро муаллифи ва 10дан ортиқ дастурий маҳсулотларнинг муаллифи бўлган. Илгари фанга номаълум бўлган «Зилзилалар олдидан импульсли электромагнит нурланиш» ҳодисалари; «Бўлажак зилзила фокуси устидаги ионосферанинг электрон зичлигининг аномал ўзгариши» ва «Яқинлашиб келаётган зилзила ҳудудида тўлқин деформациясининг кучайиши» ҳодисаларини аниқлаган.

Сабриддин Самарович ҳар қандай муаммо бўйича ўз нуқтаи назарига эга, муросасиз, шу билан бир қаторда камтар, ҳаммага биринчи бўлиб ёрдам қўлини берадиган олим ва инсон сифатида ҳамкасблари ва келгуси авлод хотирасида қолади.

*Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси
Сейсмология институти жамоаси*

Хамидов Лутфулла Абдуллаевич хотирасига

(1951 йил 9 феврал – 2026 йил 2 апрел)



2026 йил 2 апрелда Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ғ.О.Мавлонов номидаги Сейсмология институтининг бош илмий ходими, сейсмик фаол ер ёриқлари ва бўлажак тектоник зилзилалар ўчоқларининг яқин зоналарида содир бўладиган сеймотектоник ҳамда техноген жараёнларнинг микдорий моделларини ишлаб чиқиш бўйича етакчи мутахассис, физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим Лутфулла Абдуллаевич Хамидов вафот этди.

Лутфулла Абдуллаевич Хамидов 1951 йил 9 февралда Тошкент шаҳрида зиёлилар оиласида туғилган. 1973 йилда Тошкент Давлат Университетининг (ҳозирги Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий Университети) механика-математика факультетини тамомлаб, Москва давлат университетининг «Газ ва тўлқинлар динамикаси» кафедрасига бир йиллик стажировкага юборилган.

Лутфулла Абдуллаевич Хамидов 1972 йилдан то вафотига қадар 54 йил мобайнида Сейсмология институтида техник, кичик илмий ходим, катта илмий ходим, етакчи илмий ходим, лаборатория мудир, бош илмий ходим лавозимларида фаолият юритган.

Л.А.Хамидов меҳнат фаолиятидан узилмаган ҳолда 1988 йил Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси М.Т. Ўрозбоев номидаги Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтида

«Эластиклик назариясининг баъзи статик муаммоларини ҳал қилиш» мавзусида физика-математика фанлари номзоди диссертациясини, 1991 йилда эса Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ғ.О.Мавлонов номидаги Сейсмология институтида «Ер қобиғининг сейсмик фаол ёриқ зоналарида кучланганлик концентрациясининг микдорий моделлари» мавзусида докторлик диссертациясини ҳимоя қилган.

Л.А.Хамидов Сейсмология институтида 20 йилдан ортиқ даврда «Математик моделлаштириш ва сейсмологик тадқиқотларни автоматлаштириш» лабораторияси мудир лавозимида ишлаш билан бир қаторда Институтнинг деярлик ҳамма соҳаларида, жумладан илмий-амалий, ташкилий, редакторлик, жамоат, кадрлар тайёрлаш, ёшларни илм-фанга жалб қилиш, халқаро алоқалар, янги замонавий инфорацион технологияларни кенг жорий қилиш ва айниқса сўнгги йилларда техноген сейсмиклик соҳасида сермахсул фаолият юритган.

Унинг илмий қизиқишлари сейсмик фаол ёриқлар ва яқинлашиб келаётган тектоник зилзилалар ўчоқларида содир бўладиган сеймотектоник жараёнларнинг микдорий моделларини ишлаб чиқишдан иборат. У математик физика ва геофизиканинг ноанъанавий чегаравий масалаларини сонли ечиш усулини ишлаб чиқди ва янада ривожлантирди. Сейсмик микрорайонлаштиришнинг назарий асослари ва усулларини ишлаб чиқишда иштирок этди, геофизик тадқиқотларни замонавий ахборот ва компьютер технологиялари билан таъминлаш, зилзилаларнинг гидрогеосейсмологик ва геофизик даракчиларининг ахборотлилигини баҳолаш, айниқса муҳим сув омборларининг деформация таъсири соҳаларини аниқлаш, сув омборлари тўғонларининг сейсмик мониторингини ўтказиш ва мустаҳкамлигини баҳолаш ва бошқа тадқиқотлар билан шуғулланган.

Л.А.Хамидов биринчи бўлиб Ўзбекистонда фаолият кўрсатаётган сув омборларининг деформация зонаси ўлчамларини баҳолашда назарий моделлардан фойдаланган, Тянь-Шан ва Турон платформасидаги минтақавий сейсмик фаол ёриқлар ёрдамида деформацияни микдорий баҳолаш технологиясини ишлаб чиққан, муҳим сув омборларнинг таъсир

зоналаридаги маҳаллий ёриқларнинг кучланиш-деформация ҳолатини миқдорий жиҳатдан баҳолаган.

Л.А.Хамидов узоқ йиллар ЎзР ФА Сейсмология институти ҳузуридаги «Геофизика. Фойдали қазилмаларни қидиришнинг геофизик усуллари» ихтисослигидан докторлик диссертацияларини ҳимоя қилиш бўйича Д015.07.01. ва DSc.02/30.12.2019.GM/FM.97.01 рақамли Илмий кенгашлар илмий котиби ва аъзоси сифатида фаолият юритган. Л.А.Хамидов Ўзбекистон Фанлар академиясида нашр этиладиган «Ўзбекистонда сейсмология муаммолари» илмий журналининг асосчиларидан бири, масъул котиби ва таҳририятнинг доимий аъзоси бўлган.

Л.А.Хамидов илмий раҳбарлигида 2та фан номзоди диссертациялари ҳимоя қилинган.

Илмий фаолияти натижалари у чоп этган 300дан ортиқ илмий ишларда, жумладан 3та монографияда акс этган. Ихтиро учун учта патент олган.

Лутфулла Абдуллаевич илмий жамоада обрўга эга, муаммоларни ечиш бўйича маслаҳатини аямайдиган, камтар, ҳаммага биринчи бўлиб ёрдам қўлини берадиган, шогирдларига меҳрибон олим ва инсон сифатида ҳамкасблари ва келгуси авлод хотирасида қолади.

*Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси
Сейсмология институти жамоаси*

Мўминов Мирзоид Юсупович хотирасига*(1951 йил 1август – 2025 йил 24 декабр)*

2025 йил 24 декабрда Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ғ.О.Мавлонов номидаги Сейсмология институтининг катта илмий ходими, сейсмология, геофизика, геофизик майдонлар вариацияларини ўрганиш, зилзилалар тайёрланиш жараёнлари билан боғлиқ бўлган ер магнит майдони аномал вариацияларни ўрганиш, классификация қилиш ва кучли зилзилаларни прогноз қилиш соҳалари йирик мутахассиси, физика-математика фанлари номзоди, катта илмий ходим Мўминов Мирзоид Юсупович вафот этди.

Мирзоид Юсупович Мўминов 1951 йил 1 августда Тошкент вилоятида зиёлилар оиласида туғилди. 1968 йил ўрта мактабни тугатгач Тошкент Политехника институтининг (ҳозирги ТошДТУ) Геологоразведка факультетига «Фойдали қазилма конларини қидириш ва разведка қилишнинг геофизик усуллари» йўналиши бўйича ўқишга кириб 1973 йил муваффақиятли битирди ва «Тоғ муҳандиси-геофизик» мутахассиси бўлди.

Меҳнат фаолиятини 1973 йилдан Ўзбекистон Республикаси Геология вазирлигига қарашли «Тошкентгеология» трестининг Комплекс геолого-геофизик экспедициясида муҳандис-геофизик лавозимида бошлаган.

1974-йилдан 2002-йилгача Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Сейсмология институтида ва унинг Комплекс экспедициясида кичик илмий ходим, катта ва етакчи геофизик, ишлаб чиқариш-техник бўлими бошлиғи ҳамда катта илмий ходим лавозимларида ишлаган.

1990-йилда физика-математика фанлари номзоди илмий даражасини олиш учун «Ўзбекистонда сейсмомагнит эффектнинг вақт ва майдон узра номоён бўлиш хусусиятлари ва уларни зилзилаларни прогноз қилишда қўлланилиши» мавзусида диссертациясини ҳимоя қилган.

2003-2008-йилларда Тошкент вилояти, Тошкент туманидаги «Наврўз» маҳалла қўмитаси раиси лавозимида ишлаган. Ушбу лавозимдаги фаолияти учун Тошкент вилояти ҳокимлиги, Республика «Маҳалла» жамғармасининг фахрий ёрлиқлари ҳамда Халқ таълими вазирлигининг «Халқ таълими ҳомийси» кўкрак нишони билан тақдирланган. Унинг ташаббуси билан «Наврўз» маҳалласи ҳудудида янги мактаб учун жой ажратилган. Мактаб қурилишига ва уни жиҳозлар билан таъминлаш ишларига Мўминов Мирзоиднинг ўзи бошчилиқ қилган ва бошланган эзгу ишни охирига етказиш учун ўз жамғармасидан ҳам молиявий ҳаражатлар қилган. Бу ўринда у оталари Мўминов Юсуп ота бошлаган эзгу анъанани давом эттирган. Бугунги кунда маҳалла аҳолиси фарзандлари учун қурилган бу мактабда таҳсил олаётган ёшларни билимли инсон бўлиб етиштириларида Мўминов Мирзоиднинг хиссаси катта.

Мўминов Мирзоид 2009 йили яна илмий фаолиятига қайтиб Сейсмология институти «Геофизик майдонлар вариациялари» лабораториясида катта илмий ходим лавозимида фаолиятини давом эттирган ва геофизика, геомагнетизм, Марказий Осиё ҳудуди сейсмиклигини юзага келиш сабабларини ўрганиш йўналишларида илмий тадқиқотлар ўтказган. Тадқиқотларнинг асосий қисми зилзилалар даракчиларини ер магнит майдони вариацияларида намоён бўлиш қонуниятларини ўрганишга бағишлаган. У зилзилаларни прогноз қилиш илмий йўналишини энг содиқ фидойи вакилларида бири бўлиб, муаммони ҳал бўлишига астойдил ишонган ва бу йўналишда бор куч-ғайратини, билимини сарф этган, ташаббускор инсон бўлган.

Илмий натижалардан ташқари у «Зилзилани прогноз қилиш усули» мавзусида учта ихтиро учун муаллифлик гувоҳномалари ва патентлар эга бўлган. Илмий фаолияти давомида у 150 дан ортиқ илмий мақола ва бир нечта монографиялар аввал Сейсмология институти қошидаги, сўнгра Фанлар академияси ва Идоралараро тузилган (ЎзРФА ва ФВВ) «Зилзилаларни прогноз қилиш» комиссиясини доимий аъзоси бўлган.

М.Ю.Мўминов чуқур илм эгаси сифатида Сейсмология институти Комплекс экспедицияси, кейинчалик Ўзбекистон Республикаси Фавқулодда вазиятлар вазирлиги ва Фанлар академиясининг Сейсмологик ва сейсмопрогностик мониторинг ҳамда сейсмик хавфдан ҳимоя соҳасидаги илмий-техник кенгаш ҳамда Сейсмик вазиятни баҳолаш ва яқин келажақдаги сейсмик вазиятни прогноз қилиш бўйича Идоралараро эксперт комиссияси таркибида фаолият юритган. ФВВ Сейсмопрогностик мониторинг республика маркази ёшларига сейсмопрогностик кузатув ишларини олиб бориш, маълумотларни комплекс таҳлил қилиш ва зилзилалар даракчиларини аниқлаш йўналишларида сабоқ бериб келган.

Мўминов Мирзоид ҳар қандай муаммо бўйича ўз нуқтаи назарига эга, синчков, ташаббускор, камтар, ҳар бир инсонга ёрдам қўлини берадиган олим ва инсон сифатида ҳамкасблари ва келгуси авлод хотирасида қолади.

*Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси
Сейсмология институти жамоаси*

M u n d a r i j a	sah.
Ibragimov R.S. O'zbekistonda eskiy seysmik xavfni baholash uchun uygunlashtirilgan seysmik manba modellariga yo'nalish	5
Ibragimova T.L. O'zbekistonning seysmogen zonalarida zilzilalar magnituda taqsimotining shakllari haqida	14
Nurmatov U.A., Sadykov Yu.M., Yusupdjanova U.A. Afg'onistonning shimoliy qismi hududining seysmotektonik va seysmik holati	29
Yodgorov Sh.I., Muhammadqulov N.M., Xayriddinov B.B., Avazov Sh.B., Qodirboyev A.K., Abdushukurov Sh.Z. Ohangaron suv ombori hududidagi ko'chkilarning dinamik faolligini mikroseysmik tadqiqotlar asosida baholash	37
Ёдгоров Ш.И. Тошкент шахри турар-жой фондининг симуляцион моделлар асосида эҳтимолий сценарли zilzilalar iqtisodiy талафотларини таҳлили	48
Jumayev D.D. Farg'ona shahri gruntlarining muhandis-seysmologik xususiyatlari va «Eurocode 8» bo'yicha tasnifi	58
Mamarozikov T.U., Xalbayev S.B., Alimov B.G., Qurbonov T.S., Qodirov J.Z. Yuqori shovqinli lokal seysmik stansiyalar tarmog'i sharoitida mikroseysmik hodisalarni detektorlash uchun oniy spektral entropiya (ISED) usulini qo'llash	66
Ibragimova T.L. Seysmik xavf va riskni zamonaviy baholash: yangi tendensiyalar va munozarali masalalar (<i>Asian Seismological Commission 16-Bosh Assambleyasining S10 «Seismic Hazard and Risk Assessment» sekiyasi materiallari asosida, 2026-yil 25-30-aprel, Tashkent</i>)	75
Bekmirzayev D.A., Nabiye S.N. Suv omborlari to'g'onlarining kuchlanganlik-deformatsiya holatini radiolokatsion kosmik monitoring asosida baholash (surxon suv ombori to'g'oni misolida)	83

С о д е р ж а н и е	стр.
Ибрагимов Р.С. Проблема согласования моделей сейсмических источников при вероятностной оценке сейсмической опасности территории Узбекистана	5
Ибрагимова Т.Л. О формах магнитудного распределения землетрясений в очаговых зонах Узбекистана	14
Нурматов У.А., Садыков Ю.М., Юсупджанова У.А. Сейсмотектоническая и сейсмическая обстановка района северной части Афганистана	29
Ёдгоров Ш.И., Мухаммадкулов Н.М., Хайриддинов Б.Б., Актамов Б.У., Авазов Ш.Б., Кадырбаев А.К., Абдушукуров Ш.З. Оценка динамической активности оползней на территории Ахангаранского водохранилища на основе микросейсмических исследований	37
Ёдгоров Ш.И. Анализ экономического ущерба от вероятных сценарных землетрясений для жилищного фонда города Ташкента на основе симуляционных моделей	48
Джумаев Д.Д. Инженерно-сейсмологические свойства грунтов города Ферганы и их классификация по «Eurocode 8»	58
Мамарозиков Т.У., Халбаев С.Б., Алимов Б.Г., Курбанов Т.С., Кодиров Ж.З. Применение мгновенной спектральной энтропии (ISED) для детектирования микросейсмических событий в условиях высокой зашумлённости локальной сети сейсмических станций	67
Ибрагимова Т.Л. Современная оценка сейсмической опасности и риска: новые тенденции и дискуссионные вопросы <i>(по материалам секции S10 «Seismic Hazard and Risk Assessment» 16-й Генеральной Ассамблеи Азиатской Сейсмологической Комиссии, 25-30 апреля 2026 г., Ташкент)</i>	75
Бекмирзаев Д.А., Набиев С.Н. Оценка напряженно-деформационный состояние плотин водохранилищ на основе радиолокационного космического мониторинга (на примере плотины сурханского водохранилища)	83

C o n t e n t	page
Ibragimov R.S. Toward harmonized seismic source models for probabilistic seismic hazard assessment of Uzbekistan	5
Ibragimova T.L. On the forms of earthquake magnitude distributions in seismogenic zones of Uzbekistan	4
Nurmatov U.A., Sadykov Yu.M., Yusupdjanova U.A. Seismotectonic and Seismic Conditions of the Northern Part of Afghanistan	29
Yodgorov Sh.I., Muhammadkulov N.M., Khairiddinov B.B., Aktamov B.U., Avazov Sh.B., Kadyrbaev A.K., Abdushukurov Sh.Z. Assessment of the dynamic activity of landscapes on the territory of the Akhangaran reservoir based on microseismic research	37
Yodgorov Sh.I. Analysis of economic losses from probable scenario-based earthquakes for the residential building stock of Tashkent city using simulation models	48
Jumaev D.D. Engineering-seismological properties of soils in Fergana city and their classification according to «Eurocode 8»	58
Mamarozikov T.U., Khalbaev S.B., Alimov B.G., Kurbanov T.S., Kodirov Zh.Z. Application of Instantaneous Spectral Entropy (ISED) for Microseismic Event Detection in Highly Noisy Local Seismic Network Conditions	67
Ibragimova T.L. Modern seismic hazard and risk assessment: new trends and debatable issues (<i>Based on the materials of Session S10 «Seismic Hazard and Risk Assessment» of the 16th General Assembly of the Asian Seismological Commission, April 25-30, 2026, Tashkent</i>)	75
Bekmirzayev D.A., Nabiyeu S.N. Assessment of reservoir dam deformations based on radar space monitoring (case of the Surkhan reservoir dam)	83

Коллектив авторов

SEISMOLOGIYA MUAMMOLARI

ПРОБЛЕМЫ СЕЙСМОЛОГИИ

SEISMOLOGY PROBLEMS

2026, № 1, том 8

*Утверждено к печати Ученым советом
Института сейсмологии им. Г.А.Мавлянова (04.05.2026 г. № 4)*

Редактор **Т.Г.Кочергина** (рус.)

Компьютерная верстка **В.Р.Юсупов**

Формат 80×64_{1/8}. Усл. печ. л. 13. Уч.-изд. л. 15. Тираж 100 экз.
Отпечатано в Бизнес Полиграф.
Ташкент, Чиланзар, ул. Козиробот, 65.

Обуна индекси (подписной индекс) 1351.