

УДК 550.34:551.24(470.6)

DOI: 10.46698/VNC.2026.66.96.001

Оригинальная статья

Прогноз геодинамически активных зон Предкавказья на основе анализа временных рядов микросейсмических наблюдений

А.А. Ступина¹, Д.Ю. Евсюков^{2,1}, М.Н. Степанцевич¹,
М.С. Никаноров¹, Е.М. Дорофеев³

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА
им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
e-mail: h677hm@gmail.com, stepancevich@rgau-msha.ru,
nikanorov@rgau-msha.ru;

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия,
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: evsjob@yandex.ru;

³ Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия,
353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93,
e-mail: 79180401222@yandex.ru

Статья поступила: 31.03.2026, доработана: 12.06.2026, принята к публикации: 15.06.2026

Резюме: Актуальность работы. Территория Предкавказья характеризуется высокой тектонической активностью и сложным геодинамическим режимом, что определяет необходимость совершенствования методов выявления и прогноза геодинамически активных зон на основе современных геофизических данных. **Цель исследования.** Установление закономерностей изменения параметров микросейсмического поля и оценка возможности использования временных рядов микросейсмических наблюдений для прогноза геодинамически активных зон Предкавказья. **Методы исследования.** Использованы временные ряды непрерывных микросейсмических наблюдений в диапазоне частот 0,1–40 Гц. Выполнены предварительная обработка сигналов, спектральный и корреляционный анализ, а также пространственная интерпретация результатов с сопоставлением данных микросейсмического мониторинга и тектонического строения региона. **Результаты.** Установлено, что геодинамически активные зоны характеризуются повышенными амплитудами микросейсмических колебаний, устойчивыми спектральными максимумами в диапазоне 2–5 Гц и увеличенными коэффициентами корреляции между пунктами наблюдений. Выявлены пространственно устойчивые аномалии микросейсмической активности, совпадающие с крупными разломными структурами. Показано, что изменения параметров микросейсмического поля могут предшествовать локальным деформационным процессам и слабосейсмическим событиям, что подтверждает перспективность применения микросейсмического мониторинга для оценки современного геодинамического состояния региона.

Ключевые слова: Предкавказье, геодинамика, микросейсмичность, временные ряды, микросейсмический мониторинг, тектонические нарушения, спектральный анализ, геодинамически активные зоны, геофизические исследования, сейсмический мониторинг.

Для цитирования: Ступина А.А., Евсюков Д.Ю., Степанцевич М.Н., Никаноров М.С., Дорофеев Е.М. Прогноз геодинамически активных зон Предкавказья на основе анализа временных рядов микросейсмических наблюдений. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 97–107. DOI: 10.46698/VNC.2026.66.96.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.66.96.001

Original paper

Prediction of geodynamically active zones of the Ciscaucasia based on the analysis of time series of microseismic observations

A.A. Stupina¹, D.Yu. Evsyukov^{2,1}, M.N. Stepansevich¹,
M.S. Nikanorov¹, E.M. Dorofeev³

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation,
e-mail: h677hm@gmail.com, stepancevich@rgau-msha.ru,
nikanorov@rgau-msha.ru;

² Bauman Moscow State Technical University, 5, 2nd Baumanskaya Str., Moscow 105005,
Russian Federation, e-mail: evsjob@yandex.ru;

³ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918,
Russian Federation, e-mail: 79180401222@yandex.ru

Received: 31.03.2026, revised: 12.06.2026, accepted: 15.06.2026

Abstract: Relevance. The Ciscaucasia is characterized by high tectonic activity and a complex geodynamic regime, which necessitates the development of advanced approaches for identifying and forecasting geodynamically active zones using modern geophysical observations. **Aim.** To determine the patterns of microseismic field variations and assess the applicability of microseismic time series analysis for forecasting geodynamically active zones in the Ciscaucasia. **Methods.** Continuous microseismic observation time series recorded in the frequency range of 0.1–40 Hz were analyzed. Signal preprocessing, spectral analysis, correlation analysis, and spatial interpretation were performed, followed by comparison of microseismic monitoring results with regional tectonic structures. **Results.** Geodynamically active areas were found to be characterized by increased amplitudes of microseismic oscillations, stable spectral peaks within the 2–5 Hz frequency range, and elevated correlation coefficients between observation sites. Spatially persistent anomalies of microseismic activity coinciding with major fault systems were identified. Variations in microseismic field parameters were shown to precede local deformation processes and weak seismic events. The obtained results demonstrate the potential of microseismic monitoring for assessing the present geodynamic state of the region and forecasting geodynamically active zones.

Keywords: Ciscaucasia, geodynamics, microseismicity, time series, microseismic monitoring, tectonic faults, spectral analysis, geodynamically active zones, geophysical studies, seismic monitoring.

For citation: Stupina A.A., Evsyukov D.Yu., Stepansevich M.N., Nikanorov M.S., Dorofeev E.M. Prediction of geodynamically active zones of the Ciscaucasia based on the analysis of time series of microseismic observations. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 97–107. DOI: 10.46698/VNC.2026.66.96.001

Введение

В последние десятилетия территория Предкавказья рассматривается как один из наиболее сложных и динамически напряженных регионов юга России. Современные геодинамические процессы здесь определяются взаимодействием круп-

ных тектонических структур Кавказского складчатого сооружения и Восточно-Европейской платформы, что приводит к формированию активных разломных зон, локальных областей деформаций и повышенной микросейсмической активности [Рассказов и др., 2018]. Для многих районов Предкавказья характерно наличие скрытых геодинамических процессов, которые далеко не всегда сопровождаются заметными сейсмическими событиями, однако оказывают существенное влияние на состояние геологической среды [Asanuma et al., 2004]. В связи с этим особый интерес в последние годы вызывают исследования, связанные с анализом микросейсмического поля и временных рядов наблюдений, позволяющих выявлять слабые изменения напряженно-деформированного состояния массива пород [Serdyukov et al., 2015].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных вопросам региональной геодинамики Кавказа и Предкавказья [Shestopalov, Kril, 2022; Eremenko et al., 2022; Ergun et al., 2025], проблема выделения и прогноза геодинамически активных зон до настоящего времени остается окончательно не решенной. В большинстве работ основной акцент делается либо на анализе сильных сейсмических событий, либо на изучении отдельных тектонических структур [Baisch, McMahon, 2014]. Вместе с тем, как показывают результаты современных исследований, процессы подготовки активизации геологической среды сопровождаются изменением характеристик фоновой микросейсмичности, причем такие изменения могут наблюдаться задолго до проявления крупных деформационных процессов [Адушкин, Спивак, 2005]. По этой причине анализ временных рядов микросейсмических наблюдений представляет значительный интерес не только с научной точки зрения, но и в плане практического геодинамического мониторинга [Rong et al., 2025].

Следует отметить, что микросейсмические колебания обладают высокой чувствительностью к изменениям состояния геологической среды. Даже незначительные вариации напряжений в разломных зонах могут приводить к изменению спектральных и энергетических характеристик микросейсмического фона [Wu et al., 2025]. В ряде работ показано, что для геодинамически активных районов характерны устойчивые аномалии в структуре временных рядов, проявляющиеся в виде изменения амплитудных характеристик, появления квазипериодических колебаний и перестройки спектрального состава сигнала [Khmelinin et al., 2021; Bornyakov et al., 2023]. Однако единый подход к интерпретации подобных аномалий пока отсутствует, а результаты различных авторов во многом противоречат друг другу [Семинский и др., 2022].

Особую сложность представляет тот факт, что микросейсмическое поле формируется под воздействием большого числа факторов различной природы. Помимо собственно тектонических процессов, существенное влияние оказывают климатические условия, техногенные воздействия, сезонные колебания и локальные геологические особенности территории [Lin et al., 2025]. По этой причине при анализе временных рядов требуется применение методов, позволяющих выделять устойчивые компоненты сигнала и исключать случайные шумовые составляющие [Attila Csaba et al., 2015]. Наиболее перспективными в этом отношении являются методы спектрального анализа, корреляционного анализа и различные варианты временно-частотной обработки сигналов.

Для территории Предкавказья подобные исследования особенно актуальны в связи с высокой плотностью населения и наличием большого количества объектов промышленной и транспортной инфраструктуры. Развитие современных систем гео-

динамического мониторинга требует получения более детальных представлений о пространственно-временном распределении геодинамической активности региона. При этом использование только традиционных сейсмологических данных зачастую оказывается недостаточным, поскольку значительная часть деформационных процессов протекает без возникновения заметных землетрясений.

В настоящей работе рассматриваются особенности временных рядов микросейсмических наблюдений на территории Предкавказья и проводится анализ их связи с геодинамически активными зонами региона. Основное внимание уделено выявлению устойчивых аномалий микросейсмического поля, оценке их пространственной локализации и возможности использования полученных результатов для прогноза геодинамической активности. Предполагается, что комплексный анализ временных рядов позволяет получить дополнительную информацию о современном состоянии геологической среды и повысить эффективность регионального геодинамического мониторинга.

Основанием для проведения данного исследования послужили как высокая геодинамическая активность региона, так и ограниченность существующих подходов к прогнозированию активных зон на основе традиционных геофизических методов. Полученные результаты могут представлять интерес при решении задач мониторинга опасных геологических процессов и оценки устойчивости территорий в условиях современного геодинамического режима.

Методы и материалы

В качестве исходных данных для проведения исследований использовались временные ряды микросейсмических наблюдений, полученные на территории центральной и восточной частей Предкавказья. Основной объем экспериментального материала был сформирован по данным непрерывной регистрации микросейсмического фона в диапазоне частот 0,1–40 Гц. Продолжительность отдельных серий наблюдений составляла от 30 суток до 18 месяцев, что позволило исследовать как кратковременные вариации сигнала, так и более длительные изменения микросейсмической активности. Дискретность регистрации составляла 100 Гц, а для ряда экспериментальных участков использовался режим повышенной частоты опроса до 200 Гц, позволяющий более детально анализировать высокочастотную часть спектра.

Регистрация микросейсмических колебаний осуществлялась с применением широкополосных сейсмоприемников типа Güralp CMG-6TD, Lennartz LE-3Dlite MkIII и геофонов GS-20DX. Для регистрации и накопления сигнала применялись цифровые станции сбора данных National Instruments NI USB-4431 и NI CompactDAQ с 24-битным аналого-цифровым преобразованием. Средний уровень собственных шумов измерительной системы не превышал 10^{-8} м/с² в рабочем диапазоне частот. Синхронизация временных рядов производилась по GPS-модулям Trimble Resolution T с точностью не хуже 1 мс.

Установка датчиков производилась как в поверхностных пунктах наблюдений, так и в частично заглубленных скважинах глубиной до 12 м. Для уменьшения влияния техногенных помех использовались площадки, удаленные от автомобильных дорог и промышленных объектов не менее чем на 1,5–2 км. При проведении наблюдений температура окружающей среды составляла от –5 до +32 °С, а влажность воздуха изменялась в пределах 40–90 %. Следует отметить, что даже при соблюдении указанных условий полностью исключить влияние внешних шумовых факторов не представлялось возможным.

Первичная обработка сигналов включала удаление тренда, фильтрацию низкочастотных помех и нормализацию амплитудных характеристик. Для полосовой фильтрации использовались цифровые фильтры Баттерворта 4-го порядка с рабочими диапазонами 0,5–20 Гц и 1–10 Гц. Анализ временных рядов производился с использованием программных комплексов MATLAB R2023b, Python 3.11 с библиотеками ObsPy, SciPy и NumPy, а также пакета OriginPro 2024. Спектральный анализ выполнялся методом быстрого преобразования Фурье с длиной окна 4096–8192 отсчетов и перекрытием 50 %. Для оценки устойчивости спектральных аномалий применялось скользящее усреднение по временным интервалам продолжительностью от 30 минут до 24 часов.

При исследовании пространственного распределения микросейсмической активности использовались методы корреляционного анализа и построения карт относительной интенсивности микросейсмического поля. Для визуализации результатов и построения схем геодинамически активных зон применялись программные средства Surfer 25 и QGIS 3.34. Полученные данные сопоставлялись с существующими картами разломной тектоники и региональной сейсмичности Предкавказья, что позволило выявить ряд участков с повышенной геодинамической активностью и устойчивыми аномалиями микросейсмического режима.

Результаты и обсуждение

В ходе обработки временных рядов микросейсмических наблюдений, полученных для различных участков Предкавказья, было установлено, что структура микросейсмического поля региона имеет выраженную пространственную и временную неоднородность. Наиболее интенсивные изменения параметров сигнала наблюдались в районах, приуроченных к крупным тектоническим нарушениям и зонам пересечения разломов. Следует отметить, что даже в периоды отсутствия заметных сейсмических событий в исследуемых временных рядах фиксировались устойчивые изменения спектральных характеристик, которые не носили случайного характера и повторялись на протяжении длительных интервалов наблюдений.

Анализ амплитудно-временных зависимостей показал, что для геодинамически активных участков характерно увеличение среднеквадратических значений микросейсмического сигнала в диапазоне частот 1–8 Гц. В отдельных случаях рост амплитуды составлял 25–40 % относительно фоновых значений. Особенно хорошо подобные изменения проявлялись в районах предполагаемого развития глубинных разломных структур. При этом увеличение интенсивности микросейсмического фона происходило неравномерно. В ряде наблюдений фиксировались квазипериодические колебания амплитуды с характерными интервалами от нескольких часов до 2–3 суток. Подобное поведение сигнала, вероятно, связано с перераспределением напряжений в верхней части земной коры и периодической активизацией локальных деформационных процессов.

При проведении спектрального анализа было установлено, что для большинства исследуемых зон характерно наличие устойчивых максимумов спектральной плотности в области 2–5 Гц (табл. 1). В относительно спокойных районах подобные пики либо отсутствовали, либо имели существенно меньшую выраженность. Кроме того, в активных районах наблюдалось периодическое смещение максимумов спектра в сторону более низких частот. Особенно отчетливо это проявлялось в периоды повышенной региональной микросейсмической активности (рис. 1). Возможно, данный эффект связан с изменением условий распространения упругих волн в породном массиве при росте уровня трещиноватости и локальной разгрузке напряжений.

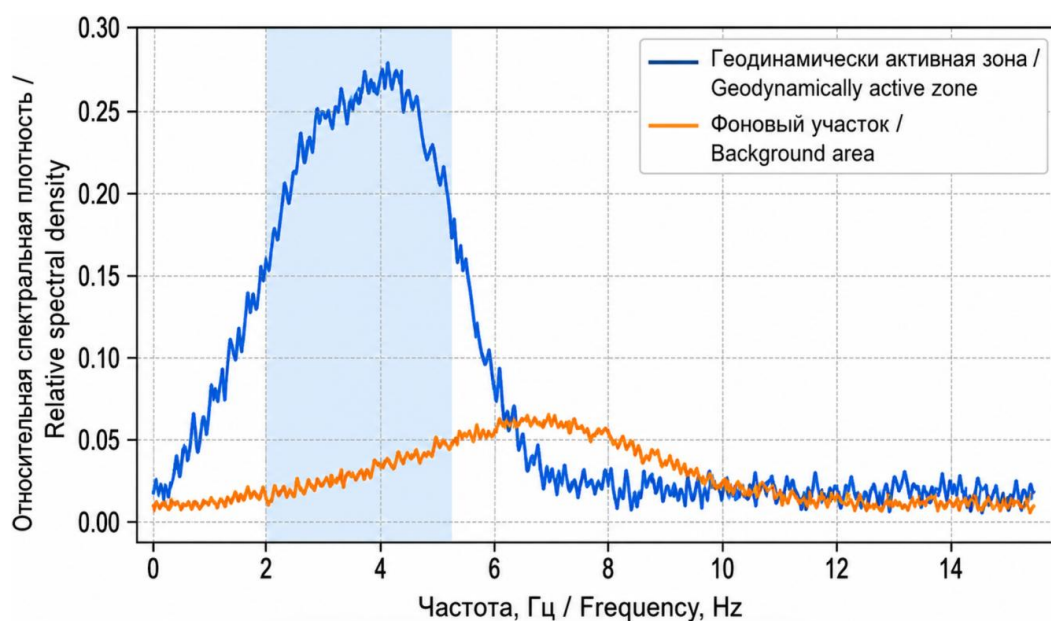


Рис. 1. Пространственное распределение микросейсмической активности на территории Предкавказья /

Fig. 1. Spatial distribution of microseismic activity in the Ciscaucasia

Таблица 1 / Table 1

Основные спектральные характеристики микросейсмических сигналов для различных участков Предкавказья /
Main spectral characteristics of microseismic signals for different areas of the Ciscaucasia

Район наблюдений / Observation area	Средняя амплитуда сигнала, мкм/с / Average signal amplitude, $\mu\text{m/s}$	Доминирующий диапазон частот, Гц / Dominant frequency range, Hz	Среднее значение спектральной плотности / Average spectral density value	Характер микросейсмической активности / Character of microseismic activity
Центральное Предкавказье / Central Ciscaucasia	0,84	2–5	0,73	Устойчиво повышенная / Stably elevated
Восточное Предкавказье / Eastern Ciscaucasia	0,61	3–7	0,58	Умеренная / Moderate
Район крупных разломов / Major fault zone	1,12	1–4	0,94	Высокая / High
Фоновый участок / Background area	0,37	6–12	0,29	Низкая / Low
Предгорные зоны / Foothill zones	0,69	2–6	0,64	Переменная / Variable

Интересные результаты были получены при сравнении временных рядов, зарегистрированных на различных пунктах наблюдений. Для станций, расположенных в пределах предполагаемых активных тектонических зон, коэффициенты взаимной корреляции сигнала достигали 0,65–0,82 (табл. 2). В то же время для удаленных

участков значения корреляции обычно не превышали 0,3–0,4. Это указывает на наличие регионально связанных процессов, влияющих на формирование микросейсмического поля. Следует заметить, что максимальные коэффициенты корреляции наблюдались не в периоды наиболее сильных амплитуд сигнала, а при относительно стабильном микросейсмическом режиме. Вероятно, в этот момент происходило формирование устойчивых деформационных процессов в пределах отдельных блоков земной коры.

Таблица 2 / Table 2

**Корреляционные характеристики временных рядов
микросейсмических наблюдений /
Correlation characteristics of time series of microseismic observations**

Пункты наблюдений / Observation stations	Расстояние между пунктами, км / Distance between stations, km	Коэффициент корреляции / Correlation coefficient	Наличие общей аномалии / Presence of a common anomaly	Геодинамическая характеристика / Geodynamic characteristic
Пункт А – Пункт В / Station A – Station B	18	0,82	Да / Yes	Активная разломная зона / Active fault zone
Пункт В – Пункт С / Station B – Station C	34	0,71	Да / Yes	Область повышенной трещиноватости / Zone of increased fracturing
Пункт С – Пункт D / Station C – Station D	56	0,48	Частично / Partially	Умеренная активность / Moderate activity
Пункт D – Пункт E / Station D – Station E	72	0,31	Нет / No	Фоновый участок / Background area
Пункт А – Пункт E / Station A – Station E	95	0,22	Нет / No	Геодинамически спокойная зона / Geodynamically stable zone

Следует отдельно отметить влияние сезонных факторов на структуру микросейсмического поля. В летний период уровень низкочастотного шума возрастал в среднем на 15–20 %, что вероятно связано как с климатическими причинами, так и с увеличением техногенной активности. Вместе с тем наиболее устойчивые аномалии, наблюдаемые в пределах геодинамически активных зон, сохранялись вне зависимости от сезона. Это позволяет считать их не случайными внешними помехами, а отражением внутренних процессов в геологической среде. В некоторых случаях увеличение микросейсмической активности предшествовало локальным слабым сейсмическим событиям за 2–5 суток. Подобная закономерность наблюдалась не всегда, однако повторяемость такого эффекта на нескольких независимых участках представляет определенный интерес с точки зрения прогноза геодинамической активности.

При анализе пространственного распределения микросейсмической энергии было установлено, что наиболее контрастные аномалии совпадают с зонами повы-

шенной плотности разломных нарушений. Особенно отчетливо это проявилось для центральной части Предкавказья, где наблюдалось формирование вытянутых областей повышенной микросейсмической активности северо-западного направления. Геометрия этих аномалий хорошо согласуется с известными элементами региональной тектоники. В пределах некоторых участков ширина подобных зон достигала 10–15 км, а протяженность превышала 70 км. Следует заметить, что внутри таких областей структура микросейсмического поля была крайне неоднородной. Отдельные локальные участки демонстрировали резкое увеличение энергии сигнала, тогда как соседние территории оставались относительно спокойными.

Полученные результаты показывают, что временные ряды микросейсмических наблюдений обладают высокой чувствительностью к изменениям состояния геологической среды. При этом наиболее информативными оказались не абсолютные значения амплитуд, а особенности их временной изменчивости и спектральной структуры. В частности, для активных зон характерно сочетание нескольких признаков одновременно: рост низкочастотной составляющей сигнала, увеличение дисперсии временных рядов, появление устойчивых спектральных максимумов и повышение корреляции между соседними пунктами наблюдений. Отдельно каждый из этих признаков может быть вызван различными внешними факторами, однако их совместное проявление значительно повышает вероятность связи наблюдаемых эффектов с геодинамическими процессами.

Следует отметить, что интерпретация микросейсмических данных осложняется высокой чувствительностью сигнала к техногенным воздействиям. Вблизи населенных пунктов и транспортной инфраструктуры наблюдалось существенное увеличение уровня шума в диапазоне 8–20 Гц. В отдельных случаях техногенные помехи практически полностью перекрывали естественный микросейсмический фон. По этой причине часть временных рядов была исключена из дальнейшего анализа. Вместе с тем даже в условиях значительного уровня внешнего шума для ряда участков удавалось выделять устойчивые аномальные изменения спектральных характеристик, не связанные с режимом работы промышленных объектов или транспортной нагрузкой.

Интересно, что некоторые выявленные аномалии сохранялись на протяжении нескольких месяцев практически без заметного изменения параметров. Это может свидетельствовать о длительном существовании локальных зон повышенного напряженного состояния. Подобные участки потенциально представляют интерес как области возможной концентрации деформационных процессов. В то же время ряд аномалий носил кратковременный характер и исчезал спустя несколько суток после появления. Вероятно, такие изменения связаны с локальными процессами перераспределения напряжений и частичной релаксацией породного массива.

Сопоставление полученных результатов с данными региональной сейсмичности показывает, что зоны повышенной микросейсмической активности далеко не всегда совпадают с районами возникновения сильных землетрясений. В ряде случаев наиболее выраженные аномалии наблюдались в районах относительно слабой современной сейсмичности. Это может объясняться тем, что значительная часть деформационных процессов в земной коре реализуется без формирования крупных сейсмических очагов. Подобный результат хорошо согласуется с представлениями о существовании медленных геодинамических процессов, сопровождающихся накоплением деформаций без развития выраженных разрывных нарушений.

В целом проведенные исследования показывают, что анализ временных рядов микросейсмических наблюдений позволяет выявлять скрытые особенности современного геодинамического режима Предкавказья. Использование комплексного подхода, включающего спектральный, корреляционный и пространственный анализ

сигналов, дает возможность выделять зоны потенциально повышенной геодинамической активности даже при отсутствии выраженных сейсмических событий. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения микросейсмического мониторинга для задач оценки состояния геологической среды и прогноза активизации деформационных процессов в пределах сложных тектонических регионов.

Выводы

Проведенные исследования временных рядов микросейсмических наблюдений на территории Предкавказья показали, что параметры микросейсмического поля обладают выраженной чувствительностью к современным геодинамическим процессам и могут использоваться для выявления зон повышенной тектонической активности. Установлено, что для геодинамически активных районов характерно устойчивое увеличение амплитуды микросейсмического сигнала в диапазоне частот 1–8 Гц, а также наличие выраженных спектральных максимумов в области 2–5 Гц.

В ходе анализа экспериментальных данных выявлено существование пространственно устойчивых микросейсмических аномалий, совпадающих с районами развития крупных тектонических нарушений и зон повышенной трещиноватости породного массива. Для подобных участков наблюдалось увеличение уровня корреляции между временными рядами соседних пунктов наблюдений, что свидетельствует о наличии связанных региональных деформационных процессов.

Установлено, что изменение спектральной структуры микросейсмического сигнала нередко предшествует локальным слабосейсмическим событиям и сопровождается ростом низкочастотной составляющей микросейсмического фона. При этом часть зарегистрированных аномалий не имела прямой связи с землетрясениями, что позволяет предположить их связь с медленными деформационными процессами в верхней части земной коры.

Показано, что использование комплексной обработки временных рядов, включающей спектральный, корреляционный и пространственный анализ, позволяет существенно повысить информативность микросейсмического мониторинга. Наиболее достоверные результаты достигаются при совместном анализе нескольких параметров сигнала, поскольку отдельные характеристики могут существенно зависеть от сезонных и техногенных факторов.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов микросейсмического мониторинга для прогноза геодинамически активных зон Предкавказья и оценки современного напряженно-деформированного состояния геологической среды. Разработанный подход может использоваться при решении задач регионального геодинамического контроля, мониторинга потенциально опасных тектонических процессов и оценки устойчивости территорий в пределах сложных геодинамических регионов.

Литература

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. Роль тектонических нарушений в межгеосферных взаимодействиях на границе земной коры и атмосферы // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 402. № 1. – С. 92–97.
2. Рассказов Ю.И., Петров В.А., Гладырь А.В., Тюрин Д.В. Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы // Горный журнала. – 2018. – № 7. – С. 17–21. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.02.
3. Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Перевалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. Комплексный мо-

ниторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты // Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13. № 5. – 0677. DOI: 10.5800/GT-2022-13-5-0677.

4. Asanuma H., Kumano Y., Izumi T., Soma N., Kaieda H., Aoyagi Y., Tezuka K., Wyborn D., Niitsuma H. Microseismic monitoring of a stimulation of HDR reservoir at Cooper Basin, Australia, by the Japanese team // Transactions – Geothermal Resources Council. – 2004. – Vol. 28. – pp. 191–195.

5. Attila Csaba A.C.S., Bujdosó E., Csabafi R., Hegedus E., Torok I., Toth I. First result of the seismic monitoring of Mecsek Mountains // In: 8th Congress of the Balkan Geophysical Society (BGS 2015). Chania, Greece, 2015. – pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201414237.

6. Baisch S., McMahon A. Seismic real-time monitoring of a massive hydraulic stimulation of a geothermal reservoir in the Cooper Basin, Australia // EAGE/DGG Workshop: Microseismic Monitoring. – 2014. pp. 1–15. DOI: 10.3997/2214-4609.20140005.

7. Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Shagun A.N., Sankov V.A., Salko D.V., Miroshnichenko A.I., Vstovsky G.V., Sintsov A.E. On similarities between deformation processes preceding ice shocks and tectonic earthquakes // Report Earth Sciences. – 2023. – Vol. 508. No. 2. – pp. 91–96. DOI: 10.1134/S1028334X22602097.

8. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic Monitoring of Geodynamic Phenomena in Rockburst-Hazardous Mining Conditions // Journal of Mining Science. – 2022. – Vol. 58. No. 1. – pp. 10–19. DOI: 10.1134/S1062739122010021.

9. Ergun T., Akkoyunlu M.F., Aksari D., Poyraz S.A., Cambaz M.D., Cok O., Gunes Y., Kalafat D., Kekovali K., Koseoglu A., Ogutcu Z., Ozel N.M., Ozer M., Polat R., Suvarikli M., Teoman U.M., Turhan F. Monitoring and Station Health of Türkiye – KOERI Stations and Their Contribution to AdriaArray Seismic Network // Annals of Geophysics. – 2025. – Vol. 68. No. 5. DOI: 10.4401/ag-9317.

10. Khmelinin A.P., Konurin A.I., Konurina M.I. Justification of electromagnetic scanning of oil-filled formation using downhole matrix antenna arrays // In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 773. No. 1. – Art. No. 012091. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012091.

11. Lin H., Zhang Q., Duan K., Wang P., Zhang X., Liu C., Chen C., Zhao Y. Geo-mechanical model test on strong mine tremors induced by the breakage of high thick-and-hard overlying strata during longwall coal retreat mining // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2025. – Vol. 58. No. 5. – pp. 5549–5578. DOI: 10.1007/s00603-025-04412-z.

12. Rong H., Wei S., Zhang H., Chen L., Li N. Influencing factors and distribution characteristics of rock burst under complex geological dynamic environment // Coal Science and Technology. – 2025. – Vol. 53. No. 3. – pp. 420–431. DOI: 10.12438/cst.2024-1129.

13. Serdyukov S.V., Azarov A.V., Dergach P.A., Duchkov A.A. Equipment for microseismic monitoring of geodynamic processes in underground hard mineral mining // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51. No. 3. – pp. 634–640. DOI: 10.1134/S1062739115030291.

14. Shestopalov V., Kril T. Analysis of depression structures dynamic by remote sensing data // In: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Monitoring 2022): Materials 16th International Conference. Kiev, Ukraine, 2022. DOI: 10.3997/2214-4609.2022580195.

15. Wu C., Liao J., Yuan G., Li L., Wen A., Xia C. Effect of pre-existing faults on spatio-temporal evolution of in-situ stress and microseismic distribution // Earth Science – Journal of China University of Geosciences. – 2025. – Vol. 50. No. 10. – pp. 4027–4043. DOI: 10.3799/dqkx.2025.164.

References

1. Adushkin V.V., Spivak A.A. Role of the tectonic discontinuities in inter-geospheric interactions at the Earth crust-atmosphere boundary. Report Academies of Sciences. 2005. Vol. 402. No. 1. pp. 92–97. (In Russ.)

2. Rasskazov I.Y., Petrov V.A., Gladyr A.V., Tyurin D.V. Geodynamic test site in the Streltsovsky ore field: Practice and prospects. Gornyi Zhurnal. 2018. No. 7. pp. 17–21. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.02. (In Russ.)

3. Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., Sankov V.A., Pospeev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminskiy I.K., Lukhnev A.V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemskiy I.K., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Korol S.A. Integrated monitoring of hazardous geological processes in Pribaikalye: pilot network and first results. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2022. Vol. 13. No. 5. Art. No. 0677. DOI: 10.5800/GT-2022-13-5-0677. (In Russ.)
4. Asanuma H., Kumano Y., Izumi T., Soma N., Kaieda H., Aoyagi Y., Tezuka K., Wyborn D., Niitsuma H. Microseismic monitoring of a stimulation of HDR reservoir at Cooper Basin, Australia, by the Japanese team. *Transactions – Geothermal Resources Council*. 2004. Vol. 28. pp. 191–195.
5. Attila Csaba A.C.S., Bujdoso E., Csabafi R., Hegedus E., Torok I., Toth I. First result of the seismic monitoring of Mecsek Mountains. In: 8th Congress of the Balkan Geophysical Society (BGS 2015). Chania, Greece. 2015. pp.1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201414237.
6. Baisch S., McMahon A. Seismic real-time monitoring of a massive hydraulic stimulation of a geothermal reservoir in the Cooper Basin, Australia. *EAGE/DGG Workshop: Microseismic Monitoring*. 2014. pp. 1–15. DOI: 10.3997/2214-4609.20140005.
7. Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Shagun A.N., Sankov V.A., Salko D.V., Miroshnichenko A.I., Vstovsky G.V., Sintsov A.E. On similarities between deformation processes preceding ice shocks and tectonic earthquakes. *Report Earth Sciences*. 2023. Vol. 508. No. 2. pp. 91–96. DOI: 10.1134/S1028334X22602097.
8. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic Monitoring of Geodynamic Phenomena in Rockburst-Hazardous Mining Conditions. *Journal of Mining Science*. 2022. Vol. 58. No. 1. pp. 10–19. DOI: 10.1134/S1062739122010021.
9. Ergun T., Akkoyunlu M.F., Aksari D., Poyraz S.A., Cambaz M.D., Cok O., Gunes Y., Kalafat D., Kekovali K., Koseoglu A., Ogutcu Z., Ozel N.M., Ozer M., Polat R., Suvarikli M., Teoman U.M., Turhan F. Monitoring and Station Health of Turkiye – KOERI Stations and Their Contribution to AdriaArray Seismic Network. *Annals of Geophysics*. 2025. Vol. 68. No. 5. DOI: 10.4401/ag-9317.
10. Khmelinin A.P., Konurin A.I., Konurina M.I. Justification of electromagnetic scanning of oil-filled formation using downhole matrix antenna arrays. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 773. No. 1. Art. No. 012091. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012091.
11. Lin H., Zhang Q., Duan K., Wang P., Zhang X., Liu C., Chen C., Zhao Y. Geo-mechanical model test on strong mine tremors induced by the breakage of high thick-and-hard overlying strata during longwall coal retreat mining. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2025. Vol. 58. No. 5. – pp. 5549–5578. DOI: 10.1007/s00603-025-04412-z.
12. Rong H., Wei S., Zhang H., Chen L., Li N. Influencing factors and distribution characteristics of rock burst under complex geological dynamic environment. *Coal Science and Technology*. 2025. Vol. 53. No. 3. pp. 420–431. DOI: 10.12438/cst.2024-1129.
13. Serdyukov S.V., Azarov A.V., Dergach P.A., Duchkov A.A. Equipment for microseismic monitoring of geodynamic processes in underground hard mineral mining. *Journal of Mining Science*. 2015. Vol. 51. No. 3. pp. 634–640. DOI: 10.1134/S1062739115030291.
14. Shestopalov V., Kril T. Analysis of depression structures dynamic by remote sensing data. In: *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Monitoring 2022): Materials 16th International Conference*. Kiev, Ukraine. 2022. DOI: 10.3997/2214-4609.2022580195.
15. Wu C., Liao J., Yuan G., Li L., Wen A., Xia C. Effect of pre-existing faults on spatio-temporal evolution of in-situ stress and microseismic distribution. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*. 2025. Vol. 50. No. 10. pp. 4027–4043. DOI: 10.3799/dqkx.2025.164.