

АНАЛИЗ ПРИРОДЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ В РАЙОНЕ Г. БЕРЕЗНИКИ 7 ЯНВАРЯ 2025 г.

Шулаков Д.Ю., Горный институт УрО РАН, Пермь

Район Верхнекамского месторождения характеризуется аномально высокой техногенной нагрузкой на недра, что неизбежно приводит к активизации тектонических процессов. Одним из таких проявлений стало микроземлетрясение, произошедшее 7 января 2025 г., самое крупное в данном регионе с начала 21 века (магнитуда $M_L=2.5$). В статье описываются подходы к уточнению координат его эпицентра и глубины очага. Выполняется сопоставление сейсмограмм с другими сейсмическими событиями известной природы. Делается вывод, что данное микроземлетрясение, несмотря на совпадение в плане с горными выработками одного из рудников, имеет природный характер и приурочено к погребенной рифогенной структуре.

Ключевые слова: землетрясение, мониторинг, Верхнекамское месторождение, эпицентр, магнитуда

Район Березниковско-Соликамской градопромышленной агломерации характеризуется аномально высоким уровнем техногенной нагрузки на недра. Здесь происходит интенсивная подземная добыча калийных солей с одновременным формированием огромных солеотвалов на земной поверхности, откачка подземных вод, разработка нефтяных месторождений. Ко всему этому добавляется воздействие Камского водохранилища. Безусловно, подобный масштаб воздействия не может не привести к возникновению дополнительных напряжений в земной коре.

Как следствие, уже с середины 1980-х годов на территории Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) возникла проблема повышенной геодинамической активности. В результате накопившегося за многие десятилетия совокупного техногенного воздействия разнородная разломно-блоковая структура верхней части земной коры была выведена из равновесного состояния. Одним из проявлений данных процессов явились техногенные землетрясения, произошедшие на территории региона в 1993 [4], 1995 [6] и 1997 [2, 5] гг.

Все три этих землетрясения имели выраженные макросейсмические проявления, то есть ощущались людьми на территории гг. Березники или Соликамск. В то же время инструментальных данных по данным землетрясениям очень мало. До 1995 г. ближайшей сейсмической станцией была «Арти», расположенная в Свердловской области, на расстоянии около 350 км от ВКМС. К 1997 г. начала действовать локальная сейсмическая сеть на территории рудника СКРУ-2 в г. Соликамске. Данные этой сети позволили провести достаточно подробный динамический и кинематический анализ сейсмических волн от землетрясения, произошедшего 9 октября 1997 г. на территории шахтного поля рудника БКПРУ-2 (г. Березники) [5].

После землетрясения 1997 г. в течение более 25 лет каких-либо значимых проявлений тектонической активности на территории ВКМС не наблюдалось. В это

же время при сотрудничестве «ГИ УрО РАН» и недропользователей на территории как Верхнекамского месторождения, так и всего Уральского региона активно шло развитие систем сейсмического мониторинга. По состоянию на начало 2025 г. локальные сейсмические сети на территории ВКМС насчитывали свыше 80 сейсмических станций, расположенных как в горных выработках, так и на земной поверхности [8]. Кроме того, на территории Пермского края действует 8 региональных сейсмических станций, оборудованных современной высокочувствительной аппаратурой.

7 января 2025 г. в 10:08 UTC (15:08 местного времени) всеми сейсмическими станциями, расположенными на территории ВКМС, было зарегистрировано крупное сейсмическое событие. По результатам оперативной обработки было установлено, что его очаг располагался на территории шахтного поля БКПРУ-4. Однако опрос работников рудника, находившихся в это время на смене, показал, что они не ощутили каких-либо заметных сотрясений почвы или других сейсмических проявлений. При этом точное определение координат эпицентра и выделившейся энергии оказалось затруднено, поскольку записи на ближайших датчиках были сильно зашкалены. Кроме того, шахтные системы сейсмического мониторинга на рудниках БКПРУ-2 и БКПРУ-4 не имеют привязки к единой временной базе.

Для решения задачи определения координат очага была разработана специальная методика, позволяющая использовать данные всех доступных ближайших сейсмических станций (шахтные сети рудников БКПРУ-2 и БКПРУ-4 и сейсмические станции на территории г. Березники). Был выполнен расчет весовой функции, учитывающей фактические времена вступления сейсмических волн на станции, имеющие привязку к единому времени, и разность времен прихода сейсмических волн на датчики шахтных сетей, работающих в локальной временной системе. Предполагается, что минимум этой функции соответствует положению эпицентра сейсмического события. Однако из-за того, что эта функция в плане имеет вытянутый «овражный» характер, положение эпицентра было дополнительно уточнено за счет использования разности времен прихода P- и S-волн на ближайшие шахтные датчики (где это было возможно, несмотря на сильное зашкаливание сигнала).

При расчете времен пробега сейсмических волн была использована локальная скоростная модель. Она представляет собой глобальную модель IASP91 [10], дополненную в верхней части информацией о скоростном разрезе южной части ВКМС. В качестве исходных данных о скоростях были использованы результаты вертикального сейсмического профилирования (ВСП) в солеразведочной скважине № 17. С целью упрощения расчетов, данные ВСП были генерализованы до 7-слойной модели, соответствующей основным скоростным границам до глубины 500 м.

Итоговое положение эпицентра показано на рисунке 1. На представленном плане изображены два эллипса: заштрихованный соответствует наиболее вероятному положению очага, а пунктирная линия – диапазон возможных его положений с учетом ошибок определения времен вступлений и погрешностей задания скоростной модели среды.

Необходимо отметить, что данный подход позволяет достаточно надежно определить координаты очага сейсмического события только в плане (эпицентр). Поскольку все сейсмические датчики расположены или на земной поверхности, или на относительно небольшой глубине (200-300 м), определение абсолютной вертикальной отметки гипоцентра оказалось неустойчивым.

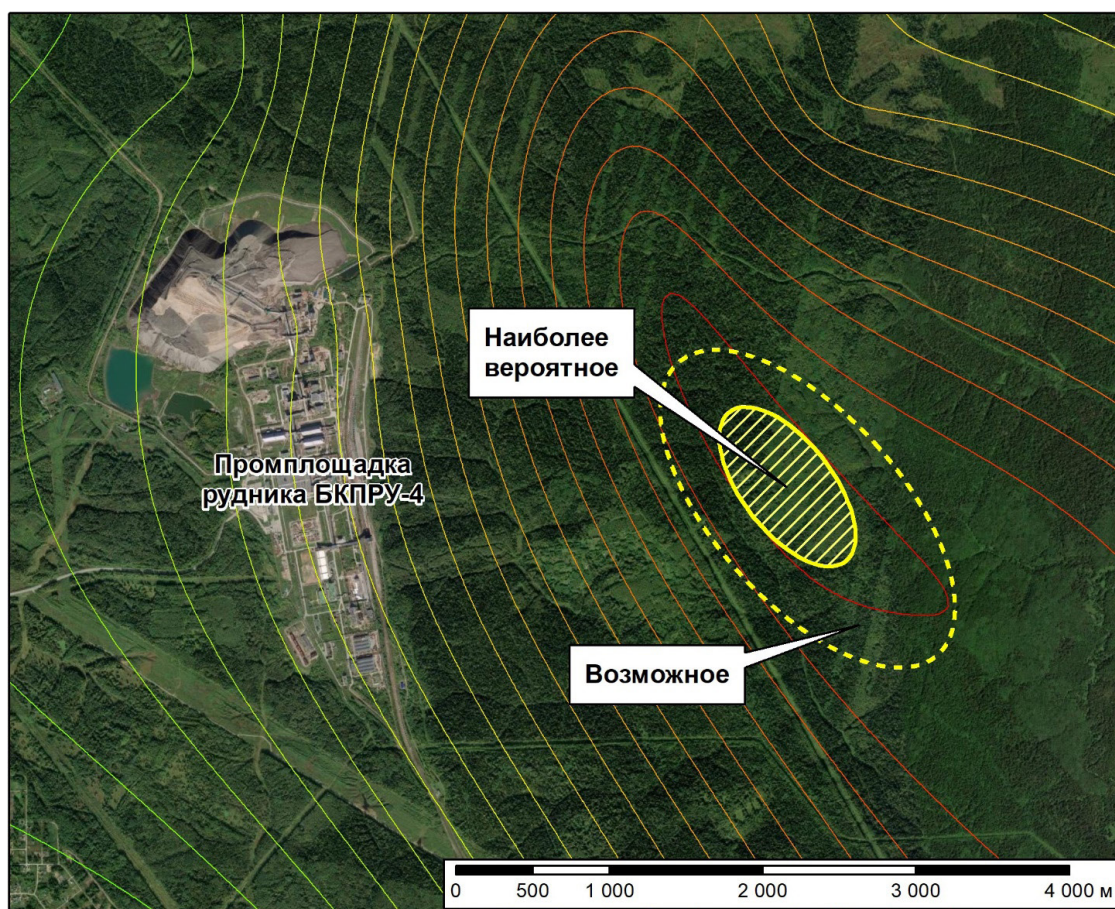


Рис. 1. Изолинии весовой функции и положение эпицентра сейсмического события, определенное посредством комплекса методов

Как видно из рисунка 1, эпицентр сейсмического события располагался на территории шахтного поля рудника БКПРУ-4, примерно в 2.5 км к востоку от его промплощадки, и в плане попал на выработанное пространство. В связи с этим службами рудника было выполнено обследование выработок в эпицентральной зоне. В результате не было выявлено каких-либо разрушений их несущих элементов, также не было обнаружено расслопроявлений (капелей и истечений из кровли выработок). Также были проведены внеочередные измерения по нивелировочной профильной линии, проходящей вблизи очаговой зоны, и шахтные сейсморазведочные исследования. Никаких аномалий в скоростях оседания земной поверхности выявлено не было, как и не было обнаружено сейсморазведочных признаков критического негативного изменения физических свойств пород водозащитной толщи.

Таким образом, различные прямые и косвенные методы контроля горнотехнической ситуации свидетельствуют об отсутствии признаков реализации процессов разрушения продуктивной и надсоляной толщ. Из этого можно сделать однозначный вывод, что очаг данного сейсмического события располагался существенно ниже уровня горных выработок.

Как уже упоминалось, сейсмограммы на ближайших к эпицентру сейсмических датчиках были зашкалены из-за того, что используемая аппаратура не рассчитана

на регистрацию настолько сильных сигналов. В то же время, данное сейсмическое событие было зарегистрировано сетью региональных сейсмических станций, расположенных на расстоянии до 200 км от рудника. Поскольку эти станции оснащены широкополосной аппаратурой и надежно откалиброваны, был выполнен расчет магнитуды с использованием их записей. Установлено, что локальная (Рихтеровская) магнитуда составила $M_L=2.5$. Такая магнитуда примерно соответствует сейсмической энергии $3 \cdot 10^8$ Дж (300 МДж). В случае тектонического землетрясения подобной магнитуде соответствует формирование сейсмогенного разрыва протяженностью около 300 м [3].

С целью установления возможной природы зарегистрированного сейсмического события было выполнено сопоставление его сейсмограмм с записями других сейсмических событий. Наибольший интерес представляет уже упомянутое землетрясение 9 октября 1997 г., которое ощущалось многими жителями г. Березники. Интенсивность колебаний в его эпицентральной зоне достигала 5 баллов по шкале MSK-64. Данное землетрясение было записано всеми действовавшими на тот момент сейсмостанциями Уральского региона, его магнитуда составила $M_L=3.1$. Поскольку ближайшая сейсмическая станция в то время находилась на территории рудника СКРУ-2, для определения координат эпицентра были использованы совместно инструментальные данные и результаты макросейсмического обследования. В результате установлено, что эпицентр данного землетрясения находился на территории шахтного поля БКПРУ-2, в районе 2-го пруда. Однако проведенное обследование в доступных выработках этого рудника не показало наличие каких-либо значимых разрушений [5]. То есть общая ситуация обладает высокой степенью сходства – крупное сейсмическое событие на территории шахтного поля без каких-либо видимых разрушений в горных выработках или в надсоляной толще.

Поскольку один из сейсмических датчиков (S26) с 1997 по 2025 гг. практически не изменил своего положения, и характеристики используемой аппаратуры также остались близкими, было выполнено сравнение сейсмограмм обоих событий, полученных этим датчиком (Рис. 2, Рис. 3).

Как видно из рисунка 2, начальные части сейсмограмм, соответствующие продольным волнам и наиболее тесно связанные с очаговым процессом, обладают высокой степенью сходства как по общей форме колебаний, так и по их спектральному составу.

Если сравнивать полные сейсмограммы (Рис. 3), то можно заметить, что землетрясение 1997 г. характеризуется более интенсивными и длительными поверхностными волнами. Наиболее вероятной причиной этого является то, что, во-первых, оно имело на порядок большую энергию, а во-вторых, эпицентральной расстояние до него также было больше (25 км против 19 км).

Для уточнения возможной природы очага сейсмического события было выполнено сопоставление его сейсмограмм с записями тектонических микроземлетрясений с близкой магнитудой, полученными на сопоставимых расстояниях. В качестве опорных сейсмограмм были взяты записи, полученные временной сетью сейсмических станций в районе сейсмически активной зоны «Таборы» (Пермский край) [1]. Также для сравнения была взята сейсмограмма массового технологического взрыва, проведенного на одном из карьеров Уральского региона. На рисунке 4 представлено такое сравнение для записей, полученных сейсмостанцией BRK04 (г. Березники, мкр. «МЖК»). Глубина очагов рассматриваемых тектонических событий составляла от 3 до 4 км.

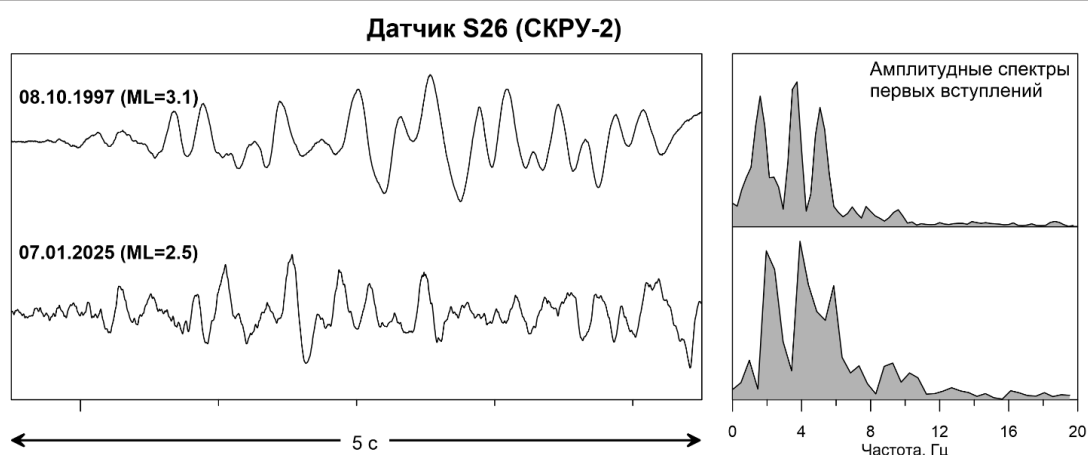


Рис. 2. Сравнение начальной части сейсмограмм сейсмических событий 08.10.1997 и 07.01.2025

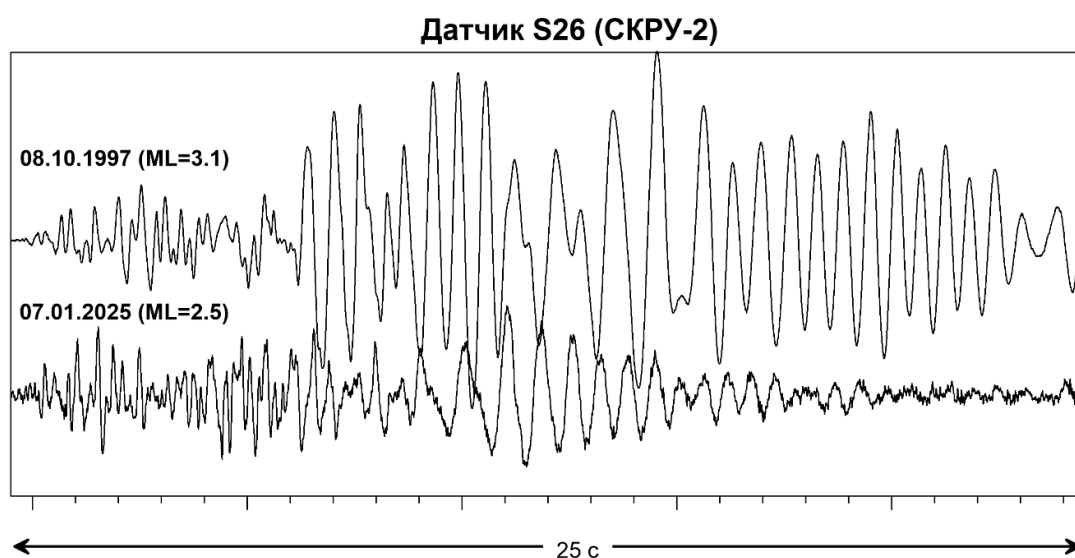


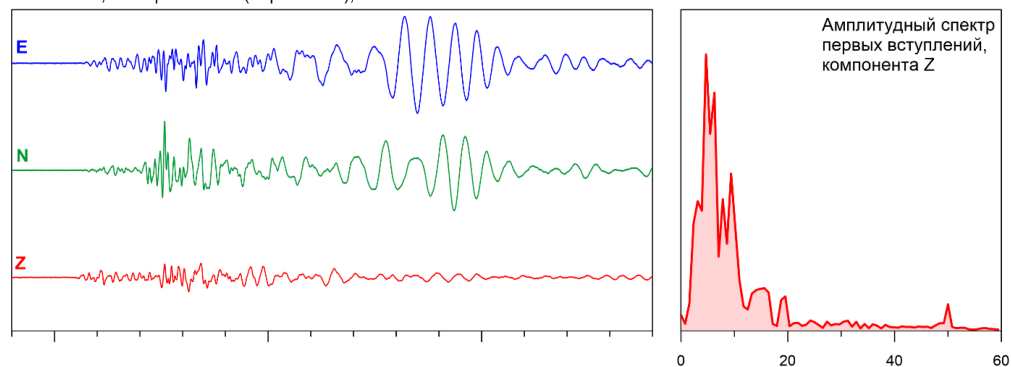
Рис. 3. Сравнение сейсмограмм сейсмических событий 08.10.1997 и 07.01.2025

Сравнение с сейсмограммами тектонических землетрясений позволяет говорить о следующих особенностях события, произошедшего 7 января 2025 г.:

- начальная часть сейсмограммы (наиболее зависимая от очаговых процессов) характеризуется более низкочастотным спектром;
- поперечные S-волны выражены слабее, чем для тектонических событий (представляющих собой подвижку по разлому), но более интенсивны, чем у технологических взрывов;
- присутствуют интенсивные поверхностные волны, что говорит об относительно небольшой глубине очага.

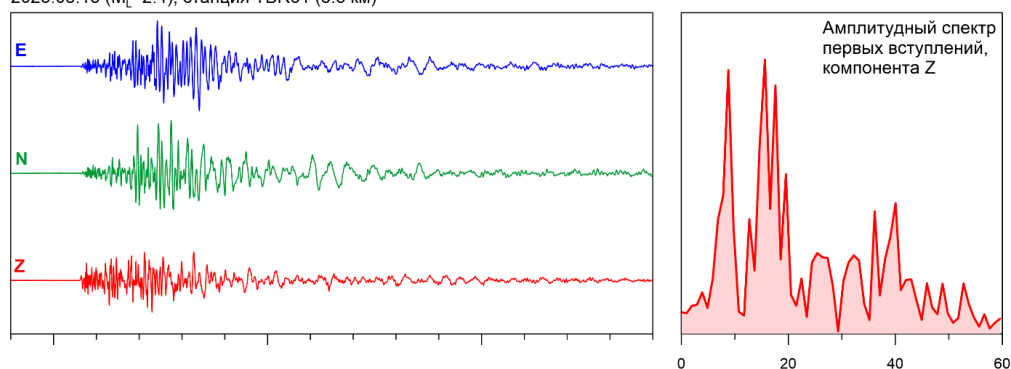
Также можно отметить, что сейсмограммы массового взрыва радикально отличаются от всех остальных, представленных на данном рисунке: начальная часть записи имеет самый высокочастотный состав, поперечные S-волны на сейсмограммах выявить практически невозможно, зато присутствуют длительные монохроматические колебания, связанные с тем, что данный взрыв является короткозамедленным (взрывается большое количество скважинных зарядов с интервалом в десятки мс).

2025.01.07, станция BRK04 (мкр. "МЖК"), 8.9 км

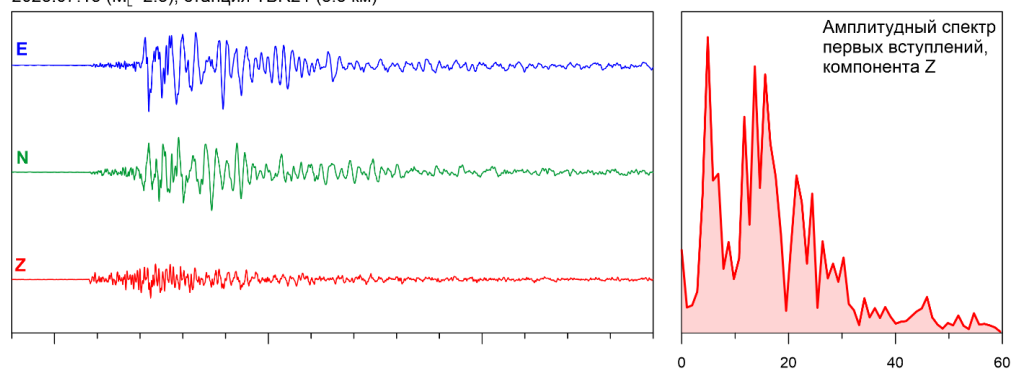


Тектонические микроземлетрясения (р-н п. Таборы)

2023.08.18 ($M_L=2.4$), станция TBR61 (8.3 км)



2023.07.13 ($M_L=2.3$), станция TBR21 (8.3 км)



Массовый взрыв на меднорудном карьере

2025.09.25 ($M_L=2.3$), станция SS01 (8.0 км)

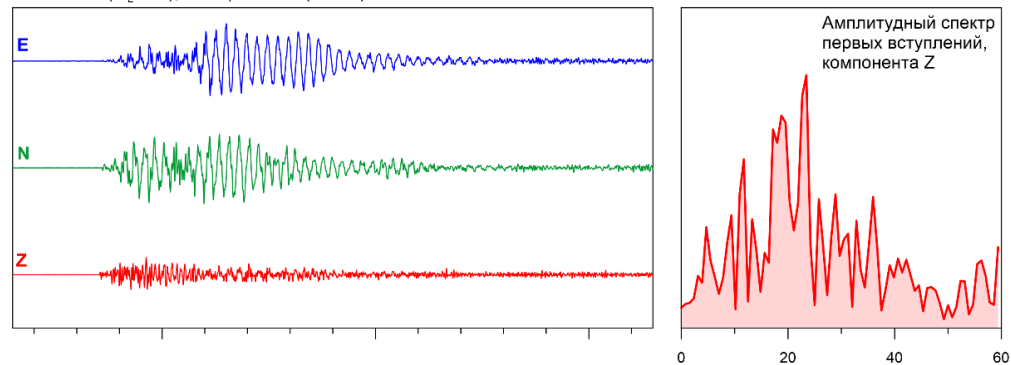


Рис. 4. Сравнение сейсмограмм события 07.01.2025, полученных на территории мкр. МЖК, с тектоническими микроземлетрясениями и массовым взрывом

Анализ геологического и тектонического строения района очага сейсмического события показывает, что его эпицентр совпадает с расположенной в осадочном чехле позднедевонской органогенной постройкой – Легчимской структурой облекания, сформированной в пределах Берзниковского палеоплато. Эта структура представляет собой крупное куполовидное поднятие площадью порядка 26 км² (6.7х5.0 км) и амплитудой 103 м. Наличие подобного образования предполагает вероятность активных тектонических процессов в период его формирования, что косвенно подтверждается предполагаемыми здесь, по данным различных авторов, тектоническими неоднородностями [7, 9]. Кроме того, различия в активности данных процессов сказывается и на особенностях строения самого рифа. Наличие гребневых субфаций предполагает существование в их пределах более благоприятных условий для роста рифа за счет дополнительного теплового воздействия, обусловленного тектоническими процессами. Положение эпицентра сейсмического события в плане как раз и совпадает с подобной особенностью в строении рифогенной структуры. Здесь также отмечается и вероятное влияние рифа на строение продуктивной толщи в виде интенсивной складчатости.

Обобщая всё вышесказанное, можно сделать вывод, что рассматриваемое сейсмическое событие представляет собой тектоническое микроземлетрясение (т.е. не имеющее ощутимых людьми проявлений), связанное с изменениями в подсолевых отложениях в районе гребневых фаций Легчимской рифогенной структуры. Несмотря на отсутствие макросейсмических проявлений, оно было зарегистрировано сейсмическими станциями на расстоянии до 200 км и является крупнейшим тектоническим событием на территории ВКМС с начала XXI века.

Библиографический список

1. Баранов Ю.В. Активная сейсмическая зона «Таборы» / Ю. В. Баранов, И. В. Голубева // Горное эхо. – 2023. – № 3 (92). – С. 69-72. doi: <https://doi.org/10.7242/echo.2023.3.9>
2. Дягилев Р.А. Макросейсмика техногенных землетрясений Урала / Р. А. Дягилев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 3. – С. 292-304. – EDN YJUCGX.
3. Завьялов А.Д. Новый способ определения характерного размера очаговой зоны / А. Д. Завьялов, О. Д. Зотов // Вулканология и сейсмология. – 2021. – № 1. – С. 22-29.
4. Маловичко А.А. Берзниковское землетрясение 25 октября 1993 г. // Проблемы безопасности при отработке месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций: Материалы международного симпозиума SPM-95. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – С. 295–307.
5. Маловичко А.А. Землетрясение в районе Второго Берзниковского пруда 9 октября 1997 г. / А.А. Маловичко, А.К. Кустов, Д.Ю. Шулаков // Горные науки на рубеже XXI века. Материалы Международной конференции. – Екатеринбург: Горный институт, 1998. – С. 165-171.
6. Маловичко А.А. Соликамское землетрясение 5 января 1995 года (Ms=4.2) / А.А. Маловичко, Д.А. Маловичко, А. К. Кустов // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году: Сборник научных трудов. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизическая служба Российской академии наук, 2001. – С. 163-169. – EDN VBAISL.
7. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н.М. Джиноридзе. – СПб: Соликамск, 2000. – 400 с.
8. Шулаков Д.Ю. Сейсмологический мониторинг Верхнекамского месторождения: задачи, проблемы, решения / Д. Ю. Шулаков, П. Г. Бутырин, А. В. Верховланцев // Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 25-29. – DOI 10.17580/gzh.2018.06.05. – EDN UTEFRY.

9. Щербинина Г.П. Проявление франско-турнейских рифогенных массивов в плотностном строении верхней части разреза Соликамской впадины / Г. П. Щербинина // Горное эхо. – 2020. – № 3(80). – С. 98-100. – DOI 10.7242/echo.2020.3.19. – EDN CUDDPI.
10. Kennett B. L. N. and Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International* 122 (1991), 429–465.

Благодарности:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (регистрационный номер НИОКТР 126012716041-5).

Для цитирования:

Шулаков Д.Ю. Анализ природы сейсмического события в районе г. Березники 7 января 2025 г. // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026. – № 2. – С. 21–28. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.2.2>

Сведения об авторе:

Шулаков Денис Юрьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: shulakov@mi-perm.ru, ORCID: 0000-0002-5673-8819

ANALYSIS OF THE NATURE OF THE SEISMIC EVENT IN THE AREA OF BEREZNIKI ON JANUARY 7, 2025

Shulakov D.Y.

Mining Institute UB RAS, Perm

The area of the Verkhnekamskoye deposit is characterized by an abnormally high technogenic load on the subsoil which inevitably leads to the activation of tectonic processes. One of their manifestations was a microearthquake with magnitude $M_L=2.5$ on January 7, 2025 which became the largest in this region since the beginning of the 21st century. The article describes approaches to clarifying the coordinates of its epicenter and the depth of the source. The seismograms are compared with other seismic events of known origin. It is concluded that this microearthquake is of tectonic origin and is associated with the buried reef structure, despite its similarity in plan to the mine workings of one of the mines.

Keywords: *earthquake, monitoring, Verkhnekamskoye deposit, epicenter, magnitude*

Поступила в редакцию: 16.02.2026

Принята к публикации: 08.06.2026