



**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕТАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ АКТИВНОСТИ В ДОНБАССЕ**

**А. В. Анциферов¹, В. В. Туманов¹, Е. А. Ялпута¹,
О. Л. Шалованов¹, Д. С. Бородин¹, Д. Ю. Шулаков²**

¹*Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела,
E-mail: ranimi@ranimi.org, ул. Челюскинцев 291, г. Донецк 283004, Донецкая Народная Республика*

²*Горный институт УрО РАН, E-mail: shulakov@mi-perm.ru,
ул. Сибирская 78а, г. Пермь 614007, Россия*

Рассмотрены результаты мониторинга техногенной сейсмической активности с использованием станции сейсмического контроля “Ермак-5” в районе горных работ шахты “Калиновская-Восточная”. Выявлены места, интенсивность и причины сейсмических событий, зафиксированных на глубине отработки угольного пласта и влияющих на близкорасположенные жилые массивы.

Сейсмомониторинг, угольный пласт, техногенная активность

**DETAILED SEISMIC MONITORING TO STUDY
MAN-INDUCED ACTIVITY IN THE DONETSK BASIN**

**A. V. Antsiferov¹, V. V. Tumanov¹, E. A. Yalputa¹,
O. L. Shalovanov¹, D. S. Borodin¹, and D. Yu. Shulakov²**

¹*Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying,
E-mail: ranimi@ranimi.org, ul. Chelyuskintsev 291, Donetsk 283004, Donetsk People's Republic*

²*Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: shulakov@mi-perm.ru, ul. Sibirskaya 78a, Perm 614007, Russia*

The results of monitoring man-induced seismic activity using Ermak-5 seismic control station in the mining area of the Kalinovskaya-Vostochnaya mine are considered. Places, intensity, and causes of seismic events recorded at the depth of coal seam mining and affecting the nearby residential areas are determined.

Seismic monitoring, coal seam, man-induced activity

При добыче угля, а также в процессе ликвидации угольных предприятий социально значимыми являются вопросы мониторинга техногенной ситуации на поверхности с оценкой рисков ее негативного развития. В связи с этим особая роль должна отводиться изучению геодинамических процессов и явлений на подрабатываемых территориях, представляющих угрозу жизнедеятельности человека. Зачастую такие геодинамические события характеризуются сейсмическими проявлениями (по сути, техногенной сейсмичностью) в виде толчков, четко фиксируемых в зданиях и сооружениях, расположенных на поверхности в зоне действия угольных шахт. Следует заметить, что изучением этих явлений довольно успешно занимаются в Польше (Верхнесилезский угольный бассейн), Германии (Рурский угольный бассейн), а также в основных угледобывающих регионах России, Казахстана и других странах. Так, в Польше сравнительно недавно создана измерительно-информационная система для наблюдения динамических явле-

ний, происходящих в земной коре в Верхнесилезском угольном бассейне, структура которой аналогична той, которая была разработана для мониторинга движений европейской тектонической плиты в рамках программы Европейской системы наблюдения за плитами (EPOS). Измерительная часть системы состоит из стационарных устройств и сейсмических датчиков, работающих в режиме мониторинга, которые установлены в различных местах месторождения как на поверхности, так и под землей, а собранные данные позволяют успешно проводить исследования в области геодинамики районов разработки угольных пластов [1, 2]. В тоже время данная система при несомненных достоинствах отличается большой сложностью управления и значительными трудозатратами на ее эффективное функционирование.

В Российской Федерации к настоящему времени накоплен довольно большой опыт детального сейсмического мониторинга для изучения техногенной активности [3], в том числе в условиях шахт, с целью предотвращения негативных динамических явлений при ведении горных работ (выбросов, горных ударов и т. п.) и оценки связанной с этим локальной и региональной (общешахтной, общерудничной) опасности [4 – 7]. Однако заметим, что применяемые системы шахтного сейсмомониторинга имеют достаточно четкую направленность на безопасность добычи угля и других полезных ископаемых, и по этой причине их возможности как сейсмологических методов для контроля геодинамики над областью горных работ на территориях плотной жилой застройки весьма ограничены. В последние годы значительный вклад в разработку аппаратных и программных средств в рамках широкомасштабных экспериментальных исследований природной и техногенной сейсмичности внесли ученые Горного института Уральского отделения РАН (“ГИ УрО РАН”) [8].

До недавнего времени геодинамические явления, обусловленные техногенной сейсмичностью, практически оставались неизученными и в Донбассе (на территории Донецкой Народной Республики) прежде всего из-за отсутствия необходимого оборудования, программно-методического обеспечения и дефицита финансирования. В то же время необходимость проведения исследований периодически возникала вследствие особо сложных горно-геологических условий добычи угля с одновременным влиянием гидрогеологических факторов, обусловленных затоплением старых выработок. Например, в середине 90-х годов прошлого века специалисты УкрНИМИ принимали участие в обследовании территории и жилого фонда поселка шахты им. Е. Т. Абакумова, жители которого жаловались на периодические подземные толчки, предположительно связываемые с горными работами. Для исследований применялась специально разработанная в институте сейсмическая аппаратура непрерывной регистрации с одним геофоном СВ-20, однако локализовать источники и природу сейсмических событий с помощью одного датчика оказалось невозможным, хотя удалось зарегистрировать временные промежутки этих событий.

В 2019 г. аналогичная проблема возникла на территории поселков Объединенный и Калиново г. Макеевки, расположенных в зоне ведения горных работ ш. “Калиновская-Восточная” ГП “Макеевуголь”. Очевидно, что фиксируемые жителями и администрацией поселков многочисленные толчки по своей природе не являются классическими землетрясениями, связанными с естественной сейсмичностью региона или отголосками далеких сейсмических очагов [9]. Поэтому участниками рабочей группы, организованной по поручению Главы Республики, для установления природы наблюдаемых негативных динамических явлений первоначально рассматривались следующие наиболее вероятные техногенные причины фиксируемых толчков:

- действия, связанные с утилизацией или испытанием взрывчатых веществ;
- незаконная добыча угля с применением буровзрывных работ;
- горные работы, ведущиеся шахтой “Калиновская-Восточная” ГП “Макеевуголь”;
- геодинамические процессы, происходящие в горных выработках ликвидированных шахт № 13-Бис и им. Ленина;
- взрывы скоплений метана и др.

Для достоверного определения местоположения источников сейсмической активности, фиксируемых населением, а также установления причины наблюдаемых явлений на территории пос. Объединенный был организован мониторинг с участием специалистов Республиканского академического научно-исследовательского и проектно-конструкторского института горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ). Этот район характеризуется многократной подработкой, на фоне которой ведутся горные работы по добыче угля на глубине 700 м. Здесь также достаточно развиты процессы, связанные с ликвидацией соседних шахт.

Для проведения детального сейсмического мониторинга 13 января 2020 г. в пос. Объединенный Советского района г. Макеевки было установлено оборудование. На начальном этапе исследований разработана схема размещения сейсмических станций, которая оконтуривала практически весь поселок и позволяла регистрировать сейсмические сигналы с любого из возможных направлений на расстоянии до нескольких километров (рис. 1). Спроектированная мониторинговая система состояла из четырех автономных станций, каждая из которых оснащена трехкомпонентными велосиметрами HS-1 (Geospace, США), цифровыми регистраторами “Ермак-5” [10], 3G-модемом и системами бесперебойного питания. Обработка данных осуществлялась учеными ГИ УрО РАН с помощью разработанного ими специализированного программного комплекса, а также программного обеспечения РАНИМИ и программ, находящихся в открытом доступе. В результате наблюдений выявлены две альтернативные зоны подземных источников сейсмической активности. Дальняя зона получена при использовании в расчетах высокоскоростной модели со скоростями продольных волн около 5000 м/с, а ближняя (наиболее вероятная) соответствует модели со скоростями продольных волн 2500 м/с, фактически наблюдаемых в данном регионе (рис. 1).



Рис. 1. Предполагаемые зоны источников техногенной сейсмичности на исследуемом участке: 1 — высокоскоростная модель; 2 — низкоскоростная модель; 2 — станция наблюдения “Ермак-5”; 3 — первоначальная граница проведения сейсмического мониторинга

Для уточнения скоростной модели на участке, прилегающем к области сейсмического мониторинга, специалистами РАНИМИ выполнены дополнительные сейсморазведочные исследования с использованием аппаратуры на базе модуля “Geode” (рис. 2).

На рис. 3 показаны характерные сейсмограммы, на которых первые вступления различных волновых пакетов прослеживаются достаточно отчетливо, позволяя наиболее однозначно интерпретировать полученный материал.

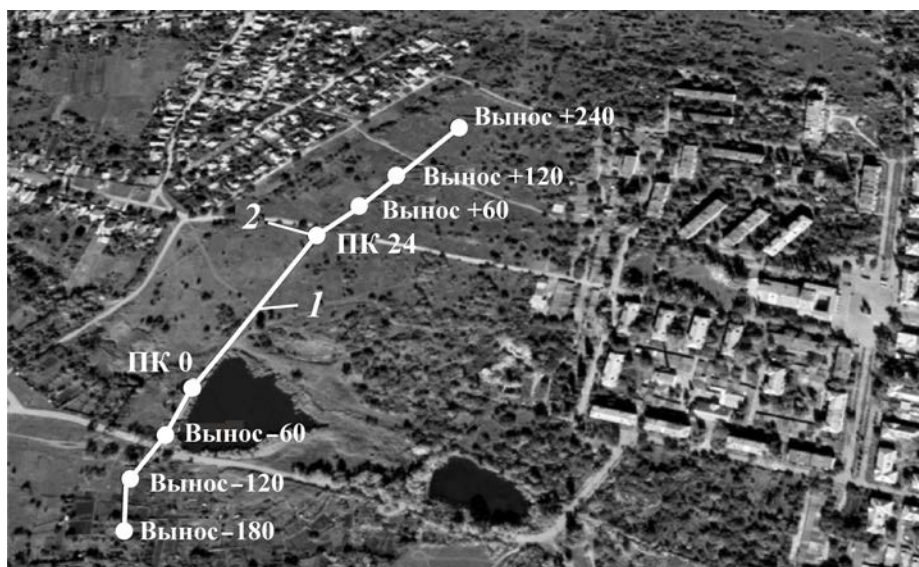


Рис. 2. Схема проведения дополнительных сейсмических исследований: 1 — профиль сейсмических наблюдений; 2 — пикет

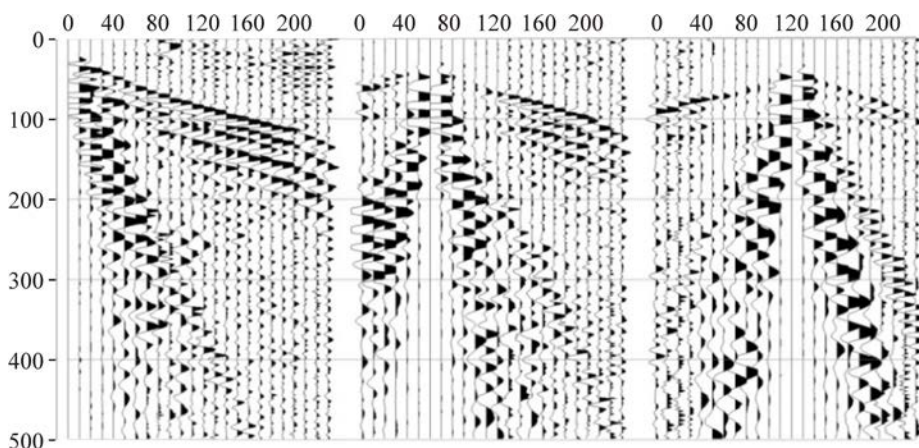


Рис. 3. Визуализация характерных сейсмограмм

Для дальнейшей обработки результатов мониторинга использовалась уточненная скоростная модель с преимущественными значениями скоростей продольных волн в диапазоне от 2500 до 3000 м/с, которая дала возможность с большой долей вероятности локализовать район возникновения сейсмической активности в области, находящейся на период мониторинга между фронтом очистных работ 5-й восточной лавы и технической границей шахты “Калиновская-Восточная”. Плановое местоположение очаговой области полностью подтверждено в ходе последующих исследований при новой окончательной расстановке датчиков и регистраторов “Ермак-5”, в которой спрогнозированная ранее зона подземной сейсмической активности находится внутри расстановки (рис. 4).

Отметим, что во время мониторинга вплоть до его окончания источники подавляющего большинства зарегистрированных сейсмических событий концентрировались в этой сравнительно компактной области. Их глубина, как правило, соответствовала вышележащим по отношению к обрабатываемому пласту отложениям, включающим мощные слои песчаников. Все сейсмические события имели импульсный характер. Магнитуда M_L , определенная по данным инструментальных наблюдений, составила от 1.0 до 2.8. Максимальная зарегистрированная

амплитуда сейсмической волны — 2.6 мм/с. Этот уровень достаточно хорошо ощутим людьми (особенно на верхних этажах зданий), но в разы меньше потенциально опасных значений, порог которых начинается от 7.0 мм/с. Следует добавить, что упругие колебания, вызываемые непосредственно техногенными процессами (БВР, работа выемочных механизмов, посадка непосредственной кровли), установленной аппаратурой регистрируются с предельно низкими амплитудами и на земной поверхности не ощущаются.

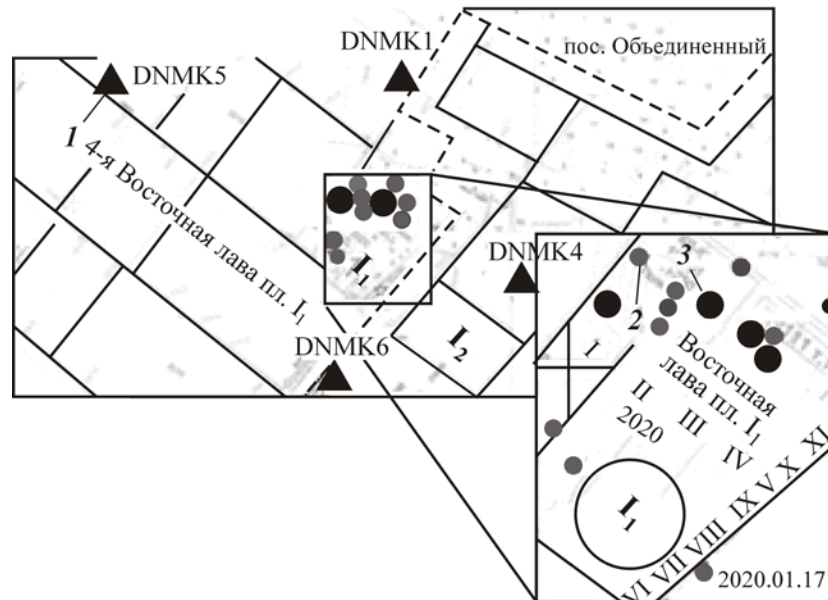


Рис. 4. Прогноз очаговой области сейсмической активности с новой расстановкой датчиков: 1 — станция наблюдения “Ермак-5”; 2 — событие с $M_L < 2.5$; 3 — событие с $M_L > 2.5$

Учитывая характер и положение регистрируемых очагов сейсмических событий (вблизи фронта горных работ, т. е. в зоне максимальной концентрации напряжений), их можно идентифицировать как техногенные землетрясения и микроземлетрясения, индуцированные ведением горных работ на шахте “Калиновская-Восточная”. Факторами, провоцирующими техногенную сейсмическую активность в районе добычных работ, являются снижение прочностных свойств углепородного массива и результаты затопления ранее отработанных угольных пластов шахты “Калиновская-Восточная” и соседних шахт им. Ленина и № 13-Бис.

С приближением очистных работ к зонам максимальной концентрации напряжений происходит изменение напряженно-деформированного состояния горного массива, разрушение пород с массовым образованием трещин и, как следствие, очагов сейсмических импульсов. Небольшая глубина образования трещин (до 600 – 700 м от поверхности земли) обуславливает сравнительно небольшую площадь их проявления на дневной поверхности — в пределах отдельных поселковых кварталов. С удалением от эпицентра эти колебания затухают и на поверхности не ощущаются [11].

С началом отработки новой лавы по добыче угля на шахте “Калиновская-Восточная” в марте 2021 г. снова произошли подземные толчки, которые чувствовались на поверхности местными жителями пос. Объединенный г. Макеевки. В апреле принято решение о возобновлении детального сейсмического мониторинга с помощью станций “Ермак-5”. В пос. Объединенный были установлены четыре станции, на которых осуществлялся круглосуточный сбор данных. Дальнейшая обработка направлена на определение гипоцентров и магнитуды регистрируемых событий.

ВЫВОДЫ

Исследования показали, что добычные работы, выполняемые на шахте “Калиновская Восточная” ГП “Макеевуголь”, характеризуются повышенным напряженным состоянием углепородного массива с низкими прочностными свойствами пород и влиянием процессов ликвидации старых выработок. При ведении горных работ наложение этих факторов индуцирует сейсмическую активность на поверхности, фиксируемую жителями близлежащих поселков как подземные толчки.

Применение современного сейсмического оборудования для наблюдений в минимально необходимом комплекте из четырех станций позволило достаточно уверенно локализовать очаги сейсмической активности в плане и по глубине, а также определить величину интенсивности сейсмических событий в очаговой области и на поверхности. При этом инструментальными наблюдениями установлено, что ни одно из более ста зарегистрированных оборудованием сейсмических событий не смогло оказать существенного негативного воздействия на промышленные и гражданские объекты на земной поверхности. Результаты эффективной фиксации и оценки техногенных толчков на подрабатываемых территориях дают возможность рекомендовать использование станции “Ермак-5” на других объектах горнодобывающей промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Mutkea Grzegorz, Kotyrbaa Andrzej and Lurkaa Adam.** Olszewskab dorota, Dykowskie Przemysław, Borkowski Andrzej, Araszkiewicz Andrzej, Barański Adam. Upper Silesian Geophysical Observation System – A unit of the EPOS project, *Journal of Sustainable Mining*, vol. 18, issue 4, 2019, pp. 198 – 207.
2. **Drzewiecki Jan, Myszkowski Jacek** Mining-induced seismicity of a seam located in rock mass made of thick sandstone layers with very low strength and deformation parameters, *Journal of Sustainable Mining*, 2018, vol. 17, issue 4, pp. 167 – 174.
3. **Sharov N. V., Molovichko A. A., and Shchukina Yu. K.** Earthquakes and microseismicity in the problems contemporary geodynamics of the east European platform, Book 2 Microseismicity, Petrozavodsk, Karelian Science Center of RAS, 2007, 96 pp. [**Шаров Н. В., Моловичко А. А., Щукина Ю. К.** Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Кн. 2. Микросейсмичность. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. — 96 с.]
4. **Yakovlev D. V., Tsirel S. V., and Mulev S. N.** Mechanism of development and methods of prompt assessment of technogenic seismic activity in mines and mining regions, *Journal of Mining Science*, 2016, no. 2, pp. 34 – 47. [**Яковлев Д. В., Цирель С. В., Мулев С. Н.** Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах // ФТПРПИ. — 2016. — № 2. — С. 34 – 47.]
5. **Oparin V. N., Sashurin A. D., Kulakov G. I., et al.** Contemporary geodynamics of rock mass of the upper part of the lithosphere: Origins, Parameters, Impact on Objects of Subsoil Use, Novosibirsk, Publishing House of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2008, 449 pp. [**Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Кулаков Г. И. и др.** Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 449 с.]
6. **Zakalinsky V. M., Frantov A. Ye., Averin A. P., Belousov F. S., and Mingazarov R. Ya.** System for monitoring the impact of explosion-generated pulses on underground workings being driven in the immediate vicinity of open-pit boundaries, *Mine Surveying and Subsurface Resources Management*, Moscow, 2016, no. 4 (84), pp. 17 – 19. [**Закалинский В. М., Франтов А. Е., Аверин А. П., Белоусов Ф. С., Мингазаров Р. Я.** Система контроля воздействия взрывных импульсов на подземные выработки, ведущие

еся в непосредственной близости от границ карьера // Маркшейдерия и недропользование. — М., 2016. — № 4 (84) — С. 17 – 19.]

7. **Zakharov V. N.** Geoinformation support and integrated monitoring of geo- and gas-dynamic processes in high-intensity underground coal mining, *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2012, no. S1, pp. 32 – 43. [**Захаров В. Н.** Геоинформационное обеспечение и комплексный мониторинг гео- и газодинамических процессов при высокоинтенсивной подземной угледобыче // ГИАБ. — 2012. — № S1. — С. 32 – 43.]
8. **Shulakov D. Yu., Butyrin P. G., and Verkholtantsev A. V.** Seismological monitoring of Verkhnekamskoye field: tasks, Problems and Solutions, *Mining Journal*, Moscow, 2018, no. 6, pp. 25 – 29. [**Шулаков Д. Ю., Бутырин П. Г., Верхоланцев А. В.** Сейсмологический мониторинг Верхнекамского месторождения: задачи, проблемы и решения // Горный журнал. — 2018. — № 6. — С. 25 – 29.]
9. **Экстренное сообщение** от администрации города по поводу постоянных землетрясений в одном из поселков г. Макеевка / https://vk.com/wall-5158073_1657428 / (дата обращения: 23.06.2021).
10. **Butyrin P. G. Verkholtantsev F. G. Verkholtantsev A. V. and Shulakov D. Y.** Digital seismic logger “Ermak-5”, Experience of development and implementation, *Seismic Instruments*, 2018, vol. 54, issue 2, pp. 5 – 23. [**Бутырин П. Г., Верхоланцев Ф. Г., Верхоланцев А. В., Шулаков Д. Ю.** Цифровой сейсмический регистратор “Ермак-5”. Опыт разработки и внедрения // Сейсмические приборы. — 2018. — Т. 54. — № 2. — С. 5 – 23.]
11. **Antsiferov A. V., Tumanov V. V., Lobkov N. I., Borodin D. S., Shalovanov O. L., Bazeeva R. P.** Monitoring of Induced Seismicity in the zone of influence of coal mines of Donetsk Basin (the case of Kalinovskaya-Vostochnaya mine , the State-Owned Enterprise “Makeyevugol”), *Transactions of RANIMI*, 2020, vol. 9, no. 24, pp. 78 – 88. [**Анциферов А. В., Туманов В. В., Лобков Н. И., Бородин Д. С., Шалованов О. Л., Базеева Р. П.** Мониторинг техногенной сейсмичности в зоне влияния угольных шахт Донбасса (на примере ш. “Калиновская-Восточная” ГП “Макеевуголь”) // Труды РАНИМИ. — 2020. — Т. 9. — № 24. — С. 78 – 88.]