



## Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 550.34.6(348.098)

DOI: 10.19110/geov.2025.2.4

### Временные сейсмические наблюдения на севере Республики Коми (Полярный Урал) в 2023 году

Н. Н. Носкова<sup>1</sup>, Ф. Г. Верхоланцев<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия, [nataliyageo@mail.ru](mailto:nataliyageo@mail.ru)<sup>2</sup> Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, [sombra@mail.ru](mailto:sombra@mail.ru)

Актуальность работы определяется тем, что активная разработка месторождений полезных ископаемых на севере Республики Коми провоцирует возникновение различных сейсмических событий. Большинство из них остаются незамеченными и неизученными. Целью исследований были рекогносцировочные сейсмические наблюдения северных районов республики. Для выяснения фактической сейсмической обстановки на территории Воркутинского углепромышленного района и протекающих здесь горно-динамических процессов летом 2023 г. были организованы экспедиционные сейсмологические работы на Полярном Урале. Подобные кратковременные наблюдения на Приполярном Урале проводились также в 2021 г. и предвляли установку стационарной сейсмической станции в Инте.

Полевые работы выполнялись в 3 этапа: на известняковом карьере «Юнь-Яга», в южной периклинали массива Енганепэ и южной части хр. Нияхой. Сейсмические записи характеризуются низким и средним уровнями шумов в сравнении с новой моделью шумов Петерсона. Всего было зарегистрировано более 100 локальных сейсмических событий с энергетическим классом по Т. Г. Раутиан  $K_p = 3.8–8.9$  и магнитудой  $M_L$  от  $-0.2$  до  $2.8$ . Пространственное распределение сейсмических событий показало, что они в основном сосредоточены вокруг Воркуты и, соответственно, шахтных полей. Изучение горнодобывающей активности, а также анализ волновой картины позволили нам выявить отличия волновых форм шахтных динамических явлений и промышленных взрывов и установить природу сейсмических событий. Большинство событий являются динамическими явлениями на угольных шахтах. Построен график повторяемости, характеризующий особенности сейсмических процессов. Исходя из закона повторяемости, можно утверждать, что временными наблюдениями на Полярном Урале регистрировалась именно техногенная сейсмичность в пределах Воркутинского углепромышленного района.

**Ключевые слова:** временная сейсмическая станция, микросейсмы, техногенная сейсмичность, горный удар, угольная шахта

### Temporary seismic observations in the north of the Komi Republic (Polar Urals) in 2023

N. N. Noskova<sup>1</sup>, F. G. Verkholtantsev<sup>2</sup><sup>1</sup> Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar<sup>2</sup> Mining Institute of UB RAS, Perm

The relevance of the study is underscored by the fact that the active development of mineral deposits in the north of the Komi Republic provokes various seismic events. Most of them remain unnoticed and unexplored. The study aimed at reconnaissance seismic observations of the northern regions of the republic. To clarify the actual seismic situation in the territory of the Vorkuta coal mining region and the mountain-dynamic processes occurring here, expeditionary seismological work was organized in the Polar Urals in the summer of 2023. Similar short-term observations in the Subpolar Urals were also carried out in 2021 and preceded the installation of a stationary seismic station in the city of Inta.

Field work was carried out in 3 stages: at the Yun-Yaga limestone quarry, in the southern pericline of the Enganepe massif and in the southern part of the Niyakhoy ridge. Seismic records were characterized by low and medium noise levels compared to the new Peterson noise model. In total, more than 100 local seismic events with the energy class according to T. G. Rautian  $K_R = 3.8–8.9$  and magnitude  $M_L$  from  $-0.2$  to  $2.8$  were registered. The spatial distribution of seismic events showed that they were mainly concentrated around the city of Vorkuta and, accordingly, mine fields. The study of mining activity, as well as the analysis of the wave pattern allowed identifying differences in the wave forms of mine dynamic phenomena and industrial explosions and establishing the nature of seismic events. Most of the events are dynamic phenomena in coal mines. We constructed a recurrence graph characterizing features of seismic processes. Based on the law of recurrence, we concluded that temporary observations in the Polar Urals recorded precisely man-made seismicity within the Vorkuta coal mining region.

**Keywords:** temporary seismic station, microseisms, man-made seismicity, rock burst, coal mine

**Для цитирования:** Носкова Н. Н., Верхоланцев Ф. Г. Временные сейсмические наблюдения на севере Республики Коми (Полярный Урал) в 2023 году // Вестник геонаук. 2025. 2(362). С. 34–43. DOI: 10.19110/geov.2025.2.4

**For citation:** Noskova N. N., Verkholtantsev F. G. Temporary seismic observations in the north of the Komi Republic (Polar Urals) in 2023. Vestnik of Geosciences, 2025, 2(362), pp. 34–43. DOI: 10.19110/geov.2025.2.4



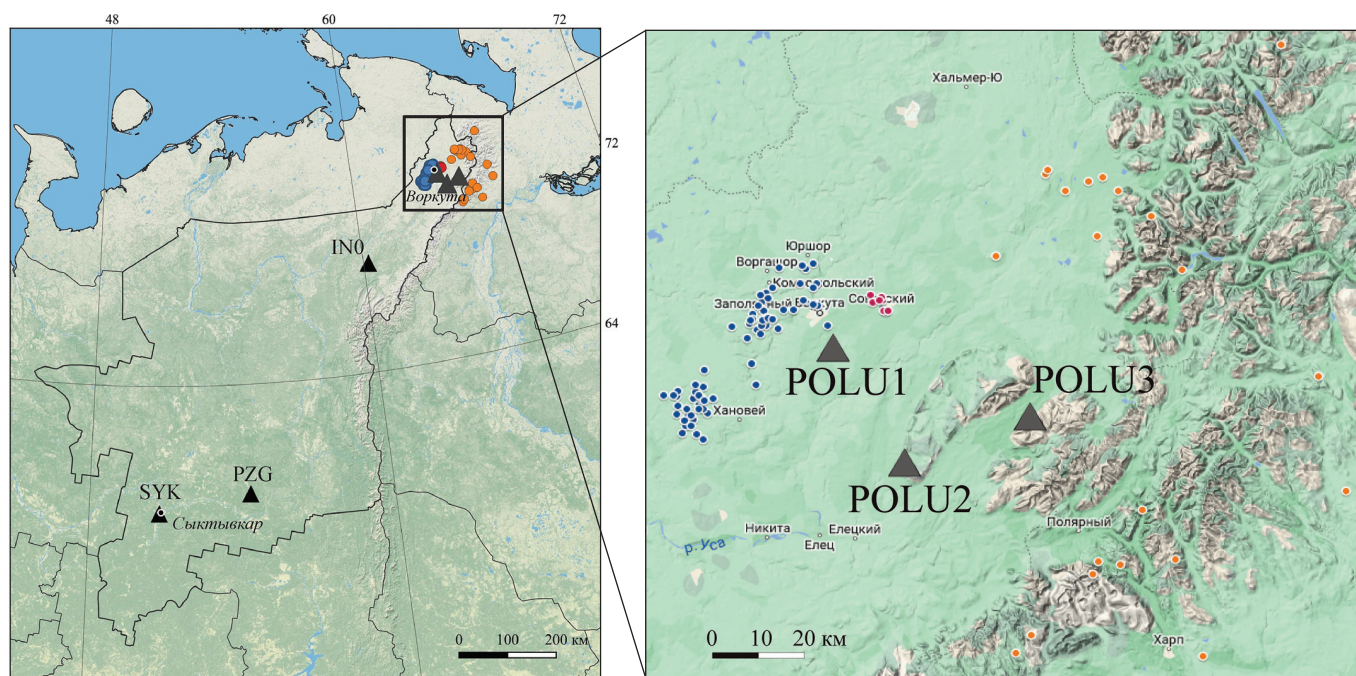
## Введение

Сейсмологические наблюдения в Республике Коми проводятся с марта 1996 г., когда в Сыктывкаре была открыта сейсмическая станция «Сыктывкар» (SYK) Института геологии (ИГ) ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Первоначально оборудование было аналоговое, позднее заменено на цифровое. В разные годы временные пункты наблюдений располагались в разных районах республики: Княжпогостском — с. Серёгово, Ижемском — с. Ижма, Усть-Куломском — пос. Зимстан. Наиболее продолжительное время функционировали сейсмостанции «Грива» (GRV) в д. Карвуджем Койгородского района (2011—2018 гг.) и «Пожег» (PZG) в с. Пожег Усть-Куломского района (2014—2023 гг.). Новый этап в развитии сейсмологических наблюдений на территории республики начался в 2021 г. с установки сейсмостанции «Инта» (IN0) ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в Инте, на северо-востоке республики (рис. 1). Благодаря этому удалось понизить порог представительности по магнитуде  $M_L$  регистрируемых сейсмических событий на севере республики с 4.0 до 2.5 и появилась возможность регистрировать техногенную сейсмичность на территории Республики Коми (Носкова и др., 2023). До этого стационарные станции техногенные события на севере республики не фиксировали. Расположение сейсмических станций ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в 2023 г. показано на рис. 1.

Территория республики слабосейсмична. Техногенные сейсмические события преобладают над природными, т. к. основу экономики республики составляют минерально-сырьевые ресурсы. Актуальность наших исследований определяется тем, что активная разработка месторождений полезных ископаемых про-

воцирует возникновение различных сейсмических событий. Доминирующее место занимает топливно-энергетический комплекс, представленный нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, газовой, угольной отраслями, что обусловлено расположением в пределах республики Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (Носкова, 2019; 2024) и Печорского угольного бассейна (Носкова, 2017; Носкова, Асминг, 2018; Носкова и др., 2018; 2024), в пределах которых и происходит основная доля техногенных сейсмических событий.

Как уже отмечалось выше, с открытием сейсмической станции «Инта» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН появилась возможность вести мониторинг техногенной сейсмичности на территории Республики Коми. На региональных расстояниях станцией регистрируются сейсмические события с  $M_L \geq 2.0$ , происходящие на угольных шахтах вблизи Воркуты, и промышленные взрывы на угольном разрезе «Юньягинский» (Носкова и др., 2023). Для выяснения реальной сейсмической обстановки на территории Воркутинского углепромышленного района и протекающих здесь горно-динамических процессов были организованы экспедиционные сейсмологические работы летом 2023 г. на Полярном Урале. Целью этих исследований были реконструктивные сейсмические исследования северных районов республики. Временные сейсмологические наблюдения необходимы для оценки объема сейсмических событий, происходящих в Воркутинском углепромышленном районе, пространственного и временного распределений природно-техногенной сейсмичности, изучения микросейсмического фона, характерных особенностей волновых форм промышленных



**Рис. 1.** Конфигурация сейсмической сети ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в 2023 г. и пространственное распределение локальных сейсмических событий, зарегистрированных временными сейсмическими станциями на Полярном Урале. Синие эпицентры — шахтные динамические явления, красные — карьерные взрывы, оранжевые — события неизвестной природы

**Fig. 1.** Configuration of the seismic network of the IG FRC Komi SC UB RAS in 2023 and the spatial distribution of local seismic events recorded by temporary seismic stations in the Polar Urals. Blue epicenters are mine dynamic phenomena, red ones are quarry explosions, orange ones are events of unknown origin



взрывов на карьерах и горно-динамических явлений на угольных шахтах Воркутинского углепромышленного района. Подобные кратковременные наблюдения проводились в 2021 г. и на Приполярном Урале и были предваряющими для установки стационарной сейсмической станции в Инте (Носкова, Попов, 2021; Носкова и др., 2023).

Помимо Урала в различных регионах России — на Кольском полуострове, в Кузбассе, Алтае-Саянском регионе, Якутии — интенсивная разработка месторождений полезных ископаемых вызывает активизацию локальной сейсмичности (Адушкин, Турунтаев, 2015; Виноградов и др., 2016; Гриб и др., 2021; Еманов и др., 2014; 2015; 2020). Сейсмически активными могут быть как горный массив в районе выработок (подземных или открытых), так и отвалы горных масс (Еманов и др., 2020). Комплексное воздействие (подземные работы, карьеры, отвалы, массовые взрывы и т. д.) горных работ ведет к расширению области сейсмической активности, перестройке её зонального распределения в «старых» горнодобывающих регионах и в целом к повышению сейсмичности, вплоть до появления землетрясений большой магнитуды (Яковлев и др., 2023). Землетрясения 2012 и 2015 гг. на Полярном и Приполярном Урале (Носкова, 2016) это подтверждают. Техногенное воздействие вызывает множество новых форм сейсмических явлений, прежде всего ровых мелкофокусных землетрясений низкой магнитуды, которые возможно регистрировать лишь на близких расстояниях. Поэтому важно обследовать данную территорию на возможное возникновение подобных событий.

Существенной проблемой для решения задач сейсмологического мониторинга является также распознавание природы сейсмических событий. Слабая сейсмичность, нестабильная работа сейсмических станций ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, их удаленность друг от друга и высокий уровень сейсмического шума в местах установки сейсмостанций не позволили накопить статистику для решения данного вопроса. Лишь комплексное изучение волновых форм сейсмических событий, происходящих на действующих карьерах и рудниках на близких расстояниях, дает возможность с большей точностью выполнять идентификацию регистрируе-

мых событий, разрабатывать и совершенствовать методики различения характерных особенностей волновых форм промышленных взрывов и горных ударов, составлять качественные каталоги землетрясений, что в конечном счёте существенным образом влияет на правильность оценок сейсмической опасности территории исследования.

## Методы исследования

Сейсмические наблюдения проводились трёхкомпонентным широкополосным сейсмометром Trillium Compact Posthole TC120-PH2 и цифровым регистратором Centaur CTR4-3S (Nanometrics Inc., Canada). Определение параметров гипоцентров выполнялось методом минимизации невязок в программах комплексов WSG (Красилов и др., 2006; Свидетельство..., 2020) и LOS (Асминг и др., 2021), с использованием скоростной модели для Восточно-Европейской платформы (Schueller et al., 1997), дополненной глубокими слоями модели AK-135 (Kennett et al., 1995).

Для расчёта локальной магнитуды  $M_L$  и магнитуды по поверхностным волнам  $M_s$  с использованием пакета программ WSG применялись способы, основанные на осредненной по Северной Евразии калибровочной функции (Габсатарова, 2006) и рекомендаций (Габсатарова, 2011) соответственно.

Замеры микросейсмического фона, расчет спектра мощности и его суточный ход выполнялись в программе Р. А. Дягилева *MicroNoise V 1.3.1* (Дягилев, 2013) по спектрам мощности сейсмических шумов с применением спектральной оценки Бартлетта. Методика исследования подробно описана в статье (Маловичко и др., 2020).

## Полевые наблюдения

Полевые работы проводились в 3 этапа:

I. На карьере по добыче щебня и бутового камня «Юнь-Ягинский», на 7 км юго-восточнее г. Воркуты. Код станции POLU1, координаты местоположения: 67.4268 N, 64.1251 E, альтитуда  $h = 277$  м.

II. На южной периклинали массива Енганепэ, в истоках руч. Левый Изъявож (приток р. Изъявож) (рис. 2).



Рис. 2. Расположение временного пункта сейсмических наблюдений POLU2

Fig. 2. Location of the temporary seismic observation point POLU2



Рис. 3. Временный пункт сейсмических наблюдений POLU3

Fig. 3. Temporary seismic observation point POLU3

Код станции POLU2, координаты: 67.1962 N, 64.4867 E,  $h = 247$  м. Оборудование располагалось на метабазальтах бедамельской серии ( $R_3$ ).

III. В южной части хр. Нияхой, руч. Нияшор (правый приток р. Нияю), около 700 м от устья (рис. 3). Код станции POLU3, местоположение: 67.2898 N, 65.1114 E,  $h = 238$  м. Сеймостанция была установлена на туфо-песчаниках бедамельской свиты ( $R_3$ ).

### Микросейсмические данные

В программе MicroNoise v 1.3.1 были рассчитаны средние уровни микросейсмических шумов по уровню медианного среднесуточного спектра мощности скорости смещений на вертикальной компоненте.

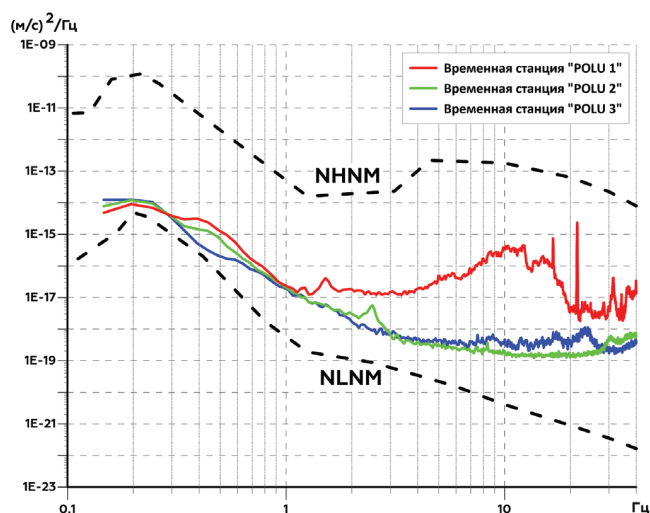


Рис. 4. Осредненные за сутки спектры мощности скорости смещений микросейсмического шума для временных пунктов наблюдений на Полярном Урале

Fig. 4. Averaged daily power spectra of microseismic noise displacement velocity for temporary observation points in the Polar Urals

Сейсмические записи временных пунктов наблюдений характеризуются низким и средним уровнями микросейсмических шумов (рис. 4) в сравнении с новой моделью шумов Петерсона (Peterson, 1993).

Станция, расположенная на территории месторождения известняка карьера «Юнь-Яга» (POLU1), характеризуется повышенным уровнем микросейсмических шумов в сравнении с двумя другими полевыми пунктами наблюдений. Повышение уровня шума в диапазоне частот от 6 Гц определяется круглосуточной техногенной деятельностью на карьере. В интервале до 5 Гц спектральная плотность микросейсмических шумов на всех трёх этапах наблюдений низкая и тяготеет к нижней границе модели Петерсона. При этом низкочастотная составляющая микросейсмического шума на пунктах наблюдения «Енганепэ» (POLU2) и «Нияхой» (POLU3) выше, что обусловлено ветровой нагрузкой в горной части исследований.

Таким образом, сейсмологические наблюдения в горной части хр. Енганепэ и Нияхой показали минимальный уровень техногенных помех, основная внешняя помеха — метеорологическая (ветер, дождь). В то же время наблюдения на известняковом карьере «Юнь-Яга» рядом с городом, наоборот, демонстрируют преобладание высокочастотной техногенной составляющей и отсутствие помех, вызванных атмосферными процессами. Но даже такой уровень фонового микросейсмического шума является приемлемым для локальных и региональных сейсмологических наблюдений.

### Инструментальная обработка

В подавляющем большинстве (95 %) инструментальная обработка сейсмических данных проводилась по одиночной трехкомпонентной станции «Полярный Урал» (POLU) ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Для нескольких сейсмических событий привлекались волновые формы станций: «Инта» (IN0) ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО



РАН, «Амдерма» (AMDE1) Архангельской сейсмической сети (код сети АН, <https://doi.org/10.7914/SN/АН>) и «Бованенково» (BVNN) ФИЦ ЕГС РАН. Для сейсмического события 1 августа 2023 г. (Носкова и др., 2024) в обработку также были включены данные сейсмической станции «Добрянка» (PR2R) ГИ УрО РАН (г. Пермь). Одностанционная локация эпицентров сейсмических событий проводилась в программе LOS (Асминг и др., 2021) по разнице времен вступления фаз Р- и S-волн и обратному азимуту на источник.

Всего в результирующий каталог вошли 107 локальных сейсмических событий с энергетическим классом по Т. Г. Раутиан  $K_p = 3.8–8.9$  и магнитудой  $M_L$  от  $-0.2$  до  $2.8$ , при этом уровень представительной магнитуды составляет  $M_L \geq 0.8$  (рис. 9). Пространственное распределение сейсмических событий показано на рис. 1. Они в основном сосредоточены вокруг г. Воркуты и, соответственно, шахтных полей. Изучение горнодобывающей активности, а также анализ волновой картины позволили нам отнести большинство событий к динамическим явлениям на угольных шахтах. Таким образом, 78 событий — это горные, горно-тектонические удары и другие динамические явления на шахтах Воркутского угленосного района, 21 явление неизвестной природы и 8 взрывов на угольном разрезе «Юнь-ягинский» (рис. 5).

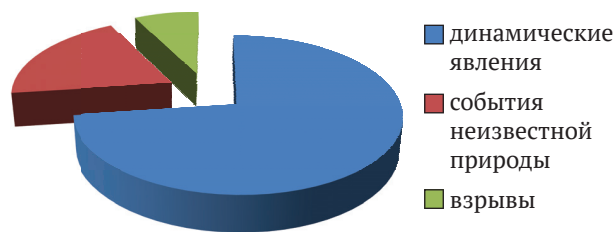


Рис. 5. Распределение локальных сейсмических событий Полярного Урала по типу

Fig. 5. Distribution of local seismic events in the Polar Urals by type

Самым заметным сейсмическим событием был горно-тектонический удар 1 августа 2023 г. (рис. 6), имевший макросейсмический эффект (Носкова и др., 2024). Временная сейсмическая станция POLU2 ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, работавшая на тот момент на массиве Енганепэ, первая зафиксировала данное событие. Жители нескольких районов г. Воркуты почувствовали толчки, похожие на землетрясение, и были обеспокоены, обращались в региональные управления. По поступившему запросу ГУ МЧС России по Республике Коми нами были переданы оперативно рассчитанные параметры эпицентра и предварительная интерпретация природы события. Инструментальный эпицентр события, по нашим расчётам, был расположен в пределах шахтного поля шахты «Воркутинская». Макросейсмическая интенсивность, рассчитанная в соответствии со шкалой ШСИ-2017 по 57 анкетам и 163 определениям категориаль-сенсоров, составила  $I_0 = 4.73 \pm 0.02$ . Рассчитанное значение макросейсмической глубины очага составило  $H = 0.5 \pm 0.4$  км, что соответствует инструментальному определению и диапазону глу-

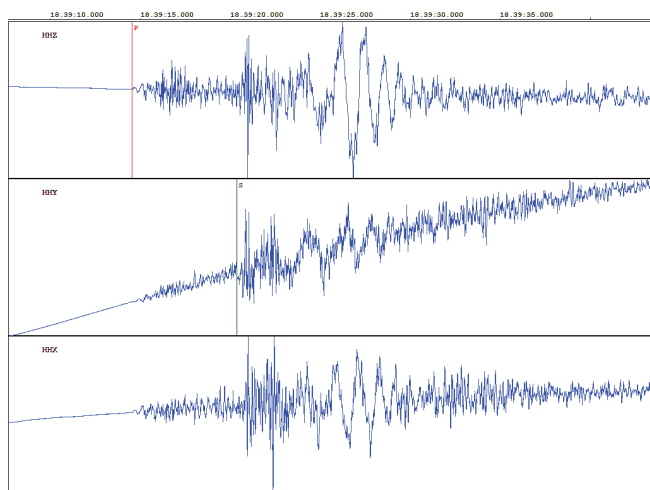


Рис. 6. Волновые формы временной сейсмической станции POLU2 горно-тектонического удара на шахте «Воркутинская» 1 августа 2023 г.,  $t_0 = 18:39$  (UTC),  $M_L = 2.8$

Fig. 6. Wave forms from temporary seismic station POLU2 of rock burst at the Vorkutinskaya mine on August 1, 2023,  $t_0 = 18:39$  (UTC),  $M_L = 2.8$

бин горных выработок Воркутского угольного месторождения (Носкова и др., 2024).

Анализ сейсмических записей различных событий показал особенности волновых форм. Для взрывов характерна интенсивная Р-волна, отсутствие S-волн и ярко выраженные поверхностные волны Лява и Релея (рис. 7), в то время как для горных и горно-тектонических ударов волновая картина схожа с землетрясением: наличие Р-волны, интенсивной S-волны, и далее в большинстве случаев выделяется поверхностная волна Релея. Примеры записей горно-тектонического и горного ударов на угольных шахтах показаны на рис. 6 и 8.

Было выявлено, что станцией «Инта» регистрируется лишь малая часть событий. Из 107 сейсмических событий зарегистрировано лишь 5. Это обусловлено тем, что подавляющая часть техногенных событий име-

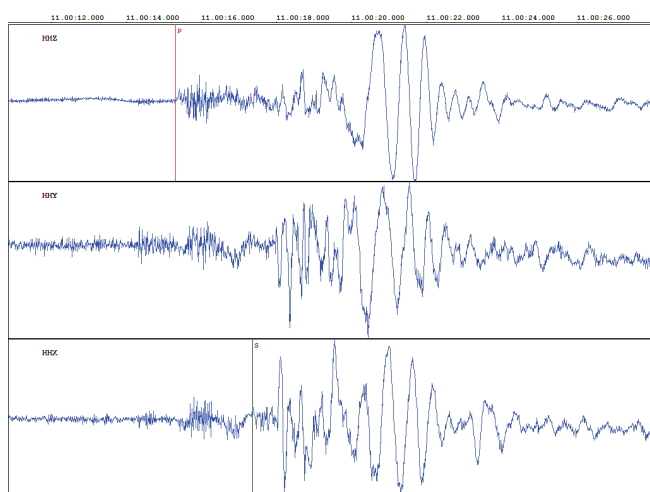
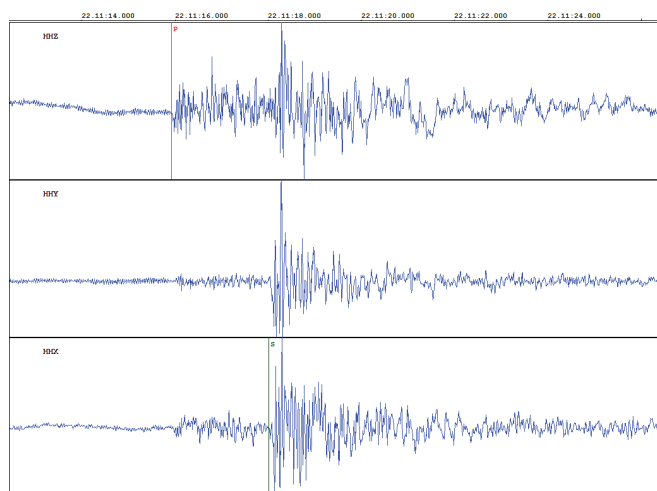


Рис. 7. Сейсмическая запись взрыва на угольном разрезе «Юньягинский» 22 июля 2023 г.,  $t_0 = 11:00$  (UTC)

Fig. 7. Seismic recording of the explosion at the Yunyaginsky coal mine on July 22, 2023,  $t_0 = 11:00$  (UTC)



**Рис. 8.** Сейсмограмма динамического явления в пределах шахтного поля «Заполярная» 20 июля 2023 г.,  $t_0 = 22:11$  (UTC)

**Fig. 8.** Seismogram of a dynamic phenomenon within the mine field of the Zapolyarnaya mine on July 20, 2023,  $t_0 = 22:11$  (UTC)

ет малую магнитуду ( $ML < 1$ ), и на региональных расстояниях они не фиксируются. Стационарной станцией «Инта» возможна регистрация сейсмических событий с  $ML \geq 2.0$ . Для проведения полноценного сейсмологического мониторинга Воркутинского углепромышленного района с использованием региональной сети также необходима стационарная сейсмическая станция вблизи шахтных полей.

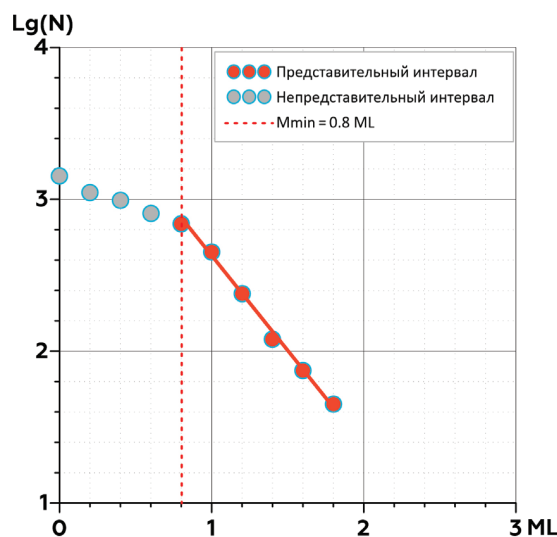
### График повторяемости

Одним из основных параметров, характеризующих особенности сейсмического процесса, является закон (или график) повторяемости землетрясений, отражающий фрактальные свойства сейсмической активности. График повторяемости землетрясений характеризует распределение количества сейсмических событий по энергии. Он имеет линейное соотношение и обычно записывается в виде закона Гутенберга — Рихтера (Gutenberg, Richter, 1954) в интегральной форме:

$$LgN = a - bM, \quad (1)$$

где  $N$  — количество событий с магнитудой  $M$  и более,  $a$  и  $b$  — эмпирически определяемые коэффициенты.

Сейсмическая активность  $a$  и наклон графика  $b$  являются одними из основных количественных параметров сейсмического режима. Таким образом, график повторяемости землетрясений в интегральном виде даёт информацию о параметрах процессов разрушения и свойствах геологической среды. Важную роль играет минимальная магнитуда  $M_{min}$  — перегиб графика повторяемости (рис. 9) — соответствующая уровню надёжной регистрации сейсмических событий. Рассматривая более слабые землетрясения с  $M < M_{min}$ , т. е. за пределом линейного участка графика повторяемости, можно получить неверные результаты. Расчет значений  $a$  и  $b$  производится только на линейном отрезке графика повторяемости, называемом представительным интервалом.



**Рис. 9.** График повторяемости сейсмических событий для временных наблюдений на Полярном Урале в 2023 г.

**Fig. 9.** Graph of seismic event recurrence for time observations in the Polar Urals in 2023

Уровень графика  $a$ -value отражает собственно сейсмическую активность — суммарную интенсивность сейсмических проявлений, как правило нормированную на временной промежуток, равный одному году. Наклон графика повторяемости  $b$ -value в физическом смысле показывает отношение между числом слабых и сильных сейсмических событий и соотношением между количеством больших и малых разрывов в геологической среде.

Для Уральского региона (Уломов, 2012), по данным инструментальных наблюдений, Уральской региональной сейсмологической сетью за более чем 20-летний период в широком интервале представительных магнитуд ( $2.0 \div 5.5$ ) получен закон повторяемости землетрясений (Верхоланцев, Голубева, 2022):

$$LgN = 2.15 - 0.69ML. \quad (2)$$

На рис. 9 представлен график повторяемости землетрясений, построенный для сейсмических событий, зарегистрированных в период временных наблюдений на Полярном Урале, которые были классифицированы как горные и горно-тектонические удары. События неизвестной природы и промышленные взрывы исключены из выборки. Горные и горно-тектонические удары — это события той же природы, что и техногенные землетрясения, и отличаются только выделенной сейсмической энергией, напрямую связанной с размером очага (Макаров, 2006; Адушкин, Турунтаев, 2015).

В каталоге событий, по которому был получен закон повторяемости, присутствует уже упомянутое в работе событие 1 августа 2023 г. (18:39 UTC) с  $ML = 2.8$  и макросейсмическими проявлениями в г. Воркуте с  $I_0 = 4.73 \pm 0.02$ . Данное событие можно классифицировать как техногенное землетрясение, но в силу малого периода наблюдений оно является непредставительным по магнитуде справа для расчета закона повторяемости.

В публикациях (Беляева и др., 2009; Адушкин, Турунтаев, 2015) приведены графики повторяемости

для техногенной сейсмичности на шахтах Воркутского угольного месторождения в энергетической форме по данным локальных шахтных сейсмологических сетей, где указан минимальный представительный энергетический класс  $K_p = 4$ , что соответствует  $ML = 0$ , а на самом графике справа события ограничены  $K = 8$ , что соответствует  $ML = 2.5$ . Таким образом, в данном примере закон повторяемости рассчитан для техногенных событий со значительно меньшей представительной магнитудой, а максимальная магнитуда ниже, чем представлено в нашем каталоге. По сути, все события являются горными и горно-тектоническими ударами, собственно техногенных землетрясений среди них нет.

В аналитическом виде для данного графика повторяемости можно записать следующее уравнение:

$$LgN = 3.88 - 1.25ML. \quad (3)$$

Среднеквадратическая ошибка определения коэффициентов  $a$  и  $b$  рассчитывалась по формулам (Куллдорф, 1966):

$$\sigma_a = \frac{a}{\sqrt{N_a}}; \quad (4)$$

$$\sigma_b = \frac{a}{\sqrt{N_a}}. \quad (5)$$

Таким образом, для уравнения 2 (временные наблюдения на Полярном Урале) значения коэффициентов составляют:  $a = 3.88 \pm 0.71$ ,  $b = 1.25 \pm 0.23$ , а для уравнения 1 (Уральский регион):  $a = 2.15 \pm 0.18$ ,  $b = 0.69 \pm 0.08$ . Видно, что величины коэффициента  $b$ -value для приведенных законов повторяемости землетрясений статистически значимо различаются между собой. Коэффициент  $b$ -value из уравнения 1 соответствует естественной природной сейсмичности для платформенных территорий, в то же время значение  $b$ -value из уравнения 2 характерно для техногенной сейсмичности, вызванной горными работами (Адушкин, Турунтаев, 2015). Значение  $b$ -value, приведенное в указанной работе, составляет 1.17, что близко к значению 1.25, полученному нами.

В качестве примера сходного (техногенного) сейсмического процесса в близкой геологической обстановке можно привести закон повторяемости для техногенных землетрясений, зарегистрированных за 20-летний период станциями Уральской сейсмологической сети в пределах Североуральского бокситового месторождения:

$$LgN = 3.92 - 1.15ML \quad (6)$$

при ошибке определения коэффициентов:  $a = 3.92 \pm 0.25$ ,  $b = 1.15 \pm 0.07$ .

Исходя из законов повторяемости землетрясений, представленных уравнениями 2 и 6, можно уверенно утверждать, что во время локальных наблюдений на Полярном Урале регистрировалась именно техногенная сейсмичность в пределах Воркутинского углепромышленного района.

## Выводы

С открытием сейсмической станции «Инта» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН появилась возможность вести мо-

нитинг техногенной сейсмичности на территории Республики Коми. Станцией за 2023 г. было зарегистрировано 25 техногенных сейсмических событий вблизи г. Воркуты (Носкова и др., 2023). Для выяснения реальной сейсмической обстановки на территории Воркутинского горнодобывающего района и протекающих здесь горно-динамических процессов были организованы экспедиционные сейсмологические работы летом 2023 г. на Полярном Урале.

Полевые работы проводились на известняковом карьере «Юнь-Яга» в южной периклинали массива Енганепэ и южной части хр. Нияхой. Для каждого временного пункта наблюдений были рассчитаны средние уровни микросейсмических шумов. Сейсмические записи характеризуются низким и средним уровнями микросейсмических шумов в сравнении с новой моделью шумов Петерсона. Сейсмологические наблюдения в горной части хр. Енганепэ и Нияхой показали минимальный уровень техногенных помех, основная внешняя помеха — метеорологическая. Наблюдения на карьере, наоборот, демонстрируют преобладание высокочастотной техногенной составляющей.

За время полевых наблюдений зарегистрировано 107 локальных сейсмических событий с энергетическим классом по Т. Г. Раутиан  $K_p = 3.8$ – $8.9$  и магнитудой  $ML$  от  $-0.2$  до  $2.8$ , уровень представительной магнитуды  $0.8$ . Большинство событий произошло в пределах шахтных полей. Изучение горнодобывающей активности, а также анализ волновой картины позволили нам выявить отличия волновых форм шахтных динамических явлений и взрывов и установить природу сейсмических событий. Таким образом, 78 событий являются горными, горно-тектоническими ударами и другими динамическими явлениями на шахтах Воркутского угленосного района, 21 — событиями неизвестной природы и 8 — взрывами на угольном разрезе «Юнгинский». Самым заметным сейсмическим событием был горно-тектонический удар 1 августа 2023 г., имеющий макросейсмические проявления в г. Воркуте ( $I_0 = 4.73 \pm 0.02$ ).

По данным временных сейсмических наблюдений, на региональных расстояниях, закон повторяемости для техногенной сейсмичности Воркутинского углепромышленного района получен впервые. Он однозначно показывает, что зарегистрированные временными наблюдениями сейсмические события характеризуют техногенную сейсмичность в пределах рассматриваемого района. В то же время установлено, что стационарная региональная сейсмическая станция «Инта» регистрирует лишь малую часть данных событий. Это обусловлено тем, что магнитуда большинства техногенных событий меньше единицы и на региональных расстояниях они не регистрируются. Таким образом, по данным только этой одной станции невозможно детально изучать и дифференцировать сейсмические процессы в пределах Полярного Урала. Проведенный сейсмологический мониторинг Воркутинского углепромышленного района показал необходимость установки стационарной сейсмической станции в г. Воркуте, что и было сделано спустя год, в июне 2024 г.

Выражаем искреннюю благодарность коллегам лаборатории региональной геологии и директору Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН И. Н. Бурцеву





за поддержку и проведение полевых работ сезона 2023 г. (геологический отряд № 4), а также рецензентам статьи за конструктивные замечания.

Исследования проводились в рамках государственных заданий ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН ГР № 122040600012-2 и ГИ УрО РАН ГР № 124020500029-1.

## Литература / References

- Адушкин В. В., Турунтаев С. В. Техногенная сейсмичность — индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.
- Adushkin V. V., Turuntaev S. B. Technogenic Seismicity: Induced and Triggered, Moscow: IDG RAS, 2015. (in Russian)
- Асминг В. Э., Федоров А. В., Прокудина А. В. Программа для интерактивной обработки сейсмических и инфразвуковых записей LOS // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 1. С. 27—40. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.1.02
- Asming V. E., Fedorov A. V., Prokudina A. V. LOS software for interactive seismic and infrasonic data processing. Russian Journal of Seismology, 2021, V. 3(1), pp. 27—40. (in Russian)
- Беляева Л. И., Гончаров А. И., Иванов Н. В., Куликов В. И. Возможные катастрофические геодинамические явления в Воркутинском угольном бассейне // Проблемы взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС, 2009. С. 155—162.
- Belyaeva L. I., Goncharov A. I., Ivanov N. V., Kulikov V. I., The probable catastrophic events in the Vorkuta coal basin. Problems of Interactions between the Geospheres. Moscow: GEOS, 2009, pp. 155—162. (in Russian)
- Верхоланцев Ф. Г., Голубева И. В. Сейсмичность Уральского региона за период с 2002 по 2022 г. по данным инструментальных наблюдений уральской сейсмологической сетью // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XVI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А. А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. С. 28.
- Verkholtantsev, F. G., and Golubeva, I. V., Seismicity of the Ural region for the period from 2002 to 2022. According to instrumental observations of the Ural seismological network. Modern Methods of Processing and Interpreting Seismological Data: Proceedings of the Seventh International Seismological Workshop. Obninsk: GS RAS, 2022, p. 28. (in Russian)
- Виноградов Ю. А., Асминг В. Э., Кременецкая Е. О., Жиров Д. В. Современная сейсмичность на территории Мурманской области и её проявление в горнопромышленных зонах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 1. С. 62—70.
- Vinogradov Y. A., Asming V. E., Kremenetskaya E. O., Zhironov D. V. Modern seismicity in mining areas in the Murmansk Region. J Min Sci 52, 2016, pp. 46—52. doi.org/10.1134/S1062739116010113
- Габсатарова И. П. Внедрение в рутинную практику подразделений Геофизической службы РАН процедуры вычисления локальной магнитуды // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 49—53.
- Gabsatarova I. P. Introduction to procedures for calculating the local magnitude into the routine practice of departments of the Geophysical Survey of the RAS. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials from International seismological school. Obninsk, GS RAS, 2006, pp. 49—53. (in Russian)
- Габсатарова И. П. Определение магнитуды MLV по поверхностным волнам региональных событий Кольского полуострова // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Шестой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 107—113.
- Gabsatarova I. P. Determination of MLV magnitude from surface waves of regional events of the Kola Peninsula. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proc. of the 6th International Seismological Workshop. Obninsk: GS RAS, 2011, pp. 107—113. (in Russian)
- Гриб Н. Н., Гриб Г. В., Качаев А. В., Малинин Ю. А., Мельников А. Е. Изменение уровня сейсмической активности в Южной Якутии под воздействием промышленных взрывов // Тенденции развития науки и образования. № 71-1. 2021. С. 117—123. DOI: 10.18411/lj-03-2021-26
- Grib N. N., Grib G. V., Kachaev A. V., Malinin Y., & Mel'nikov A. E. Change in the level of seismic activity in South Yakutia under the influence of industrial explosions, Trends in the Development of Science and Education. No. 71-1, 2021, pp. 117—123. (in Russian)
- Дягилев Р. А. MicroNoise, версия 1.3: Руководство пользователя / ФИЦ ЕГС РАН. Обнинск, 2013. 39 с.
- Dyagilev R. A. MicroNoise, version 1.3: User's manual. GS RAS. Obninsk, 2013, 39 p.
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) // ФТПРПИ. 2014. № 2. С. 224—228. DOI: 10.18411/lj-03-2021-26
- Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Leskova E. V., Shevkunova E. V., Pdkorytova V. G. Mining-induced seismicity at open pit mines in Kuzbass (Bachatsky earthquake on June 18, 2013). J. Min. Sci. 50, 2014, pp. 224—228. (in Russian)
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Корабельщиков Д. Г., Дураченко А. В. Система мониторинга наведенной сейсмичности Кузбасса и триггерные эффекты в развитии сейсмического процесса // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы III Всерос. семинара-совещания. М.: Изд-во ГЕОС, 2015. С. 190—199.
- Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Leskova E. V., Korabelschikov D. G., Durachenko A. V. Kuzbass induced seismicity monitoring system and trigger effects in the development of the seismic process. Proc. of the All-Russian seminar-meeting "Trigger effects in geosystems", Moscow: GEOS, 2015, pp. 190—199. (in Russian)
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г., Куприш О. В. Наведённая сейсмичность в угольных и железорудных районах Кузбасса // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2, № 3. С. 88—96. DOI: https://doi.org/10.35540/26867907.2020.3.08
- Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Shevkunova E. V., Podkorytova V. G., Kuprish O. V. Induced seismicity in



- coal and iron ore regions of Kuzbass. Russian Journal of Seismology, 2(3), 2020, pp. 88—96. (in Russian)
- Красилов С. А., Коломиец М. В., Акимов А. П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы междунар. сейсмолог. школы, посвящ. 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 77—83.
- Krasilov S. A., Kolomiets M. V., Akimov A. P. Organization of digital seismic data processing using the WSG software package. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the Seismological Workshop. Obninsk: GS RAS, 2006, pp. 77—83. (in Russian)
- Кулльдорф Г. Вопросы теории оценивания. М.: Наука, 1966. 176 с.
- Kulldorff G. Questions of the Theory of Evaluation. Moscow: Nauka, 1966, 176 p. (in Russian)
- Макаров А. Б. Практическая геомеханика: Пособие для горных инженеров. М.: Горная книга, 2006. 391 с.
- Makarov A. B. Practical Geomechanics: Manual for Mining Engineers. Moscow: Gornaya kniga, 2006, 391 p. (in Russian)
- Маловичко А. А., Габсатарова И. П., Дягилев Р. А., Мехрюшев Д. Ю., Зверева А. С. Оценка регистрационных возможностей сейсмической сети в западной части Северного Кавказа через геометрию сети и локальный уровень микросейсмических шумов // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 3. С. 35—60. <https://doi.org/10.21455/si2020.3-3>
- Malovichko A. A., Gabsatarova I. P., Dyagilev R. A., Mekhryushev D. Yu., Zvereva A. S., Evaluation of detection and location capability of the seismic network in the western part of the North Caucasus using network layout and local microseismic noise level. Seismic instruments, 2020, V. 56, No. 3, pp. 35—60. (in Russian)
- Носкова Н. Н. Новые данные о сейсмичности северной части Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 3 (255). С. 3—12. DOI: 10.19110/2221-1381-2016-3-3-12
- Noskova N. N. New data on northern Urals seismicity. Vestnik IG Komi SC UB RAS, March, 2016, No. 3 (255), pp. 3—12. (in Russian)
- Носкова Н. Н. Сейсмические события в Печорском угольном бассейне в 2016 году // Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления: Материалы Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2017. С. 133—135.
- Noskova N. N. Seismic Events in the Pechora Coal Basin in 2016, Geodynamics, Lithology and Ore Genesis in the East European Platform and Folded Periphery. Proc. All-Russ. Conf. with Int. Participation. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2017, pp. 133—135. (in Russian)
- Носкова Н. Н. Землетрясение 5 сентября 2019 года в Сосногорском районе Республики Коми // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 4 (40). С. 45—49. DOI: 10.19110/1994-5655-2019-4-45-49
- Noskova N. N. Earthquake on September 5, 2019 in the Sosnogorsk region of the Komi Republic. Proc. SC UB RAS, 2019, No. 4 (40), pp. 45—49. (in Russian)
- Носкова Н. Н. Сейсмическое событие 9 апреля 2024 г. в Сосногорском районе Республики Коми // III Юдахинские чтения: Сб. науч. материалов Всеросс. конф. с междунар. участием, 25—28 июня 2024, г. Архангельск / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. отд.-ние Рос. акад. наук, Федер. исслед. центр комплекс. изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаверова УрО РАН и др.; отв. ред.: К. В. Лобанов, И. Н. Болотов. Архангельск: КИРА, 2024. С. 432—436.
- Noskova N. N. Seismic event on April 9, 2024 in the Sosnogorsk region of the Komi Republic. "III Yudakhin Readings": All-Russian conference with international participation, June 25—28, 2024, Arkhangelsk. Eds.: K. V. Lobanov, I. N. Bolotov. Arkhangelsk: KIRA, 2024, pp. 432—436. (in Russian)
- Носкова Н. Н., Асминг В. Э. Уточнение параметров ряда сейсмических событий, произошедших в Воркутинском районе Республики Коми в 1971—2016 гг. // Геофизический журнал. 2018. Т. 19. № 4. С. 46—63. <https://doi.org/10.21455/gr2018.4-4>
- Noskova N. N., Asming V. E. Update of parameters of some seismic events in the Vorkuta area within 1971—2016. Geophysical Journal, 2018, V. 19, No. 4, pp. 46—63. (in Russian)
- Носкова Н. Н., Асминг В. Э., Федоров А. В. Сейсмическое событие на шахте «Комсомольская» 25 января 2018 г. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 4. С. 21—27. DOI: 10.15372/FTPRP120180403
- Noskova N. N., Asming V. E., Fedorov A. V. Seismic Event in the Komsomolskaya Mine on the 25th of January, 2018. J Min Sci, 54, 2018, pp. 550—555. <https://doi.org/10.1134/S1062739118043990>
- Носкова Н. Н., Попов И. В. Кратковременные сейсмические наблюдения на Приполярном Урале в 2021 году // Вестник геонаук. 2021. 12(324). С. 46—51. DOI: 10.19110/geov.2021.12.5
- Noskova N. N., Popov I. V. Short-term seismic observations in the Subpolar Urals in 2021. Vestnik of Geosciences, 2021, 12(324), pp. 46—51. (in Russian)
- Носкова Н. Н., Попов И. В., Машин Д. О. Новый пункт сейсмических наблюдений на территории Республики Коми // Геофизические исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 52—68. <https://doi.org/10.21455/gr2023.3-3>
- Noskova N. N., Popov I. V., Mashin D. O. New seismic observation point on the territory of the Komi Republic. Geophysical Research, 2023, V. 24, No. 3, pp. 52—68. (in Russian)
- Носкова Н. Н., Верховланцев Ф. Г., Асминг В. Э., Ваганова Н. В., Попов И. В. Сейсмические события в Воркутском угледоугольном районе в 2023 году // Вестник геонаук. 2024. 1 (349). С. 34—42. DOI: 10.19110/geov.2024.1.4
- Noskova N. N., Verkholantsev F. G., Asming V. E., Vaganova N. V., Popov I. V. Seismic events in the Vorkuta coal industrial district in 2023. Vestnik of Geosciences, 2024, 1 (349), pp. 34—42. (in Russian)
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 «Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных»/ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» (RU); А. П. Акимов, С. А. Красилов. Заявка № 2020663791; заявлено 10.11.2020; дата гос. регистрации 16.11.2020.



- Certificate of state registration of computer program No. 2020664678 "WSG software package "Seismic data processing system". FRC "UGS RAS" (RU); A. P. Akimov, S. A. Krasilov. Application No. 2020663791; filed 11/10/2020; state registration date 11/16/2020.
- Уломов В. И. Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе единой информационной системы «Сейсмобезопасность России» // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 39. № 1. С. 5—38.
- Ulomov V. Updating normative seismic zonation in the integrated information system «Seismic safety of Russia», 2012, V. 39, No. 1, pp. 5—38. (in Russian)
- Яковлев Д. В., Лазаревич Т. И., Бондарев А. В. Исследование геодинамических рисков масштабного освоения Кузбасса // Горная промышленность. 2023. (S1). С. 48—54. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-48-54>
- Yakovlev D. V., Lazarevich T. I., Bondarev A. V. Study of geodynamic risks of large-scale mining in Kuzbass. Russian Mining Industry. 2023; (1 Suppl.): 48—54. (in Russian)
- Gutenberg B., Richter C. F. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press, Princeton, 1954. 310 p.
- Kennett B. L. N., Engdahl E. R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times // Geophysical Journal International. 1995. No. 122. P. 108—124.
- Peterson J., Observations and modeling of seismic background noise. Open-File Report 93-322, Albuguergue, New Mexico, U.S. Geological Survey, 1993, 95 p.
- Schuller W., Morozov I. B., Smithson S. B. Crustal and uppermost mantle velocity structure of northern Eurasia along the profile Quartz, Bulletin of the Seismological Society of America, 1997. No. 87. P. 414—426.

Поступила в редакцию / Received 17.01.2025