

## Промышленные взрывы на территории Воронежского кристаллического массива и их временная динамика

©2023 Л. И. Надежка<sup>1, 2✉</sup>, С. П. Пивоваров<sup>2</sup>, М. А. Ефременко<sup>2</sup>,  
И. Т. Ежова<sup>1,2</sup>, Э. И. Золототрубова<sup>1</sup>, В. В. Мохова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1,  
394018, Воронеж, Российская федерация

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН»,  
Университетская пл. 1, 394018, Воронеж, Российская федерация

### Аннотация

*Введение:* В работе представлены результаты анализа временной динамики за более чем 20-летний период промышленных взрывов в крупных карьерах, функционирующих на территории Воронежского кристаллического массива. Ежегодно производится от 90 до 140 промышленных взрывов в крупных карьерах, при этом выделяется сейсмической энергии  $10^{10}$ – $10^{12}$  Дж, что оказывает значительное влияние на деформационные свойства земной коры, создавая условия для возникновения наведенной сейсмичности и других негативных явлений. В связи с этим становится чрезвычайно актуальной проблема прогнозирования изменения деформационных процессов в земной коре под воздействием мощных промышленных взрывов. Анализ временной динамики взрывных работ в карьере является важной составляющей при решении указанной выше проблемы.

*Методика:* За более чем 20-летний период зарегистрировано около 3000 крупных промышленных взрывов. Исследована временная динамика производства промышленных взрывов по годам, во всех крупных карьерах, и выделившейся при этом сейсмической энергии. Выполнен статистический анализ промышленных взрывов разного энергетического класса в течение всего периода наблюдений. Исследована методика проведения промышленных взрывов в разных карьерах по дням недели и времени суток. Проанализированы волновые формы сейсмических событий, вызванных промышленными взрывами в крупных карьерах.

*Результаты и обсуждения:* В результате анализа временной динамики промышленных взрывов в крупных карьерах ежегодно и за более чем 20-летний период установлено, что добыча полезных ископаемых в карьерах велась неравномерно. Четко выделяется период с 2008 года с небольшим временным сдвигом и до 2016–2017 гг во всех карьерах уменьшается добыча полезных ископаемых, что выражается в уменьшении количества промышленных взрывов и их мощности. Наибольшее количество взрывов за весь период наблюдений было произведено в карьере «Павловский», наибольшее количество сейсмической энергии выделилось при производстве промышленных взрывов в Железнодорожном карьере. Значительный поток сейсмической энергии регулярно выделяется при производстве каждого промышленного взрыва и, регулярно распространяясь в земной коре, меняет её деформационные свойства, создавая условия возникновения вторичных процессов, как в глубинных горизонтах Земли, так и на её поверхности.

*Выводы:* Временная динамика производства промышленных взрывов в разных крупных карьерах имеет общие и специфические черты. Ежегодно в крупных карьерах производилось от 90 до 140 промышленных взрывов. При этом, в каждом из карьеров в разные годы количество их отличается.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Надежка Людмила Ивановна, e-mail: [nadezhka@geol.vsu.ru](mailto:nadezhka@geol.vsu.ru)

Однако наблюдается четкая синхронизация по времени производства промышленных взрывов в разных карьерах с 9:00 до 11:00 часов UTC в определенные дни недели. Большое количество сейсмических событий техногенной природы, во-первых, существенно осложняет сейсмическую ситуацию в регионе, во-вторых, влияет на деформационные свойства земной коры и, в третьих, затрудняет оценку природной сейсмической активности территории Воронежского кристаллического массива – крупнейшей структуры Восточно-Европейской платформы.

**Ключевые слова:** Воронежский кристаллический массив, промышленные взрывы, временная динамика, сейсмические события, сейсмическая энергия, деформационные свойства, земная кора.

*Для цитирования:* Надежка Л. И., Пивоваров С. П., Ефременко М. А., Ежова И. Т., Золототрубова Э. И., Мохова В. В. Промышленные взрывы на территории Воронежского кристаллического массива и их временная динамика // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 3. С. 109–123. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/109-123>

### Введение

На территории Центрально-Черноземного экономического района (в геологическом плане – территория Воронежского кристаллического массива) в настоящее время значительно развита горнодобывающая промышленность. При этом полезные ископаемые добываются как в кристаллических породах докембрия, так и в осадочном чехле. В регионе функционирует более 20 карьеров, в которых полезные ископаемые добываются открытым способом. При этом, суммарное количество взрывчатого вещества во время производства одного промышленного взрыва в карьере, где добывается железная руда, (Железногорский–Михайловский, Лебединский и Стойленский карьеры), колеблется от 1 000 т до 2 500 т. В карьерах по добыче гранитного щебня (Павловский – Шкурлат, Тихий Дон) суммарное количество ВВ составляет 100–300 т. В карьерах, в которых добываются полезные ископаемые в осадочном чехле, суммарное количество ВВ при производстве одного взрыва колеблется от 5.0 т до 50 т.

Ежегодно производится от 300 до 500 промышленных взрывов, из которых 90–140 в крупных карьерах. При производстве промышленных взрывов выделяется в год сейсмической энергии от  $10^{10}$  до  $10^{12}$  Дж [1–4]. Это определяет высокую значимость проблемы воздействия промышленных взрывов на литосферную оболочку Земли. Известно, что верхние горизонты литосферы активно участвуют в деформационных процессах. При этом они способны реагировать даже на небольшие по величине воздействия [5–7]. Реакция геологической среды на техногенные воздействия разнообразна. Однако наиболее она заметна в увеличении интенсивности естественных фоновых колебаний, в деформации земной поверхности и в возникновении техногенных землетрясений [8, 9].

Степень, интенсивность и характер отклика геологической среды на сейсмические воздействия, вызванные промышленными взрывами, в значительной мере зависят от деформационных свойств земной коры, от способности накапливать сейсмическую энергию и способа её релаксации. В результате регулярных сейсмических воздействий, вызванных промышленными взрывами, в геологической среде накапливается сейсмическая энергия, вследствие этого нарушается естественное равновесное состояние деформационных процессов и геологическая среда может реагировать путём разрядки

сейсмической энергии в виде землетрясений – наведенной сейсмичности [5, 6, 9, 10]. При этом спровоцированные землетрясения могут быть значительно более мощными, чем взрывы [5, 6]. Вместе с тем, возможны медленные изменения интенсивности деформационных процессов. В этом случае в геологической среде могут возникать трещины, которые по мере регулярных сейсмических воздействий могут превращаться в разломы, а в рельефе дневной поверхности им могут соответствовать быстро «растущие» овраги, балки. Кроме того, известно, что промышленные взрывы значительно влияют на подземный водный режим. Все эти негативные факторы существенно осложняют экологическую ситуацию в регионе [10, 11].

Учитывая, что в регионе развита мощная инфраструктура, на его территории функционируют объекты повышенной экологической ответственности (две атомные станции, Россошанский завод минеральных удобрений и т.п.), расположены различного рода трубопроводы, в крупных городских агломерациях активно ведется высотная застройка, территория региона характеризуется высокой плотностью населения, активная горнодобывающая деятельность создает повышенные риски негативных процессов и чрезвычайных ситуаций.

В связи с этим становится чрезвычайно актуальной проблема прогнозирования изменения деформационных процессов в земной коре под воздействием мощных промышленных взрывов при добыче полезных ископаемых. Анализ временной динамики взрывных работ, особенно в карьерах, отражающих активность добычи полезных ископаемых, является важной составляющей при решении указанной выше проблемы.

Ниже приводится анализ временной динамики взрывных работ в наиболее крупных карьерах в Европейской части России по добыче железной руды и гранитного щебня на территории Воронежского кристаллического массива, так как именно в этих карьерах производство промышленных взрывов вызывает наиболее мощный поток сейсмической энергии.

### Методика исследований

Анализ интенсивности взрывных работ в крупных карьерах региона, их временной динамики, выполнен на основе большого объема фактических данных, полученных путем сейсмологических наблюдений постоянными и временными сетями сейсмических

станций. На территории региона в настоящее время функционирует сеть, состоящая из 12 сейсмических станций, пять из которых входит в Федеральную сеть сейсмологических наблюдений России. Обработка и интерпретация волновых форм сейсмических событий различной природы производится с использованием программы WSG [12, 13].

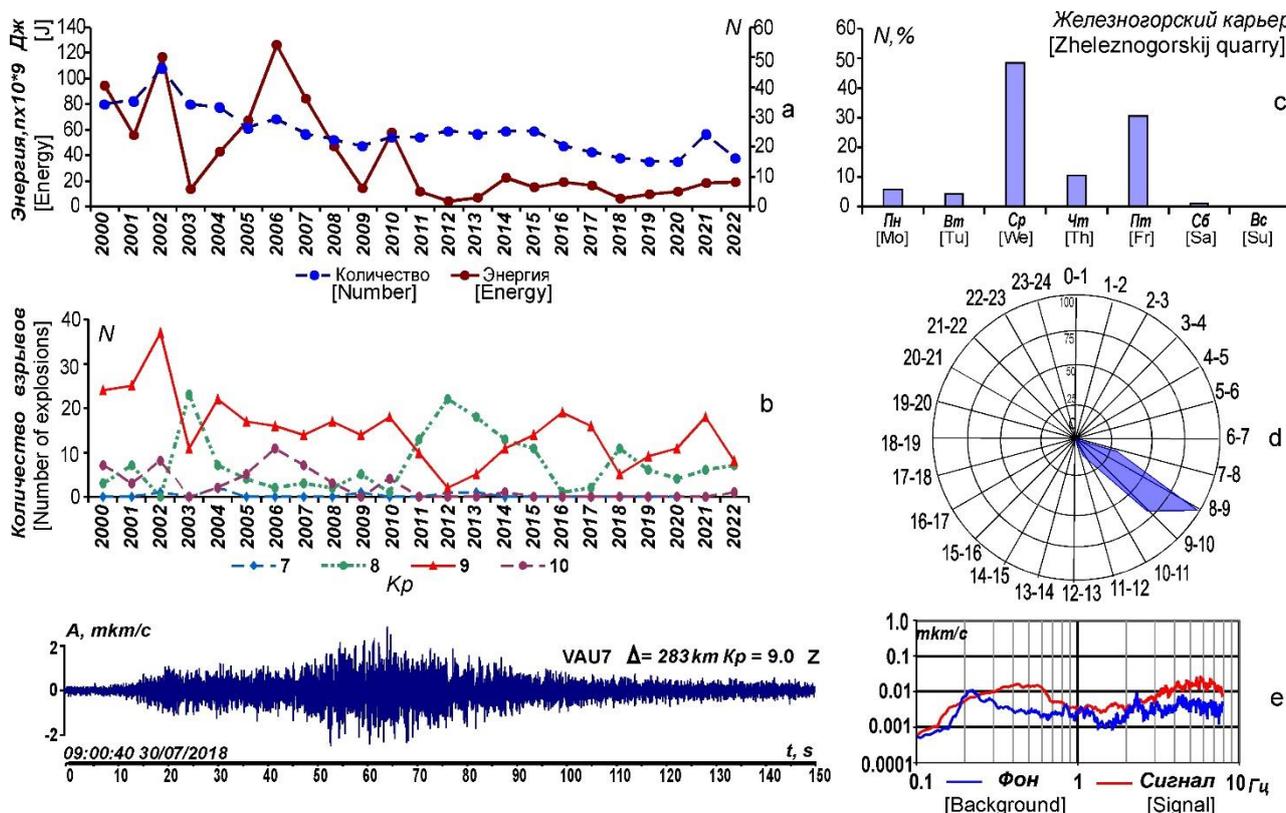
Сейсмологический мониторинг дал возможность получить уникальные данные о характере горнодобывающей промышленности в регионе, о временной динамике производства промышленных взрывов в каждом карьере, о характере волновых форм и интенсивности вызываемых ими сейсмических событий, о количестве выделяющейся при производстве промышленных взрывов сейсмической энергии.

За более чем 20-летний период проведения сейсмологического мониторинга в регионе зарегистрировано более 9 000 промышленных взрывов, из них в крупных карьерах около 3 000. Разработка месторождений в каждом карьере характеризуется общими и специфическими чертами. Это и скорость разработки, т.е. количество взрывов в месяц или год, и время производства промышленных взрывов, и суммарное количество взрывчатого вещества (ВВ), используемого при производстве одного взрыва, и сейсмическая энергия, выделяющаяся при взрывах. Ниже дана характеристика

временной динамики добычи полезных ископаемых в каждом крупном карьере.

Наиболее крупные карьеры расположены на территории геоблока КМА [14]. В этих карьерах добывается железная руда путем производства мощных промышленных взрывов. Среди них наиболее мощные промышленные взрывы производятся в **Железногорском карьере** крупнейшем в Европе. Он административно расположен в Курской области. В геологическом плане карьер расположен в пределах Белгородско-Михайловской рифтогенной зоны, которая представлена отложениями курской и оскольской серий [14, 15]. Глубина эрозионного среза в районе расположения карьера составляет – 50 м. Добыча железной руды ведется достаточно активно. За период наблюдений (2000 г. по 2022 г.) зарегистрировано более 600 промышленных взрывов.

На рис. 1а представлено распределение количества зарегистрированных взрывов и выделившейся сейсмической энергии по годам. Как видно из рис. 1а в Железногорском карьере с 2008 года отмечается уменьшение интенсивности взрывных работ и только с 2020 г. начинается их увеличение, что свидетельствует об увеличении добычи железной руды в Железногорском карьере (рис. 1а, б). Максимальное количество взрывов было произведено в 2002 г. (46), минимальное в 2019 – 15 взрывов.



**Рис. 1.** Временная динамика промышленных взрывов за период 2000–2022 гг. в Железногорском карьере: а – по годам; б – по интенсивности; в – по дням недели; г – по времени суток (UTC); е – пример записи вертикальной компоненты волнового поля промышленного взрыва и её амплитудно-частотный спектр.

**[Fig. 1.** Time dynamics of industrial explosions for the period 2000–2022 in the Zheleznogorsk quarry: (a) – by year; (b) – by intensity; (c) – by days of the week; (d) – by time of day (UTC); (e) – an example of recording the vertical component of the wave field of an industrial explosion and the amplitude-frequency spectrum.]

В Железногорском карьере производятся наиболее мощные промышленные взрывы. Суммарное количество ВВ, используемое при производстве одного короткозамедленного взрыва составляет от 1 000 до 2 500 т. Возникающие при этом сейсмические события относятся, в основном, к 8–10 энергетическим классам (рис. 1а, б), выделяющаяся при этом сейсмическая энергия во время одного промышленного взрыва составляет  $10^8$ – $10^{10}$  Дж. В Железногорском карьере максимальное количество выделившейся энергии при взрывах отмечено в 2002 году и составило  $10^{11}$  Дж, что обусловлено большим количеством взрывов 10 энергетического класса. Минимальное количество энергии  $6 \cdot 10^9$  Дж отмечено в 2013 г., большинство взрывов в этом году было 8 энергетического класса (рис. 1а, б).

Немаловажным фактором при анализе временной динамики является распределение промышленных взрывов по дням недели и по времени суток. На рис. 1с дана обобщенная диаграмма производства взрывов по дням недели за весь период наблюдений. Как видно из рисунка, промышленные взрывы производятся во все дни недели, однако наибольшее их количество (более 50 %) произведено в среду, и около 30 % – в пятницу. В отдельных случаях промышленные взрывы производились и в субботу (2 %).

Следует отметить, что взрывы в Железногорском карьере стабильно производятся с 8:00 до 10:00 часов (время UTC). Около 80 % всех взрывов производилось в период 8:00 – 9:00 часов (рис. 1д).

На рис. 1е представлен пример вертикальной компоненты волновой формы сейсмического события 9 энергетического класса, вызванного промышленным взрывом. Запись сделана сейсмической станцией, расположенной на расстоянии 283 км от эпицентра взрыва. Как видно из рисунка, даже на значительном расстоянии от источника волновое поле интенсивное, в его структуре выделяются поверхностные волны в диапазоне частот 0.3–0.8 Гц значительно превышающие уровень фоновых колебаний. Кроме того, в волновом поле содержатся и высокочастотные колебания (выше 4.0 Гц) значительной интенсивности (рис. 1е). Спектральные амплитуды их превышают спектральные амплитуды фоновых колебаний практически на порядок.

Таким образом, сейсмические события, возбуждаемые мощными промышленными взрывами в Железногорском карьере, имеют сложную волновую форму, распространяются на значительные расстояния и осложняют сейсмическую ситуацию в регионе. Выделяющаяся при взрывах значительная сейсмическая энергия, распространяясь в земной коре на большие расстояния, безусловно, оказывает мощное воздействие на деформационные свойства различных глубинных горизонтов земной коры, способствует накоплению дополнительных деформаций и напряжений. Как отмечалось выше, в Железногорском карьере производится более 20 взрывов ежегодно, т.е. воздействие на земную кору происходит регулярно, что существенно осложняет сейсмическую ситуацию в регионе и усиливает степень трансформации свойств земной коры, и,

как следствие, создает предпосылки возникновению вторичных процессов.

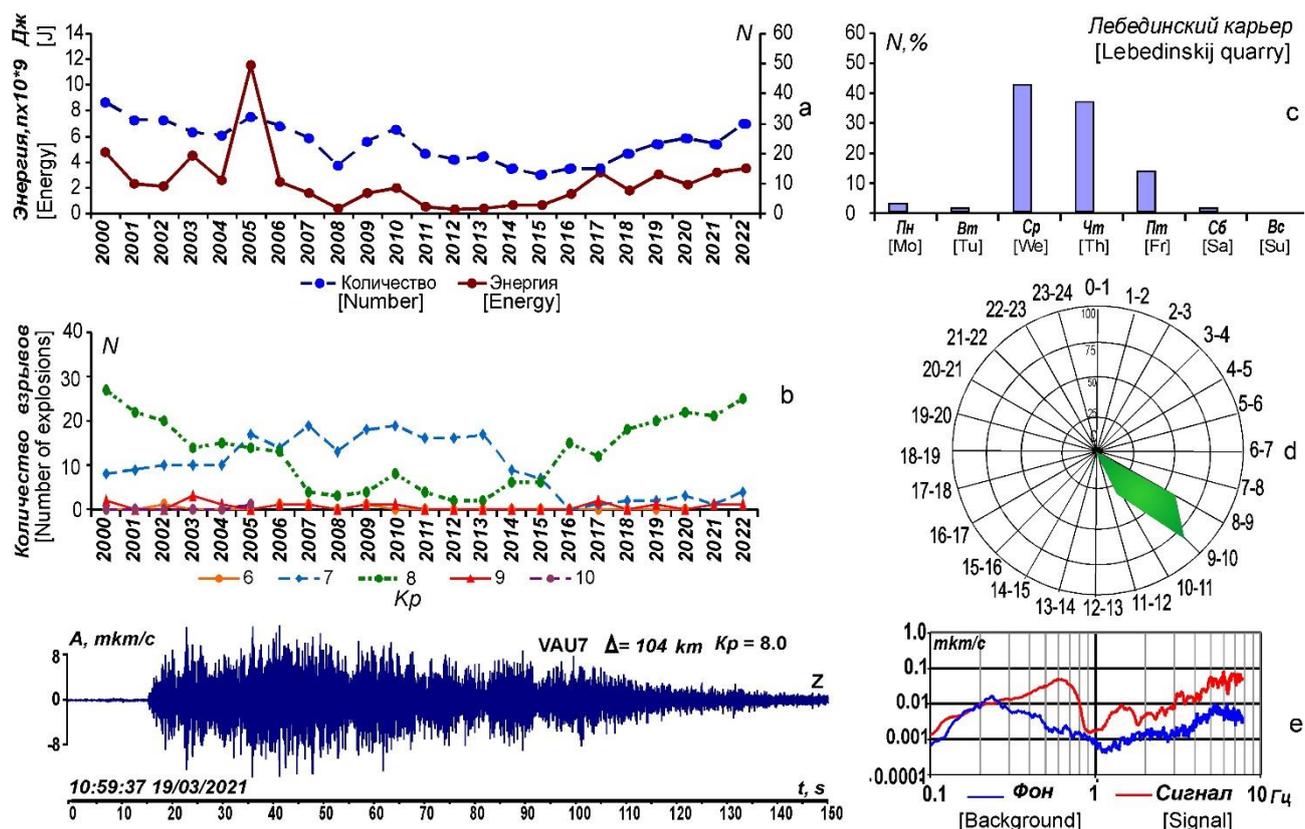
**Карьер «Лебединский»** административно расположен в Белгородской области. В этом карьере разрабатываются два месторождения железистых кварцитов: Лебединское и Южно-Лебединское с 1968 г. В настоящее время Лебединский карьер имеет значительные размеры: около 6 км в длину и около 4 км в ширину. Добыча железистых кварцитов производится с глубины 600 и более метров. Лебединский ГОК является крупнейшим в России предприятием по добыче и обогащению железной руды и производству высококачественного сырья для черной металлургии.

Абсолютные отметки рельефа докембрия в районе расположения карьера составляют 50–75 метров. Разрабатываемые месторождения расположены в пределах Алексеевско-Воронцовской рифтогенной зоны, которая представлена отложениями курской серии нижнего протерозоя. Железистые кварциты этой серии характеризуются высокими значениями плотности (до  $3.60 \text{ г/см}^3$ ) и высокими магнитными свойствами (суммарная скалярная намагниченность (индукционная и остаточная)  $> 50 \text{ А/м}$ ). В геофизических полях им соответствуют высокоинтенсивные магнитные аномалии  $Z_a$  (60–100 тыс. нТл), интенсивные гравитационные аномалии. Первая вертикальная производная поля силы тяжести характеризуется интенсивностью до 50 Е. Кроме того, породы докембрия в районе размещения карьера характеризуются пониженными значениями электрического сопротивления (до  $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ).

Добыча железной руды в карьере производится неравномерно (рис. 2а). В целом, начиная с 2008 года, постепенно уменьшается количество промышленных взрывов и их мощности и только, с 2018 г. начинается постепенный их рост, что свидетельствует об увеличении интенсивности добычи железной руды. Из рис. 2а видно также, что количество выделившейся при взрывах сейсмической энергии также неравномерно. Наблюдается резкий всплеск сейсмической энергии в 2005 году, когда был зарегистрирован 1 взрыв 10 энергетического класса при этом его энергия составила  $10^{10}$  Дж. Начиная с 2006 г. по 2016 г. количество выделившейся при взрывах сейсмической энергии ежегодно уменьшается и составляет порядка  $10^9$  Дж. С 2018 г. увеличивается годовое количество выделившейся при взрывах сейсмической энергии, что коррелируется с увеличением количества производимых промышленных взрывов и увеличением их мощности (рис. 2а, б).

Подробный анализ временной динамики промышленных взрывов различного энергетического класса показывает, что в Лебединском карьере производятся взрывы в основном 7–8 энергетических классов. При этом, в разные годы соотношение взрывов этих классов варьируется (рис. 2б).

Следует отметить, что в течение длительного промежутка времени (более 20 лет) промышленные взрывы производились в одни и те же дни недели: среда, четверг. Менее 10 % производились в пятницу и менее 1 % в понедельник, вторник, субботу.



**Рис. 2.** Временная динамика промышленных взрывов за период 2000–2022 гг. в Лебединском карьере: *a* – по годам; *b* – по интенсивности; *c* – по дням недели; *d* – по времени суток (UTC); *e* – пример записи вертикальной компоненты волнового поля, вызванного промышленным взрывом в Лебединском карьере.  
**[Fig. 2.** Time dynamics of industrial explosions for the period 2000–2022 in the Lebedinskiy quarry: (*a*) – by year; (*b*) – by intensity; (*c*) – by days of the week; (*d*) – by time of day (UTC); (*e*) – an example of recording the vertical component of the wave field caused by an industrial explosion in the Lebedinskiy quarry.]

Также стабильно производятся промышленные взрывы по времени суток. Более 95 % взрывов в Лебединском карьере производятся в интервале 8–10 часов (UTC).

Из сказанного следует, что интенсивность добычи железной руды в Лебединском карьере изменяется из года в год. Вместе с тем выделяются годы, когда производилось большое количество взрывов, но их мощность не велика и возникающие при этом сейсмические события были не очень высокого энергетического класса. Начиная с 2016 г. и по настоящее время наблюдается ежегодно увеличение количества промышленных взрывов и энергетический класс сейсмических событий, возникающих при этом относительно высокий ( $K_p=8.0$ ).

В качестве примера на рис. 2е представлена волновая форма Z-компоненты сейсмического события 8 энергетического класса возникшего в результате промышленного взрыва. Запись сделана сейсмической станцией, расположенной на расстоянии около 100 км от источника. Из рисунка видно, что волновое поле имеет сложное строение. Судя по амплитудному спектру, в структуре поля присутствуют интенсивные высокочастотные составляющие, спектральные амплитуды которых превышают спектральные амплитуды фоновых колебаний на порядок и более. Кроме того, в

структуре поля заметную роль играют поверхностные волны двух типов: Релея и Лява в диапазоне частот 0.4–0.8 Гц и 1.0–2.0 Гц. Спектральные амплитуды их превышают спектральные амплитуды фоновых колебаний на порядок и более на расстоянии около 100 км от источника. Количество сейсмической энергии, выделяемой при производстве одного взрыва, составляет  $10^8$  Дж. Учитывая, что ежегодно производится более 20 промышленных взрывов, то ежегодно выделяется  $n \cdot 10^9$  Дж сейсмической энергии.

Из этого следует, что в одном из крупнейших промышленных карьеров России при добыче железной руды выделяется значительное количество сейсмической энергии, которая, безусловно, оказывает влияние на деформационные процессы в литосфере и, в целом, на сейсмическую ситуацию в регионе.

**Стойленский карьер**, как и Лебединский карьер пространственно расположен на территории Старооскольского железорудного узла в пределах Алексеевско-Воронежской рифтогенной зоны [14, 15]. В административном плане карьер расположен вблизи г. Старый Оскол Белгородской области. Геологические и геофизические условия аналогичны условиям в районе Лебединского карьера.

Добыча железной руды в Стойленском карьере производилась в период с 2000–2022 гг неравномерно

(рис. 3а). Как и в Лебединском карьере в период с 2010г. по 2017 г. количество выделившейся, ежегодно сейсмической энергии было минимально не смотря на то, что количество взрывов ежегодно производилось столько же сколько и в 2000-2010 гг. Это свидетельствует, что промышленные взрывы были небольшой мощности и создавали небольшие сейсмические эффекты. В отличие от Лебединского карьера в Стойленском карьере в последние годы (2020-2022 гг) уменьшается количество ежегодно производимых взрывов.

На рис. 3б представлен график временного изменения количества сейсмических событий разного энергетического класса, возникающих при проведении промышленных взрывов в Стойленском карьере. Из рисунка видно, что производятся относительно мощные промышленные взрывы, создающие значительный сейсмический эффект.

На рис. 3с дана обобщенная по дням недели диаграмма производства промышленных взрывов в карьере. Из рисунка видно, что примерно 60 % взрывов производится в пятницу и около 30 % в четверг. Следует также отметить, что взрывы в Стойленском карьере производятся с 9:00 до 10:00 часов (UTC), т.е. в тот же временной интервал, что и в других карьерах, где

добывается железная руда.

В качестве примера, иллюстрирующего записи волновых форм промышленных взрывов, произведенных в Стойленском карьере на рис. 3е представлена запись Z-компоненты волнового поля сейсмического события 8 энергетического класса, возникшего в результате взрыва. Запись сделана той же сейсмической станцией, что и записи взрывов в других карьерах. Она расположена на расстоянии 97 км от источника. Как видно из рис. 3е в структуре волнового поля сейсмического события, вызванного взрывом в Стойленском карьере, как и в волновом поле сейсмических событий, вызванных в Лебединском карьере, присутствуют поверхностные волны Релея и Лява, которые образуют два максимума в амплитудном спектре в диапазоне частот 0.5–0.9 Гц и 1.0–2.0 Гц. При этом спектральные амплитуды этих волн превышают спектральные амплитуды фоновых колебаний на порядок и более. Значительная часть волнового поля представлена высокочастотными составляющими в широком диапазоне (от 4.0 Гц и выше). В целом, интенсивность волнового поля сейсмических событий, вызванных взрывами в Стойленском карьере, несколько ниже, чем интенсивность волнового поля, вызванного взрывами в Лебединском карьере.

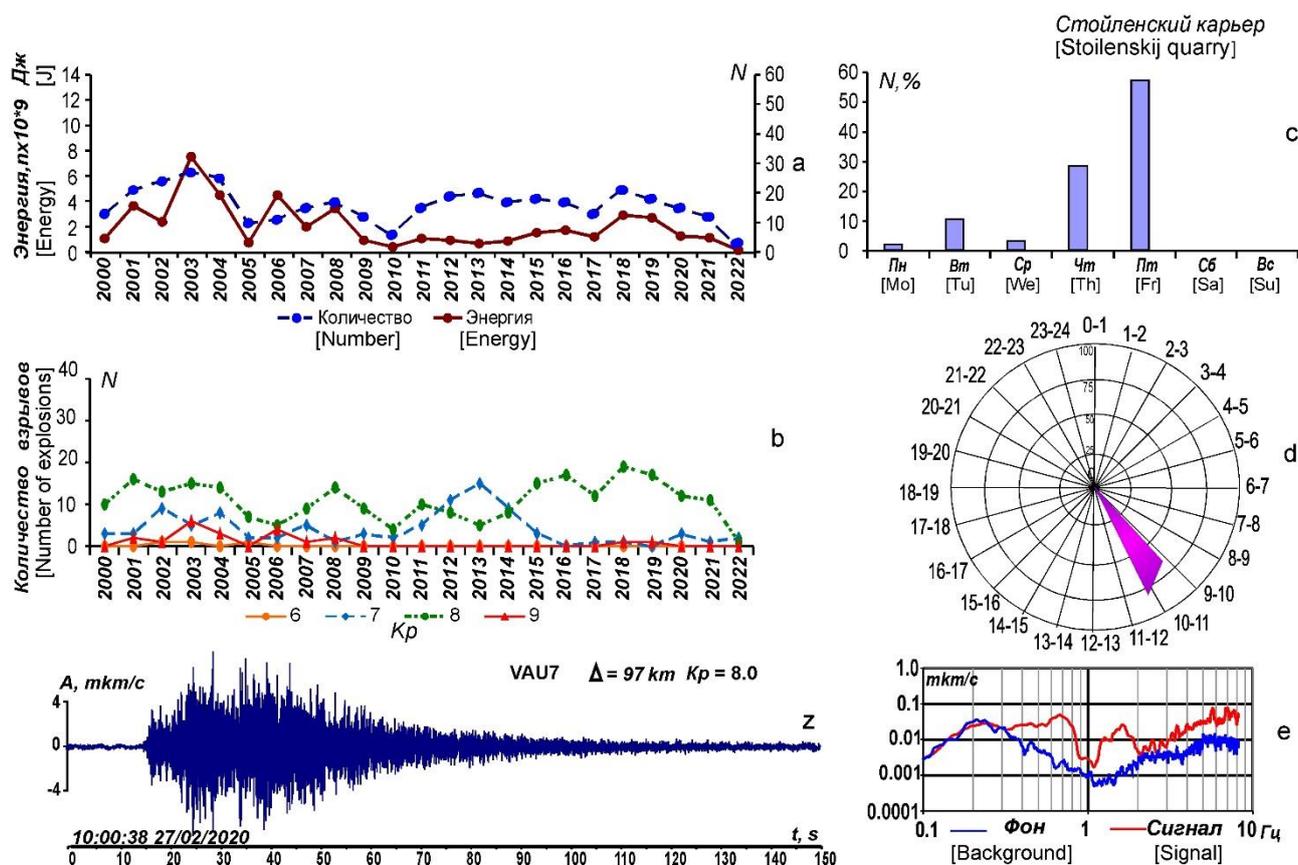


Рис. 3. Временная динамика промышленных взрывов за период 2000–2022 гг. в Стойленском карьере: а – по годам; б – по интенсивности; с – по дням недели; d – по времени суток (UTC); e – пример записи вертикальной компоненты волнового поля, вызванного промышленным взрывом в Стойленском карьере.

[Fig. 3. Time dynamics of industrial explosions for the period 2000–2022 in the Stoilenskiy quarry: (a) – by year; (b) – by intensity; (c) – by days of the week; (d) – by time of day (UTC); (e) – an example of recording the vertical component of the wave field caused by an industrial explosion in the Stoilenskiy quarry.]

Вместе с тем, количество выделяющейся при взрывах в Стойленском карьере сейсмической энергии составляет  $n \cdot 10^9$  Дж, что, безусловно, влияет на деформационное состояние и свойства геологической среды.

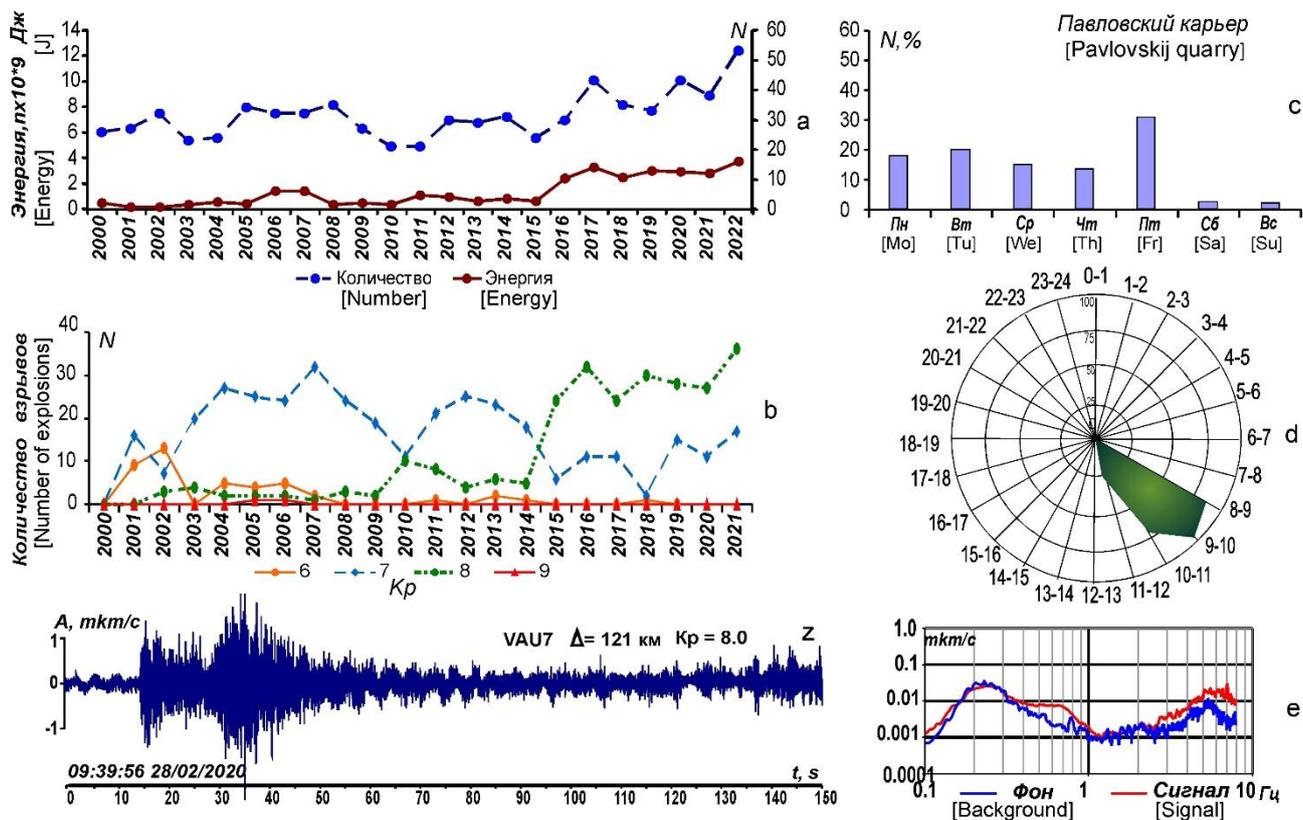
Наблюдаемая согласованность производства промышленных взрывов в железорудных карьерах по дням недели и времени суток создает вероятность наложения сейсмических событий, возникающих при взрывах в разных карьерах, или они происходят с небольшим временным сдвигом [16, 17]. Такая ситуация существенно повышает степень воздействия на литосферу региона.

**Карьеры «Павловский» («Шкурлат») и «Тихий Дон»** расположены на юге Воронежской области. В этих карьерах добывается высококачественный камень (щебень), песок и др. Мощность промышленных взрывов в этих карьерах существенно ниже, чем в карьерах КМА и составляет (100–300) тонн ВВ. Территориально карьер «Павловский» расположен у хутора Шкурлат в 12 км к юго-востоку от г. Павловска Воронежской области на левом берегу р. Дон в 7 км от русла.

В структурно-тектоническом отношении карьер расположен в южной части Лосевской шовной зоны, докембрийский фундамент которой представлен здесь породами обоянского комплекса (донская ассоциация) нижнего архея (AR<sub>1obd</sub>) и павловскими полигенно-

метасоматическими гранитоидами нижнего протерозоя (PR<sub>1p</sub>). Абсолютная отметка кристаллического фундамента 50 м в районе карьера. Полезной толщей являются гранитоиды павловского комплекса. Геофизические поля в районе расположения карьера относительно спокойные. В магнитном поля выделяются линейно-вытянутые магнитные аномалии  $Z_a$  до 0.5–1.0 тыс нТл. В поле первой вертикальной производной поле силы тяжести выделяются аномалии интенсивностью до 30 этвеш.

Разработка месторождения ведется также неравномерно в течение всего периода наблюдений. На общем фоне годового изменения количества промышленных взрывов выделяется интервал времени 2009–2015 гг., когда было снижение добычи полезных ископаемых в Павловском карьере. Об этом свидетельствует и уменьшение ежегодного количества промышленных взрывов и их мощности (рис. 4а, б). Начиная с 2015 года, наблюдается общее повышение количества взрывов и увеличивается их мощность. Большая часть сейсмических событий, возникающих при взрывах в этот период, относится к более высокому энергетическому классу (рис. 4б). В 2022 году наблюдалось максимальное количество взрывов (56) за весь период наблюдений. При этом, возникающие при взрывах сейсмические события относятся к 8 энергетическому классу. Выделившаяся энергия при взрывах в 2022 г. составляет  $3 \cdot 10^9$  Дж.



**Рис. 4.** Временная динамика промышленных взрывов за период 2000–2022 гг. в Павловском карьере: *a* – по годам; *b* – по интенсивности; *c* – по дням недели; *d* – по времени суток (UTC); *e* – пример записи вертикальной компоненты волнового поля, вызванного промышленным взрывом в Павловском карьере.

**[Fig. 4.** Time dynamics of industrial explosions for the period 2000–2022 in the Pavlovsky quarry: (*a*) – by year; (*b*) – by intensity; (*c*) – by days of the week; (*d*) – by time of day (UTC); (*e*) – an example of recording the vertical component of the wave field caused by an industrial explosion in the Pavlovsky quarry.]

Промышленные взрывы в «Павловском» карьере производятся в любой день недели (рис. 4с). Даже в выходные дни произведено порядка 5 % взрывов. Ежегодно, примерно 30 % промышленных взрывов производится в пятницу (рис. 4с). Если взрывы в карьерах КМА, где добывается железная руда, производятся на протяжении большого промежутка времени в одни и те же дни недели, то в «Павловском» карьере такой четкой привязки к дням недели нет. Анализ динамики промышленных взрывов по времени суток показал, что примерно 82 % промышленных взрывов производились с 8:00 ч до 11:00 ч (время UTC).

Волновое поле, возбуждаемое промышленными взрывами в Павловском карьере, где добывается строительное сырье – гранитный щебень, существенно отличается от волнового поля, промышленных взрывов в карьерах, в которых добывается железная руда. Прежде всего, промышленные взрывы в Павловском карьере меньшей мощности. При их производстве используется от 100 до 300 т ВВ. Кроме того физические свойства гранитоидов существенно отличаются от свойств железистых кварцитов.

Волновое поле, возбуждаемое промышленными взрывами в Павловском карьере, имеет более простую

форму и менее интенсивное. Запись сделана той же станцией, что и записи волнового поля промышленных взрывов в карьерах КМА. Поверхностные волны Релея и Лява в структуре поля близки по частотным характеристикам и образуют в амплитудном спектре один широкий максимум в диапазоне частот 0.4–0.8 Гц. Интенсивность их относительно не велика. Спектральные амплитуды превышают спектральные амплитуды фоновых колебаний менее чем на порядок (рис. 4е). В амплитудном спектре в диапазоне частот 1.0–2.5 Гц спектральные амплитуды Z-компоненты сейсмического события вызванного взрывом близки спектральным амплитудам фоновых колебаний. Интенсивность высокочастотных составляющих повышается с увеличением частоты.

В целом, единичный промышленный взрыв в Павловском карьере вызывает сейсмическое событие, в основном, 8 энергетического класса, но так как в год производится более 30 взрывов суммарная энергия ежегодно составляет  $n \cdot 10^9$  Дж. Учитывая регулярность проведения промышленных взрывов в Павловском карьере и увеличение их количества, влияния их на верхние горизонты земной коры и среду обитания человека весьма значительные.

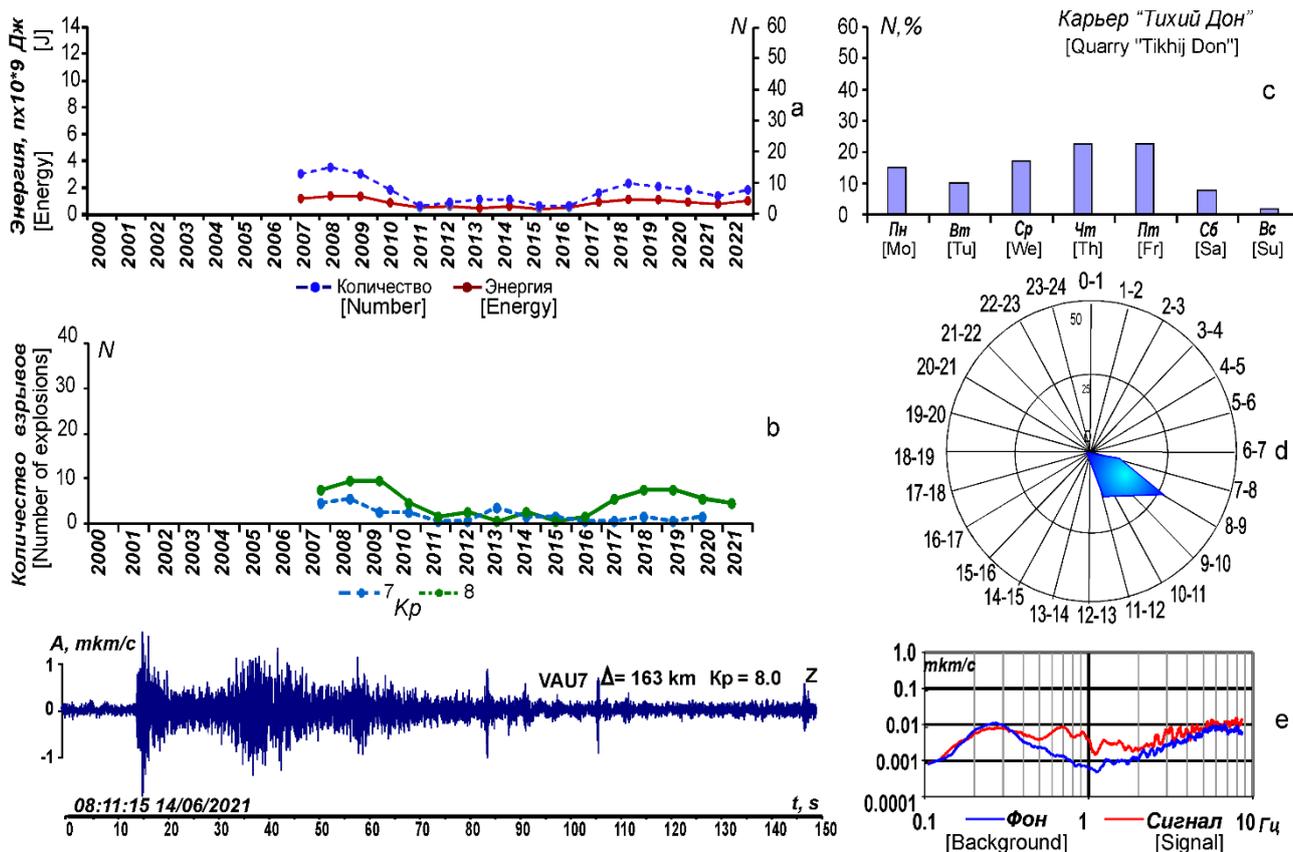


Рис. 5. Временная динамика промышленных взрывов за период 2000–2022 гг. в карьере «Тихий Дон»: а – по годам; б – по интенсивности; с – по дням недели; д – по времени суток (UTC); е – пример записи вертикальной компоненты волнового поля, вызванного промышленным взрывом в карьере Тихий Дон.

[Fig. 5. Time dynamics of industrial explosions for the period 2000-2022 in the "Quiet Don" quarry: (a) – by year; (b) – by intensity; (c) – by days of the week; (d) – by time of day (UTC); (e) – an example of recording the vertical component of the wave field caused by an industrial explosion in the Quiet Don quarry.]

Частный карьер «Тихий Дон» начал функционировать в 2007 году. Он расположен фактически в пойме Дона на расстоянии около 600 м от русла. В этом карьере производятся промышленные взрывы, создающие сейсмические события 7–8 энергетических классов. За время функционирования этого карьера Воронежской сетью сейсмических наблюдений зарегистрированы 94 промышленных взрывов. Как и в выше описанных карьерах с 2011 по 2016 гг наблюдается значительное уменьшение количества взрывов, т.е. в эти годы снижается добыча гранитного щебня в карьере. Начиная с 2017 г растет количество взрывов, достигая максимума в 2018–2019 г затем локальное понижение и в 2022 году вновь увеличивается количество взрывов и их энергия (рис. 5а, б). Взрывы в карьере «Тихий Дон», в основном, производятся со среды по пятницу (около 65 %). Около 9 % взрывов производится в выходные дни (рис. 5с). Отличительной особенностью динамики добычи полезных ископаемых является тот факт, что в 2022 г. взрывные работы производились только по понедельникам.

Взрывы в карьере «Тихий Дон» производятся в течении всего дня с 6 до 17 часов (время UTC). Количество взрывов постепенно возрастает к 8 часам, и четверть взрывов регистрируется в интервале 8–9 часов (время UTC). На интервал 8–12 часов приходится около 70 % взрывов, а в интервале 16–17 часов регистрируется лишь около 2 % взрывов (рис. 5д). Возможно, в этом карьере производятся и более слабые взрывы, которые не регистрируются сетью.

Волновое поле, возбуждаемое промышленными взрывами в карьере «Тихий Дон», имеет особенности. Во-первых, в записи волнового поля станций, расположенной на расстоянии 163 км от источника, видно, что спектральные амплитуды высокочастотных составляющих незначительно отличаются от спектральных амплитуд фоновых колебаний. В амплитудном спектре выделяется максимум отражающий наличие в волновом поле поверхностных низкочастотных волн.

Анализ временной динамики свидетельствует, что в карьере «Тихий Дон» производятся взрывные работы значительной мощности, в любой день недели и в выходные и в любое время рабочего дня и даже за его пределами. Четкой привязки к времени суток, как это наблюдается в других карьерах, здесь нет.

Производимые в карьере «Тихий Дон» взрывы вы-

зывают сейсмические события в основном, 8 энергетического класса. Не смотря на то, что ежегодно производится относительно небольшое количество промышленных взрывов, они вносят свой вклад в общую сейсмическую ситуацию в регионе.

### Обсуждение результатов

Исследование временной динамики промышленных взрывов в крупных карьерах показало, что разработка полезных ископаемых за более чем 20-летний период в каждом из карьеров имеет общие и специфические черты.

Ежегодно в крупных карьерах производится от 90 до 140 промышленных взрывов. При этом в каждом карьере количество производимых взрывов ежегодно и за весь период наблюдений существенно разное. На обобщенной диаграмме (рис. 6) показано в процентах количество промышленных взрывов, произведенных в каждом карьере от общего количества и выделенной при этом сейсмической энергии за более чем 20-летний период.

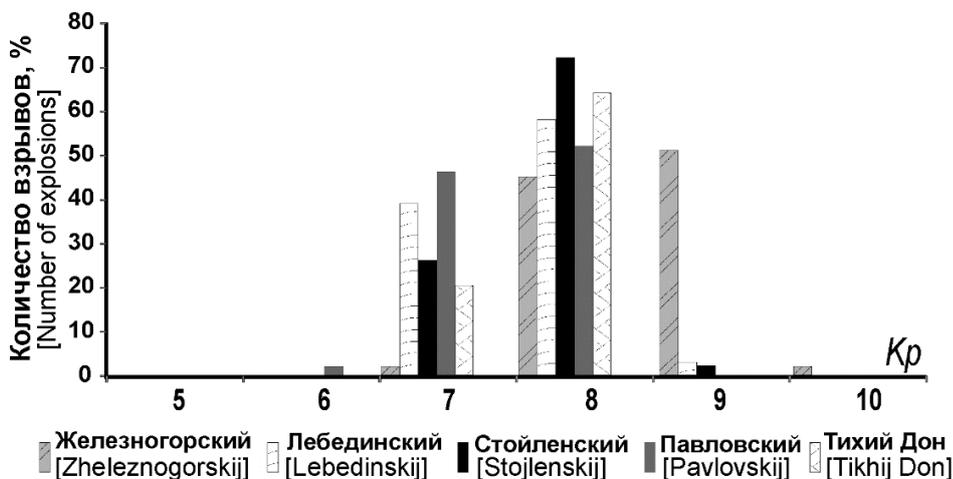
Как видно из диаграммы наибольшее количество взрывов произведено в Павловском карьере (41 %). Вместе с тем выделенная при этом сейсмическая энергия составляет всего 13 %. Наибольшее количество сейсмической энергии выделяется при взрывах в Железногорском карьере – 62 % от общего количества выделенной за исследуемый период сейсмической энергии при промышленных взрывах во всех крупных карьерах. При этом, взрывов в этом карьере было произведено всего 19 %. Это свидетельствует о том, что в Железногорском карьере производятся интенсивные взрывы.

Анализ временной динамики производства промышленных взрывов в каждом крупном карьере позволяет оценить скорость добычи полезных ископаемых. Так на всех карьерах в период после 2008 года с некоторым смещением по времени в разных карьерах наблюдается снижение добычи полезных ископаемых как железной руды, так и гранитного щебня вплоть до 2016–2017 гг. В этот период не только уменьшается количество взрывов, но и выделенной при взрывах сейсмической энергии (рис. 1а, 2а, 3а, 4а, 5а), т.е. возникающие при взрывах сейсмические события относятся к более низкому энергетическому классу.



Рис. 6 Диаграммы в процентах количества промышленных взрывов, произведенных в каждом карьере и выделенной при этом сейсмической энергии.

[Fig. 6. Diagrams as a percentage of the number of industrial explosions, produced in each quarry and the released seismic energy.]

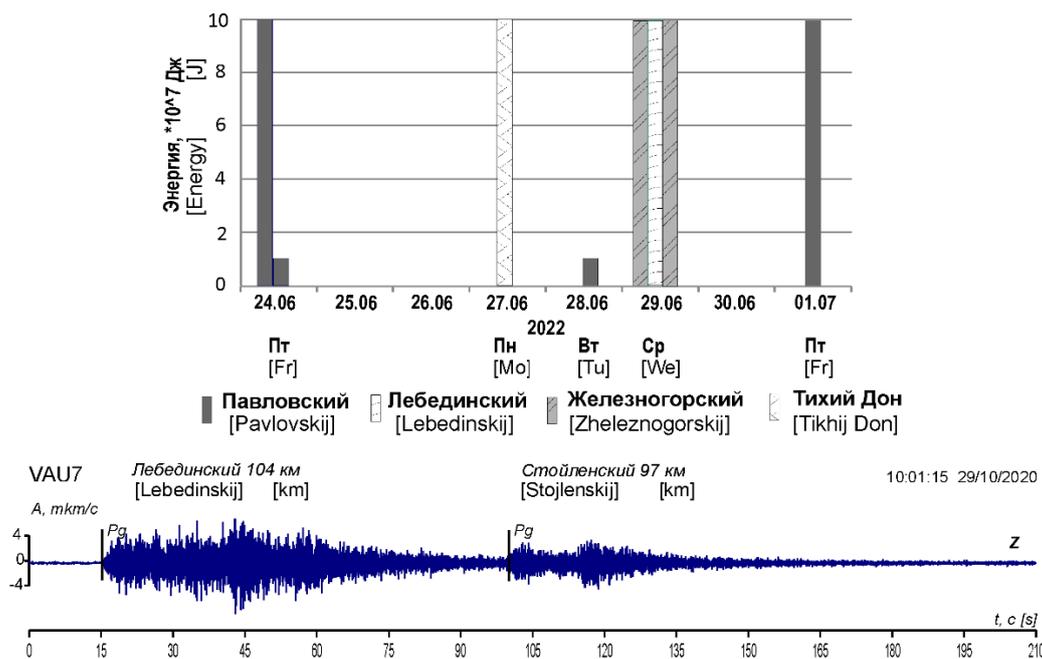


**Рис. 7.** Распределение по энергетическому классу количества промышленных взрывов (в %) в крупных карьерах.  
 [Fig. 7. Distribution by energy class of the number of industrial explosions (in%) in large quarries.]

На рис. 7 представлены обобщенные диаграммы распределения сейсмических событий, вызванных взрывами в разных карьерах по величине энергетического класса. Как видно из рисунка, возникающие при проведении промышленных взрывов в разных карьерах, сейсмические события относятся, в основном, к 8 энергетическому классу. Наиболее сильные сейсмические события, как следует из сказанного выше и рис. 7, возникают при взрывах в Железногорском карьере. Это сейсмические события 9 энергетического класса. Около 2 % – возбуждаются события 10 энергетического класса. В Железногорском карьере сейсмических событий, возникающих в результате проведения промышленных взрывов, более низкого энергетического класса, чем 8 за период наблюдений зарегистрировано менее 1 %. Во всех остальных карьерах при проведении промышленных взрывов значи-

тельное количество сейсмических событий возникает 7 энергетического класса, особенно это характерно для Павловского карьера (рис. 7). В карьерах «Лебединский», «Стойленский» сейсмические события, возникающие при проведении промышленных взрывов более высокого энергетического класса, чем 8 менее 1 %. В Павловском карьере и карьере «Тихий Дон» при производстве промышленных взрывов сейсмические события более высокого энергетического класса чем 8 не возбуждаются.

Как следует из сказанного выше, промышленные взрывы во всех карьерах за весь период наблюдений производятся во все дни недели и даже в выходные дни, но наибольшее количество производится в среду и пятницу. В эти дни максимальное количество взрывов производится в Железногорском, Павловском и Лебединском карьерах.



**Рис. 8.** Пример записи вертикальной компоненты волновых форм взрывов в карьере «Лебединский» и «Стойленский».  
 [Fig. 8. An example of recording the vertical component of the wave forms of explosions in the Lebedinsky and Stoilensky quarries.]

Как уже отмечалось, более 90 % взрывов в разных карьерах производятся с 8 до 11 часов (время UTC). Временная синхронизация проведения промышленных взрывов в разных карьерах приводит к тому, что сейсмические события накладываются друг на друга или смещены на небольшой временной интервал. Такое положение значительно усиливает негативное влияние промышленных взрывов на земную кору региона. На рис. 8 показан пример такой ситуации.

Как отмечалось выше, выделяющаяся при взрывах сейсмическая энергия ежегодно составляет от  $10^{10}$  до  $10^{12}$  Дж. Учитывая, что взрывы происходят регулярно, т.е. регулярно поток сейсмической энергии распространяется в земной коре и оказывает значительное влияние на её свойства.

Отметим, что земная кора региона латерально неоднородна и вертикально расслоена как по вещественному составу, так и по физическим свойствам [14, 15]. В структуре коры выделяются неоднородности разного типа: резкие – разломы, границы блоков с разным вещественным составом или разными физическими свойствами и диффузные, когда смена физических свойств и вещественного состава происходит постепенно. В этом случае образуются «пятна» с аномальными свойствами в структуре отдельных блоков, иногда значительных размеров [15]. Сейсмическая энергия, распространяясь в неоднородной земной коре, накапливается на неоднородностях с аномальными свойствами. Дополнительная сейсмическая энергия может стать причиной негативных явлений, прежде всего причиной наведенной сейсмичности. В случае диффузных неоднородностей увеличивается внутренняя энергия среды, что способствует возникновению трещин, изменению рельефа дневной поверхности, нарушению подземного водного режима.

### Выводы

Из сказанного выше следует, что территория Воронежского кристаллического массива подвержена значительному сейсмическому воздействию, обусловленному промышленными взрывами в крупных карьерах региона.

Анализ временной динамики промышленных взрывов в разных карьерах показал, что добыча полезных ископаемых происходит неравномерно. За последние 20 лет в работе всех крупных карьеров был период снижения добычи полезных ископаемых с 2009±1 год по 2017±1 год. В это время или снижается количество промышленных взрывов, или уменьшается их мощность. Начиная с 2016-2018 гг. происходит увеличение добычи полезных ископаемых во всех карьерах. Сейсмические события, возникающие при взрывах, как ранее отмечалось, в основном, относятся к событиям 7–9 энергетических классов. Общее их количество в год колеблется от 90 до 140, а количество выделившейся энергии от  $10^{10}$ – $10^{12}$  Дж.

Большое количество сейсмических событий техногенной природы, во-первых, существенно осложняет сейсмическую ситуацию в регионе, во-вторых, затруд-

няет оценку природной сейсмической активности территории Воронежского кристаллического массива – крупнейшей структуры Восточно-Европейской платформы.

Важной особенностью временной динамики промышленных взрывов является их синхронизация, в ряде случаев по времени суток и дням недели. Это приводит к наложению сейсмических событий, вызванных взрывами, и тем самым повышается интенсивность воздействия, или увеличивается время сейсмического воздействия на литосферу региона и среду обитания.

Сейсмическая энергия, возникающая при взрывах, распространяясь в земной коре, существенно влияет на её деформационные свойства. Накопление сейсмической энергии на неоднородностях земной коры в результате регулярного сейсмического воздействия, вызванного промышленными взрывами, создает условия возникновения наведенной сейсмичности.

Регулярные энергетические воздействия значительно повышают внутреннюю энергию, меняют свойства геологической среды, способствуют возникновению медленных движений в пределах крупных диффузных неоднородностей, что может способствовать, как минимум, изменению дневного рельефа, подземного водного режима и может быть причиной образования трещин в верхних горизонтах кристаллической коры.

Кроме того, сейсмическая энергия, вызванная промышленными взрывами, распространяясь в геологической среде, повышает интенсивность фоновых микросейсмических (вибрационных) колебаний.

Таким образом, интенсивная добыча полезных ископаемых открытым способом в карьерах осложняет сейсмическую ситуацию в регионе и негативно влияет как на состояние и свойства земной коры.

Вместе с тем, выполняемый в настоящее время сейсмологический мониторинг на территории Воронежского кристаллического массива сетью сейсмических станций позволяет контролировать возникающие при проведении промышленных взрывов негативные явления, выявлять и оценивать степень угрозы чрезвычайных ситуаций. Полученные при этом данные будут служить основой разработки стратегической программы обеспечения сейсмической безопасности территории промышленно развитого региона России.

*Конфликт интересов:* Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Надежка Л. И., Пивоваров С. П., Семенов А. Е., Ипполитов О. М. Сейсмические эффекты крупномасштабных взрывов в Воронежском регионе и их геоэкологические следствия. Сб. ст.: *Месторождения природного и техногенного минерального сырья: геология, геохимия, геохимические и геофизические методы поисков, экологическая геология*. Воронеж: ВГУ, 2008. С. 326–329.
2. Надежка Л. И., Пивоваров С. П., Дубянский А. И., Ефременко М. А., Пивоваров Р. С. Об энергетических оценках техногенных событий в геологических условиях Воронежс-

- кого кристаллического массива. *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных*: материалы XIII Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 166–169.
3. Семёнов А. Е., Надежка Л. И., Сафронич И. Н., Ежова И. Т. Характер и интенсивность сейсмических воздействий горнопромышленных комплексов на литосферу Воронежского кристаллического массива. *Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов*: материалы XXII Всероссийской с международным участием научно-практической Щукинской конференции. Воронеж: ВГУ, 2020. С. 317–321.
4. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России. Под ред. В. В. Адушкина, А. А. Маловичко. М.: ГЕОС, 2013. 384 с.
5. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЭК, 2005. 250 с.
6. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.
7. Адушкин В. В., Кочарян Г. П., Санина И. А. О вкладе взрывных работ в развитие сейсмодеформационных процессов в регионе // *Доклады Академии наук*. 2011. Т. 441. № 1. С. 92–94.
8. Косинова И. И., Надежка Л. И., Семёнов А. Е., Сафронич И. Н., Ежова И. Т., Силкин К. Ю., Пивоваров С. П. Критерии экологических оценок сейсмических воздействий, возникающих при производстве промышленных взрывов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2021. № 1. С. 82–93.
9. Надежка Л. И., Семенов А. Е., Силкин К. Ю. К проблеме сейсмической безопасности Центрально-Черноземного экономического региона. *Комплексные проблемы техносферной безопасности. Задачи, технологии и решения комплексной безопасности*: сб. ст. XV Международной научно-практической конференции. Воронеж: ВГУ, 2019. С. 20–23.
10. Надежка Л. И., Семенов А. Е., Ежова И. Т., Сафронич И. Н., Пивоваров С. П. Техногенная сейсмичность территории Центрально-Чернозёмного экономического региона и её возможные экологические последствия. *Комплексные проблемы техносферной безопасности*: материалы VI Международной научно-практической конференции. Воронеж: ВГТУ, 2021. Ч. 2. С. 286–289.
11. Косинова И. И., Надежка Л. И., Лисецкий Ф. Н., Бударина В. А., Семенов А. Е., Павловский А. И. Анализ пространственных закономерностей воздействий промышленных взрывов на эколого-геологические системы горнодобывающих районов // *Региональные геосистемы*. 2021. Т. 45. № 3. С. 393–413.
12. Акимов А. П., Красилов С. А. Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020 г.
13. 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 Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 77–83.
14. Литосфера Воронежского кристаллического массива по геофизическим и петрофизическим данным. Гл. ред. член-корр. РАН Н. М. Чернышов. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2012. 330 с.
15. Минерагенические исследования территорий с двухярусным строением (на примере Воронежского кристаллического массива). М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2007. 284 с.
16. Ежова И. Т., Семенов А. Е., Сафронич И. Н., Надежка Л. И. Динамика промышленных взрывов на территории курской магнитной аномалии. *Мальшевские чтения*: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Белгород, 2019. С. 141–147.
17. Ежова И. Т., Надежка Л. И., Ефременко М. А. Инструментальные сейсмологические наблюдения промышленных взрывов как эффективный контроль сейсмических воздействий на геологическую среду. *Закономерности трансформации экологических функций геосфер крупных горнопромышленных регионов*. Сб. ст. под ред. И.И. Косиновой. Москва: Издательство «Научная книга», 2022. С. 42–54.

## Industrial explosions on the territory of the Voronezh Crystal massif and their temporal dynamics

©2023 L. I. Nadezhka<sup>1, 2✉</sup>, S. P. Pivovarov<sup>2</sup>, M. A. Efremenko<sup>2</sup>, I. T. Ezhova<sup>1,2</sup>, E. I. Zolototrubova<sup>1</sup>, V. V. Mokhova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, 394018, Voronezh, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Federal Research Center "Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences", Universitetskaya pl. 1, 394018, Voronezh, Russian Federation*

### Abstract

*Introduction:* The paper presents the results of the analysis of temporal dynamics for more than 20 years of industrial explosions in large open pits operating on the territory of the Voronezh crystalline massif. Annually, from 90 to 140 industrial explosions are carried out in large quarries, while seismic energy of  $10^{10}$ – $10^{12}$  J is released, which has a significant impact on the deformation properties of the earth's crust, creating conditions for the occurrence of induced seismicity and other negative phenomena. In this regard, the problem of predicting changes in deformation processes in the earth's crust under the influence of powerful industrial explosions becomes extremely urgent. Analysis of the temporal dynamics of blasting in quarries is an important component in solving the above problem.

*Methodology:* For more than 20 years, about 3000 large industrial explosions have been registered. The temporal dynamics of the production of industrial explosions by years, in all large quarries and the seismic energy released during this, was studied. A statistical analysis of industrial explosions of different energy classes was performed during the entire observation period. The technique of conducting industrial explosions in different quarries by day of the week and time of day has been studied. The waveforms of seismic events caused by industrial explosions in large open pits are analyzed.

*Results and discussions:* As a result of the analysis of the temporal dynamics of industrial explosions in large open pits annually and for more than a 20-year period, it was found that the extraction of minerals in open pits was uneven. The period from 2008 with a slight time shift and until 2016-2017 is clearly distinguished in all open pits, the extraction of minerals is decreasing, which is expressed in a decrease in the number of industrial explosions and their power. The largest number of explosions over the entire observation period was produced in the Pavlovsky open pit, the largest amount of seismic energy was released during the production of industrial explosions in the Zheleznogorsk open pit. A significant flow of seismic energy is regularly released during the production of each industrial explosion and regularly propagating in the earth's crust, changes its deformation properties, creating conditions for the occurrence of secondary processes both in the deep horizons of the Earth and on its surface.

*Conclusions:* The temporal dynamics of the production of industrial explosions in various large quarries has common and specific features. From 90 to 140 industrial explosions were carried out annually in large quarries. At the same time, in each of the quarries in different years, their number differs. However, there is a clear synchronization in the time of production of industrial explosions in different pits from 9:00 to 11:00 UTC on certain days of the week. A large number of man-made seismic events, firstly, significantly complicates the seismic situation in the region, secondly, affects the deformation properties of the earth's



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Lyudmila I. Nadezhka, e-mail: [nadezhka@geol.vsu.ru](mailto:nadezhka@geol.vsu.ru)

crust, and thirdly, makes it difficult to assess the natural seismic activity of the territory of the Voronezh crystalline massif, the largest structure of the East European platform.

**Keywords:** Voronezh crystal massif, industrial explosions, temporal dynamics, seismic events, seismic energy, deformation properties, earth's crust.

*For citation:* Nadezhka L. I., Pivovarov S. P., Efremenko M. A., Ezhova I. T., Zolototrubova E. I., Mokhova V. V. Industrial explosions on the territory of the Voronezh Crystal massif and their temporal dynamics // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 3, pp. 109-123. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/109-123>

*Conflict of interests:* The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

#### REFERENCES

1. Nadezhka L. I., Pivovarov S. P., Semenov A. E., Ippolitov O. M. Sejsmicheskie efekty` krupnomasshtabny`x vzry`vov v Voronezhskom regione i ix geo`kologicheskie sledstviya [Seismic effects of large-scale explosions in the Voronezh region and their geoecological consequences]. Sb. st.: *Mestorozhdeniya prirodnoho i texnogennogo mineral`nogo syr`ya: geologiya, geoximiya, geoximicheskie i geofizicheskie metody` poiskov, e`kologicheskaya geologiya* [Deposits of natural and man-made mineral raw materials: geology, geochemistry, geochemical and geophysical exploration methods, ecological geology]. Voronezh, VSU publ., 2008, pp.326–329 (In Russ)
2. Nadezhka L. I., Pivovarov S. P., Dubyanskij A. I., Efremenko M. A., Pivovarov R. S. Ob e`nergeticheskix ocenax texnogenny`x sobytij v geologicheskix usloviyax Voronezhskogo kristallicheskogo massiva. [On energy assessments of technogenic events in the geological conditions of the Voronezh crystalline massif]. *Sovremennye metody` obrabotki i interpretacii sejsmologicheskix danny`x: materialy` XIII Mezhdunarodnoj sejsmologicheskoy shkoly`* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Obninsk, GS RAN publ., 2018, pp. 166–169. (In Russ)
3. Semenov A. E., Nadezhka L. I., Safronich I. N., Ezhova I. T. Xarakter i intensivnost` sejsmicheskix vozdeystvij gornopromy`shlenny`x kompleksov na litosferu Voronezhskogo kristallicheskogo massiva. [Character and intensity of seismic impacts of mining complexes on the lithosphere of the Voronezh crystalline massif]. *Struktura, veshhestvenny`j sostav, svojstva, sovremennaya geodinamika i sejsmichnost` platformenny`x territorij i sopredelny`x regionov: materialy` XXII Vserossijskoj s mezhdunarodny`m uchastiem nauchno-prakticheskoy Shhukinskoj konferencii* [Structure, material composition, properties, modern geodynamics and seismicity of platform territories and adjacent regions]. Voronezh, VSU publ., 2020, pp. 317–321. (In Russ)
4. *Vzry`vy` i zemletryaseniya na territorii Evropejskoj chasti Rossii* [Explosions and earthquakes in the European part of Russia]. Ed. V. V. Adushkin, A. A. Malovichko. Moscow, GEOS publ., 2013, 384 p. (In Russ)
5. Adushkin V. V., Turuntaev S. B. *Texnogenny`e processy` v zemnoj kore (opasnosti i katastrofy`)* [Technogenic processes in the earth's crust (hazards and catastrophes)]. Moscow, INE`K publ., 2005, 250 p. (In Russ)
6. Adushkin V. V., Turuntaev S. B. *Texnogennaya sejsmichnost` – inducirovannaya i trigger`naya* [Technogenic seismicity – induced and trigger]. Moscow, IDG RAN publ., 2015, 364 p. (In Russ)
7. Adushkin V. V., Kocharyan G. P., Sanina I. A. O vklade vzry`vny`x rabot v razvitie sejsmodeformacionny`x processov v regione [On the contribution of blasting to the development of seismic and deformation processes in the region]. *Doklady` Akademii nauk – DAN Reports of the Academy of Sciences* 2011, vol. 441, no. 1, pp. 92–94. (In Russ)
8. Kosinova I. I., Nadezhka L. I., Semenov A. E., Safronich I. N., Ezhova I. T., Silkin K. Yu., Pivovarov S. P. Kriterii e`kologicheskix ocenok sejsmicheskix vozdeystvij, vznikayushhix pri proizvodstve promy`shlenny`x vzry`vov [Criteria for environmental assessments of seismic impacts arising in the production of industrial explosions]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Geology*, 2021, no. 1, pp. 82–93 (In Russ)
9. Nadezhka L. I., Semenov A. E., Silkin K. Yu. K probleme sejsmicheskoy bezopasnosti Central`no-Chernozemnogo e`konomicheskogo regiona [On the problem of seismic safety of the Central Black Earth economic region]. *Kompleksny`e problemy` texnosfernoj bezopasnosti. Zadachi, texnologii i resheniya kompleksnoj bezopasnosti: sb. st. XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Complex problems of technosphere security. Tasks, technologies and solutions of complex security]. Voronezh, VSU publ., 2019, pp. 20–23 (In Russ)
10. Nadezhka L. I., Semenov A. E., Ezhova I. T., Safronich I. N., Pivovarov S. P. *Texnogennaya sejsmichnost` territorii Central`no-Chernozemnogo e`konomicheskogo regiona i eyo vozmozhny`e e`kologicheskie posledstviya* [Technogenic seismicity of the territory of the Central Black Earth economic region and its possible environmental consequences]. *Kompleksny`e problemy` texnosfernoj bezopasnosti: materialy` konferencii* [Complex problems of technosphere safety]. Voronezh, VGTU publ., 2021, ch. 2, pp. 286–289 (In Russ)
11. Kosinova I. I., Nadezhka L. I., Liseczkij F. N., Budarina V. A., Semenov A. E., Pavlovskij A. I. Analiz prostranstvenny`x zakonomernostej vozdeystvij promy`shlenny`x vzry`vov na e`kologo-geologicheskie sistemy` gornodoby`vayushhix rajonov [Analysis of the spatial

patterns of the impact of industrial explosions on the ecological and geological systems of mining areas]. *Regional'ny'e geosistemy – Regional geosystems*, 2021, vol. 45, no. 3, pp. 393–413 (In Russ)

12. Akimov A. P., Krasilov S. A. Programmny`j kompleks WSG «Sistema obrabotki sejsmicheskix danny`x» [Software package WSG "Seismic data processing system"]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy` dlya E`VM № 2020664678 ot 16.11.2020 y. (In Russ)

13. Krasilov S. A., Kolomicz M. V., Akimov A. P. Organizaciya processa obrabotki cifrovu`x sejsmicheskix danny`x s ispol'zovaniem programmnogo kompleksa WSG [Organization of digital seismic data processing using the WSG software package]. *Sovremennye metody obrabotki i interpretacii sejsmologicheskix danny`x: materialy Mezhdunarodnoj sejsmologicheskoy shkoly`* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Obninsk, GS RAN publ., 2006. pp. 77–83 (In Russ)

14. *Litosfera Voronezhskogo kristallicheskogo massiva po geofizicheskim i petrofizicheskim danny`m* [Lithosphere of the Voronezh crystalline massif according to geophysical and petrophysical data]. Scientific editor: N. M. Chernyshov, Voronezh, «Nauchnaya kniga» publ., 2012, 330 p. (In Russ)

15. *Mineragenicheskie issledovaniya territorij s dvuxy-*

*rusny`m stroeniem (na primere Voronezhskogo kristallicheskogo massiva)* [Minerogenic studies of territories with a two-tier structure (on the example of the Voronezh crystalline massif)]. Moscow, GEOKART, GEOS publ., 2007, 284 p. (In Russ)

16. Ezhova I. T., Semenov A. E., Safronich I. N., Nadezhka L. I. Dinamika promy`shlenny`x vzry`vov na territorii kurskoj magnitnoj anomalii. [Dynamics of industrial explosions on the territory of the Kursk magnetic anomaly. Malyshev readings]. *Maly`shevskie chteniya: materialy konferencii* [Malyshev readings]. Belgorod, BSTU, 2019, pp. 141–147 (In Russ)

17. Ezhova I. T., Nadezhka L. I., Efremenko M. A. Instrumental'ny'e sejsmologicheskie nablyudeniya promy`shlenny`x vzry`vov kak e`ffektivny`j kontrol` sejsmicheskix vozdejstvij na geologicheskuyu sredu [Instrumental seismological observations of industrial explosions as an effective control of seismic impacts on the geological environment. Patterns of transformation of ecological functions of geospheres in large mining regions]. *Zakonomernosti transformacii e`kologicheskix funkcij geosfer krupny`x gornopromy`shlenny`x regionov: sb. st.* [Regularities of transformation of ecological functions of geospheres of large mining regions]. Moscow, «Nauchnaya kniga» publ., 2022, pp. 42–54 (In Russ)

*Надежка Людмила Ивановна*, к.г.-м.н., зав. лаборатории, Воронежский государственный университет, зав. лаборатории, ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nadezhka@geol.vsu.ru; ORCID 0000-0003-2360-9081

*Пивоваров Сергей Павлович*, н.с., ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Воронеж, Российская Федерация; e-mail: serg@geothys.vsu.ru; ORCID 0000-0001-6136-7242

*Ефременко Марина Алексеевна*, к.г.-м.н., н.с., ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Воронеж, Российская Федерация; e-mail: 2880@mail.ru; ORCID 0000-0001-8200-8126

*Ежова Ирина Трофимовна*, вед. геофизик, Воронежский государственный университет, ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nadezhka@geol.vsu.ru; ORCID 0009-0006-3259-0895

*Золотрубова Элеонора Ивановна*, вед. геофизик, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nadezhka@geol.vsu.ru; ORCID 0009-0008-1675-0603

*Мохова Виктория Вадимовна*, преподаватель, Воронежский государственный университет, инженер-исследователь ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Воронеж, Российская Федерация; e-mail: viktorijaperevoznikova@rambler.ru; ORCID 0009-0005-2368-7241

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Lyudmila I. Nadezhka*, PhD in Geol.-Min., Head of the lab.; head of the lab. Voronezh State University, Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», Voronezh, Russian Federation; e-mail: nadezhka@geol.vsu.ru; ORCID 0000-0003-2360-9081

*Sergey P. Pivovarov*, Researcher Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», Voronezh, Russian Federation; e-mail: serg@geothys.vsu.ru; ORCID 0000-0001-6136-7242

*Marina A. Efremenko*, PhD in Geol.-Min., Researcher Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», Voronezh, Russian Federation; e-mail: 2880@mail.ru; ORCID 0000-0001-8200-8126

*Irina T. Ezhova*, Leading geophysicist, Voronezh State University, Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», Voronezh, Russian Federation; e-mail: nadezhka@geol.vsu.ru; ORCID 0009-0006-3259-0895

*Eleonora I. Zolotrubova*, Leading geophysicist, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: nadezhka@geol.vsu.ru; ORCID 0009-0008-1675-0603

*Victoria V. Mokhova*, Lecturer, Voronezh State University, Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», Voronezh, Russian Federation; e-mail: viktorijaperevoznikova@rambler.ru; ORCID 0009-0005-2368-7241

*Authors have read and approved the final manuscript.*