

## Критерии экологических оценок сейсмических воздействий, возникающих при производстве промышленных взрывов

©2021 И. И. Косинова<sup>1✉</sup>, Л. И. Надежка<sup>1,2</sup>, А. Е. Семенов<sup>2,1</sup>,  
И. Н. Сафронич<sup>1,2</sup>, И. Т. Ежова<sup>1,2</sup>, К. Ю. Силкин<sup>1,2</sup>, С. П. Пивоваров<sup>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 статье изложены результаты анализа сейсмических эффектов, возникающих при производстве промышленных взрывов в карьерах по добыче полезных ископаемых. В регионе функционирует более 20 карьеров, в которых ежегодно производится от 300 до 500 взрывов. При этом выделяется  $10^{10}$ - $10^{13}$  Дж сейсмической энергии.

**Методика:** Был проведен эксперимент с целью определения наличия или отсутствия наведенной сейсмичности. Для этого вокруг Павловского карьера в разных азимутах, на расстоянии 60 км от карьера были установлены сейсмические станции. Спустя 8 часов после взрыва в Павловском карьере, мощность которого составила 300 т ВВ, произошли 5 низкомагнитудных сейсмических событий. Они аккумулировались в пределах Лискинской сейсмически активной зоны.

**Результаты и обсуждение:** Оценены экологические последствия проведения промышленных взрывов. Показано, что короткозамедленные промышленные взрывы оказывают существенное воздействие на геологическую среду, создавая предпосылки возникновения наведенной сейсмичности и возбуждая сейсмические колебания в широком диапазоне частот, которые распространяются на значительные расстояния. Максимальная амплитуда колебаний изменяется от десятков нм/с до 1000 мкм/с, длительность воздействия от нескольких секунд до 5 минут. На основе анализа большого объема данных, разработаны критерии оценки благоприятности среды обитания человека.

**Заключение:** По степени воздействия промышленных взрывов на комфортность среды обитания выделены четыре уровня, характеризующиеся системой сейсмических признаков: комфортные, гипокомфортные, дискомфортные и экстремальные.

**Ключевые слова:** карьеры, короткозамедленные промышленные взрывы, наведенная сейсмичность, сейсмическая энергия, волновые характеристики, центр, Россия.

**Источник финансирования:** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-55-00010/20 от 30.04.20 и БРФФИ X20P-284 от 04.05.2020 г

**Для цитирования:** Косинова И. И., Надежка Л. И., Семенов 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. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3340>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Косинова Ирина Ивановна, e-mail: [kosinova777@yandex.ru](mailto:kosinova777@yandex.ru)

### Введение

В настоящее время добыча полезных ископаемых, в основном, ведется открытым способом, т.е. с помощью взрывных технологий. При этом, особенно при мощных взрывах, происходит значительное загрязнение и трансформация различных компонентов окружающей среды. Для оценки влияния промышленных взрывов и снижения их негативного воздействия на литосферу, среду обитания человека и его здоровье необходимо проведение детального анализа эколого-геологических эффектов, вызванных горнодобывающим производством.

В широком спектре эколого-геологических фактов особое место занимают сейсмические эффекты массовых взрывов, которые, во-первых, создают предпосылки возникновения наведенной сейсмичности, во-вторых, возбуждают сейсмические колебания, влияющие на комфортность среды обитания.

Территория Центрально-Черноземного экономического региона (ЦЧЭР) подвержена значительному воздействию промышленных взрывов. В регионе функционирует более 20 карьеров, в которых ведется интенсивная добыча полезных ископаемых. В трех карьерах КМА Железногорском (Михайловский), Лебединском и Стойленском добывается железная руда. В этих карьерах общее количество взрывчатых веществ (ВВ), используемых при проведении короткозамедленного взрыва, составляет более 1000 т. Наиболее мощные взрывы производятся в Михайловском карьере. Здесь

суммарная мощность ВВ промышленного взрыва достигает в отдельных случаях 2500 т. В карьерах Воронежской области – Павловском и Тихий Дон – добывается гранитная крошка. Суммарная мощность взрывов составляет 300т ВВ и более.

В многочисленных карьерах Липецкой области добывается известняк и доломиты. Мощность взрывов не превышает 50 т ВВ.

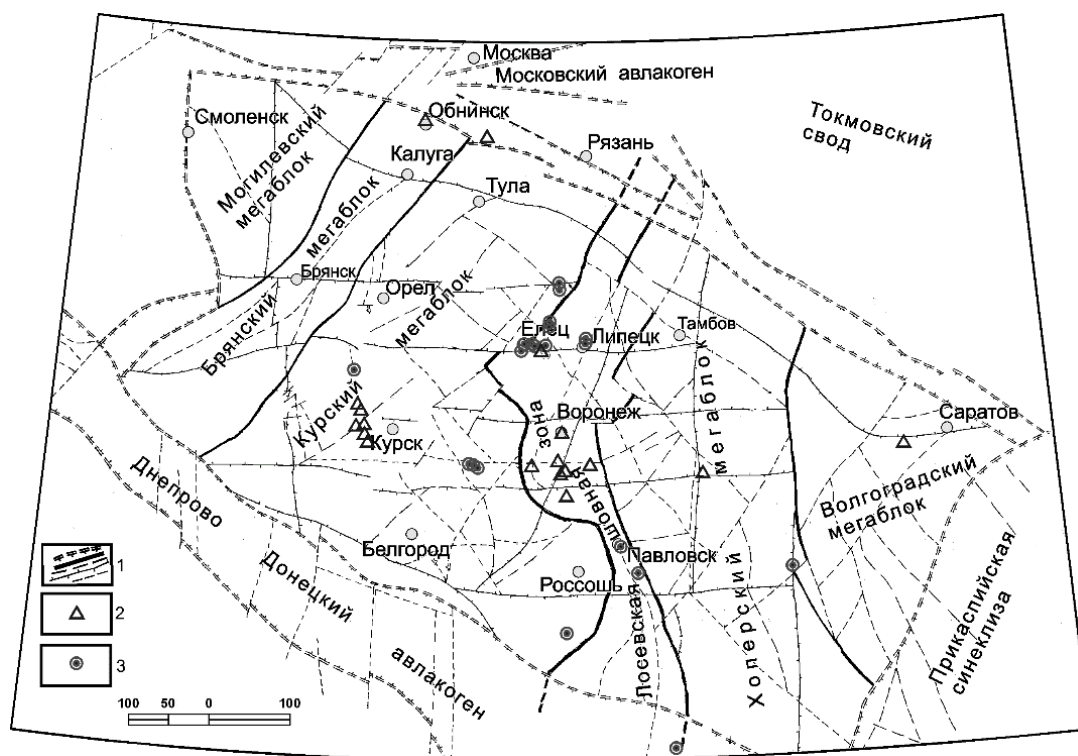
Ежегодно производится в регионе более 300 взрывов. По количеству сейсмической энергии, выделяющейся ежегодно при производстве промышленных взрывов, ЦЧЭР занимает второе место на территории Европейской части России после Урала [1]. Ежегодно величина сейсмической энергии, выделившейся при производстве промышленных взрывов, колеблется от  $10^{10}$  до  $10^{12}$  Дж.

### Методика эксперимента

На территории ЦЧЭР – в геологическом отношении это большая часть Воронежского кристаллического массива – функционирует сеть сейсмических станций, часть из которых входит в Федеральную сеть сейсмологических наблюдений России.

На рисунке 1 представлена схема расположения промышленных карьеров и сейсмических станций.

Кроме постоянно функционирующих сейсмических станций, за 25-летний период наблюдений было организовано более 300 временных пунктов сейсмических наблюдений.

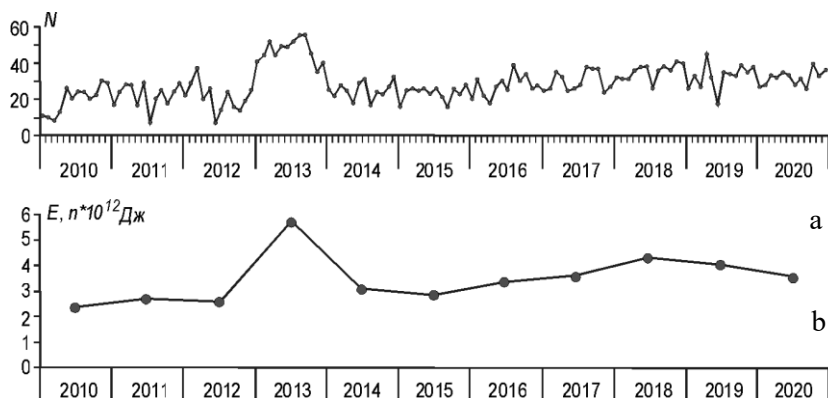


**Рис. 1.** Схема расположения сейсмических станций и карьеров на территории ВКМ. 1 – разломы разного ранга; 2 – сейсмические станции; 3 – карьеры (пункты промышленных взрывов).

[Fig.1. Diagram of the location of seismic stations and quarries on the territory of the VCM. 1 – faults of different ranks; 2 – seismic stations; 3 – quarries (points of industrial explosions).]

Сейсмический мониторинг, выполняемый постоянными и временными станциями, дал возможность получить уникальные данные о характере, временной динамике, степени влияния на среду обитания человека сейсмических событий, которые происходят при производстве промышленных взрывов. В отдельные годы

количество взрывов достигает 500 и более. На рисунке 2а представлено временное распределение количества событий, возникших в результате взрывов, а на рисунке 2б количество выделившейся сейсмической энергии. Как видно из рисунка, количество энергии колеблется в последние 10 лет от  $2.5 \cdot 10^{12}$  Дж до  $5.5 \cdot 10^{12}$  Дж.

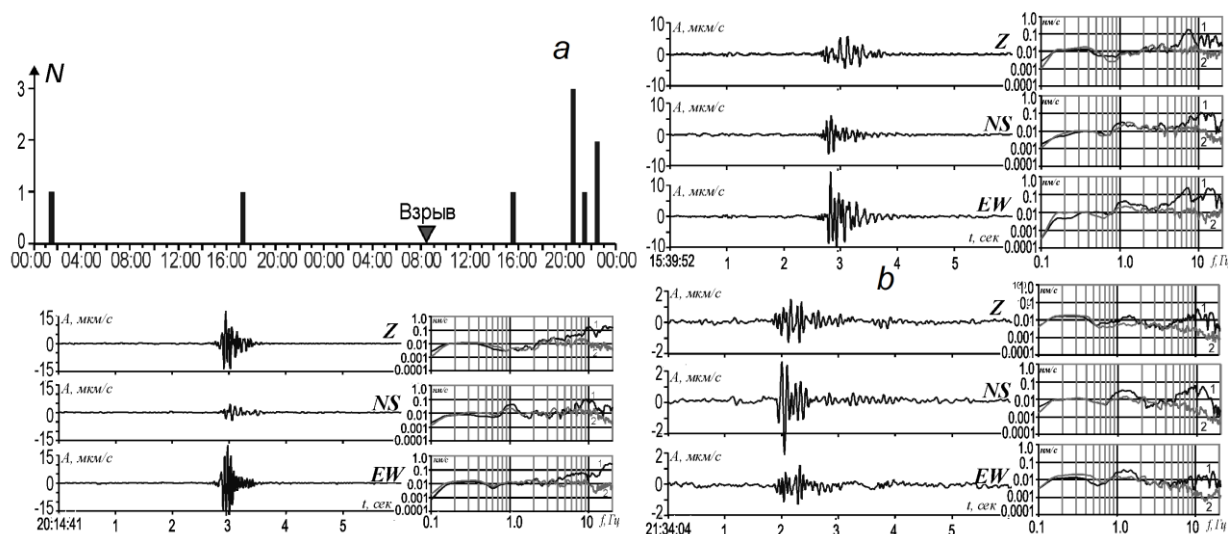


**Рис. 2.** Распределение количества взрывов по месяцам 2010–2020 гг. (а) и выделившейся энергии по годам (б).  
**[Fig. 2.** Distribution of the number of explosions by the months of 2010–2020 (a) and the released energy by the years (b)]

Локальная магнитуда сейсмических колебаний, вызванных взрывами, колеблется в пределах 0.5–3.6 [1], что соответствует 3–11 энергетическим классам. Следует заметить, что магнитуда сейсмических событий взрывов находится в том же диапазоне, что и локальная магнитуда большинства природных землетрясений. Это осложняет анализ природной сейсмичности в регионе.

Большой поток сейсмической энергии, выделяющийся при производстве промышленных взрывов, распространяясь в неоднородной дискретной геологической среде, способствует накоплению напряжений на контактах блоков и зонах тектонических нарушений. Процесс накопления деформаций и напряжений может приводить к природно-техногенным землетрясениям (наведенной сейсмичности). Такие явления наблюдаются в регионах с активной добычей полезных ископаемых [2, 3, 4].

Признаки наведенной сейсмичности отмечаются в литосфере Воронежского кристаллического массива. Был проведен эксперимент с целью определения наличия или отсутствия наведенной сейсмичности. Для этого вокруг Павловского карьера в разных азимутах, на расстоянии 60 км от карьера были установлены сейсмические станции. Спустя 8 часов после взрыва в Павловском карьере, мощность которого составила 300 т ВВ, произошли 5 низкомагнитудных сейсмических событий. Они аккумуляровались в пределах Лискинской сейсмически активной зоне. Из этого следует, что наведенная сейсмичность может осуществляться только в структурах, где природные условия уже подготовлены для того, чтобы землетрясение произошло. Отметим, что в пределах Лискинской сейсмически активной зоны за 25 лет наблюдений зарегистрировано более 90 природных землетрясений 6–8 энергетических классов [5].



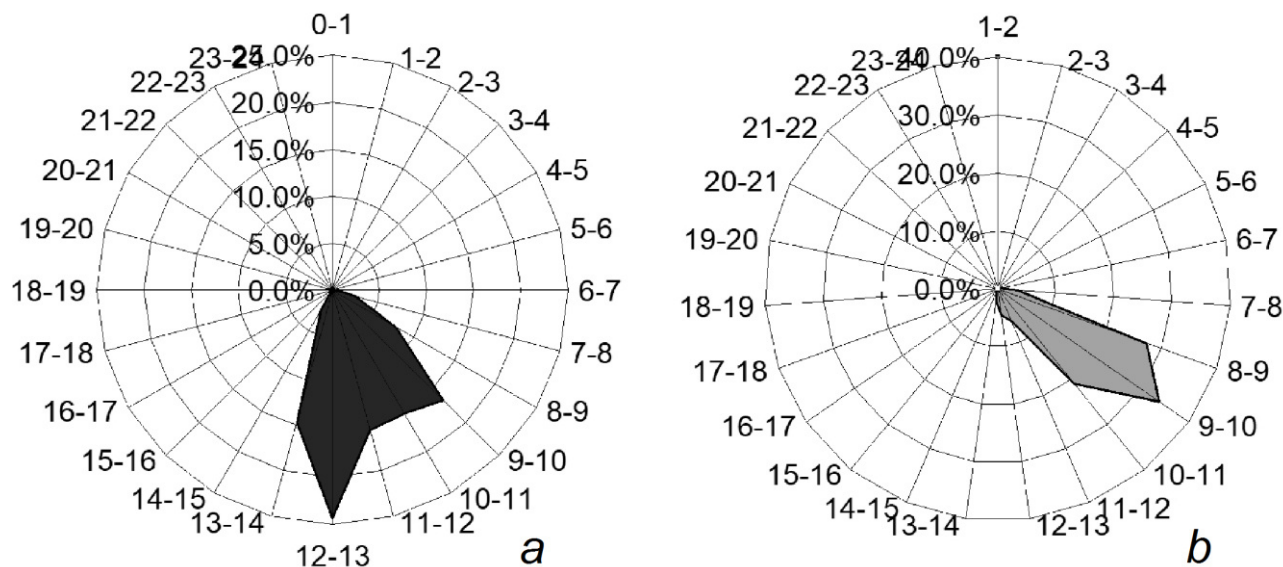
**Рис. 3.** Пример релаксации геологической среды после взрыва: а – трехкомпонентные записи сейсмических событий, инициированных взрывом, б – амплитудно-частотные спектры взрыва и фона.

**[Fig. 3.** Example of relaxation of the geological environment after the explosion: a – three-component records of seismic events initiated by the explosion, b – the amplitude-frequency spectra of the explosion and background.]

На рисунке 3 представлены результаты эксперимента. Можно видеть, что все события низкомagnitude, высокочастотные и не продолжительные по времени. Вместе с тем, отсутствие аналогичных ситуаций в другое время в пределах этой зоны и в других направлениях от источника, дает основание предположить, что взрыв в Павловском карьере послужил «толчком» к разрядке избыточных напряжений [2].

Важным фактором при анализе сейсмических событий, возникающих при взрывах, является день не-

дели и время, когда происходят промышленные взрывы. Анализ данных показал, что они происходят во все дни недели, даже в выходные [6, 7]. При этом промышленные взрывы в крупных карьерах, как правило, происходят в конкретные дни: среда, пятница – в карьерах КМА и вторник, пятница – в карьерах Воронежской области. 90% взрывов в крупных карьерах производится с 08:00 часов до 11:00 часов (время UTC). В карьерах Липецкой области взрывы производятся в любое время суток (рис. 4).



**Рис. 4.** Распределение взрывов в карьерах Липецкой области (а) и крупных карьерах КМА и Воронежской области (б) по времени суток (время UTC) за 10 лет (в %).

[Fig. 4. Distribution of explosions in the quarries of the Lipetsk region (a) and large quarries of the KMA and the Voronezh region (b) by clock (UTC time) for 10 years (%).]

Как известно, кумулятивный сейсмический эффект короткозамедленного промышленного взрыва формируется из сейсмических эффектов, вызванных взрывами отдельных скважин [8, 9, 10]. Сейсмический сигнал взрыва одной скважины имеет простую форму. Суммарный сейсмический эффект массового промышленного взрыва на небольших расстояниях от карьера представляет собой цуг отдельных сейсмических сигналов, каждый из которых является сейсмическим эффектом отдельно взрываемого блока. Технология взрывных работ в карьерах предусматривает подрыв (отбойку) отдельных блоков, в ряде случаев, в разных частях карьера, при этом с временной задержкой. Поэтому в записи массового взрыва на относительно небольших расстояниях от источника можно четко видеть сейсмические эффекты, которые создаются отдельными блоками. С удалением от источника, форма сейсмического события существенно изменяется. Это происходит в связи с тем, что по мере увеличения расстояния происходит, с одной стороны, рассеивание энергии, с другой, в суммарном волновом поле появляются отраженные и преломленные волны от границ

раздела в земной коре на пути прохождения волн, а также интерференция волн разного типа (рис. 5).

Значительную роль в формировании суммарного волнового поля короткозамедленного промышленного взрыва, его интенсивности и частотного состава на удалении от карьера играет строение земной коры, как в пункте регистрации, так и на пути прохождения волнового поля.

Анализ записей сейсмических событий, возбуждаемых взрывами в разных карьерах, показал, что наиболее интенсивно проявляются горизонтальные компоненты волнового поля (рис. 6).

На рисунке 6 показаны записи одного и того же события сейсмическими станциями, расположенными в одной региональной структуре (Лосевской шовной зоне ВКМ), что и Павловский карьер, т.е. строение земной коры на пути распространения волн близкое, но разные локальные геологические условия в пунктах наблюдений. Последним обусловлено, на наш взгляд, различие в интенсивности волнового поля на различных частотах. Из этого следует, что эколого-геологический эффект массовых промышленных взрывов определяет-

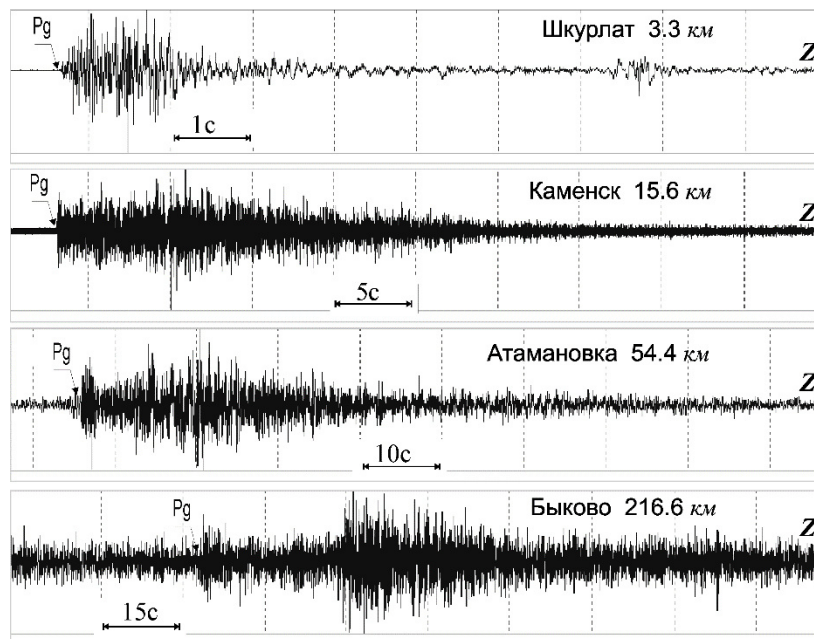


Рис. 5. Трехкомпонентные записи взрыва в Павловском карьере на разных удалениях.  
 [Fig. 5. Three-component records of the Pavlovsk quarry explosion at different distances.]

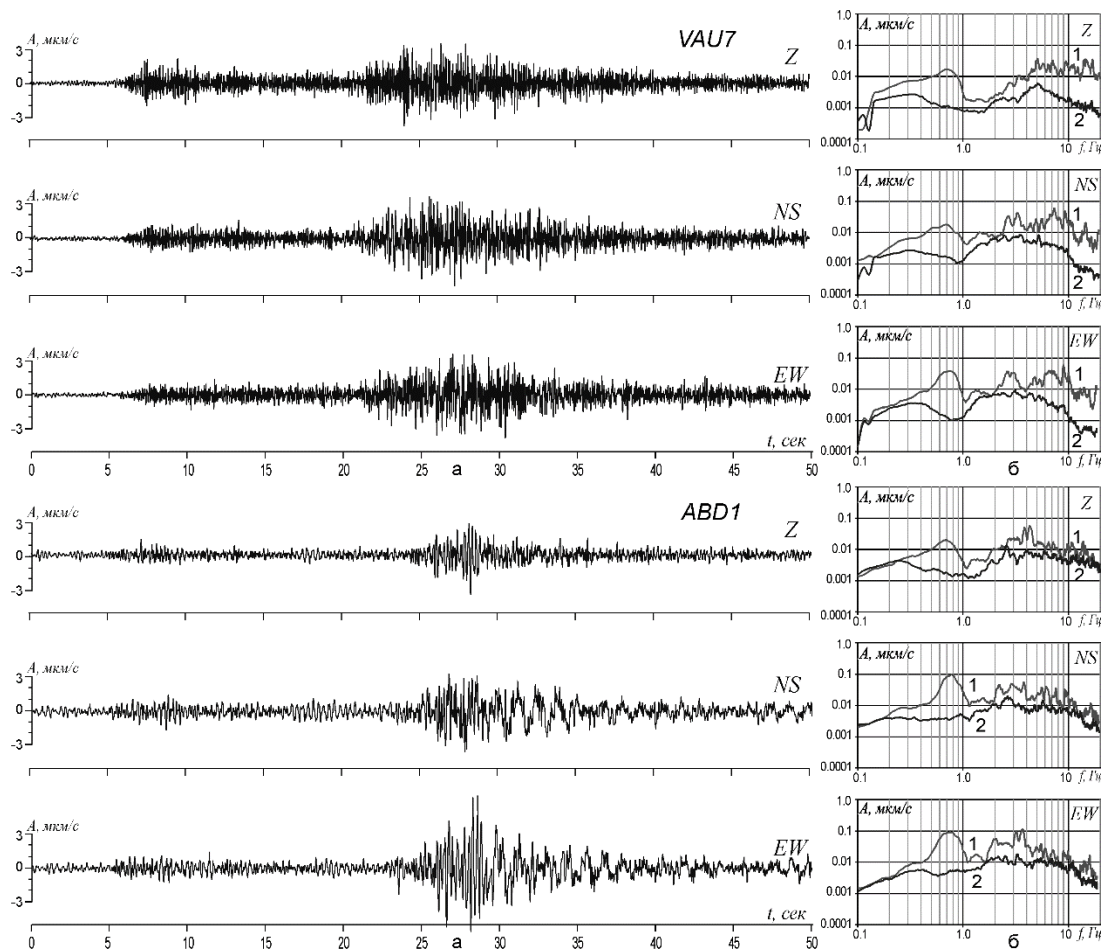


Рис. 6. Пример трехкомпонентных записей взрыва в Павловском карьере (а) и сравнение амплитудных спектров записи взрыва (1) и фона (2) станциями, расположенными в различных локальных геологических условиях.  
 [Fig. 6. Example of three-component records of the explosion in the Pavlovsky quarry (a) and comparison of the amplitude spectra of the explosion record (1) and background (2) by stations located in different geological conditions.]



ся не только мощностью взрыва, но и строением и физическими свойствами геологической среды в различных точках физической поверхности Земли. Безусловно, суммарная мощность короткозамедленного промышленного взрыва является главным фактором создания колебаний (вибрации) в широком диапазоне частот. Чем ближе к источнику колебаний, тем интенсивнее их проявление, тем ощутимее негативное влияние на среду обитания человека и его здоровье.

Обозначенный эксперимент включал также изучение влияния сейсмических событий, возникающих при взрывах в Павловском карьере, на уровень вибраций грунта в жилых одноэтажных домах. Для этого была создана сеть сейсмических станций: две станции были установлены в жилых помещениях и одна на грунте (рис. 7). Расстояние от подрываемого блока составило менее 3.0 км. Был произведен короткозамедленный взрыв, суммарная мощность которого составила 300 т. Сейсмические воздействия этого взрыва были значительными, как на грунт, так и в жилых помещениях. Интенсивность колебаний по сравнению фоновыми значениями возросла в 1000 раз на грунте. В жилых помещениях это увеличение было еще значительнее, особенно возросла интенсивность горизонтальных составляющих (рисунок 7).

В анализируемом диапазоне частот 0.1–20 Гц, превышение амплитудно-частотного спектра сейсмического события, вызванного взрывом относительно амплитудно-частотного спектра фона, составило от 200 до 800 раз на грунтах. На уровне физической поверхности Земли (грунт) экспериментальное увеличение интенсивности колебаний наблюдалось в диапазонах частот 6.0–8.0 Гц, 10.5 Гц, 11.0–12.0 Гц, 14.0–16.0 Гц. Как видно из рис. 7, амплитудно-частотные спектры горизонтальных компонент сейсмического события отличаются от амплитудно-частотного спектра вертикальной компоненты. Отношение спектров горизонтальных компонент сейсмического сигнала и фоновых колебаний показывает, что максимальное увеличение интенсивности колебаний наблюдается на частоте 17.0–18.0 Гц и составляет 800 фоновых значений (рис. 7). Это доказывает, что на расстоянии до 3000 км взрывы в Павловском карьере увеличивают колебания частиц грунта до 800 и, возможно, более раз.

Еще более сильные сейсмические воздействия наблюдались в жилых постройках. Безусловно, степень воздействия зависит, в том числе, и от качества постройки жилого дома. Амплитуда колебаний E-компоненты составляет более 1000 мкм/с. Отношение спектральных амплитуд различных компонент сейсмического сигнала и фона свидетельствует о их значительном увеличении в диапазоне частот 6.0–8.0 Гц. Z-компоненты в 600 раз, N-компоненты в 1000 раз, E-компоненты в 2000 раз. В диапазоне частот 10.0 Гц зафиксировано увеличение спектральных амплитуд N-компоненты в 900 раз, E-компоненты в 1500 раз. Следует подчеркнуть, что увеличение спектральных амплитуд различных компонент сейсмического события и фоновых колебаний в доме в том же диапазоне

частот, что и на грунте, отчетливо свидетельствуют о наличии явления резонанса.

В результате, интенсивность колебаний, вызванных промышленным взрывом в доме, в 1000 раз и более превышают фоновые значения в широком диапазоне частот от 6.0 до 18.0 Гц, а для N-компоненты и выше.

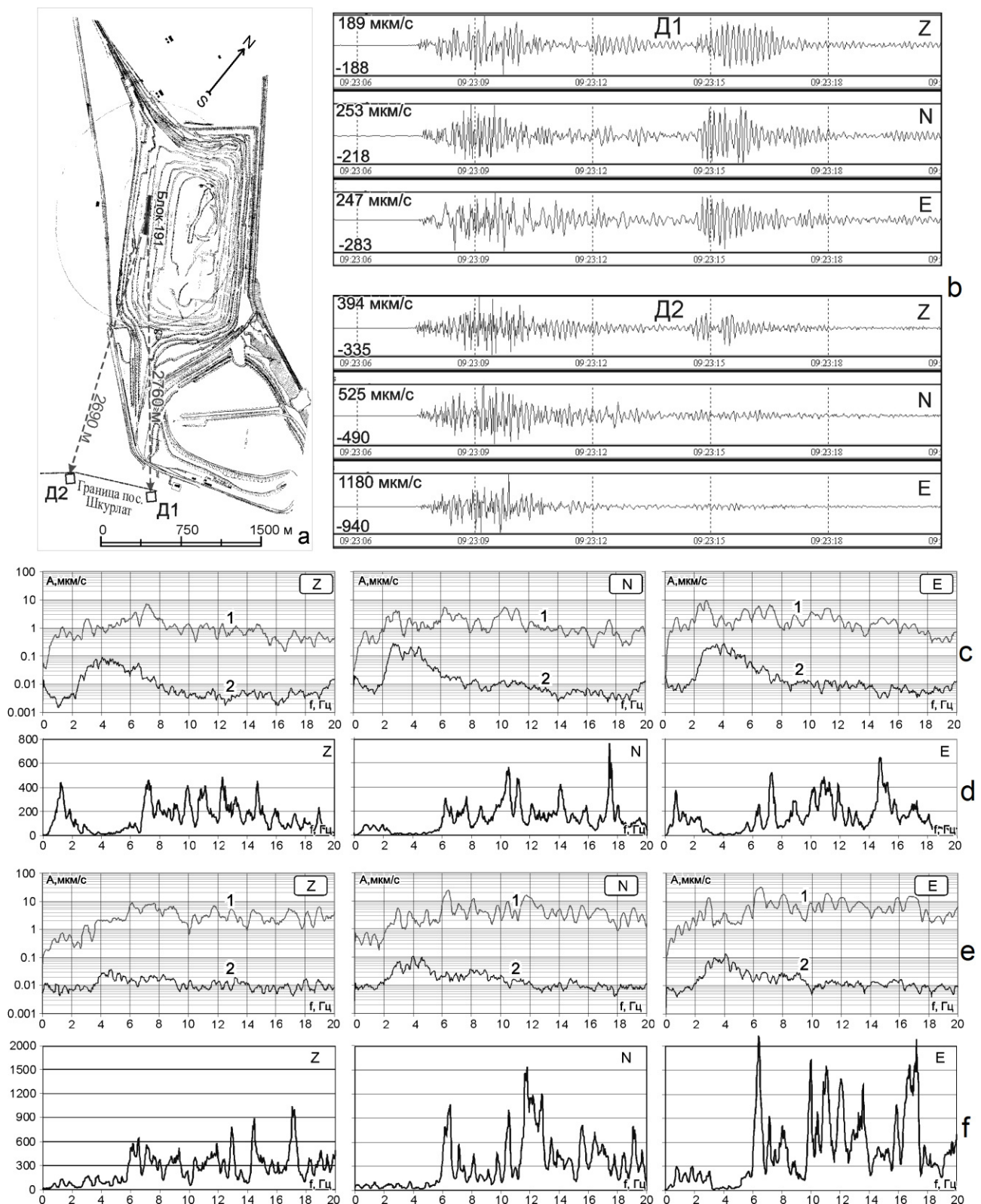
С увеличением расстояния от источника, как уже отмечалось, существенно изменяется форма сигнала. Если на близком расстоянии в волновом поле можно видеть составляющую, обусловленную подрывом разных блоков, то на расстояниях относительно удаленных 20–80 км (для взрывов разной мощности) сейсмическое событие представляет собой единую волновую форму со сложной внутренней структурой. При этом, для оценки сейсмического воздействия промышленных взрывов целесообразно использовать максимальную амплитуду на данном расстоянии и длительность сейсмических колебаний. На рисунке 8, в качестве примера, представлены записи вертикальной компоненты сейсмического события, вызванного короткозамедленным промышленным взрывом, (энергетический класс 8.7) и амплитудно-частотные спектры. Записи сделаны на расстоянии 54 и 457 км. Хорошо видно изменение формы сигнала, максимальной амплитуды и длительности. В спектре, на разных расстояниях выделяются два типа волн: поверхностные на частотах до 2.0 Гц и объемные (продольные и поперечные) на частотах выше 2.0 Гц. Кроме того, меняется отношение спектральных амплитуд сейсмического события и фона. Если на расстоянии 54 км это отношение для поверхностных волн превышает фоновые в частотном диапазоне 2.0–10.0 Гц в 10 раз, более 10 Гц – в 100 раз, то с увеличением расстояния ситуация меняется. В среднем, отношение сигнал/фон на расстоянии 54 км составляет 5–10 единиц. На расстоянии более 400 км увеличение спектральных амплитуд сигнала по отношению к фону практически на всех частотах не превышает 5.

Представленная на рисунке динамика формы сейсмического события, свидетельствует, во-первых, что мощные взрывы создают сейсмические события, которые распространяются на сотни километров. Во-вторых, интенсивность колебаний (вибраций) уменьшается, а время их воздействий увеличивается.

### Обсуждение результатов

Вибрации, которые создаются короткозамедленными промышленными взрывами, не являются постоянными. Вместе с тем они, в зависимости от спектра собственных колебаний зданий и сооружений, жилых построек, могут формировать резонансные явления.

Выявлено, что наиболее опасной для человека является частота 6.0–8.0 Гц, так как собственная частота колебаний внутренних органов человека во многом характеризуется данным диапазоном. Вследствие этого могут возникать резонансные явления, что, безусловно, влияет на состояние здоровья человека. Как было показано выше, именно в этом диапазоне частот наблюдается увеличение интенсивности колебаний



**Рис.7.** Схема расположения пунктов наблюдения в районе в Павловского карьера (а), трехкомпонентные записи сейсмического эффекта промышленного взрыва в двух жилых домах Д1 и Д2 (б) и сравнение амплитудных спектров трех компонент записей взрыва (1) и фона (2) полученных на грунте (с) и в жилом доме Д2 (д) и их отношения для грунта (е) и дома (ф).

[Fig. 7. Diagram of the locations of the observation points in the area in Pavlovsk career (a), three-component seismic recording of the effect of the industrial explosion in the two houses D1 and D2 (b) and comparison of the amplitude spectra of the three components of the explosion records (1) and background (2) is obtained on the ground (b) and in a residential building D2 (l) and their relationship to soil (d) and the house (e).]

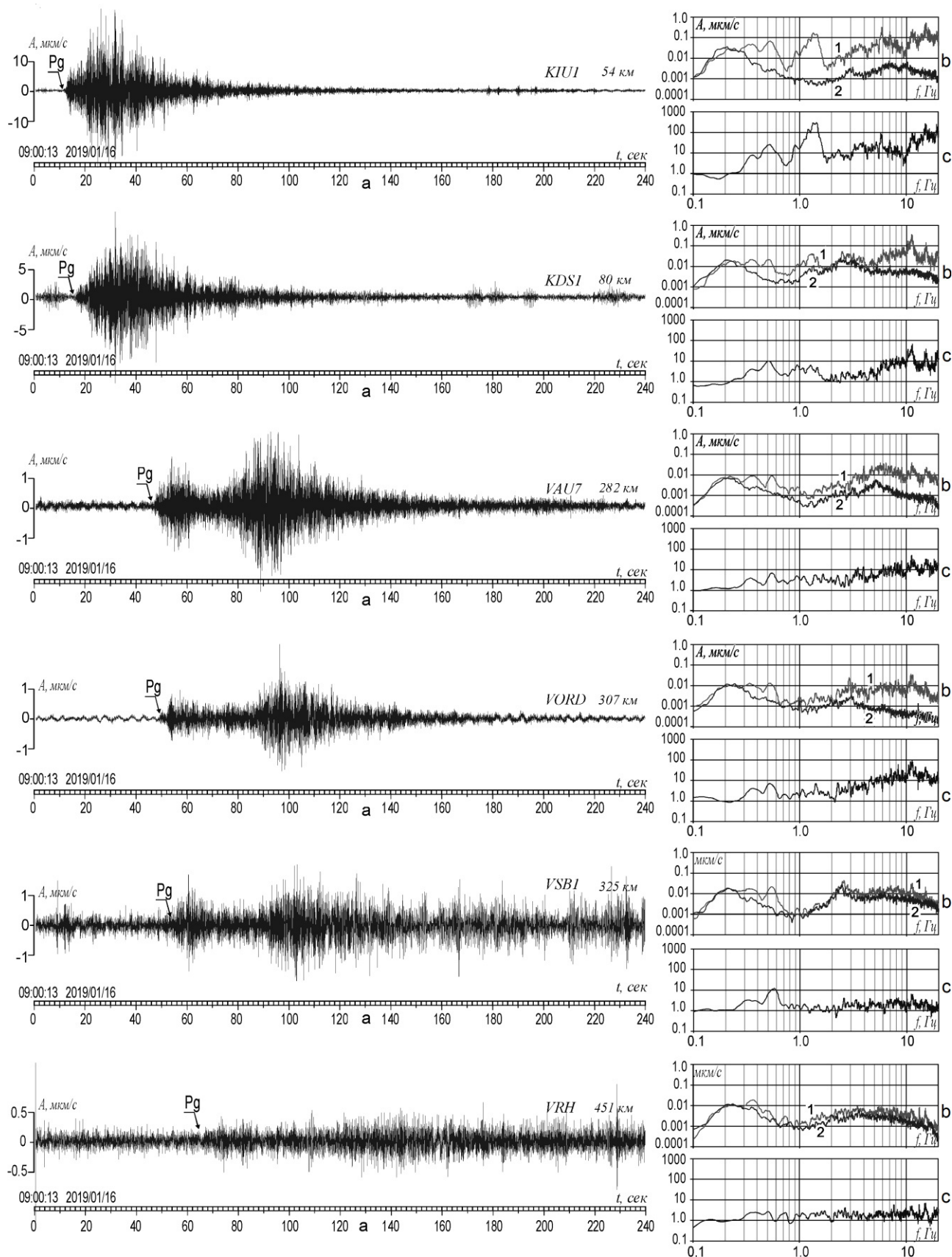


Рис. 8. Вертикальные составляющие записей взрыва в Михайловском карьере (а), амплитудные спектры (б) взрыва (1) в сравнении с фоновыми (2) и их отношения (с) на станциях региональной сети.

[Fig. 8. Vertical components of the explosion records in the Mikhailovsky quarry (a), the amplitude spectra (b) of the explosion (1) in comparison with the background ones (2) and their relations (c) at the stations of the regional network.]



грунтов и, особенно, жилых построек. Согласно рисунку 7, увеличение интенсивности 3-х компонент колебаний наблюдается также на частотах от 10.0 до 18.0 Гц, что также формирует дискомфортные особенности среды обитания. Следует подчеркнуть, что степень воздействия вибраций на здоровье человека зависит от интенсивности вибрации, их спектрального состава, длительности воздействий, времени суток и частоты проявления.

Учитывая значительную сейсмическую нагрузку на земную кору региона, вызванную короткозамедленными промышленными взрывами, возникает необходимость разработки критериев оценки степени воздействия сейсмических событий, возникающих при взрывах на среду обитания человека, объекты жизнеобеспечения и здоровье человека. Особую остроту эта проблема приобретает для территории Центрально-Черноземного экономического региона, так как это промышленно развитый регион, изобилующий объектами повышенного экологического риска (две атомные станции, Россошанский химкомбинат, и др.), объектами спецназначения, промышленными предприятиями различного назначения. Немаловажным является обстоятельство высокой плотности населения. Следует также иметь в виду, что территория региона не является сейсмически пассивной. В соответствии с картой ОСР-2015С, значительная часть территории региона характе-

ризуется фоновой сейсмичностью 6 баллов.

Дополнительная сейсмическая нагрузка, возникающая при проведении промышленных взрывов более чем в 20 карьерах, создающих ежегодный поток сейсмической энергии  $10^{10}$ - $10^{12}$  Дж, существенно осложняют эколого-геологическую ситуацию в регионе.

На основе проведенных исследований нами выделены сейсмические критерии, которые могут характеризовать экологическую ситуацию территории по степени ее безопасности и комфортности. К ним предлагается отнести:

- количество взрывов, в %;
- время производства промышленных взрывов, час.;
- максимальная амплитуда колебаний, мкм/с;
- частота, Гц;
- превышение сейсмического эффекта относительно фоновых значений,  $\alpha$ ;
- длительность воздействия, сек.

Систематизация выделенных критериев позволяет произвести оценку степени комфортности среды обитания в пределах крупных горнодобывающих районов (табл.1).

Представленная оценка отражает степень негативных эколого-геологических воздействий, обусловленных активной добычей полезных ископаемых в Центрально-Черноземном экономическом регионе.

**Табл. 1.** Оценка уровней комфортности среды обитания  
[Table. 1. Assessment of the levels of comfort of the environment]

Условия комфортности [Comfort conditions]	Кол-во взрывов в %, в мес. [Number of explosions in%, month]	Время произв. (UTC), час [Production time (UTC), hour]	$A_{max}$ мкм/с [ $A_{max}$ $\mu\text{m} / \text{s}$ ]	Частота, Гц [Frequency, Hz]	Отношен. сигн./фон $\alpha$ [signal / background, $\alpha$ ]	Длит. воздейств $\tau$ , сек [Duration of exposure $\tau$ , sec]
1. Комфортная	0–2	9–10	<1.0	2, 4, 8, 16	<5	<20
2. Гипокомфортная	3–9	9–12	1.0–100.0	2, 4, 8, 16	5–100	20–120
3. Дискомфортная	10–15	11–15	100–1000	0.5–20.0	100–1000	120–240
4. Экстремальная	>15	7–18	>1000	0.5–20.0	>1000	>240

### Заключение

1. Короткозамедленные промышленные взрывы оказывают существенное негативное влияние на комфортность среды обитания населения региона, которое формируется частотой взрывов, временем производства, мощностью взрыва, количеством выделившейся сейсмической энергии. Последняя, распространяясь в неоднородной и нелинейной геологической среде, накапливается на неоднородностях (области тектонических нарушений, границ блоков и др.) и создает предпосылки повышения сейсмичности в регионе, причем спровоцированные землетрясения могут быть значительной силы.

2. Промышленные взрывы создают значительные по интенсивности вибрационные колебания грунтов в широком диапазоне частот. Они распространяются на сотни километров, создавая негативное влияние на здания, сооружения, системы жизнеобеспечения и здоровье человека. Не исключено, что колебания грунтов,

вызванные промышленными взрывами, могут стать причиной резонансных явлений.

3. По степени воздействия промышленных взрывов на комфортность среды обитания выделены четыре уровня, характеризующиеся системой сейсмических признаков. Учитывая значительный вклад энергии взрывов в общий поток сейсмической энергии в регионах, при составлении карт общего сейсмического районирования следует учитывать этот факт в регионах с развитой горнодобывающей промышленностью, одним из которых является Центрально-Черноземный экономический регион.

Необходимо дальнейшее совершенствование методики комплексного изучения экологических эффектов сейсмических колебаний, направленной на выделение ведущих групп диапазонов, частот колебаний, систематизации информации по их воздействию на комфортность среды обитания.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России. Под ред. В.В. Адушкина и А.А. Маловичко. М.: Изд-во ГЕОС. 2013. 384 с.
2. Надежка Л. И., Семенов А. Е., Сафронич И. Н. Гистерезисная модель накопления и разрядки сейсмической энергии в геологической среде // *Триггерные эффекты в геосистемах*. Под редакцией В. В. Адушкина, Г. Г. Качаряна. М.: ТОРУС. 2019. С. 85–89.
3. Экологическая геология крупных горнодобывающих районов Северной Евразии (теория и практика). Под ред. И.И. Косиновой. Воронеж.: Изд-во Областная типография им. Болховитинова. 2015. 576 с.
4. Ананьин И. В. К вопросу о проявлении некоторых землетрясений в восточной части Восточно-Европейской платформы. Исследования сейсмической опасности // *Вопросы инженерной сейсмологии*. Выпуск. 29. М.: Наука. 1988. С. 119–124.
5. Семенов А. Е., Золототрубова Э. И., Надежка Л. И. Геодинамическая позиция Лискинской сейсмически активной зоны Воронежского кристаллического массива // *Материалы XI Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных»*. Обнинск. 2016. С. 311–314.
6. Семенов А. Е., Ефременко М. А., Пивоваров Р. С. Особенности волновых полей промышленных взрывов в крупных карьерах на территории Воронежского кристаллического массива. // *Труды XII Уральской молодежной научной школы по геофизике*. Пермь. УРО РАН. 2011. С. 87–90.
7. Семенов А. Е., Надежка Л. И., Сафронич, И. Н., Ежова И. Т. Характер и интенсивность сейсмических воздействий горно-промышленных комплексов на литосферу Воронежского кристаллического массива. // *Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Структура, вещественный состав, свойства, геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов*. Воронеж.: Изд-во «Печатный дом». ВГУ. 2020. С. 72–76.
8. Адушкин В. В., Спивак А. А., Соловьев С. П., Перник П. М., Кишкина С. Б. Геоэкологические последствия массовых взрывов в карьерах. // *Геоэкология*. 2000 №6. С. 554–563.
9. Спунгин В. Г., Перник П. М. Особенности сейсмического эффекта массового взрыва химического ВВ. // *Динамические процессы в геосферах под воздействием внешних и внутренних потоков энергии и вещества*. М.: ИДГ РАН. 1998. С. 270–278.
10. Кишкина С. Б., Спивак А. А. Локальный сейсмический эффект карьерных взрывов. // *Физические процессы в геосферах: их проявление и взаимодействие*. М.: ИДГ РАН. 1999. С. 111–116.

## Criteria for the environmental assessment of seismic effects arising from the production of industrial explosions

©2021 I. I. Kosinova<sup>1✉</sup>, L. I. Nadezhka<sup>1,2</sup>, A. E. Semenov<sup>2,1</sup>,  
I. N. Safronich<sup>1,2</sup>, I. T. Ezhova<sup>1,2</sup>, K. Yu. Silkin<sup>1,2</sup>, S. P. Pivovarov<sup>2</sup>

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

### Abstract

**Introduction:** The article presents the results of the analysis of seismic effects associated with the production of industrial explosions in quarries for the extraction of minerals. The region has over 20 quarries where between 300 and 500 explosions are produced annually. This releases  $10^{10}$ - $10^{13}$  J of seismic energy.

**Methodology:** An experiment was conducted to determine the presence or absence of induced seismicity. For this, seismic stations were installed around the Pavlovsk quarry at different azimuths at a distance of 60 km from the quarry. 8 hours after the explosion at the Pavlovsk quarry with a yield of 300 tons of explosives, 5 low magnitude seismic events occurred. They accumulated within the Liski zone of seismic activity.

**Results and discussion:** The environmental consequences of industrial explosions have been assessed. It was shown that short-delay industrial explosions have a significant impact on the geological environment. They create the prerequisites for induced seismicity and excite seismic vibrations in a wide range of frequencies that spread over large distances. The maximum amplitude of the vibrations varies from tens of nm/s to 1000  $\mu$ m/s. The duration of the exposure is from a few seconds to 5 minutes. The analysis of a large amount of data was used to develop criteria to evaluate how favourable the human habitat is.

**Conclusions:** Four levels characterised by a system of seismic indications have been distinguished by the impact of industrial explosions on the comfortability of the environment: comfortable, hypercomfortable, uncomfortable, and extreme.

**Keywords:** quarries, short-delayed industrial explosions, induced seismicity, seismic energy, wave characteristics, centre, Russia.

**Funding:** The work was supported by the RFBR grant 20-55-00010 / 20 of 04/30/2020 and the BRFFR X20R-284 of 05/04/2020

**For citation:** Kosinova I. I., Nadezhka L. I., Semenov A. E., Safronich I. N., Ezhova I. T., Silkin K. Yu., Pivovarov S. P. Criteria for the environmental assessment of seismic effects arising from the production of industrial explosions. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 1, pp. 82–93. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3340>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

---

✉ Irina I. Kosinova, e-mail: [kosinova777@yandex.ru](mailto:kosinova777@yandex.ru)

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

## REFERENCES

1. *Vzryvy i zemletryaseniya na territorii Evropeiskoi chasti Rossii* [Explosions and earthquakes in the European part of Russia.]. Ed. V. V. Adushkina, A. A. Malovichko. Moscow, GEOS publ., 2013, 384 p. (In Russ)
2. Nadezhka L. I., Semenov A. E., Safronich I. N. Gisterezisnaya model' nakopleniya i razryadki seismicheskoi energii v geologicheskoi srede [Hysteresis model of accumulation and discharge of seismic energy in the geological environment]. *Triggernye efekty v geosistemakh* [Trigger effects in geosystems]. Ed. V. V. Adushkina, G. G. Kacharyana. Moscow, TORUS publ., 2019, pp. 85–89. (In Russ)
3. *Ekologicheskaya geologiya krupnykh gornodobyvayushchikh raionov Severnoi Evrazii (teoriya i praktika)* [Ecological geology of large mining regions of Northern Eurasia (theory and practice)]. Ed. I. I. Kosinovi. Voronezh, Oblastnaya tipografiya im. Bolkhovitinova publ., 2015, 576 p. (In Russ)
4. Anan'in I. V. K Voprosu o proyavlenii nekotorykh zemletryaseni v vostochnoi chasti Vostochno-Evropeiskoi platformy. Issledovaniya seismicheskoi opasnosti [The question of the manifestation of some earthquakes in the eastern part of the East European platform. Seismic hazard studies]. *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Engineering seismology issues.], vol.29, Moscow, Nauka publ., 1988, pp. 119–124. (In Russ)
5. Semenov A. E., Zolototrubova E. I., Nadezhka L. I. Geodinamicheskaya pozitsiya Liskinskoi seismicheski aktivnoi zony Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Geodynamic position of the Liskinsky seismically active zone of the Voronezh crystalline massif]. *Materialy XI Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly «Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh»* [Materials of the XI International Seismological School "Modern methods of processing and interpretation of seismological data."]. Obninsk, 2016, pp. 311–314. (In Russ)
6. Semenov A. E., Efremenko M. A., Pivovarov R. S. Osobnosti volnovykh polei promyshlennykh vzryvov v krupnykh kar'erakh na territorii Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Features of wave fields of industrial explosions in large quarries on the territory of the Voronezh crystalline massif]. *Trudy XII Ural'skoi molodezhnoi nauchnoi shkoly po geofizike* [Proceedings of the XII of the Ural youth scientific school on geophysics.]. Perm, URO RAN, 2011, pp. 87–90. (In Russ)
7. Semenov A. E., Nadezhka L. I., Safronich I. N., Ezhova I. T. Kharakter i intensivnost' seismicheskikh vozdeistvii gornopromyshlennykh kompleksov na litosferu Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [The nature and intensity of seismic impacts of mining and industrial complexes on the lithosphere of the Voronezh crystalline massif]. *Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Struktura, veshchestvennyi sostav, svoystva, geodinamika i seismichnost' platformennykh territorii i sopredel'nykh regionov* [Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Struktura, veshchestvennyi sostav, svoystva, geodinamika i seismichnost' platformennykh territorii i sopredel'nykh regionov]. Voronezh, Pechatnyi dom publ., VGU, 2020, pp. 72–76. (In Russ)
8. Adushkin V. V., Spivak A. A., Solov'ev S. P., Pernik P. M., Kishkina S. B. Geoekologicheskie posledstviya massovykh vzryvov v kar'erakh [Geoecological consequences of massive explosions in quarries.]. *Geoekologiya – Geoecology*. 2000, no.6, pp. 554–563. (In Russ)
9. Spungin V. G., Pernik P. M. Osobnosti seismicheskogo efekta massovogo vzryva khimicheskogo VV [Features of the seismic effect of a mass explosion of a chemical explosive]. *Dinamicheskie protsessy v geosferakh pod vozdeistviem vneshnikh i vnutrennikh potokov energii i veshchestva* [Dynamic processes in geospheres under the influence of external and internal flows of energy and matter]. Moscow, IDG RAN, 1998, pp. 270–278. (In Russ)
10. Kishkina S. B., Spivak A. A. Lokal'nyi seismicheskii effekt kar'ernykh vzryvov [Local seismic effect of quarry]. *Fizicheskie protsessy v geosferakh: ikh proyavlenie i vzaimodeistvie* [Physical processes in the geospheres: their manifestation and interaction.]. Moscow, IDG RAN, 1999, pp. 111–116. (In Russ)

*Косинова Ирина Ивановна* – д. г.-м. н., профессор, заведующий кафедрой, экологической геологии, Воронежский государственный университет, Воронеж, РФ; E-mail: kosinova777@yandex.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9130-7926>

*Надѣжка Людмила Ивановна* – заведующий лабораторией сейсмического мониторинга ВКМ, Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН), Воронеж, РФ; E-mail: nadezhka\_ssm@geophys.vsu.ru

*Александр Евгеньевич Семѐнов* – младший научный сотрудник, Лаборатория сейсмического мониторинга ВКМ, ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН, Воронеж, Российская Федерация;

*Сафронич Игорь Николаевич* – младший научный сотрудник, Лаборатория сейсмического мониторинга ВКМ, ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН, Воронеж, Российская Федерация;

*Ежова Ирина Трофимовна* – Инженер-геофизик, Лаборатория сейсмического мониторинга ВКМ, ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН, Воронеж, Российская Федерация;

*Силкин Константин Юрьевич* – к.г.-м.н., доцент кафедры экологической геологии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация;

*Пивоваров Сергей Павлович* – научный сотрудник Лаборатория сейсмического мониторинга ВКМ, ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН, Воронеж, Российская Федерация;

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Irina I. Kosinova* – PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., Professor, Head of the Department of Environmental Geology, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: kosinova777@yandex.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9130-7926>

*Lyudmila I. Nadezhka* – Head of the Laboratory of Seismic Monitoring of VKM, "United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences" (FGBUN FITS EGS RAS), Voronezh, Russian Federation; E-mail: nadezhka\_ssm@geophys.vsu.ru

*Alexander E. Semenov* – Junior Researcher, Laboratory of Seismic Monitoring of VKM6, FGBUN FITS EGS RAS, Voronezh, Russian Federation;

*Igor N. Safronich* – Junior Researcher, Laboratory of Seismic Monitoring of VKM, FGBUN FITS EGS RAS, Voronezh, Russian Federation;

*Irina T. Ezhova* – Geophysicist Engineer, Лаборатория сейсмического мониторинга ВКМ, ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН, Воронеж, Российская Федерация;

*Konstantin Yu. Silkin* – PhD, Associate Professor of the Department of Environmental Geology, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation;

*Sergei P. Pivovarov* – research associate, Laboratory of Seismic Monitoring of VKM, FGBUN FITS EGS RAS, Voronezh, Russian Federation;

*All authors have read and approved the final manuscript.*