

DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.13.3.002

УДК 550.834

© А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев, А.А. Бах, А.В. Дураченко, Е.В. Шевкунова,  
Н.А. Серёжников, У.Ю. Ворона, 2019

**А.Ф. ЕМАНОВ**

д-р техн. наук,  
директор филиала  
Алтае-Саянский филиал  
ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,  
г. Новосибирск  
e-mail: emanov@gs.nsc.ru



**А.А. ЕМАНОВ**

канд. геол.-минерал. наук,  
заместитель директора по науке  
Алтае-Саянский филиал  
ФИЦ «Единая Геофизическая служба РАН»,  
г. Новосибирск;  
старший научный сотрудник  
Институт нефтегазовой геологии  
и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН  
e-mail: alex@gs.nsc.ru



**А.В. ФАТЕЕВ**

старший научный сотрудник  
Алтае-Саянский филиал  
ФИЦ «Единая Геофизическая служба РАН»,  
г. Новосибирск;  
ведущий инженер  
Институт нефтегазовой геологии  
и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН  
e-mail: fateev@gs.sbras.ru



**А.А. БАХ**

старший научный сотрудник  
Алтае-Саянский филиал  
ФИЦ «Единая Геофизическая служба РАН»,  
г. Новосибирск  
e-mail: abakh61@mail.ru



**А.В. ДУРАЧЕНКО**

научный сотрудник  
Алтае-Саянский филиал  
ФИЦ «Единая Геофизическая служба РАН»,  
г. Новосибирск  
e-mail: durachenko@gs.nsc.ru



**Е.В. ШЕВКУНОВА**

научный сотрудник  
Алтае-Саянский филиал  
ФИЦ «Единая Геофизическая служба РАН»,  
г. Новосибирск  
e-mail: elenash@gs.sbras.ru



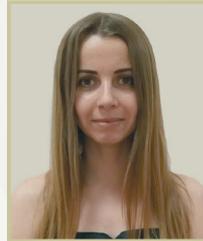
**Н.А. СЕРЁЖНИКОВ**

младший научный сотрудник  
Алтае-Саянский филиал  
ФИЦ «Единая Геофизическая служба РАН»,  
г. Новосибирск  
e-mail: bestyah21@mail.ru



**У.Ю. ВОРОНА**

научный сотрудник  
Алтае-Саянский филиал  
ФИЦ «Единая Геофизическая служба РАН»,  
г. Новосибирск  
e-mail: u.y.vorona@gmail.com



## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВМЕСТНОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГЕОСРЕДЫ И ОСОБО ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

*Рассмотрены возможности одновременного мониторинга наведённой сейсмичности, сейсмического эффекта промышленных взрывов и состояния зданий и сооружений после сейсмических воздействий. В 2019 году наиболее интенсивная наведённая сейсмичность фиксируется в районе Полысаево и шахты «Распадская». Наибольшее количество промышленных взрывов с магнитудами более 2,5 производится на разрезах в районе г. Междуреченска, на линии разрезов от Талды до Каракана, а также в районе разреза Бачатский. Наведённая сейсмичность в виде роёв событий в 2019 году зафиксирована около железнорудных шахт «Казская» и «Шерегешская». Метод стоячих волн показан как эффективный способ изучения физического состояния и сейсмостойкости зданий. На его основе предложен мониторинг ответственных сооружений с обнаружением нарушений конструкций в реальном времени.*

Ключевые слова: СЕЙСМОЛОГИЯ, НАВЕДЁННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ, СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ВЗРЫВОВ, КУЗБАСС, СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ, МОНИТОРИНГ ЗДАНИЙ, СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ СООРУЖЕНИЙ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ.

Современный уровень развития сейсмологии и инженерной сейсмологии требует пересмотра концепции контроля над сейсмической опасностью во времени. Основными задачами в обеспечении сейсмической безопасности являются:

- мониторинг крупных землетрясений в удалённой зоне (сотни километров), способных оказать сейсмическое воздействие на предприятие;
- мониторинг сейсмических событий средних энергий на удалении в десятки километров;
- фиксация наведённой сейсмичности на территории предприятия;
- мониторинг промышленных взрывов;
- анализ сейсмического воздействия на площади предприятий;
- инженерно-сейсмологический мониторинг особо ответственных зданий и сооружений.

В приложении к [1] по Кузбассу решение задач мониторинга на новом уровне вполне реализуемо по причине развития сети станций на территории Кемеровской области и вокруг неё. В целом методика мониторинга геосреды и особо ответственных зданий и сооружений должна содержать следующие блоки:

1. Мониторинг землетрясений.
2. Исследования наведённой сейсмичности около шахт и разрезов.
3. Мониторинг промышленных взрывов и контроль над эффективностью короткозамедленного взрывания.
4. Создание базы данных результатов инженерно-сейсмологического обследования особо опасных инженерных объектов.
5. Системы мониторинга особо опасных или ответственных зданий и сооружений.

Уровень разработки всех блоков находится на разном уровне, но любой из них является вполне пригодным для практического использования.

## Сейсмологический мониторинг землетрясений

Возможности сейсмологического мониторинга определяются существующей в регионе сетью сейсмологических станций. Кемеровская область и Республика Алтай наиболее обеспечены сейсмическими станциями, но даже такие сети не решают всех проблем определения сейсмической опасности территории. Следует отметить, что для изучения крупных землетрясений важны удалённые от очага сейсмические станции, а для изучения слабых землетрясений определяющее значение имеет плотность сети станций. Важно не пропустить возникающие сейсмические активизации на территории в виде землетрясений малых энергий. На самом деле, начиная с какого-то уровня энергий, сеть станций всегда пропускает наиболее слабые землетрясения. На рис. 1 представлена сеть сейсмологических станций, где указаны даты открытия станций. В Кемеровской области развитие сети происходило в последние два десятилетия [2, 3]. Подробно этапы повышения возможностей изучения землетрясений в Кузбассе представлены в работе [4]. Созданная сеть сейсмологического мониторинга Кузбасс позволила установить, что природная сейсмичность данной территории существенно уступает интенсивности наведённой сейсмичности.

Возможности мониторинга в Кемеровской области подробно рассмотрены в [4]. В данной работе рассмотрим текущие результаты мониторинга.

На рис. 2 представлена карта землетрясений в 2019 году на территории Кемеровской области. Наибольшее количество землетрясений происходит в районе г. Полысаево и в районе г. Междуреченска — Шахта «Распадская». Менее активны разрез Бачатский, разрез Краснобродский, разрез Талдинский, район разреза Караканский. Активизированным остаётся район подземной добычи угля около г. Новокузнецка. Значительно уменьшилось количество землетрясений в районе Калтанского угольного разреза.

Можно отметить, что наведённая сей-

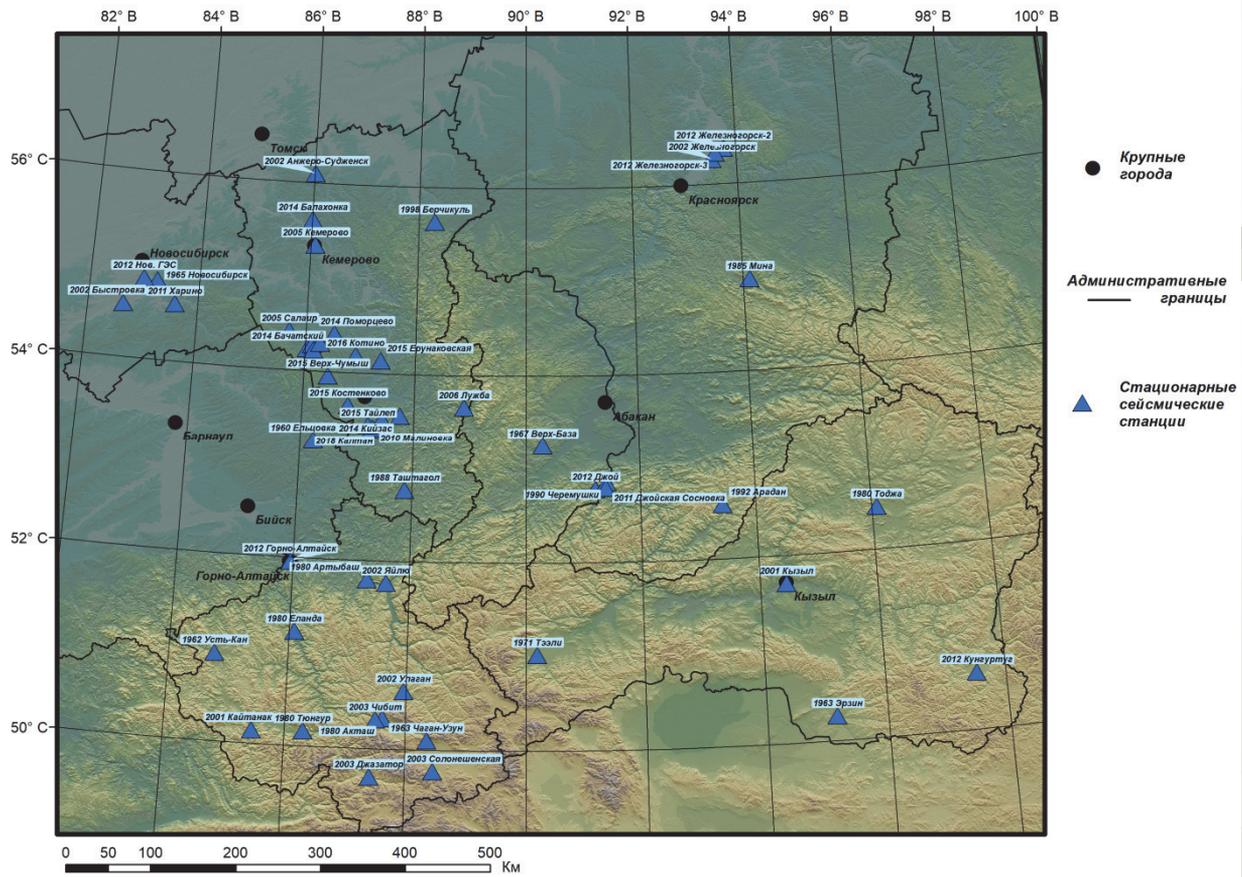


Рис. 1. Сеть сейсмологических станций в Алтае-Саянской горной области

смичность, как и в предыдущие годы, развивается в местах добычи полезных ископаемых. Сильное техногенное воздействие на земную кору вызывает сейсмическую активизацию недр. Без техногенного воздействия подобной активизации возникнуть не могло. Детальное изучение с временными сетями станций в районе Бачатского угольного разреза [5] позволило установить, что сейсмический режим техногенной активизации около разреза Бачатский непрерывен и нестационарен: выделяются периоды фонового уровня сейсмичности, пониженного по энергии сильнейших землетрясений и разреженной частотой

слабых событий, и периоды активизаций с сильными и крупными землетрясениями и увеличенной частотой слабых событий.

В целом мы наблюдаем пятнистую картину сейсмичности, увязанную с горными выработками и с изменяющимся во времени доминированием по числу землетрясений.

Следует обратить внимание на большое количество землетрясений в районе шахт по добыче железной руды. Сейсмическая активность среды около этих предприятий известна и в прошлые годы в связи с крупнейшим Таштагольским землетрясением 05.02.1988 [6, 7].

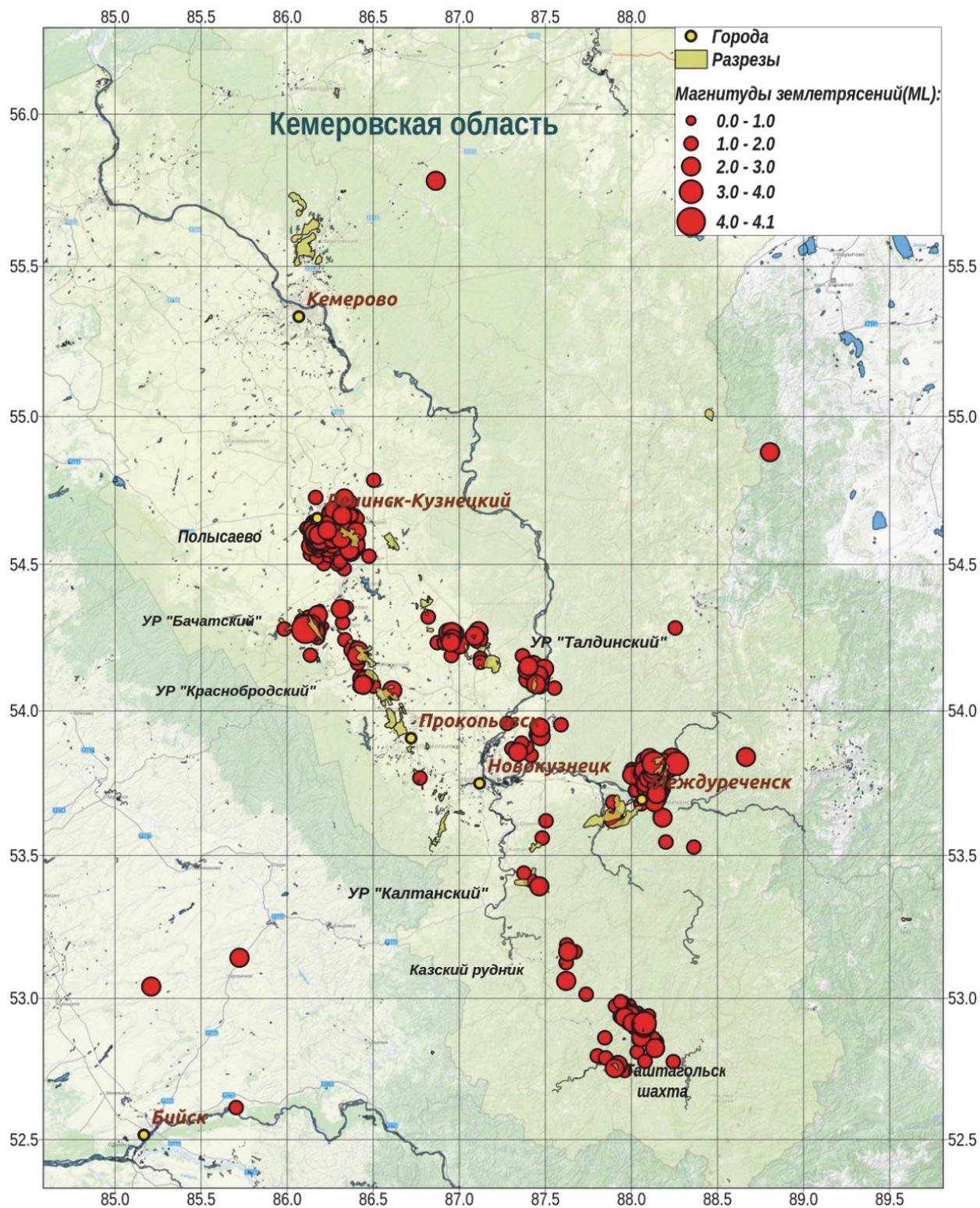


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений в Кузбассе, 2019 год (до 29 июля)

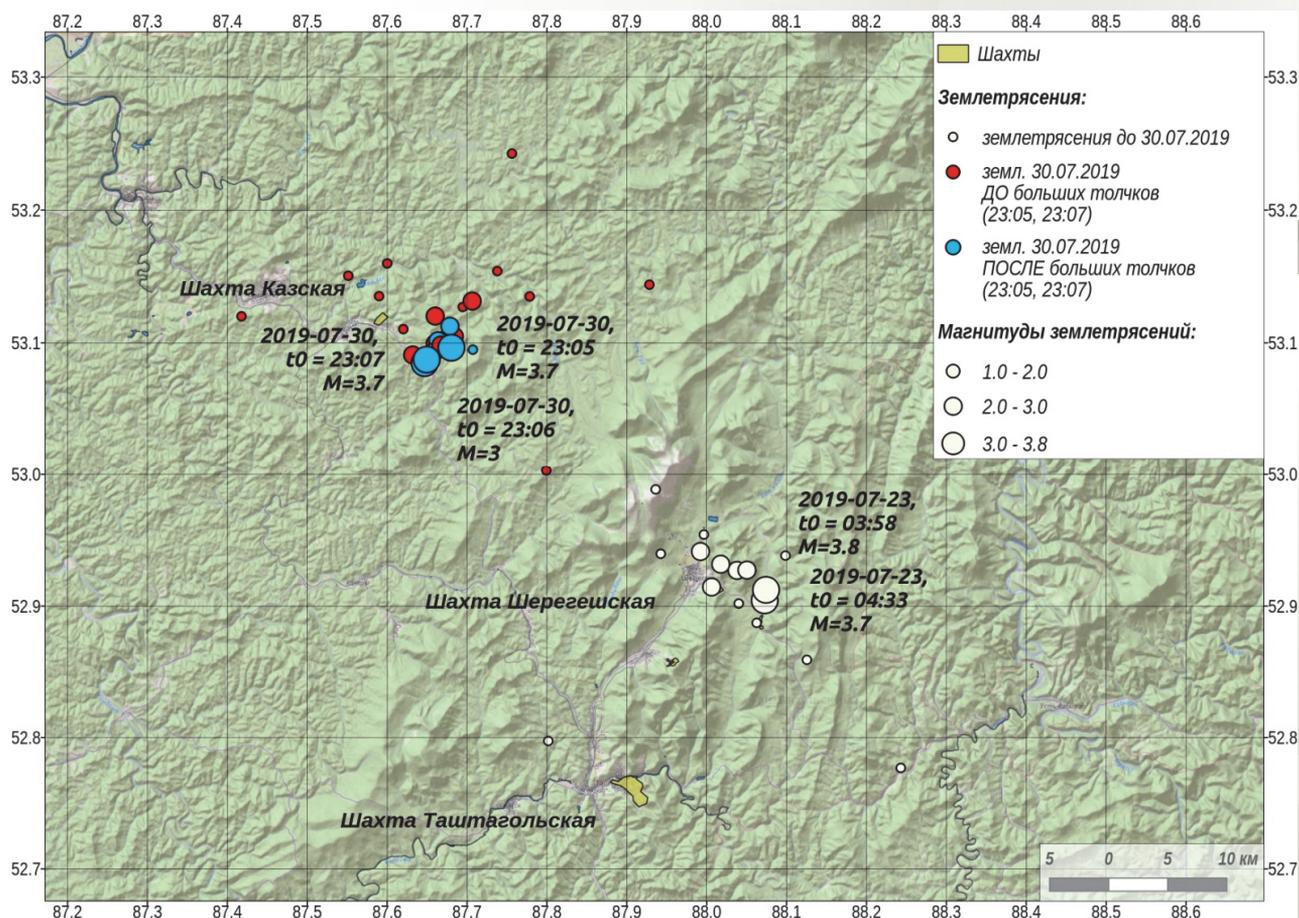


Рис. 3. Карты эпицентров землетрясений в районе железорудных шахт

На рис. 3 представлена карта эпицентров землетрясений июльской активизации 2019 года в районе железорудных шахт «Казская» и «Шерегешская». Медленное развитие сейсмического процесса в этом районе привело к тому, что сегодня достаточно детально изучены особенности наведённой сейсмичности около угольных шахт [8], характеристики наведённой сейсмичности около угольных разрезов [5], и нет данных о закономерностях развития наведённой сейсмичности около железорудных шахт, хотя исследования на железорудных шахтах начинались значительно раньше [7]. На шахте Таштагол много лет работает сеть регистрации горных ударов [3, 9], контролирующая сейсмический процесс в районе горных выработок и неориенти-

рованная на изучение наведённой сейсмичности, охватывающей довольно крупные блоки земной коры в районе горных предприятий.

На основе рассмотренных материалов можно сделать выводы, что наведённая сейсмичность за период квартала в значительной степени позволяет выделить большинство активизированных зон в Кузбассе, в то время как для изучения природной сейсмичности, связанной с тектоническими разломами, требуется более значительный интервал времени.

На рис. 4 отражено развитие сейсмического процесса в Кузбассе во времени. Каждая точка соответствует землетрясению в Кемеровской области, а магнитуда отражает энергию.

Диаграмма распределения землетрясений  
Кемеровской области

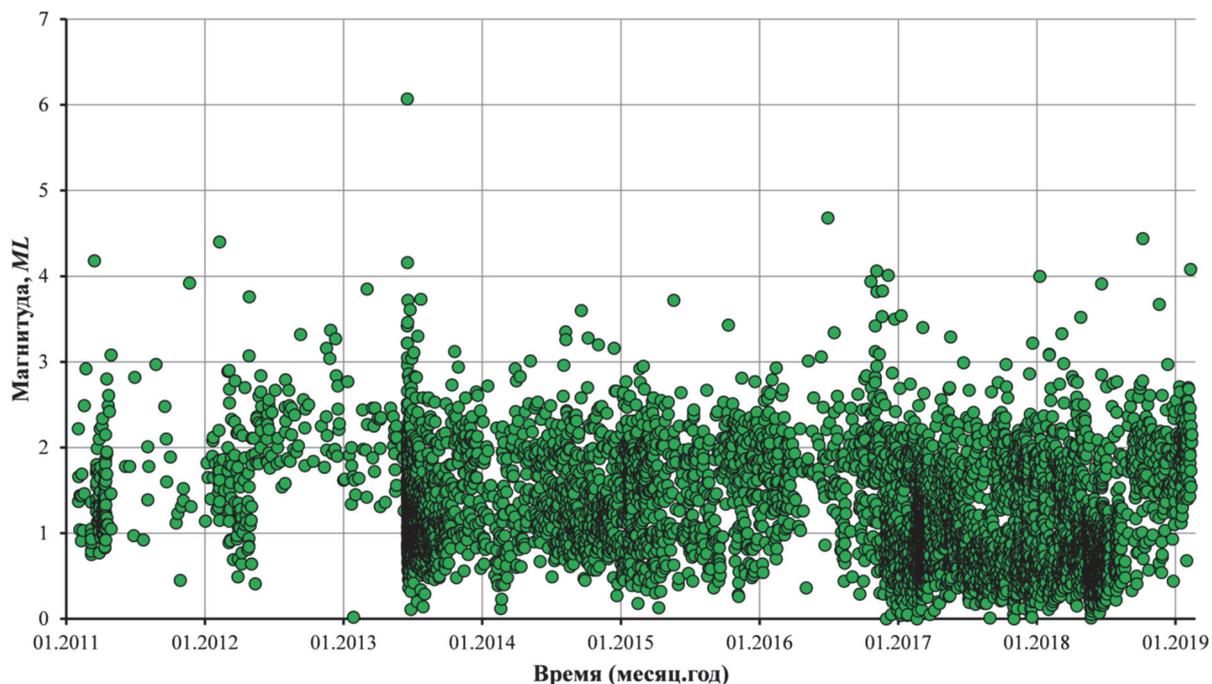


Рис. 4. Развитие сейсмического процесса во времени на территории Кемеровской области

Можно увидеть, что сейсмический процесс со временем усиливается: увеличивается количество слабых землетрясений и чаще происходят землетрясения с магнитудой 4 и более. При этом отмечается нестационарность процесса.

При большом количестве техногенных землетрясений в Кузбассе в последние годы самые крупные техногенные землетрясения происходили в Горловском месторождении угля около г. Новосибирска [10].

### Мониторинг промышленных взрывов

Сейсмическая сеть станций позволяет регистрировать все промышленные взрывы на территории Кузбасса и контролировать

техногенное сейсмическое воздействие на недра [4]. На территории Кемеровской области за 2018 год произведено около 9 тысяч промышленных взрывов, что существенно превышает количество землетрясений. Магнитуды взрывов изменяются в интервале  $0,5 \div 4$ .

Карта плотности взрывов с наибольшим сейсмическим эффектом за 2019 году представлена на рис. 5. Наибольшее количество взрывов с большим сейсмическим эффектом производится на разрезах в районе г. Междуреченска, на линии разрезов от Талды до Каракана, а также в районе разреза Бачатский. На других предприятиях количество взрывов с большими магнитудами (более 2,5) существенно меньше.

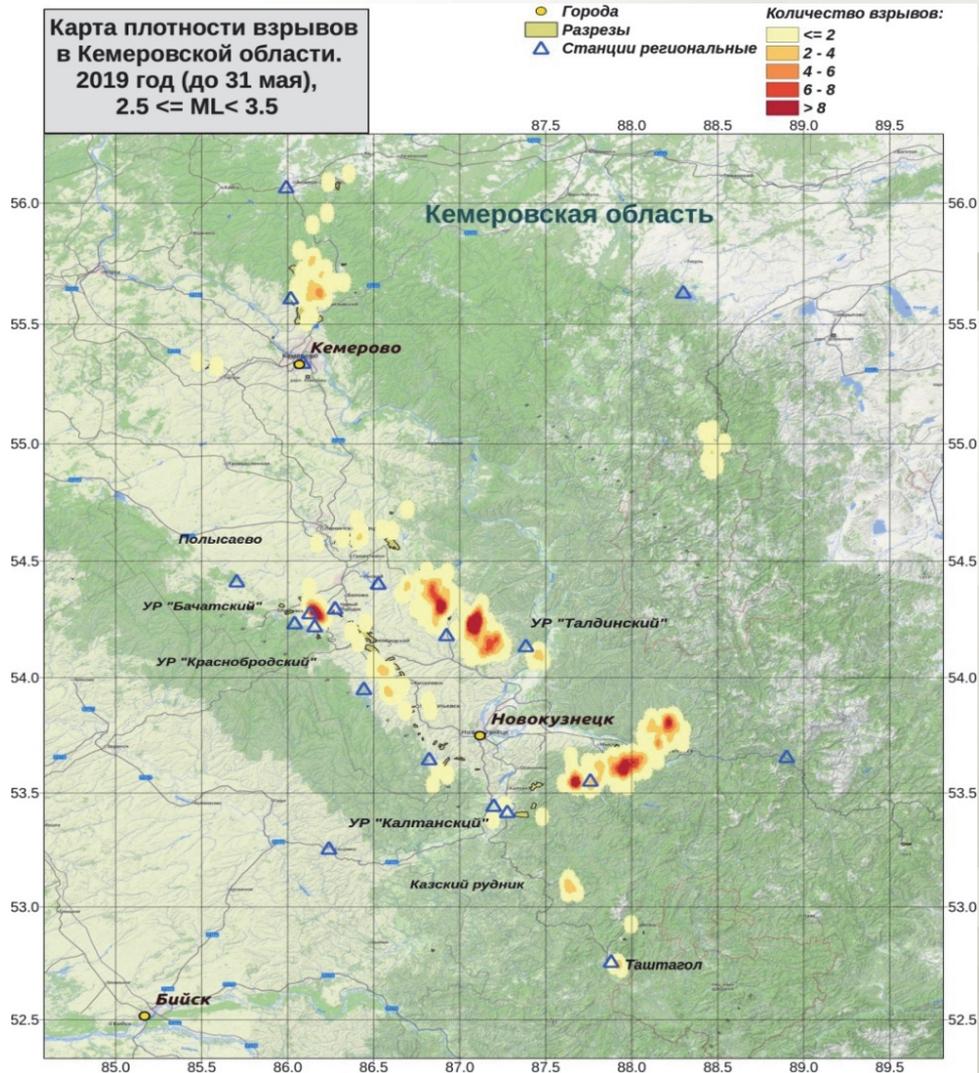


Рис. 5. Карта плотности взрывов с наибольшим сейсмическим эффектом (первая половина 2019 года). Локальные магнитуды 2,5 ÷ 3,5

Иначе выглядит карта плотности промышленных взрывов со средним уровнем сейсмического эффекта с магнитудами 1,5 ÷ 2,5 (рис. 6). Чаще всего такие взрывы происходят на разрезах Киселёвский и Талдинский, но при этом такой уровень сейсмического эффекта взрывов характерен и для многих других разрезов. Взрывы с магнитудами менее 1,5 фиксируются далеко не во всех разрезах. Наибольшее число таких взрывов в Бачатском и Талдинском разрезах, но они не являются доминирующими.

Как известно [4, 11, 12], короткозамедленное взрывание при правильном его применении должно обеспечивать сейсмический эффект, не зависящий от общей массы заряда и количества ступеней взрыва. Наличие большого различия в магнитудах взрывов в Кузбассе говорит о наличии ошибок в схемах инициирования взрывов. Сейсмический эффект от взрывов и воздействие на недра, посёлки и города может быть существенно снижен на территории Кузбасса.

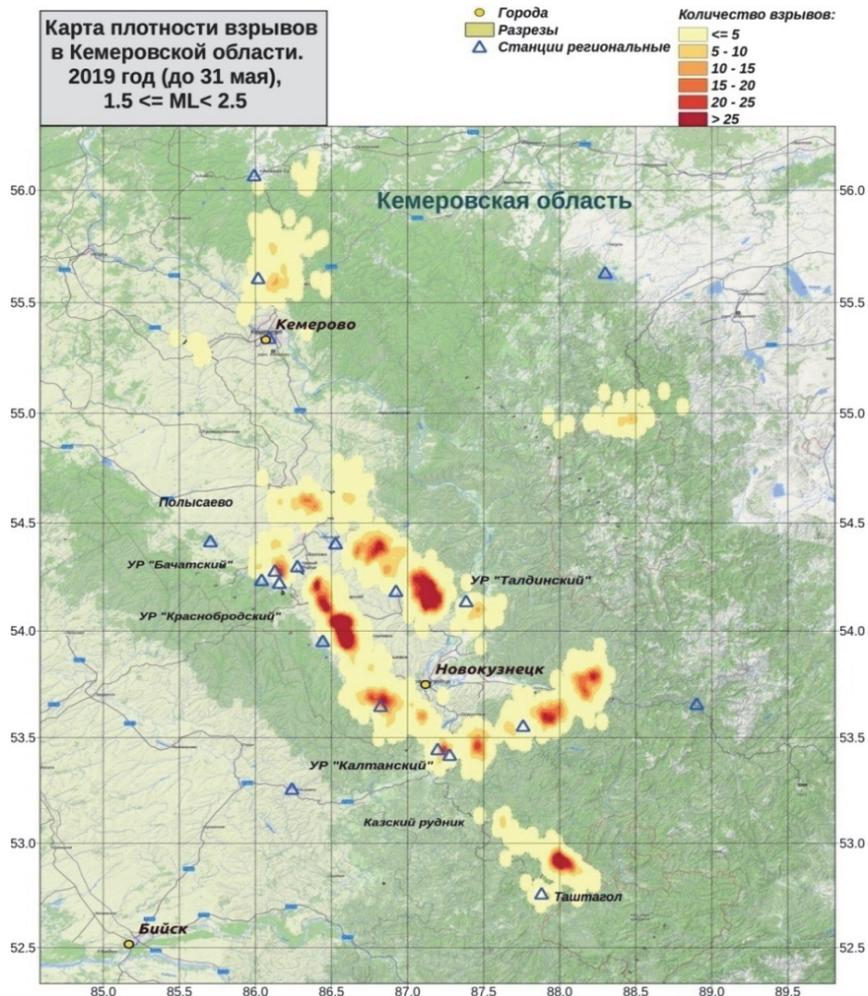


Рис. 6. Карта плотности взрывов со средним сейсмическим эффектом (первая половина 2019 года).  
Локальные магнитуды 1,5 ÷ 2,5

С частью предприятий, выполняющих взрывные работы на территории Кемеровской области, достигнуто соглашение о получении информации о параметрах короткозамедленных взрывов.

В данной работе мы приведём только два примера контроля над качеством короткозамедленного взрывания на разрезах.

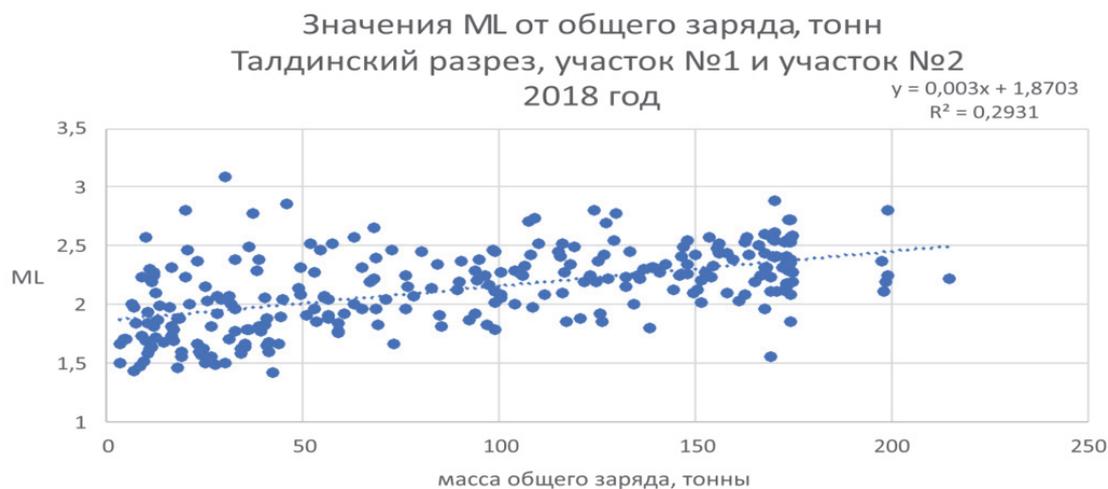


Рис. 7. Зависимость магнитуды взрыва от массы общего заряда

Первая зависимость соответствует разрезу Талдинский за 2018 год (рис. 7). Особенностью полученной зависимости являются два факта: наличие больших магнитуд у взрывов с зарядами менее 50 т, что говорит о грубых нарушениях при производстве небольших взрывов; наклон средней линии для зависи-

мости магнитуды от величины общего заряда. Понятно, что это обеспечивается наложением во времени подрыва некоторых скважин в разных рядах. Наличие наклона в зависимости позволяет легко спрогнозировать средние магнитуды при увеличении допустимых общих зарядах взрывов.

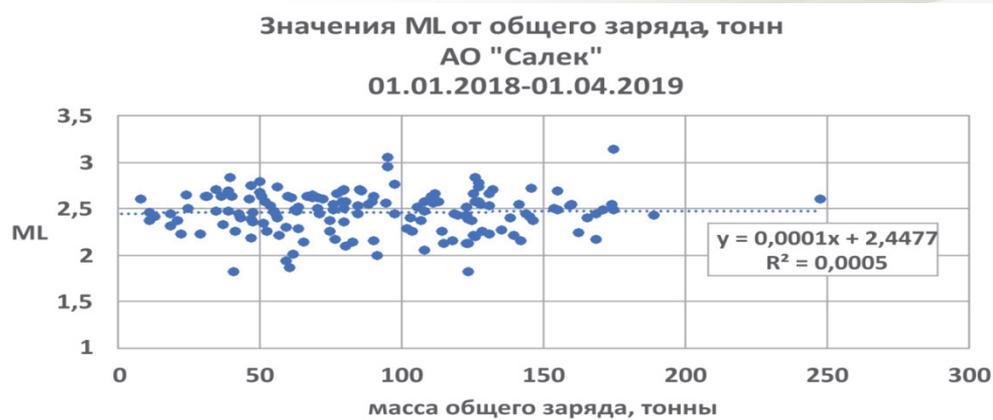


Рис. 8. Зависимость магнитуды от величины общего заряда короткозамедленного взрыва АО «Салек», Разрез Восточный

На рис. 8 представлена зависимость магнитуды от величины общего заряда для разреза Восточный, где в среднем нет роста магнитуд с увеличением заряда взрыва. Совершенно ясно, что при таком взрывании увеличение допустимой общей массы заряда к увеличению сейсмического эффекта не приводит.

Показательным для обеспечения возможностей снижения сейсмического эффекта за счёт короткозамедленного взрывания являются два опытных взрыва в разрезах Кедровский и Черниговский, расположенных рядом друг с другом.

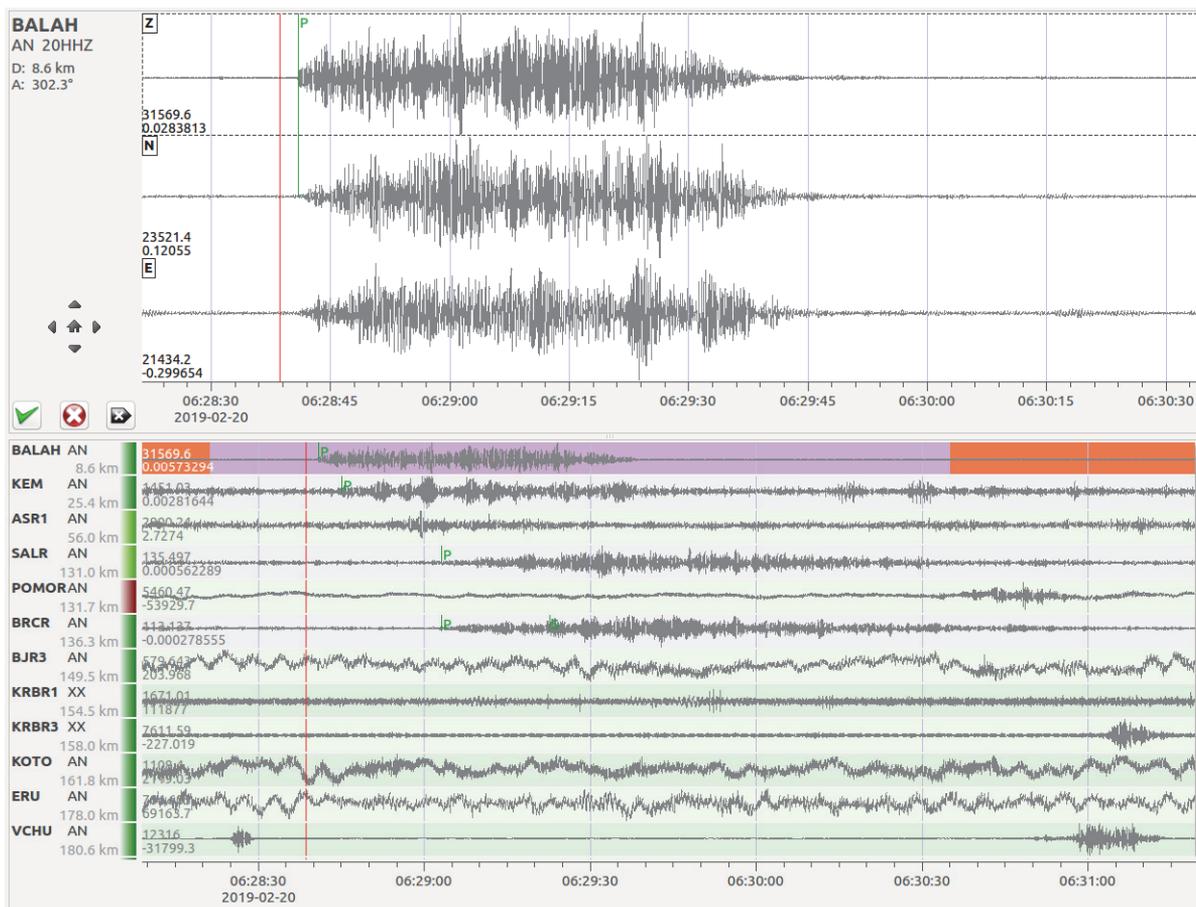


Рис. 9. Сейсмограммы взрыва на Кедровском разрезе. На удалениях 8,6 ÷ 180,6 км. Трёхкомпонентная запись на станции около разреза и записи вертикальной компоненты на удалённых станциях

На рис. 9 представлены сейсмограммы опытного взрыва на разрезе Кедровский 20 февраля 2019 года. Общая масса взрывчатых веществ 312 тонн. Ближайшая станция на удалении 8,6 км записала довольно ровное по амплитуде сейсмическое колебание длительностью более 45 секунд. На таком удалении сейсмическая запись взрыва длится первые секунды. В данном случае длительность записи определяется длительностью серии взрывов, входящих в короткозамедленный взрыв.

Нижний блок — это монтаж вертикальных компонентов с сейсмологических станций на разных удалениях. Запись промышленного взрыва превышает уровень фона на удалениях до 136 км от источника. Большая часть территории Кузбасса такой взрыв не ощущала. Магнитуда взрыва, определенная по сети станций,  $M_L = 1,86$ .

Иной результат получен при опытном взрыве на разрезе Черниговский. Взрыв

470 тонн, 20 февраля 2019 года  $M_L = 2,5$ . Ожидался примерно одинаковый сейсмический эффект промышленных взрывов, но получились существенные различия.

На рис. 10 приведены сейсмограммы второго опытного взрыва. Трёхкомпонентная сейсмограмма для удаления 6,2 км позволяет понять причину возникших различий. Длительность сейсмической записи на этом удалении полностью определяется длительностью взрыва. На записи видно, что первые 8 секунд уровень амплитуд значительно ниже, чем на последующей части сейсмограммы. Взрыв начинался с существенно меньшим сейсмическим эффектом, и лишь по истечении 8 секунд началось усиление колебаний. Магнитуда взрыва и сейсмический эффект в целом в данном случае определяются взрывами после 8 секунд замедления. Именно в это время сделаны ошибки в параметрах инициирования.

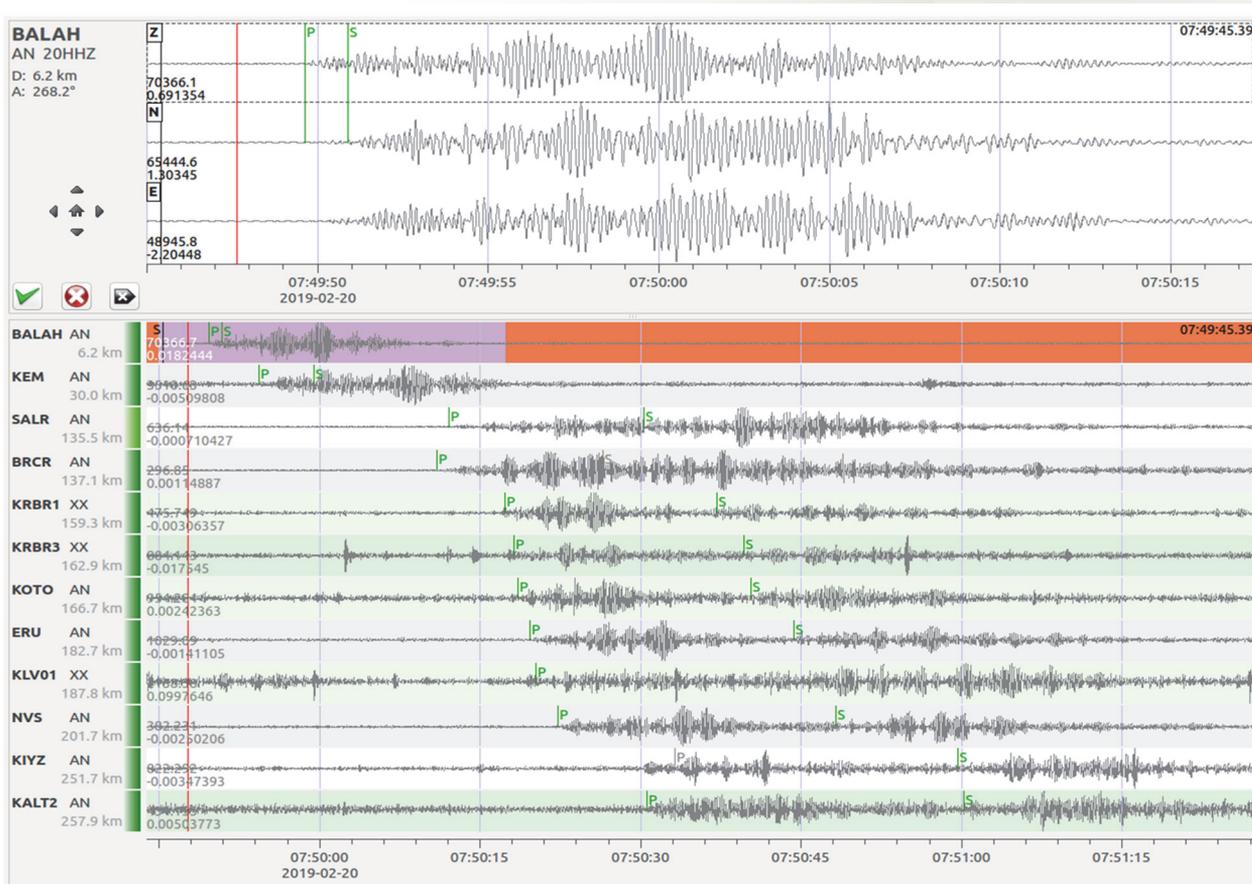


Рис. 10. Сейсмограммы взрыва на Черниговском разрезе. На удалениях 6,2 ÷ 257,9 км. Трёхкомпонентная запись на станции около разреза и записи вертикальной компоненты на удалённых станциях

Все записи на удалениях до 257,9 км взрыва в Черниговском разрезе имеют высокое соотношение сигнал/шум. Данный взрыв оказывает более существенное сейсмическое воздействие на территорию Кузбасса, чем предыдущий.

Поскольку рассмотренные взрывы были опытными, т. е. выполнялись как показательные перед представителями горных предприятий, Ростехнадзора и власти, интересными

представляются данные взрывы в сравнении с рядовыми производственными взрывами.

На рис. 11 представлена зависимость магнитуды от массы заряда, красным цветом отмечено положение опытных взрывов. Оказывается, худший из опытных взрывов выполнен на уровне лучших из рядовых, производственных взрывов, а лучший опытный взрыв является просто рекордным по снижению сейсмического эффекта.

Значения  $M_L$  от общего заряда, тонн. Разрез Черниговский, 3-4 квартал 2017 (синие маркеры) и экспериментальные взрывы 20.02.2019 (красные маркеры)

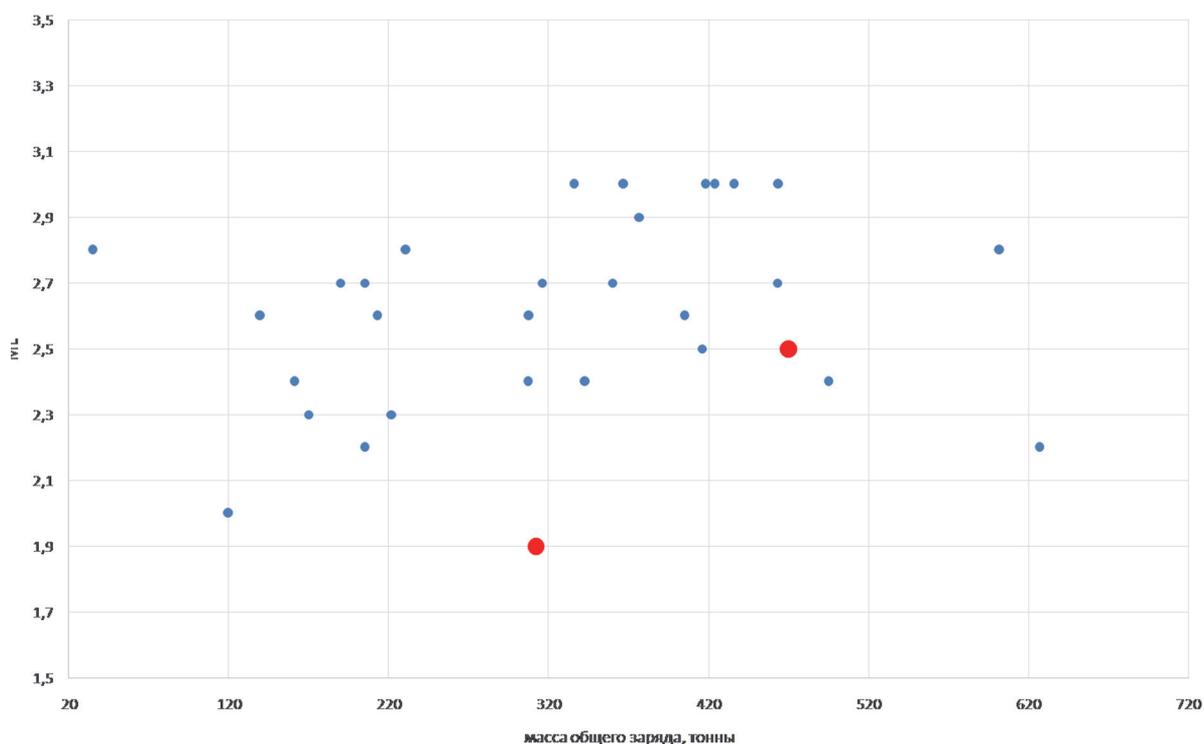


Рис. 11. Зависимость локальной магнитуды взрыва от массы заряда

Опытные работы с короткозамедленным взрыванием продемонстрировали существование резервов в снижении сейсмического эффекта взрывов за счет тщательного подбора параметров взрывания. Учитывая большое количество промышленных взрывов в Кузбассе, можно рассчитывать на ослабление сейсмического воздействия на здания и сооружения.

### Инженерно-сейсмологический мониторинг зданий и сооружений

Здания и промышленные предприятия в Кузбассе постоянно подвергаются интенсивным сейсмическим воздействиям как от землетрясений, так и от промышленных взрывов. В ряде случаев здания получают повреждения, поэтому необходима инструментальная оценка их сейсмостойкости и надёжности, а для особо ответственных объектов необходимо создание систем мониторинга [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

Любой мониторинг объекта предполагает наличие информации о начальных его характеристиках. В данной работе для детального обследования зданий и определения их состояния применяется метод стоячих волн [21, 22].

В работах [21, 22] обосновывается методика наблюдений за микросейсмами в зданиях, создаётся математическая модель волнового поля, строятся алгоритмы, позволяющие выделить стоячие волны в чистом виде и преобразовывать их из разновременных наблюдений в одновременные записи стоячих волн на плотной системе наблюдений, покрывающей заданную площадь или объём. Поскольку стоячие волны представляют собой монохроматические колебания с некоторой добротностью, определяющей затухание колебаний во времени, то множество мод колебаний из общего поля отфильтровываются друг от друга и строятся карты для каждой из мод: амплитуд колебаний, фаз колебаний,

добротности, когерентности. Построенный набор карт является основой для качественной интерпретации физического состояния здания по стоячим волнам.

В основе модели сейсмических колебаний произвольных точек здания заложено представление о том, что колебания каждой точки состоит из суммы двух составляющих, где первая составляющая — стоячие волны, а вторая — бегущие волны; при этом делаются следующие предположения:

При воздействии микросейсмических колебаний на здание отличия формирующихся в нём стоячих волн, зарегистрированных в двух произвольных точках, описываются линейной системой, характеристика которой не зависит от времени.

При воздействии микросейсмических колебаний на здание отличия бегущих волн, зарегистрированных в двух произвольных точках, не могут быть описаны линейной системой, характеристика которой не зависит от времени.

Линейные связи в изменениях стоячих волн, регистрируемых в двух точках, существуют для каждой пары одноимённых компонент регистрируемых колебаний.

Модель связи колебаний, регистрируемых в двух разных точках на поверхности грунта, примет вид

$$\bar{F}_0(t) = F_0(t) + W_0(t), \quad \bar{F}_i(t) = F_0(t) * h_{0i}(t) + W_i(t), \quad (1)$$

где  $h_{0i}(t)$  — импульсная характеристика линейной системы, описывающей связь между одновременными записями стоячих волн в точках 0 и  $i$  на заданной площадке,  $W(t)$  — бегущие волны,  $F_0(t)$  — запись стоячей волны в опорной точке.

Для модели (1) получают одновременные записи стоячих волн из разновременных, последовательных наблюдений с опорной точкой. Процедура обработки в таком случае сводится к следующим операциям:

1. Нахождение частотных характеристик линейных систем  $h_{0i}(\omega)$ .

2. Запись или формирование независимой реализации процесса колебаний опорной

точки при сейсмическом воздействии на исследуемый объект.

3. Пересчёт стоячих волн из опорной точки с использованием  $h_{0i}(\omega)$  во все точки обследуемого объекта.

Характеристика  $h_{0i}(\omega)$  в виде оптимального фильтра Винера [21, 22, 23], преобразующего сигнал  $\bar{F}_0(t) = F_0(t) + W_0(t)$  в запись стоячей волны в точке  $i$ , найдена как результат минимизации по  $h_{0i}(t)$  математического ожидания квадрата ошибки между сигналом  $\bar{F}_0(t)$ , пропущенным через фильтр, и сигналом  $F_i(t)$ , являющимся выходом линейной системы.

$$M \left| F_i(t) - \bar{F}_0(t) * h_{0i}'(t) \right|^2 = \min. \quad (2)$$

Взяв производную по  $h_{0i}'(t)$  от данного выражения и приравняв её к нулю, после преобразований было получено:

$$h_{0i}'(\omega) = \frac{R_{0i}(\omega)}{R_0(\omega)} = \frac{M \left[ F_i(\omega) \bar{F}_0^*(\omega) \right]}{M \left| \bar{F}_0(\omega) \right|^2}. \quad (3)$$

Усреднение спектров осуществляется разбиением реализации колебаний, записанных одновременно на  $n$  блоках. Разбив на непрерывающиеся блоки запись, получаем множество реализаций, по которым можно осуществить усреднение. Формула для расчёта фильтра Винера, обеспечивающего пересчёт колебаний из опорной точки в  $i$ -ю, примет вид:

$$h_{0i}'(\omega) = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{F}_i(\omega) \bar{F}_0^*(\omega)}{\sum_{j=1}^n \left| \bar{F}_0(\omega) \right|^2}. \quad (4)$$

Формула (4) позволяет вести расчёт характеристики фильтра с погрешностью, которая зависит от следующих параметров наблюдений: шаг дискретизации по времени —  $\Delta t$ , длина единичного блока —  $T$ , количество блоков в записи —  $n$ . Выбор первых двух параметров не вызывает затруднений. Шаг дискретизации увязывается с частотным диапа-

зоном, в котором изучается реакция объекта на сейсмическое воздействие. Длина единичного блока связана с необходимым разрешением спектрального анализа  $\Delta f = 1/T$ . Сложнее стоит вопрос о количестве блоков. Расчёт по формуле (4) — лишь некоторая оценка характеристики фильтра, погрешность которой зависит от количества блоков  $n$  и соотношения энергии шумов и полезных сигналов в модели (1).

Для оценки количества блоков, необходимых для обеспечения заданной погрешности фильтра, полезен спектр когерентности  $\gamma(\omega)$ , который можно рассчитать по записям микросейсмических колебаний в двух точках обследуемого объекта по формуле

$$\gamma^2(\omega) = \frac{|R_{0i}(\omega)|^2}{R_{00}(\omega)R_{ii}(\omega)}, \quad (5)$$

где  $R_{00}(\omega)$  — спектр автокорреляционной функции колебаний, записанных в опорной точке,  $R_{ii}(\omega)$  — то же в  $i$ -й точке.

В предположении о независимости реализаций шумов на входе и выходе линейной системы и их некоррелированности с полезными сигналами получим:

$$\gamma^2(\omega) = \frac{1}{(1 + \alpha_0(\omega))(1 + \alpha_i(\omega))}, \quad (6)$$

где  $\alpha_0(\omega) = \frac{M|W_0(\omega)|^2}{M|F_0(\omega)|^2}$ ,  $\alpha_i(\omega) = \frac{M|W_i(\omega)|^2}{M|F_i(\omega)|^2}$  —

отношения средневзвешенных квадратов шум/полезный сигнал в опорной и  $i$ -й точках.

Из формулы (6) следует, что спектр когерентности зависит только от отношения энергии бегущих волн к энергии стоячих волн. Спектр когерентности может быть рассчитан по одновременным записям в любой паре точек обследуемой площадки. Значения  $\gamma(\omega)$  лежат в диапазоне  $0 \div 1$ . Единица соответствует случаю, когда в двух точках регистрируются только стоячие волны. При  $\gamma(\omega) = 0$  в двух точках площадки регистрируются только бегущие волны.

Для зданий экспериментами доказано, что значения спектра когерентности на собственных частотах инженерных сооружений высоки — 0,8–0,99, а в промежутке между ними соответствуют значениям 0,1–0,3. Алгоритм обработки стоячих волн является симбиозом фильтра Винера и свойства когерентности стоячих волн. Подробное описание алгоритмов оценки точности можно найти в работе [21]. Среднеквадратическая ошибка фазовой характеристики фильтра для пересчёта стоячих волн из опорной точки

$$\text{в } i\text{-тую будет равна } \sigma_{\theta}(\omega) \approx \frac{\sqrt{1 - \gamma_{oi}^2(\omega)}}{|\gamma_{oi}(\omega)|\sqrt{2n}}.$$

Относительная ошибка амплитудной характеристики фильтра равна

$$\varepsilon \left[ |h_{oi}'(\omega)| \right] = \frac{\sigma[h_{oi}'(\omega)]}{|h_{oi}(\omega)|} \approx \frac{\left[ 1 - \gamma_{oi}^2(\omega) \right]^{1/2}}{|\gamma_{oi}(\omega)|\sqrt{2n}}, \quad (7)$$

где  $\sigma[h_{oi}'(\omega)]$  — среднеквадратическое отклонение оценки частотной характеристики фильтра.

Из этих формул заданная точность и число блоков могут быть увязаны после вычисления значения спектра когерентности на собственных частотах. Количество блоков определяет длину реализации, записанную в каждой точке обследуемой площадки, и существенно влияет на производительность работ. Точность восстановления поля стоячих волн будет зависеть от значений когерентности и от длительности регистрации.

Метод стоячих волн эффективен при исследовании зданий как простой конструкции, так и сложной [2, 24]. Под объектами сложных конструкций будем понимать:

- здания и сооружения, имеющие внутри конструкции отражающие границы, создающие кроме общего поля стоячих волн локальные поля;
- здания и сооружения с непрямоугольной конструкцией;
- здания и сооружения с несущими стенами комбинированной конструкции;
- блочные конструкции зданий и сооружений.

## Экспериментальные исследования зданий с явными нарушениями

В любом случае за методом стоячих волн при его детальности и разрешенности анализа всегда остаётся задача диагностики физического состояния.

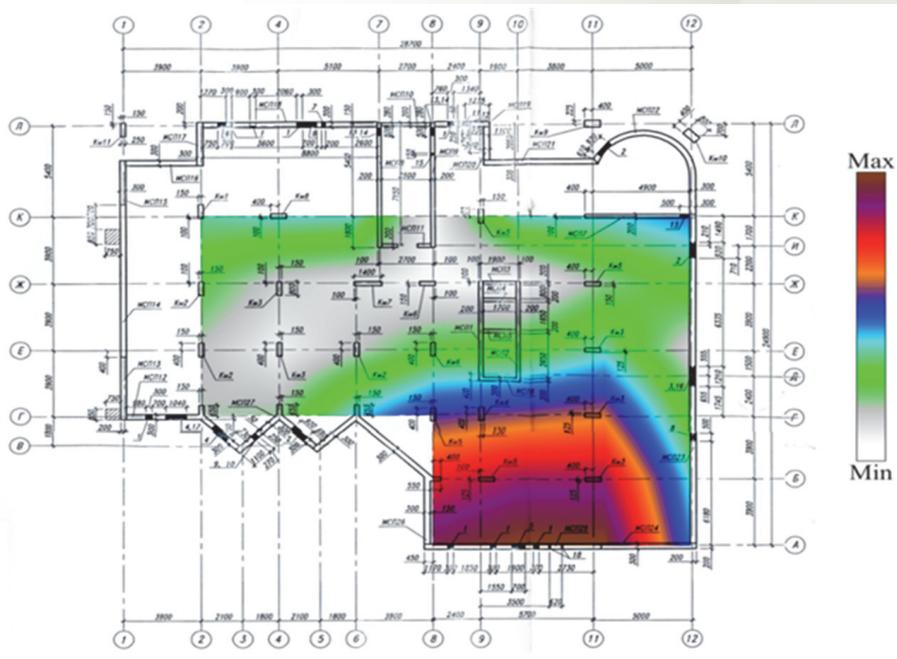


Рис. 12. Мода собственных вертикальных колебаний фундаментальной плиты жилого дома на ул. Урицкого. Частота 7,86 Гц

Метод стоячих волн позволяет обнаруживать возникновение опасных нарушений в здании на ранних стадиях. На рис. 12 представлены карты амплитуд вертикальных колебаний для стоячей волны в здании, рядом с которым вырыт котлован для строительства

нового здания. Мы видим усиленные колебания части здания рядом с котлованом. Здание прореагировало на грунтовые изменения рядом с ним и, безусловно, произошли изменения в здании, которые можно оценивать как ущерб.



Карта амплитуд продольных колебаний крыльца здания на частоте 16.70 Гц

Из-за неравномерной просадки грунта произошло частичное разрушение строительных конструкций крыльца здания. В результате сформировались стоячие волны, характеризующие не все здание целиком, а только его часть, ограниченную трещинами.

Усиление крыльца металлическими конструкциями

Рис. 13. Дефект конструкции из-за проседания грунта

На рис. 13 представлен случай, когда из-за проседания здания трещинами отделён элемент конструкции, в котором сформировалось локальное поле стоячих волн. Ремонтные работы без устранения резонансного усиления колебаний в парапете не приведут к желаемому результату.

**Здания и сооружения, имеющие внутри конструкции отражающие границы, которые создают кроме общего поля стоячих волн локальные**

Наличие мощных локальных стоячих волн в здании весьма серьёзно может менять сейсмостойкость объекта. Примером явля-

ются здания с сейсмозащитой [25, 26, 27], в которых появляются элементы, разделяющие конструкцию и приводящие к образованию дополнительных мод стоячих волн в части здания [2]. Ярким примером является сравнение результатов обследования двух рядом стоящих зданий одной конструкции, но одно с гибким первым этажом, а другое без [2]. Большинство мод по кратности, разложенной по двум волновым числам, имеют соответствующие друг другу и описывают колебания конструкции зданий в целом; и только две моды присущи только одному зданию с гибким этажом. Это собственные колебания конструкции здания выше гибкого этажа.

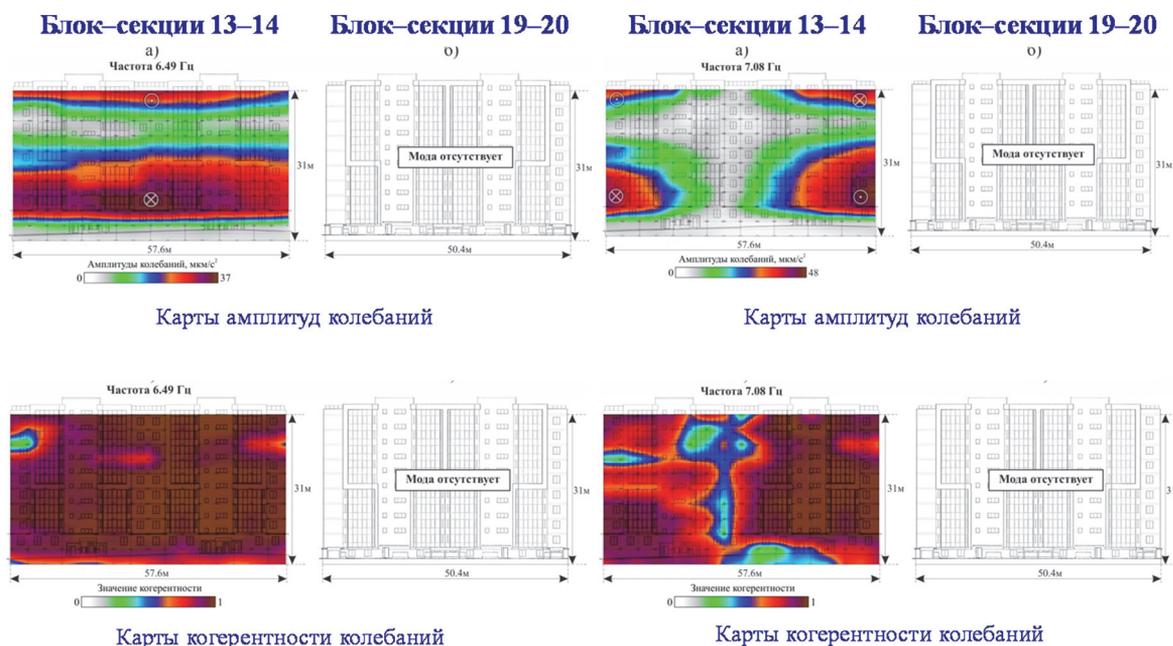


Рис. 14. Собственные колебания здания над гибким этажом (Еманов А.Ф., Красников А.А., 2015). а) мода (1,2); б) мода (2,2)

На картах амплитуд (рис. 14 а) видно, что собственные колебания начинаются над первым гибким этажом, а горизонтальные узловые линии проходят на уровне 2/3 высоты от

начала второго этажа. Мы имеем дело с колебаниями, где закреплён низ и не закреплёны верх и боковые грани здания.

Таблица 1

Собственные частоты колебаний блок-секций 13–14 и 19–20

Блок-секции 13–14		Блок-секции 19–20	
Частота, Гц	Описание	Частота, Гц	Описание
2,15	Поперечная мода (1,1)	2,54	Поперечная мода (1,1)
2,34	Поперечная мода (2,1)	2,78	Поперечная мода (2,1)

Блок-секции 13–14		Блок-секции 19–20	
Частота, Гц	Описание	Частота, Гц	Описание
2,69	Продольная мода (1,1)	3,08	Продольная мода (1,1)
6,49	Поперечная мода (1,2)	Мода отсутствует	
7,08	Поперечная мода (2,2)	Мода отсутствует	
7,81	Продольная мода (1,2)	9,57	Продольная мода (1,2)
8,06	Поперечная мода (3,1)	8,89	Поперечная мода (3,1)
10,89	Поперечная мода (3,2)	12,99	Поперечная мода (3,2)
12,99	Поперечная мода (4,2)	14,55	Поперечная мода (4,2)

В табл. 1 приведены собственные частоты колебаний блок-секций 13–14 и 19–20. В графе «Описание» приведены краткие характеристики собственных колебаний, содержащие информацию о направлении смещений, количестве пучностей и взаимном расположении узловых линий (линий смены фаз колебаний) [2]. Можно видеть, что для одинаковых конструкций в зданиях существуют только однотипные моды, кроме двух мод, возникших

из-за отражающей границы между гибким этажом и остальной частью здания. При одной и той же кратности отличия собственных частот однотипных мод здания вызваны двумя причинами, во-первых, гибкий этаж вводится в здание с целью изменить собственные частоты, во-вторых, даже в однотипных зданиях существуют некоторые отличия по причине реального исполнения строительства.

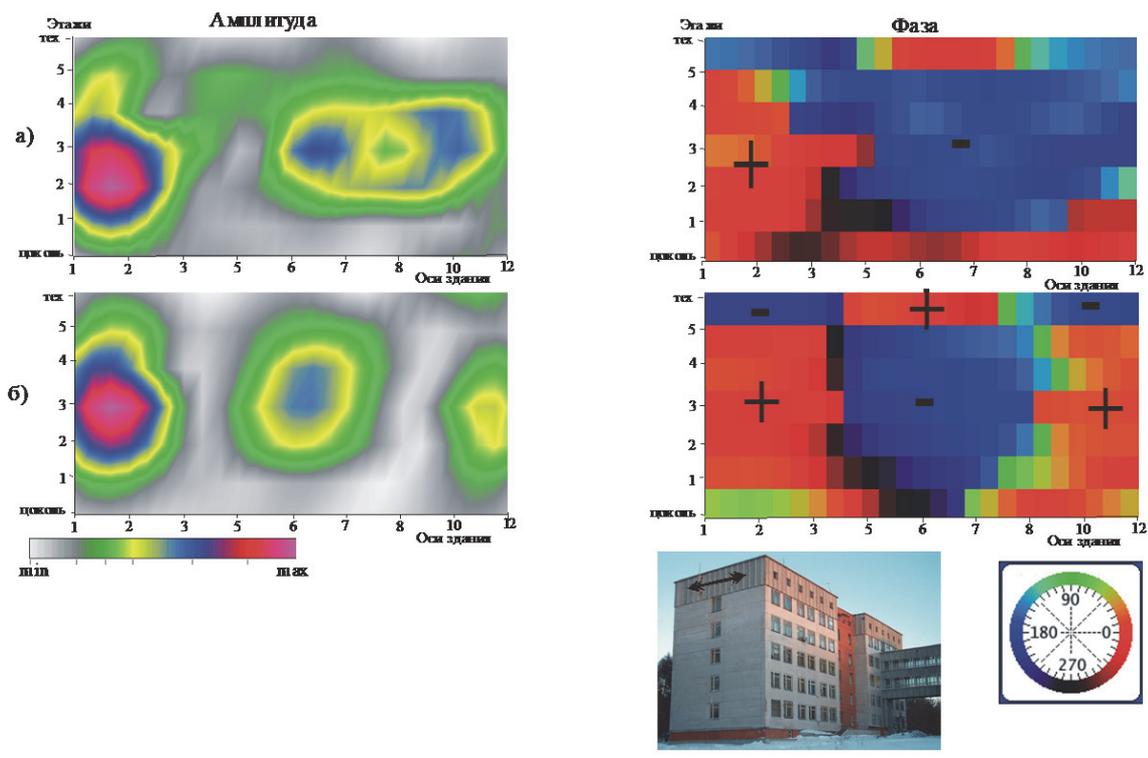


Рис. 15. Карты амплитуд и фаз колебаний для мод центральной части здания  
а) мода поперечных колебаний (2,1) и б) мода (3,1)

На рис. 15 представлены карты амплитуд и фаз стоячих волн двух из ряда наблюдавшихся стоячих волн в здании. На фотографии здания можно видеть, что чердачный этаж

отличается по конструкции от основных этажей здания, также имеется подвальный этаж со своей конструкцией. Область существования представленных на рис. 13 стоячих волн

хорошо видна на картах фаз. Видно, что фазовая картина для верхнего этажа и подвала иная, чем для центральной части здания, а по картам амплитуд ясно, что мы имеем дело с собственными колебаниями между двух отражающих границ внутри здания. При этом внутренние границы характеризуются как зажатые. По данным стоячих волн, свободно колеблются только боковые стены здания. В этом же здании существуют стоячие волны для здания в целом, как бы не замечающие существования промежуточных границ. Для полного анализа физического состояния здания с отражающими границами необходимо получать полную информацию о собственных колебаниях объекта.

### Здания и сооружения с не прямоугольной конструкцией

Простыми для понимания являются стоячие волны в зданиях прямоугольной формы, но далеко не все объекты являются такими. Ещё одним вариантом сложных объектов яв-

ляются геометрически сложные и блочные конструкции. К таким конструкциям относятся прежде всего плотины ГЭС. Строения в виде трапеции, когда верх шире, чем низ, создают уникальные условия для формирования полей собственных колебаний. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС [28] по ряду мод имеет картину изменения кратности по горизонтали с высотой плотины. Для описания такого эффекта достаточно двух волновых чисел (кратность по вертикали, кратность по горизонтали).

На рис. 16 приведены данные по амплитудам и фазам двух мод стоячих волн в теле плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Именно для этих мод ярко проявляется эффект смены горизонтальной кратности по вертикали. Гораздо ярче этот эффект прослеживается на картах фаз стоячих волн. Следует отметить, что большие здания и плотины ГЭС являются уникальными объектами, для каждого из которых метод стоячих волн позволяет видеть неповторимые картины собственных колебаний (стоячих волн).

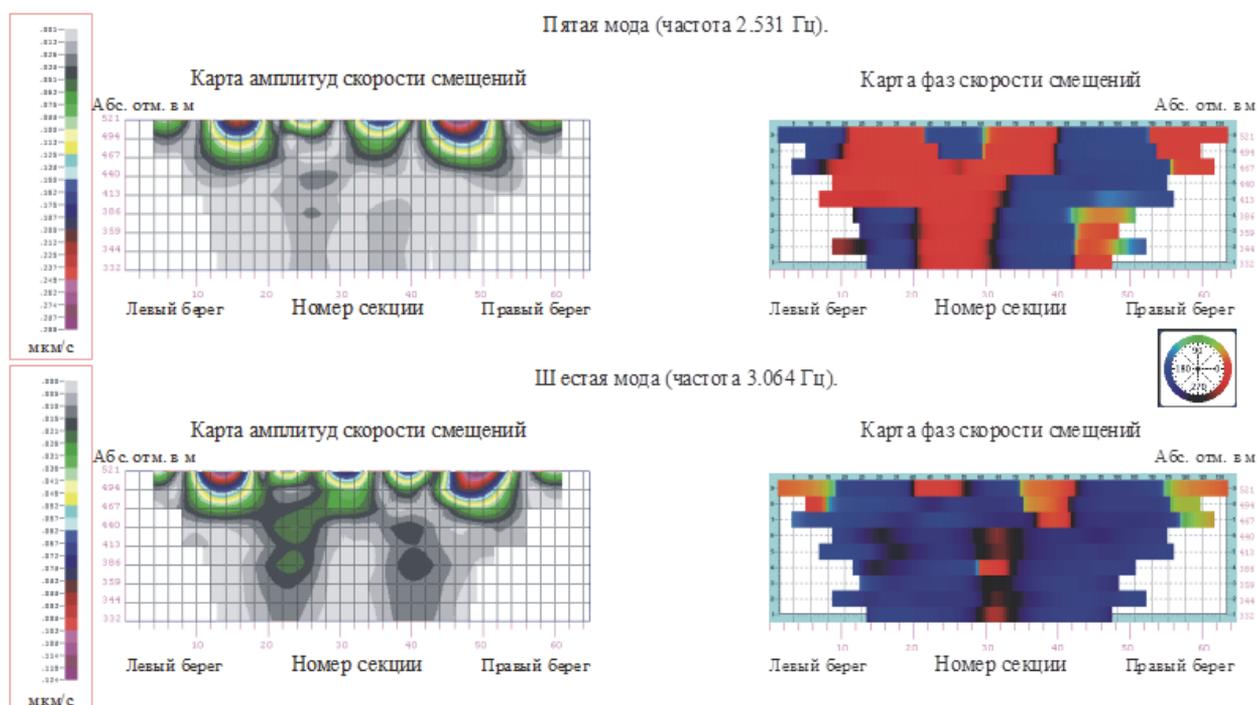


Рис. 16. Карты амплитуд и фаз стоячих волн в платине Саяно-Шушенской ГЭС

На рис. 16 даны названия мод, установленные как собственные частоты по порядку. На самом деле все гораздо сложнее, и моды представленных стоячих волн не описываются даже двумя волновыми числами по верти-

кали и горизонтали. Вмешивается различие ширины верха и низа сооружения. Мода стоячей волны, названная пятой, по верху имеет кратность шесть, по низу — четыре, по вертикали кратность два. Мода стоячей волны,

представленная как шестая, по верху имеет кратность семь, по низу кратность три и по вертикали — четыре. Вопрос о правильной интерпретации кратности мод стоячих волн является необходимым условием дальнейшей количественной интерпретации.

### Здания и сооружения с несущими стенами комбинированной конструкции

Другим примером сложного объекта являются здания со сложным строением стен. Для одного из служебных зданий технического университета в г. Томске фиксируются две моды одного порядка (3,1).

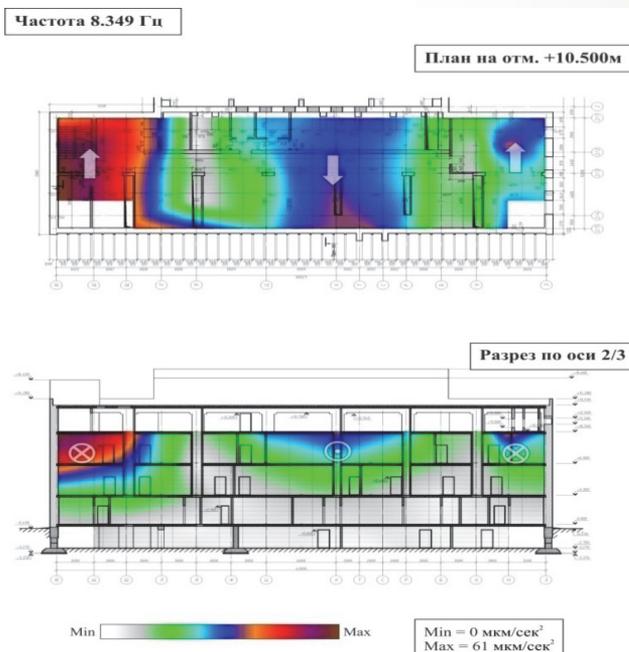


Рис. 17. Мода (3,1) для здания в г. Томске

На рис. 17 мы видим в двух измерениях данные о стоячей волне в здании с той особенностью, что свободные колебания испытывает не только верх здания, но и левая вертикальная стена здания. Низ и правая стена закреплены. Интересным представляется то, что для теоретических расчётов невозможным является обоснование данных граничных условий.

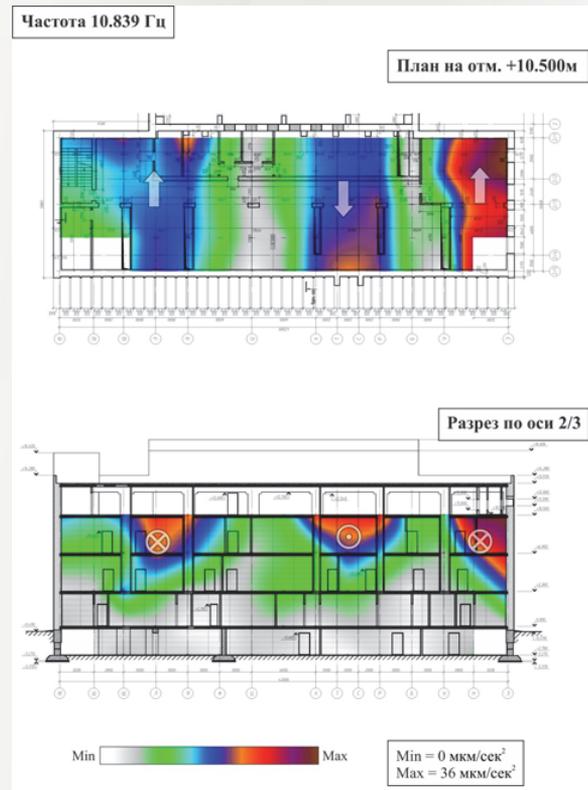


Рис. 18. Мода (3,1) для здания в г. Томске (того же, что и на рис. 15)

На рис. 18 представлены данные о стоячей волне в этом же здании с той же кратностью, но картина иная. В данном случае свободные колебания у верха здания и правой стены, а левая стена и низ зажаты. Представленные данные говорят, что сложно построенные стены могут вести себя двояко. Отражать колебания внешней гранью и внутренней. В этом случае, вероятно, внешние отражения имеют свободу колебаний, а внутренние ведут себя как зажатые. В результате мы имеем резонансы в здании, которые не описываются теоретическими расчётами.

### Блочные конструкции зданий и сооружений

Одним из примеров формирования стоячих волн в блочной конструкции являются результаты, полученные на плотине Богучанской ГЭС (рис. 19) [4].

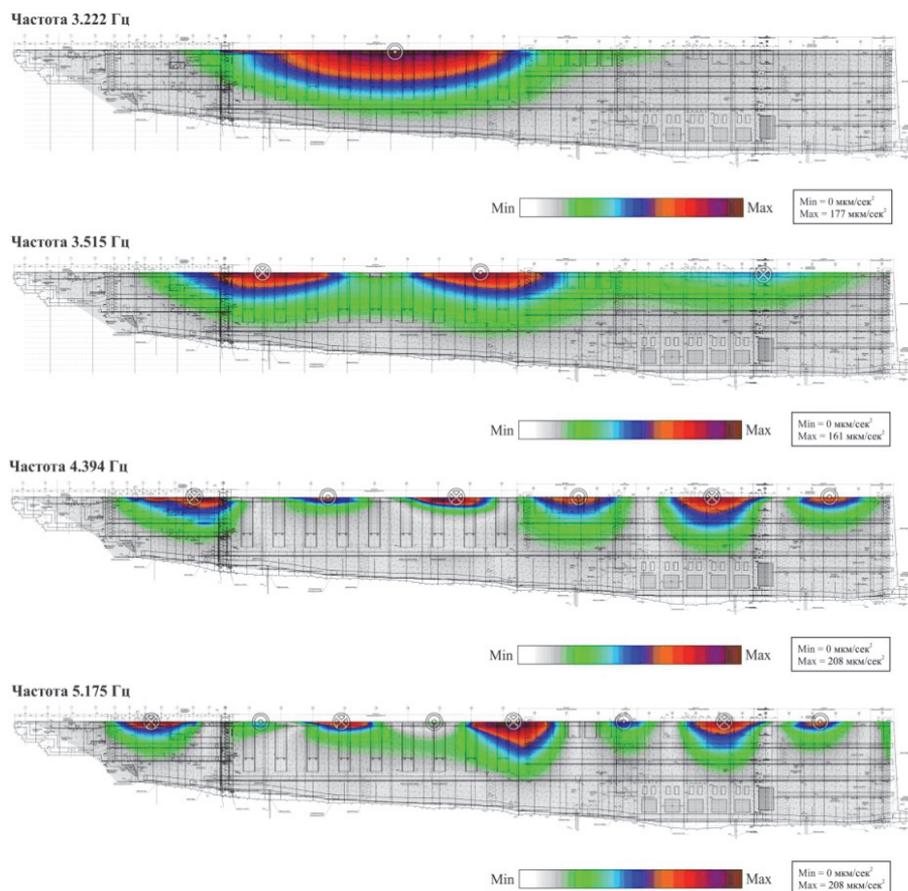


Рис. 19. Стоячие волны в плотине Богучанской ГЭС, блочный объект

Таблица 2

Собственные частоты колебаний бетонной плотины Богучанской ГЭС

Номер моды по порядку	Номер моды	Значение частоты, Гц	Направленность колебаний
1	1	3,222	Горизонтальные X, по потоку
2	3	3,515	Горизонтальные X, по потоку
3	6	4,394	Горизонтальные X, по потоку
4	8	5,175	Горизонтальные X, по потоку

Плотина Богучанской ГЭС состоит из каменно-набросной и бетонной частей. Представленные результаты относятся только к бетонной части плотины. В ней обнаружено четыре собственные частоты (табл. 2). При этом кратность прослеживается только по одному измерению, по-видимому, по вертикали мы имеем дело с кратностью один, в данной конструкции более высокие моды по вертикали не формируются. По картам амплитуд определяется, что стоячие волны сформиро-

ваны между разными вертикальными границами. Так, первая мода колебаний пространственно ограничена в стационарной части плотины. Третья мода своей третьей пучностью выходит в глухую часть бетонной плотины. Шестая и восьмая моды сформированы в бетонной плотине в целом. Такая особенность формирования поля стоячих волн указывает на блочное строение бетонной плотины. Если первая мода представляет собой собственные колебания одного блока плотины, то более

высокие моды являются собственными колебаниями нескольких блоков.

Более сложными объектами с блочным строением могут быть мосты.

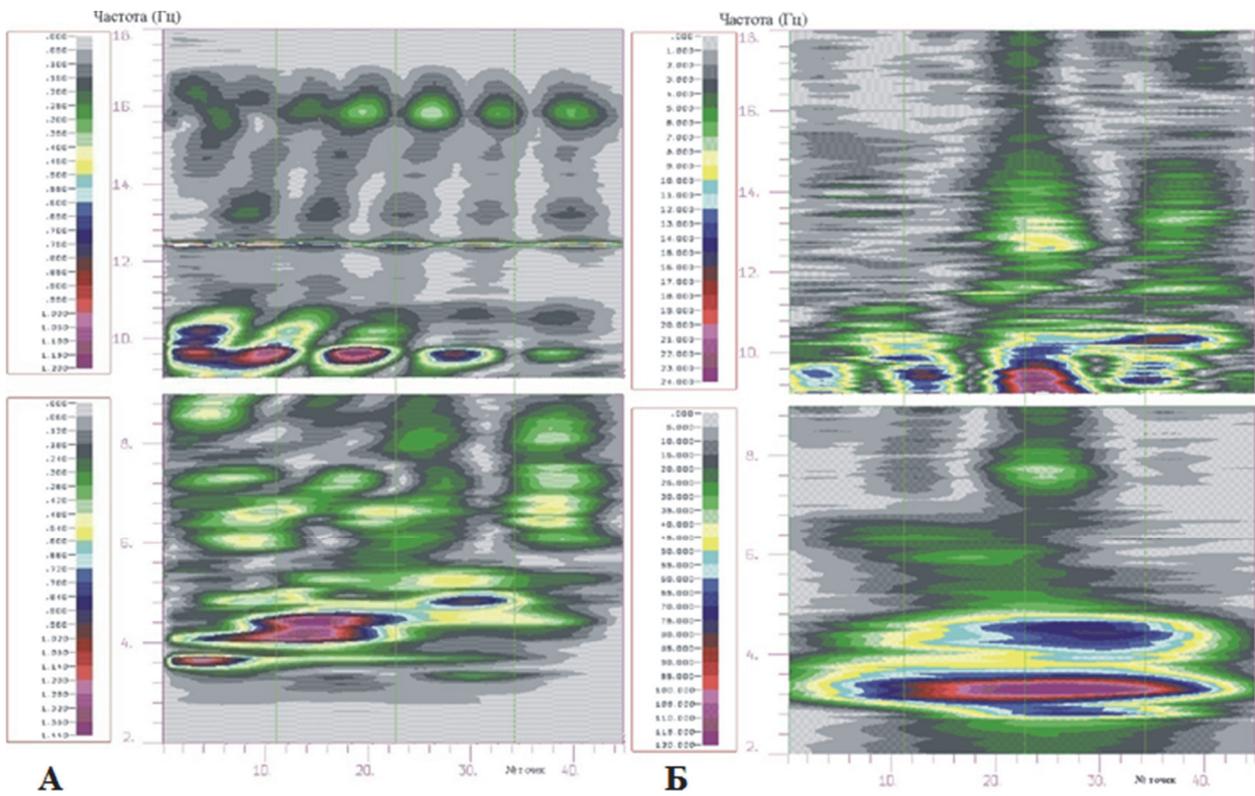


Рис. 20. Спектры стоячих волн моста через р. Иня, г. Новосибирск:

А — измерение на малых амплитудах колебаний (отсутствие движения транспорта);

Б — измерение на больших амплитудах колебаний (интенсивное движение)

На рис. 20 приведены спектры стоячих волн моста для малых амплитуд колебаний, когда каждый пролёт имеет отдельные собственные колебания, и для больших амплитуд колебаний, когда колебания пролётов соединяются в общем колебательном процессе. Это тот случай, когда требуется применять нелинейную модель инженерного сооружения [29].

В настоящее время метод стоячих волн с успехом восстанавливает полное волновое поле стоячих волн в объектах любой сложности, и важным является разработка принципов интерпретации стоячих волн в инженерных объектах. Для простых конструкций зданий интерпретация велась всегда и применялась для верификации расчётных моделей [30, 31, 32, 33], а для сложных выполнялась частичная интерпретация по части набора стоячих волн.

Полная интерпретация полей стоячих волн должна выполняться по представленной ниже схеме.

- Выделение собственных частот и построение карт амплитуд стоячих волн карт фаз, карт когерентности для каждой собственной частоты.
- Определение объёмов, в которых существуют группы стоячих волн. Фактически нахождение в объекте отражающих границ или выявление блочного строения.
- Обнаружение эффектов, связанных с изменениями кратности, вызванными сложной геометрией объекта.
- Раздельная интерпретация по каждой стоячей волне с определением граничных условий по области её существования и волновых чисел.
- Переход к качественной интерпретации по каждой из стоячих волн на основе интер-

претации карт по стоячим волнам и к количественной на основе решения волнового уравнения.

Фактически обследование зданий методом стоячих волн дает информацию обо всех резонансах внутри него, на детальных картах видны дефекты и нарушения в конструкции. Всё это является документом о физическом состоянии объекта на момент обследования. При регулярно большом количестве сейсмических воздействий на здания в Кузбассе состояние конструкций будет стареть и изменяться быстрее, чем в других регионах. Самый простой способ оценить нарушение в здании — выполнить повторные исследования методом стоячих волн; сравнивая два результата, можно выявить наличие изменений и нарушений с их локализацией по объекту. Сегодня такой подход не введён в практику контроля над техническим состоянием объекта, но активно формируется идея непрерывного мониторинга с малым количеством датчиков.

### Инженерно-сейсмологический мониторинг зданий и сооружений

Неоднократно на зданиях устанавливались системы сейсмологического мониторинга [16, 17, 18, 19, 20, 34], но при этом все они по сути своей были системами сбора информации в компьютер, за которым работал человек и на основе субъективного восприятия информации принимал решения о наличии или отсутствии повреждений в здании.

В данной работе рассмотрим построение инженерно-сейсмологического мониторинга на основе метода стоячих волн. Предполагается детальное обследование объекта и использование информации о полном поле стоячих в нём волн для мониторинга по редкой сети датчиков в объекте.

Задачи непрерывного сейсмического мониторинга зданий и сооружений:

- обнаружение изменений в физическом состоянии зданий;
- локализация области возникновения необратимых изменений конструкций;
- оценка существования нарушений в со-

оружении после крупных сейсмических воздействий;

- исследование основных характеристик источников вибраций в зданиях и сооружениях.

Алгоритмы мониторинга [35] основаны на разнообразных подходах и моделях взаимосвязей в волновых полях стоячих волн. Контролируемыми величинами при сейсмическом мониторинге здания могут быть:

- амплитуды ускорения вынужденных колебаний;
- частоты собственных колебаний здания;
- логарифмические декременты затухания;
- формы собственных колебаний;
- фазовые соотношения в стоячих волнах;
- анализ спектров когерентности во времени;
- неизменность во времени частотных характеристик фильтров для пересчёта стоячих волн из точки в точку;
- анализ спектров шумов и нелинейных эффектов;
- поиск изменений в поле стоячих волн.

Наиболее информативным для обнаружения нарушений в здании является спектр когерентности. Слово когерентность на русский язык переводится как взаимосвязь. То есть мы собираемся контролировать взаимосвязь в колебаниях здания. Говоря о взаимосвязи, необходимо конкретизировать, по каким колебаниям рассматривается взаимосвязь, между какими элементами конструкции в здании рассматривается взаимосвязь, по какому параметру она оценивается и др.

Суть мониторинга в том, что устойчивая взаимосвязь при отсутствии нарушений в здании должна быть неизменной во времени. В колебаниях зданий когерентными во времени являются стоячие волны. У нас есть опорная точка и смещающиеся точки, где регистрируются колебания соответствующие модели (1). Спектр когерентности может рассчитываться между записями в любых двух точках, где ведётся одновременная регистрация колебаний. Заменяя значения математического ожидания в (5) на усреднение по времени, получим выражение для квадрата спектра когерентности:

$$\gamma^2(\omega) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n \overline{F_i}(\omega) \overline{F_0}^*(\omega) \right|^2}{\sum_{j=1}^n \left| \overline{F_0}(\omega) \right|^2 \sum_{j=1}^n \left| \overline{F_i}(\omega) \right|^2}. \quad (8)$$

Для непрерывного мониторинга минимальное количество точек — две. В этом случае мониторинг ведётся по полю стоячих волн для объекта в целом, и ставится упрощенная задача ответить на вопрос, есть в здании нарушения после сейсмического воздействия или нет? Если есть сеть станций мониторинга в здании, тогда есть возможность ответить на вопрос, в какой части здания нарушена конструкция?

Прежде чем переходить к сетям точек мониторинга, рассмотрим простой пример наличия в здании всего двух точек регистрации колебаний и обработке данных с целью обнаружения нарушений. Для этого мы должны рассмотреть вопрос о том, какие параметры входят в расчёт спектра когерентности [23]. Первый параметр — шаг дискретизации записи  $\Delta t$  — им определяется верхняя частота диапазона регистрации. Чаще всего  $\Delta t$  уже заложено в аппаратуре для инженерно-сейсмо-

логических исследований. Как правило, дискретизация выполняется с частотой 100 Гц. Количество отчётов в блоке для расчёта спектров  $m = T / \Delta t$  связано с длиной блок  $T$  — всё это определяет разрешенность спектров по частоте.  $N$  — количество блоков — определяет точность спектров когерентности. Поскольку у точности оценки спектров когерентности экспоненциальная зависимость от числа блоков отсутствует, то при большом числе блоков повышение точности замедляется [23, 21, 22]. В случае мониторинга объекта число блоков можно задавать любым, но поскольку присутствует интерес к изменению когерентности во времени, то спектр когерентности для мониторинга рассчитывается на скользящем окне.

В соответствии с моделью (1) спектр когерентности позволяет анализировать временные изменения в поле стоячих волн. Фактически даёт информацию о составе поля собственных колебаний инженерного сооружения и об изменении связей в поле собственных колебаний. Пример мониторинга здания с использованием спектров когерентности, рассчитываемых между двумя точками, представлен на рис. 21.

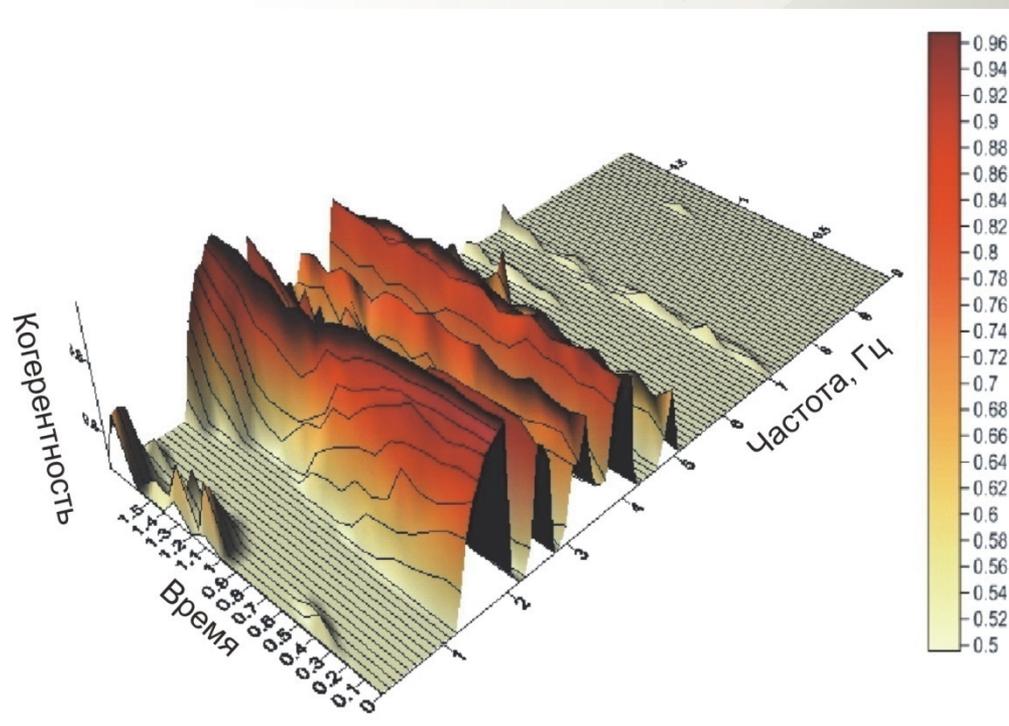


Рис. 21. Текущие спектры когерентности в мониторинге здания оперного театра, г. Новосибирск

В случае, когда интерес представляют не быстрые изменения конструкции, полученные в результате сейсмического воздействия, а медленные в результате старения здания, есть возможность отслеживать этот процесс, зафиксировать начало первого блока по времени и вести мониторинг с пропусками блоков (через один, через два и так далее.).

### Заключение

- Сейсмологическая сеть станций и инженерно-сейсмологические системы на особо ответственных зданиях и сооружениях как единая система позволят обеспечить новый уровень безопасности Кузбасса.

- Наведённая сейсмичность в 2019 году продолжает фокусироваться около горнодобывающих предприятий с проявлениями изменчивости и нестационарности в развитии во времени. Нет прямой увязки сейсмического воздействия от промышленных взрывов на недра с наведённой сейсмичностью.

- Специальные эксперименты по корот-

козамедленному взрыванию в разрезах и наличие сейсмологического контроля над производственными взрывами доказывают, что есть возможность существенного снижения сейсмического воздействия взрывов на территории Кузбасса.

- В 2019 году проявила себя наведённая сейсмичность около железорудных шахт «Казская» и «Шерегешская» в виде роёв землетрясений.

- Метод стоячих волн в исследовании зданий и сооружений сложных конструкций даёт полную информацию об их сейсмостойкости и физическом состоянии на момент исследования.

- Инженерно-сейсмологический мониторинг особо ответственных объектов на основе алгоритмов метода стоячих волн позволяет в реальном времени обнаруживать нарушение конструкции при сейсмических воздействиях.

- Совместная система мониторинга землетрясений, промышленных взрывов и зданий в условиях Кузбасса должна быть жизненной необходимостью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Корабельщиков Д.Г., Дураченко А.В. Система мониторинга наведённой сейсмичности Кузбасса и триггерные эффекты в развитии сейсмического процесса // Материалы III-го Всероссийского семинара-совещания «Триггерные эффекты в геосистемах». 2015. С. 190–199.

2. Еманов А.Ф., Красников А.А. Применение метода стоячих волн для исследования сейсмоизолированных зданий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. № 4. С. 37–64.

3. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. Т. 1. 549 с.

4. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Ворона У.Ю., Серёжников Н.А. Сейсмический эффект промышленных взрывов и основные закономерности формирования и развития сейсмичности около шахт и разрезов Кузбасса // Вестник ВостНИИ. 2018. № 2. С. 58–74.

5. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Техногенное Бачатское землетрясение 18.06.2013 в Кузбассе — сильнейшее в мире при добыче твёрдых полезных ископаемых // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т. 43. № 4. С. 34–60.

6. Дергачёв А.А., Филина А.Г. Таштагольское землетрясение 05 февраля 1988 г. Макросейсмика // В сборнике: Исследования по созданию научных основ прогноза землетрясений в Сибири. 1989. С. 13–14.

7. Дергачёв А.А., Данциг Л.Г. Детальные сейсмологические наблюдения в эпицентральной зоне Таштагольского землетрясения 05.02.1988 г. // В сборнике: Исследования по созданию научных основ прогноза землетрясений в Сибири. 1990. С. 37–42.

8. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмические актив-

- зации при разработке угля в Кузбассе // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 1. С. 49–64.
9. Ерёменко А.А., Ерёменко В.А., Гайдин А.П. Горно-геологические и геомеханические условия разработки железорудных месторождений в Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск: Наука, 2009. 229 с.
10. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Подкорытова В.Г., Куприш О.В., Шевкунова Е.В. Кольванское землетрясение 09.01.2019 с  $M_L = 4.3$  около г. Новосибирск // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 2. № 2. С. 36–45.
11. Друкованый М.Ф. Методы управления взрывом на карьерах. М.: Недра, 1973. 402 с.
12. Еманов А.Ф. Влияние короткозамедленного взрывания на сейсмограммы промышленных взрывов // Геология и геофизика. 1982. № 9. С. 81–89.
13. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. М.: Изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. 283 с.
14. Корчинский И.Л. Сейсмические нагрузки на здания и сооружения. М.: Изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1959. 77 с.
15. Алёшин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. М.: Светоч Плюс, 2010. 303 с.
16. Болдырев Г.Г., Нестеров П.В., Живаев А.А., Валеев Д.Н. Системы мониторинга строительных конструкций зданий и сооружений // Предотвращение аварий зданий и сооружений. Сборник научных трудов. М., 2010. Вып. 9. С. 443–463.
17. Завалишин С.И., Шаблинский Г.Э., Зубков Д.А., Румянцев А.А. Динамический мониторинг зданий и сооружений для контроля их сейсмостойкости // Предотвращение аварий зданий и сооружений. Сборник научных трудов. М., 2009. Вып. 8. С. 42–53.
18. Идиатуллин Д.Р., Клецин В.И. Система мониторинга состояния несущих конструкций реального времени (СМИК) // Предотвращение аварий зданий и сооружений. Сборник научных трудов. М., 2010. Вып. 9. С. 324–333.
19. Капустян Н.К., Таракановский В.К., Вознюк А.Б., Климов А.Н. Действующая система мониторинга высотного жилого здания в Москве // Предотвращение аварий зданий и сооружений. Сборник научных трудов. М., 2010. Вып. 9. С. 192–206.
20. Сущев С.П., Самарин В.В., Адаменко И.А., Сотин В.Н. Мониторинг технического состояния несущих конструкций высотного здания // Предотвращение аварий зданий и сооружений. Сборник научных трудов. М., 2009. Вып. 8. С. 15–26.
21. Еманов А.Ф., Селезнёв В.С., Бах А.А. и др. Пересчёт стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологическом исследовании // Геология и геофизика. 2002. № 2. С. 192–206.
22. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 3. С. 20–24.
23. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. 408 с.
24. Еманов А.Ф., Бах А.А. Стоячие волны в инженерных объектах сложных конструкций // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 2. № 2. С. 67–73.
25. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. М.: Стройиздат, 1976. 229 с.
26. Айзенберг Я.М. Некоторые проблемы обеспечения сейсмической надежности современных ответственных и сложных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. № 4. С. 23–25.
27. Смирнов В.И. Сейсмоизоляция – современная антисейсмическая защита зданий в России // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 4. С. 41–54.
28. Еманов А.Ф., Бах А.А., Данилов И.А., Дергачёв А.А., Селезнёв В.С., Толошинов А.В., Булатов В.А. Детальные инженерно-сейсмологические исследования плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Вестник Красноярской государственной архитектурно-строительной академии: Сб. науч. тр. Красноярск: КрасГАСА, 2003. Вып. 6. С. 86–108.

29. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). М.: МГСУ, 2012. 92 с.

30. Белостоцкий А.М., Каличава Д.К. Адаптируемые конечно-элементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Ч. 1: Основы разработанной расчётно-экспериментальной методики // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 4. С. 19–27.

31. Бах А.А., Красников А.А. Использование метода стоячих волн для анализа динамических характеристик высотных зданий на примере 40-этажного комплекса «дирижабль», г. Москва // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. № 1. С. 26–30.

32. Красников А.А. Стоячие волны в куполах: экспериментальные исследования и математическое моделирование // В сборнике: Трофимукские чтения. Труды научной конференции молодых ученых, аспирантов, студентов. 2007. С. 241–243.

33. Красников А.А., Еманов А.Ф., Бах А.А. Оценка полноты конечно-элементных моделей инженерных сооружений по экспериментальным данным метода стоячих волн // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 2. № 4. С. 179–184.

34. Шахраманьян А.М. Технологические и методические основы построения систем мониторинга несущих конструкций высотных и уникальных объектов // Предотвращение аварий зданий и сооружений. Сборник научных трудов. М., 2010. Вып. 9. С. 262–274.

35. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Красников А.А., Дураченко А.В. Сейсмический мониторинг зданий и промышленных объектов (алгоритмы и методика) // 50 лет сейсмологического мониторинга Сибири. Тезисы докладов. Новосибирск, 2013. С. 141–150.

---

**DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.13.3.002**

**UDK 550.834**

**© A.F. Yemanov, A.A. Yemanov, A.V. Fateyev, A.A. Bakh, A.V. Durachenko, E.V. Shevkunova, N.A. Serozhnikov, U.YU. Vorona, 2019**

**A.F. EMANOV**

Doctor Of Engineering Sciences,  
Branch Director

Altay-Sayan Branch of FRC «United Geophysical Survey RAS», Novosibirsk  
e-mail: emanov@gs.nsc.ru

**A.A. EMANOV**

Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences,  
Deputy Director for Research

Altay-Sayan Branch of FRC «United Geophysical Survey RAS», Novosibirsk;  
Senior Researcher  
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS  
e-mail: alex@gs.nsc.ru

**A.V. FATEEV**

Senior Research Scientist

Altay-Sayan Branch of FRC «United Geophysical Survey RAS», Novosibirsk;  
Senior Engineer

A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS  
e-mail: fateev@gs.nsc.ru

**A.A. BACH**

Senior Research Scientist

Altay-Sayan Branch of FRC «United Geophysical Survey RAS», Novosibirsk

e-mail: abakh61@mail.ru

**A.V. DURACHENKO**

Researcher

Altay-Sayan Branch of FRC «United Geophysical Survey RAS», Novosibirsk

e-mail: durachenko@gs.nsc.ru

**E.V. SHEVKUNOVA**

Researcher

Altay-Sayan Branch of FRC «United Geophysical Survey RAS», Novosibirsk

e-mail: elenash@gs.nsc.ru

**N.A. SEREZHNIKOV**

Junior Researcher

Altay-Sayan Branch of FRC «United Geophysical Survey RAS», Novosibirsk

e-mail: bestyah21@mail.ru

**U.YU. VORONA**

Researcher

Altay-Sayan Branch of FRC «United Geophysical Survey RAS», Novosibirsk

e-mail: u.y.vorona@gmail.com

**METHODOLOGICAL BASIS OF JOINT INSTRUMENTAL SEISMOLOGICAL MONITORING OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT AND ESPECIALLY RESPONSIBLE BUILDINGS AND STRUCTURES**

*The possibilities of simultaneous monitoring of induced seismicity, the seismic effect of industrial explosions and the condition of buildings and structures after seismic effects are considered. In 2019, the most intense induced seismicity is recorded in the Polysaev and Rospadskaya mines. The largest number of industrial explosions with magnitudes greater than 2,5 are carried out at sections in the area of Mezhdurechensk, on the section line from Taldy to Karakan, as well as in the area of the Bachatsky section. Induced seismicity in the form of swarms of events in 2019 was recorded near the iron mines of Kazskaya and Sheregeshska. The standing wave method is shown as an effective way to study the physical condition and earthquake resistance of buildings. Based on it, monitoring of critical structures with the detection of structural violations in real time is proposed.*

Keywords: SEISMOLOGY, INDUCED SEISMICITY, SEISMIC EFFECT OF EXPLOSIONS, KUZBASS, STANDING WAVES, MONITORING OF BUILDINGS, SEISMIC RESISTANCE OF STRUCTURES, SEISMIC DANGER.

**REFERENCES**

1. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V., Korabelschikov D.G., Durachenko A.V. Monitoring system of induced seismicity of Kuzbass and trigger effects in the development of the seismic process // Materials of the III All-Russian seminar-meeting «Trigger effects in geosystems» [Materialy III-go Vserossiyskogo seminar-soveshchaniya «Triggernyye efekty v geosistemakh»]. 2015. P. 190–199. (In Russ.).
2. Emanov A.F., Krasnikov A.A. The use of the standing wave method for the study of seismically insulated buildings // Issues of engineering seismology [Voprosy inzhenernoy seysmologii]. 2015. T. 42. No. 4. P. 37–64. (In Russ.).

3. Geomechanical fields and processes: experimental and analytical studies of the formation and development of focal zones of catastrophic events in mining-technical and natural systems. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS, 2018. Vol. 1. 549 p. (In Russ.).

4. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Vorona U.Yu., Serezhnikov N.A. The seismic effect of industrial explosions and the basic laws of the formation and development of seismicity near mines and sections of the Kuzbass // Bulletin of VostNII [Vestnik VostNII]. 2018. No. 2. P. 58–74. (In Russ.).

5. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V. The technogenic Bachat earthquake of 06/18/2013 in Kuzbass is the strongest in the world in the extraction of solid minerals // Problems of Engineering Seismology [Voprosy inzhenernoy seysmologii]. 2016. T. 43. No. 4. P. 34–60. (In Russ.).

6. Dergachev A.A., Filina A.G. Tashtagol earthquake on February 05, 1988 Macroseismics // In the collection: Research on the creation of the scientific basis for the prediction of earthquakes in Siberia [V sbornike: Issledovaniya po sozdaniyu nauchnykh osnov prognoza zemletryaseny v Sibiri]. 1989. P. 13–14. (In Russ.).

7. Dergachev A.A., Danzig L.G. Detailed seismological observations in the epicentral zone of the Tashtagol earthquake 02.05.1988 // In the collection: Studies on the creation of the scientific basis for the prediction of earthquakes in Siberia [V sbornike: Issledovaniya po sozdaniyu nauchnykh osnov prognoza zemletryaseny v Sibiri]. 1990. P. 37–42. (In Russ.).

8. Emanov A.F., Emanov A.A., Leskova E.V., Fateev A.V., Semin A.Yu. Seismic activation during coal mining in Kuzbass // Physical Mesomechanics. 2009. T. 12. No. 1. P. 49–64. (In Russ.).

9. Eremenko A.A., Eremenko V.A., Gaidin A.P. Mining and geological and geomechanical conditions for the development of iron ore deposits in the Altai-Sayan folded region. Novosibirsk: Nauka, 2009. 229 p. (In Russ.).

10. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Podkorytova V.G., Kuprish O.V., Shevkunova E.V. Kolyvan earthquake on January 9, 2019 with  $ML = 4.3$  near the city of Novosibirsk // Interexpo Geo-Siberia. 2019. T. 2. No. 2. P. 36–45. (In Russ.).

11. Drukovany M.F. Explosion control methods in quarries. M.: Nedra, 1973. 402 p. (In Russ.).

12. Emanov A.F. The effect of Slow Explosion on seismograms of industrial explosions // Geology and Geophysics. 1982. No. 9. P. 81–89. (In Russ.).

13. Medvedev S.V. Engineering seismology. M.: Publ. Literature on construction, architecture and building materials. 1962. 283 p. (In Russ.).

14. Korchinsky I.L. Seismic loads on buildings and structures. M.: Publ. Literature on construction, architecture and building materials. 1959. 77 p. (In Russ.).

15. Aleshin A.S. Seismic micro-zoning of critical facilities. M.: Svetoch Plus, 2010. 303 p.

16. Boldyrev G.G., Nesterov P.V., Zhivaev A.A., Valeev D.N. Monitoring systems for building structures of buildings and structures // Prevention of accidents of buildings and structures. Collection of scientific papers [Predotvrashcheniye avariyy zdaniy i sooruzheniy. Sbornik nauchnykh trudov]. M., 2010. Issue 9. P. 443–463. (In Russ.).

17. Zavalishin S.I. Shablinsky G.E., Zubkov D.A., Rumyantsev A.A. Dynamic monitoring of buildings and structures to control their earthquake resistance // Prevention of accidents of buildings and structures. Collection of scientific papers [Predotvrashcheniye avariyy zdaniy i sooruzheniy. Sbornik nauchnykh trudov]. M., 2009. Issue 8. P. 42–53. (In Russ.).

18. Idiatullin D.R., Kletsin V.I. Real-time load-bearing structure monitoring system (SMIC) // Prevention of accidents of buildings and structures. Collection of scientific papers [Predotvrashcheniye avariyy zdaniy i sooruzheniy. Sbornik nauchnykh trudov]. M., 2010. Issue 9.

P. 324–333. (In Russ.).

19. Kapustyan N.K., Tarakanovsky V.K., Voznyuk A.B., Klimov A.N. The current monitoring system of a high-rise residential building in Moscow // Prevention of accidents of buildings and structures. Collection of scientific papers [Predotvrashcheniye aviaryi zdaniy i sooruzheniy. Sbornik nauchnykh trudov]. M., 2010. Issue 9. P. 192–206. (In Russ.).

20. Sushev S.P., Samarin V.V., Adamenko I.A., Sotin V.N. Monitoring the technical condition of the supporting structures of a high-rise building // Prevention of accidents of buildings and structures. Collection of scientific papers [Predotvrashcheniye aviaryi zdaniy i sooruzheniy. Sbornik nauchnykh trudov]. M., 2009. Issue 8. P. 15–26. (In Russ.).

21. Emanov A.F., Seleznev V.S., Bach A.A. and others. Recalculation of standing waves in detailed engineering and seismological studies // Geology and geophysics. 2002. No. 2. P. 192–206. (In Russ.).

22. Emanov A.F., Seleznev V.S., Bach A.A. Coherent restoration of standing wave fields as the basis for a detailed seismological survey of engineering structures // Earthquake-resistant construction. Safety of facilities [Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost sooruzheniy]. 2007. No. 3. P. 20–24. (In Russ.).

23. Bendat J., Piersol A. Measurement and analysis of random processes. M.: Mir, 1971. 408 p. (In Russ.).

24. Emanov A.F., Bach A.A. Standing waves in engineering objects of complex structures // Interexpo Geo-Siberia. 2019. T. 2. No. 2. P. 67–73. (In Russ.).

25. Eisenberg Y.M. Off-line facilities for seismic areas. M.: Stroyizdat, 1976. 229 p. (In Russ.).

26. Eisenberg Y.M. Some problems of ensuring seismic reliability of modern critical and complex structures // Earthquake-resistant construction. Safety of facilities [Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost sooruzheniy]. 2005. No. 4. P. 23–25. (In Russ.).

27. Smirnov V.I. Seismic isolation is a modern anti-seismic protection of buildings in Russia // Earthquake-resistant construction. Safety of facilities [Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost sooruzheniy]. 2013. No. 4. P. 41–54. (In Russ.).

28. Emanov A.F., Bach A.A., Danilov I.A., Dergachev A.A., Seleznev V.S., Toloshinov A.V., Bulatov V.A. Detailed engineering–seismological studies of the dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric station // Bulletin of the Krasnoyarsk State Academy of Architecture and Civil Engineering: Collection of scientific papers [Vestnik Krasnoyarskoy gosudarstvennoy arkhitekturno-stroitel'noy akademii: Sb. nauch. tr.]. Krasnoyarsk: KrasGASA, 2003. Issue 6. P. 86–108. (In Russ.).

29. Mkrtychev O.V., Dzhinchevelashvili G.A. Problems of taking nonlinearities into account in the theory of earthquake resistance (hypotheses and errors). M.: MGSU, 2012. 92 p. (In Russ.).

30. Belostotsky A.M., Kalichava D.K. Adaptable finite element models based on dynamic monitoring of the supporting structures of high-rise buildings. Part 1: Fundamentals of the developed calculation and experimental methods // Engineering and Construction Journal [Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal]. 2012. No. 4. P. 19–27. (In Russ.).

31. Bach A.A., Krasnikov A.A. Using the standing wave method to analyze the dynamic characteristics of high-rise buildings using the example of a 40-story «airship» complex, Moscow // Earthquake-resistant construction. Safety of facilities [Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost sooruzheniy]. 2014. No. 1. P. 26–30. (In Russ.).

32. Krasnikov A.A. Standing waves in domes: experimental studies and mathematical modeling // In the collection: Trofimukov readings. Proceedings of the scientific conference of young scientists, graduate students, students [V sbornike: Trofimukovskiye chteniya. Trudy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, studentov]. 2007. P. 241–243. (In Russ.).

33. Krasnikov A.A., Emanov A.F., Bach A.A. Assessment of the completeness of finite-element models of engineering structures according to the experimental data of the standing wave method // Interexpo Geo-Siberia [Interekspos Geo-Sibir]. 2017. T. 2. No. 4. P. 179–184. (In Russ.).

34. Shahramanyan A.M. Technological and methodological foundations of constructing monitoring systems for load-bearing structures of high-rise and unique objects // Prevention of accidents of buildings and structures. Collection of scientific papers [Predotvrashcheniye avariyy zdaniy i sooruzheniy. Sbornik nauchnykh trudov]. Moscow, 2010. Issue 9. P. 262–274. (In Russ.).

35. Emanov A.F., Emanov A.A., Krasnikov A.A., Durachenko A.V. Seismic monitoring of buildings and industrial facilities (algorithms and methods) // 50 years of seismological monitoring of Siberia. Abstracts of reports [50 let seysmologicheskogo monitoringa Sibiri. Tezisy dokladov]. Novosibirsk, 2013. P. 141–150. (In Russ.).