

УДК 550.8:681.5

# УПРАВЛЕНИЕ ИНДУЦИРОВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТЬЮ В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

**Ю.Р. Владов**

*Оренбургский Федеральный исследовательский центр УрО РАН,*  
Россия, 460014, Оренбург, Набережная ул., 29  
E-mail: vladov@mail.ru

**М.Ю. Нестеренко**

*Оренбургский Федеральный исследовательский центр УрО РАН,*  
Россия, 460014, Оренбург, Набережная ул., 29  
E-mail: n\_mu@mail.ru

**А.Ю. Владова**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: avladova@ipu.ru

**Ключевые слова:** геодинамическая безопасность, технология управления, индуцированная сейсмичность, разработка месторождения, буровзрывные работы, полезные ископаемые.

**Аннотация:** Во всем мире актуальной научно-практической проблемой остается повышение геодинамической безопасности разрабатываемых месторождений полезных ископаемых. В статье представлена новая технология управления индуцированной сейсмичностью при разработке месторождений твердых полезных ископаемых с использованием буровзрывных работ. Основное внимание уделено примеру ее реализации в восточной части Оренбургской обл., где соответствующие месторождения активно разрабатываются горнодобывающими компаниями.

## 1. Введение

Проведенный научный обзор отечественных исследований [1-5] показал актуальность вопросов, связанных с возникновением индуцированной сейсмичности при разработке месторождений полезных ископаемых. Интересные данные по этой проблеме содержатся также в [6-9], но подробный научный анализ опубликованных работ приведен в статье [10]. Меньше информации содержится в зарубежных источниках [11, 12]. Что касается исследований авторов, то они посвящены либо информационным технологиям, необходимым при разработке месторождений углеводородов [13-16], либо аспектам управления с прогнозной составляющей [17]. В целом можно утверждать, что активно исследуются причины появления индуцированной сейсмичности, но в открытой печати полностью отсутствует информация об исследованиях в области ее управления.

Проведенный патентный анализ [18] также показал отсутствие технических решений, связанных с управлением индуцированной сейсмичностью при разработке

месторождений твердых полезных ископаемых (ТПИ); более подробные патентные данные представлены в статье [10]. В этой связи предложена технология управления индуцированной сейсмичностью при разработке месторождений ТПИ с использованием буровзрывных работ [10, 19].

## 2. Технология управления

Основана на выполнении 3 этапов и 20 операций (табл.).

**Таблица.** Состав этапов и операций предложенной технологии управления.

Этап	Операция
<b>Этап 1 - выявляют сейсмически активные участки территории</b>	1.1 - определяют значимый временной интервал; 1.2 - по окончании выбранного временного интервала выбирают сейсмические события с их топографическими координатами; 1.3 - устанавливают для данной территории минимальную величину барьера по магнитуде для сейсмособытий; 1.4 - отфильтровывают сейсмические события с магнитудой ниже установленной величины барьера; 1.5 - наносят прошедшие фильтр сейсмические события на топографическую карту; 1.6 - выделяют участки территории с повышенной плотностью сейсмособытий; 1.7 - находят источники сейсмособытий за выбранный интервал времени; 1.8 - принимают их за центры участков выделенных территорий; 1.9 - оконтуривают каждый выделенный участок территории подобранным радиусом окружности; 1.10 - определяют площади оконтуренных участков и 1.11 - составляют реестры учтенных сейсмических событий
<b>Этап 2 - выявляют сейсмически активные участки территории</b>	2.1 - подсчитывают их выделившуюся сейсмическую энергию на каждом оконтуренном участке территории за выбранный временной интервал; 2.2 - определяют суммарную выделившуюся сейсмическую энергию на каждом оконтуренном участке территории за выбранный временной интервал; 2.3 - вычисляют фактические плотности выделившейся сейсмической энергии для каждого оконтуренного участка
<b>Этап 3 - выявляют сейсмически активные участки территории</b>	3.1 - определяют пороговое и базовое значения плотности выделившейся сейсмической энергии; 3.2 - нормируют фактические значения каждого оконтуренного участка и пороговое значение плотности выделившейся сейсмической энергии; 3.3 - сравнивают фактические значения плотности выделившейся сейсмической энергии с ее пороговым значением для каждого оконтуренного участка территории; 3.4 - если меньше, то не формируют управляющую информацию; 3.5 - если больше, то формируют управляющую информацию; 3.6 - повторяют процесс в каждый следующий выбранный временной интервал в заданной последовательности этапов и операций

Для реализации выбрана восточная часть Оренбургской обл., которая в структурно-тектоническом отношении входит в состав разломно-надвиговой провинции и имеет сложное геологическое строение с многочисленными тектоническими нарушениями, преимущественно в виде разломов, и естественной сейсмической активностью. Последняя в значительной мере инициируется технологической деятельностью предприятий с применением буровзрывных работ.

Среднегодовое число сейсмособытий на этой территории составляет 760, из них ежегодно 6–7 сейсмособытий с магнитудой от 3 до 3,6. Из статистических данных следует, что землетрясения, происходящие на Урале с магнитудой 3,4 в эпицентре, эквивалентны 5 баллам по шкале MSK-64. Рудники, главным образом шахты и карьеры горнодобывающих компаний, как правило, находятся в непосредственной близости от населенных пунктов, и производство массовых взрывных работ провоцирует землетрясения, способные нарушить целостность зданий и сооружений в непосредственной близости от их эпицентров.

## 2.1. Апробация технологии управления индуцированной сейсмичностью

Начнем с операций этапа (1) (см. табл. 1), на котором выявляем сейсмически активные участки территории восточнее г. Кувандыка. Здесь широко развиты магматические, интрузивные и осадочные комплексы горных пород, наибольшее значение имеют металлические полезные ископаемые. В частности, сосредоточены многочисленные месторождения медно-колчеданных и колчеданно-полиметаллических руд с сопутствующими благородными металлами. Промышленную добычу этих руд с применением буровзрывных технологий ведут крупные горнодобывающие компании: ПАО «Гайский ГОК», АО «ОРМЕТ», АО «Киембаевский ГОК». В соответствии с априорной информацией и статистическими данными за пятилетний период (2016–2020 гг.) определяем (1.1) значимый временной интервал, который составил 30 сут.

Из обширной информации (2014–2022 гг.) в статье использованы только данные за одни сутки 2022 г. Воспользуемся геофизическим бюллетенем Казахстанского национального центра данных. На интересующей авторов территории за значимый временной интервал выбираем (1.2) сейсмические события с их характеристиками (дата, время, глубина гипоцентра, магнитуда, энергетический класс). Для дальнейших вычислений исключаем из расчетов «сейсмический шум». Из физических соображений для данной территории устанавливаем (1.3) минимальную величину барьера по магнитуде, равную 1,5. Отфильтровываем (1.4) сейсмические события ниже установленной величины барьера. Используя топографические координаты, наносим (1.5) эпицентры прошедших фильтр сейсмических событий на топографическую карту.

Выделяем (1.6) участки территории с повышенной плотностью сейсмических событий: в северо-западной части (Гайский и Новоорский районы) и в юго-восточной части Восточного Оренбуржья (Ясненский и Домбаровский районы). На участках с повышенной плотностью эпицентров находим (1.7) потенциальные источники инициирования техногенных сейсмических событий, в частности, рудники, в которых добывают ТПИ с использованием буровзрывных работ: на первом участке — рудник «Гайский» ПАО «Гайский ГОК»; на втором участке — рудник «Осенний» АО «ОРМЕТ». Топографические координаты центров рудников принимаем (1.8) за центры участков выделенных территорий. Оконтурируем (1.9) каждый выделенный участок территории подобранным радиусом окружности, охватывающей повышенные плотности эпицентров сейсмических событий.

Определяем (1.10) площади оконтуренных участков с известными радиусами, км<sup>2</sup>. Составляем (1.11) реестры учтенных сейсмических событий с перечисленными ранее характеристиками, происшедших на оконтуренных участках за выбранный временной интервал: на первом участке с рудником «Гайский» ПАО «Гайский ГОК» и втором участке с рудником «Осенний» АО «ОРМЕТ».

На втором этапе определяем (2) активность прошедших фильтр сейсмических событий на оконтуренных участках территории. Используя составленные реестры и данные по энергетическому классу каждого сейсмического события, подсчитываем (2.1) выделившуюся сейсмическую энергию на каждом оконтуренном участке территории за выбранный временной интервал. Находим (2.2) суммарную выделившуюся сейсмическую энергию на каждом оконтуренном участке территории за выбранный временной интервал. Вычисляем (2.3) фактические плотности выделившейся сейсмической энергии для каждого оконтуренного участка путем деления соответствующей суммарной выделившейся сейсмической энергии на соответствующую площадь, Дж/км<sup>2</sup>.

На этапе (3) с учетом априорной информации и статистических данных за пятилетний период (2016–2020 гг.) находим (3.1) пороговое и базовое значения

плотности выделившейся сейсмической энергии, Дж/км<sup>2</sup>. Нормируем (3.2) фактические значения плотности выделившейся энергии каждого оконтуренного участка и пороговое значение плотности выделившейся сейсмической энергии путем деления этих значений на базовую величину. Далее сравниваем (3.3) нормированные фактические значения плотности выделившейся сейсмической энергии с нормированным пороговым значением для каждого оконтуренного участка территории. Если меньше, то управляющую информацию не формируем (3.4). Если больше, то формируем (3.5) управляющую информацию в том числе в виде рекомендаций по уменьшению частоты и мощности взрывов, либо числа закладок взрывчатого вещества или замедления взрывов при добыче ТПИ, а также объема единовременно закладываемых зарядов. Повторяем (3.6) процесс в каждый следующий выбранный временной интервал в заданной последовательности этапов и операций.

### 3. Заключение

Актуальность проблемы заключается в том, что общая сейсмичность региона в условиях интенсивной разработки месторождений полезных ископаемых значительно возрастает за счет возникновения индуцированной составляющей. Научный и патентный анализ отечественных и зарубежных исследований показывает, что активно обсуждаются только вопросы, связанные с возникновением индуцированной сейсмичности при разработке месторождений полезных ископаемых, много опубликованных работ посвящено причинам ее появления, но в открытой печати нет информации об исследованиях в плане управления индуцированной сейсмичностью.

Новизна технологии управления индуцированной сейсмичностью при разработке месторождений твердых полезных ископаемых с использованием буровзрывных работ заключается в последовательном выполнении 3 этапов и 20 операций. В целом, результаты исследования, практическая реализация и технико-экономическое обоснование показывают, что новая технология управления индуцированной сейсмичностью при разработке месторождений твердых полезных ископаемых с использованием буровзрывных работ является технически целесообразным и экономически выгодным мероприятием.

### Список литературы

1. Кузьмин Ю.О. Индуцированные сейсмические процессы на месторождениях нефти и газа// Проблемы недропользования. 2019. № 4 (23). С. 9-17. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.009.
2. Турунтаев С.Б., Рига В.Ю. Сейсмичность месторождений углеводородов // Деловой журнал Neftegaz.ru. 2022. № 9. С. 32-39.
3. Чебров Д.В., Тихонов С.А., Дроздин Д.В. и др. Система сейсмического мониторинга и прогнозирования на Камчатке и ее развитие. Основные результаты наблюдений в 2016-2020 гг. // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3, № 3. С. 28–49. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.3.02.
4. Кушнир А.Ф., Рожков М.В., Саввин Е.А., Чеботарева И.Я. Масштабируемая система сейсмического мониторинга реального времени на основе проблемно-ориентированной программно-алгоритмической среды SNDA в задачах оценки техногенных и природных угроз: практические результаты и перспективы развития // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2, Вып. № 16. С. 133-145.
5. Кочарян Г.Г., Золотухин С.Р., Калинин Э.В. и др. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород Коробковского железорудного месторождения на участке зоны тектонических нарушений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 1. С. 16-24. DOI: 10.15372/FTPRPI20180102.
6. Ружич В.В., Вахромеев А.Г., Левина Е.А и др. Об управлении режимами сейсмической активности в сегментах тектонических разломов с применением вибрационных воздействий и закачки растворов

- через скважины // Физическая мезомеханика. 2020. № 3. С. 54-69. DOI: 10.24411/1683-805X-2020-13006.
7. Зейгарник В.А., Богомолов Л.М., Новиков В.А. Электромагнитное инициирование землетрясений: полевые наблюдения, лабораторные эксперименты и физические механизмы (Обзор) // Физика Земли. 2022. № 1. С. 35-66. DOI: 10.31857/S0002333722010100.
  8. Гриб Г.В., Гриб Н.Н. Проявление техногенной сейсмичности в Южной Якутии // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16, № 1 (3). С. 636-640.
  9. Mikhailova N.N., Sokolova I.N. Monitoring system of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan // Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre. United Kingdom, 2019. Vol. 53, Iss. 1. P. 27-38. DOI: 10.31905/RK46YGLU.
  10. Владов Ю.Р., Нестеренко М.Ю., Владова А.Ю., Белов В.С. Повышение геодинамической безопасности управлением индуцированной сейсмичностью при разработке месторождений твердых полезных ископаемых // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 9. С. 45-51. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-9-45-51.
  11. Butra J., Kudelko J. Rockburst hazard evaluation and prevention methods in Polish copper mines // Cuprum. 2011. Vol. 61, No. 4. P. 5-20.
  12. Suorineni F.T., Hebblewhite B., Saydam S. Geomechanics challenges of contemporary deep mining: a suggested model for increasing future mining safety and productivity // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014. Vol. 114. No. 12. P. 1023-1032.
  13. Нестеренко М.Ю., Цвяк А.В., Владов Ю.Р. Влияние переотраженного сигнала на точность навигационных систем при мониторинге деформаций земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов // Успехи современного естествознания. 2016. № 9. С. 143-147.
  14. Vladova A., Vladov Y. Machine classification of pore space for hydrocarbon reservoir characterization // Proceedings – 21st IEEE Conference on Business Informatics (CBI' 2019). 2019. P. 391-396. DOI: 10.1109/cbi.2019.00051.
  15. Vladova A.J., Vladov J.R., Kushnarenko V., Bakhtadze N.N. Methodology and results of analytical identification of technical condition of technogenic facilities // IFAC Proceedings Volumes. 2012. Vol. 45, No. 6. P. 929-933.
  16. Владов Ю.Р. Идентификация геодинамического состояния продуктивных пластов, месторождений углеводородов и нефтегазоносного бассейна // Автоматизация в промышленности. 2023. № 3. С. 25-27. DOI: 10.25728/avtprom.2023.03.05.
  17. Vladov Y.R., Vladova A.Y. Control signals of a predictive industrial PID controller // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, No. 5. P. 399-402.
  18. Владов Ю.Р., Нестеренко М.Ю., Нестеренко Ю.М. и др. Пат. RU 2753903 С1. Способ классификации геодинамического состояния разрабатываемых месторождений углеводородов нефтегазоносного бассейна. Заявл. 07.07.2020; опубл. 24.08.2021. Бюл. № 24.
  19. Владов Ю.Р., Нестеренко М.Ю., Нестеренко Ю.М. и др. Пат. RU 2782173 С1. Способ управления индуцированной сейсмической активностью на участках разработки месторождений ТПИ. Заявл. 07.05.2021; опубл. 21.10.2022. Бюл. № 30.