Переходные процессы при отработке угольного месторождения в свете интеллектуального управления

Виктор Леонтьевич ЯКОВЛЕВ*
Ирина Александровна ОСИПОВА**

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность работы. Исследованием вопроса внезапных выбросов угля и газа занимаются на протяжении более полутора веков в различных странах, где велась и ведется добыча угля, используя различные подходы для изучения этого процесса с целью предотвращения аварийных ситуаций и ведения безопасных горнодобывающих работ. На сегодняшний день эта проблема остается актуальной и на территории Российской Федерации. В связи с изменившимися внешними и внутренними вызовами развития угледобычи на российских горных предприятиях предлагается рассмотреть проблему в свете интеллектуального управления.

Цель работы. Работа посвящена развитию переходных процессов при отработке угольного месторождения в свете интеллектуального управления. Задачей работы является создание индустриального графа знаний для изучения газодинамического явления внезапного выброса угля и газа, происходящего в конкретном угольном пласте, вводимом в отработку.

Метод и методология проведения работы. В основе исследования лежит проблемно-ориентированный подход к решению вопроса безопасного ведения горных работ, а именно к тщательному изучению проблемы внезапных выбросов угля и газа до того момента, пока выброс не произошел. Для решения существующей проблемы предлагается создание индустриального графа знаний, учитывающего особенности геомеханических процессов, происходящих в горном массиве. В созданном индустриальном графе знаний показаны основные классы, способствующие представлению и структуризации знаний о причинах возникновения внезапных выбросов угля и газа для конкретного угольного пласта, вводимого в отработку.

Результаты. В результате проведенного исследования на основе построения индустриального графа знаний можем сделать вывод о том, что необходимо создание иерархического индустриального графа знаний, где прослеживаются внутренние переходные процессы возникновения внезапных выбросов угля и газа, изучение нормативно-справочной информации и выявление семантических закономерностей в них, создание классификации с геомеханически конкретными явлениями и их признаками. Все эти исследования осложняются большими объемами данных, их разрозненностью, а в некоторых случаях недостоверностью и противоречивостью информации. При получении семантически непротиворечивого индустриального графа знаний структурированные знания будут необходимы для построения математической модели прогноза внезапных выбросов угля и газа, в которой учитываются внутренние переходные процессы при условии возникновения или отсутствия внезапных выбросов угля и газа.

Ключевые слова: переходные процессы, выброс, уголь, газ, интеллектуальное управление, индустриальный граф знаний.

Введение

Процесс отработки угольного месторождения неразрывно связан с различными динамическими или газодинамическими явлениями [1].

Динамические и газодинамические явления в шахтах – проблема междисциплинарная, охватывающая научные, технические, социальные, экономические и правовые вопросы. Ее важные составляющие: понятие причин и механизма явлений (построение физических и математических моделей); динамика массива и прогнозирование его состояния; разработка технологий безопасной добычи угля [2].

Согласно существующей международной классификации «Геодинамические явления в шахтах», разработанной рабочей группой по углю Европейской экономической комиссии ООН при активном участии российских ученых, данная классификация включает 4 класса явлений:

1. Горные удары, обусловленные энергией напряженных угля и пород: горные удары, толчки, выдавливания угля, стреляния, горные удары с разрушением вмещающих пород;

*vakovlev@igdur.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5860-9626>

**minesur@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3823>

2. Выбросы газа, обусловленные энергией газа: суфляры, выбросы (прорывы) газа, в том числе из зон тектонических нарушений.

3. Выбросы угля (породы) и газа, обусловленные энергией напряженных угля и пород, и газа: выбросы угля и газа, выбросы породы и газа; выбросы с разрушением вмещающих пород; обрушения, высыпания угля с газовыделением.

4. Горно-тектонические явления, обусловленные энергией напряженных угля и пород, и газа и энергией сейсмических волн: сотрясения (толчки) в массиве, горно-тектонические удары, горно-тектонические выбросы [3].

Как отмечает проф. В. С. Зыков, существуют три наименования техногенных динамических явлений в шахтах: динамические явления, геодинамические явления и газодинамические явления [3]. Отличие понятия «геодинамические явления» от понятия «динамические явления» состоит лишь в том, что оно не включает прорывы воды, плывунов, глины и пульпы. В свою очередь, под газодинамическим явлением понимают разрушения массива горных пород под влиянием горного давления, сопровождающиеся кратковременным выделением газа (метана, углекислого газа). В случае внезапного выброса угля и газа движущей силой может явиться упругая энергия газа». Такая формулировка практически уравнивает газодинамические явления с названными в международной классификации геодинамическими явлениями, поскольку любое разрушение газоносных угольных пластов, а тем более динамическое явление приводит к высокому газовыделению из угольных пластов [3].

Вместе с тем, по мнению члена-корреспондента РАН Г. И. Грицко: «Явления внезапных выбросов угля и газа относятся к динамическим формам газопроявлений при подземной добыче угля. В отличие от более или менее спокойного процесса газовыделения в горные выработки из угольных пластов и вмещающих пород, при внезапных выбросах происходит взрывоподобное (но это еще не взрыв) газовыделение с выбросом в выработки метана (скорее, смеси газов) и измельченного угля, после которого в массиве остаются характерные полости. Выброшенные метан и уголь распространяются по шахтным выработкам, нарушают вентиляцию, разрушают выработки и часто являются причиной взрывов, обрушений пород и пожаров в шахтах. В зависимости от силы выброса (количества выделившегося метана, выброшенного угля и динамики процесса), явления внезапных выбросов иногда перерастают в крупные катастрофы с многочисленными жертвами. Вместе с газом взрывается и угольная пыль».

Внезапные выбросы происходили на шахтах Франции, Бельгии, Германии, Англии, США, Австралии, Польши, Венгрии, Китая, Испании, Турции, Украины, России. Первый выброс описан во Франции в 1834 г. В России первый внезапный выброс зафиксирован в 1906 г. на шахте «Новая Смолянка» [4].

К настоящему времени произошло более 30 тысяч случаев внезапных выбросов. В СССР (теперь Россия, страны СНГ) внезапные выбросы происходили в Донбассе, Кузбассе, Печорском бассейне, в Приморье, на Урале и в Средней Азии.

Во время внезапных выбросов выбрасывается от нескольких тонн до 14 000 т (1968 г., шахта им. Ю. Гагарина

в Донбассе) угля и выделяется до 600 000 м³ метана. В некоторых бассейнах выбрасывается не метан, а углекислый газ, водород или смесь газов. Известны внезапные выбросы при разработке месторождений калийных солей; выбросы газа и породы.

В настоящее время около 30 шахт России ведут горные работы ниже критической по внезапным выбросам глубины. На них разрабатываются с применением противовыбросных мероприятий 125 опасных и угрожаемых по внезапным выбросам угля и газа шахтопластов. Всего на шахтах России произошло 910 внезапных выбросов угля и газа. Потенциальная выбросоопасность шахт увеличивается с глубиной. Глубина некоторых шахт (самыми глубокими являются шахты Воркутинского месторождения Печорского бассейна) достигла 1000 м, что говорит о высокой их опасности по газодинамическим явлениям [5].

Внезапные выбросы угля и газа имели место в России на угольных шахтах Кузбасса, Воркутинского месторождения Печорского бассейна, Партизанского и Подгоренского месторождений Приморского бассейна, Ростовского района Донбасса, Бошняковского месторождения острова Сахалин, Норильского района в Тунгусском бассейне, Егоршинского месторождения на Урале [5].

Изучение и исследование процесса внезапных выбросов угля и газа на сегодняшний день остается одним из важных направлений в области газодинамических явлений, поскольку имеет непосредственное влияние на безопасное и эффективное недропользование. Помимо этого, внезапные выбросы угля и газа являются одним из типичных газодинамических явлений для угольных шахт России, а также самым опасным по последствиям и сложным по своей природе явлением.

Кроме того, необходимо заметить, что в существующей действительности фронт горных работ продвигается на значительные глубины, где тоже фиксируются внезапные выбросы угля и газа.

Большая часть внезапных выбросов угля и газа происходит при вскрытии угольных пластов и проведении по ним подготовительных выработок. На сегодняшний день зафиксированы внезапные выбросы угля и газа в очистной выемке не в таком объеме, как при проведении пластовых подготовительных выработок, но они происходят.

В настоящее время мы можем говорить о происходящих переходных процессах как во внешнем проявлении (эффективный процесс освоения вновь введенного в отработку угольного месторождения или где ведется отработка угольного месторождения на протяжении долгого времени и т. д.), так и во внутреннем (безопасное и рациональное ведение подземных (открытых) горных работ и т. д.).

Как отмечает член-корреспондент РАН В. Л. Яковлев: «Повышение эффективности технологического и технического уровня ведения горных работ необходимо вести в рамках направления переходных процессов ввиду того, что особенностью технологического направления переходных процессов является то, что развитие технологии одного из производственных процессов зачастую обуславливает необходимость соответствующего развития технологии всех смежных ему производственных процессов. Структура технических переходных процессов

определяется задачами стратегии и инвестиционными возможностями компании» [6].

«Под переходными процессами будем понимать этапы стратегии освоения глубокозалегающих сложноструктурных месторождений – долгосрочного плана действий на всех этапах разведки, проектирования и разработки месторождения до получения товарной продукции на основе методологического подхода на принципах системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности, учитывающих нарастание геологической информации о месторождении при принятии заранее спланированных технологических и технических решений в качестве реакции на изменения внутренних и внешних условий функционирования горного предприятия ... [7] ... Они возникают при росте затрат материальных, трудовых и финансовых ресурсов, сбоях производственного ритма, увеличении текучести кадров, падении дисциплины и т. д.» [6].

Так, к примеру, применяемые меры борьбы и предотвращения внезапных выбросов угля и газа носили следующий характер, как планирование горных работ с первоочередной выемкой неопасных защитных пластов, применение дегазации пластов, дренажных скважин, увлажнение массива, сотрясательного взрыва, упрочнения массива и т. д. Все эти меры требуют высокой технологической дисциплины и непрерывного автоматизированного контроля в режиме реального времени [8].

Все перечисленные меры борьбы и предотвращения внезапных выбросов угля и газа не могут обеспечить должной безопасности и рационального ведения горных работ. По мнению члена-корреспондента РАН Г. И. Грицко: «... Остается предположить многообразие видов этих явлений, генетических факторов и механизмов процесса внезапных выбросов. Это предположение не является новым и на прежнем уровне знаний об этом явлении. Действующие классификации включают генетически разные виды внешне похожих явлений. Проблема в том, чтобы перевести эти классификации, а следовательно, методы прогноза и борьбы с этими явлениями на современный мультидисциплинарный научный уровень. При этом важно рассматривать не «выброс вообще», а уметь выделять классификационные генетически конкретные явления и их признаки. Незучеными остаются и геомеханические процессы, приводящие к механохимическому образованию или выбросу метана. Остается неясным, почему одинаковые геомеханические ситуации не всегда завершаются выбросом. Также неясно, почему у одних тектонических нарушений происходят выбросы, а у подавляющего большинства нарушений – нет. Самое важное здесь то, что все объяснения находятся после выброса, а не до него» [9].

В связи с этим можем говорить о междисциплинарном исследовании процесса внезапных выбросов угля и газа. В настоящей работе будет предложен подход в свете интеллектуального управления, а именно создания индустриального графа знаний.

Материалы и методы

С увеличением глубины горных работ по отработке угольного месторождения возрастают и объемы данных о процессе добычи угля и различной информации,

сопутствующей этому процессу. Существующая горно-геологическая, горнотехнологическая, геофизическая документация может носить разрозненный характер, быть трудно интерпретируемой, неполной, неоднородной, противоречивой для прогноза и предотвращения внезапных выбросов угля и газа.

Вместе с тем в настоящее время для визуализации, структуризации, интерпретации и выявления скрытых закономерностей все больше и больше стараются применять графы знаний (knowledge graph) [10].

По мнению авторов [11], граф знаний (knowledge graph) – это метод исследования, сочетающий теорию и метод прикладной математики, графики, технологий визуализации информации, информатики и других дисциплин с метрологическим анализом цитирования, анализом совпадений и другими методами, чтобы показать основную структуру, историю развития, границы предметной области и общей структуры знаний по дисциплине посредством визуального графа. Он показывает динамическое развитие знаний и обширные знания предметной области посредством интеллектуального анализа данных, обработки информации, измерения знаний и графического рендеринга. Другие авторы [12–14] полагают, что граф знаний (knowledge graph) – ресурс знаний и его источник, поиск, анализ, и конструирование, и рисование, и отображение знаний, и взаимная связь между ними с помощью технологии визуализации.

Согласно предложенной трактовке, можем говорить, что граф знаний (knowledge graph), позволяет выявить скрытые закономерности в формализованных и неформализованных данных с помощью различных методов прикладной математики и интеллектуального анализа данных, а также дать оценку этим знаниям и представить их визуально в виде концептуальной схемы предметной области.

Графы знаний (knowledge graph) в свою очередь подразделяются на графы знаний (knowledge graph) [15] и на индустриальные графы знаний (industry knowledge graphs) [16]. Индустриальные графы знаний показывают преимущества онтологического подхода, обеспечивающего гибкое моделирование и интероперабельность данных, стек семантических технологий, позволяющий выполнять анализ неструктурированной информации и интеллектуальный поиск данных во множестве разнородных источников, а также машинное обучение, обеспечивающее анализ и классификацию данных, в том числе в условиях неполной информации [17].

Результаты и обсуждение

В данной работе будет представлен предварительный подход к созданию индустриального графа знаний (industry knowledge graphs) применительно к рассмотрению решения проблемы прогноза и предотвращения внезапных выбросов угля и газа.

На рис. 1 представлен в первом приближении индустриальный граф знаний для иллюстрации причинно-следственных связей возникновения внезапных выбросов угля и газа в рамках рассмотрения этой проблемы еще до момента, пока выброс не произошел.

Кратко рассмотрим классы, входящие в индустриальный граф знаний. Объектом исследования в нашем

Рисунок 1. Индустриальный граф знаний для иллюстрации причинно-следственных связей возникновения внезапных выбросов угля и газа.

Figure 1. Industrial knowledge graph to illustrate the causal relationship of sudden coal and gas emissions.

случае является угольный пласт, который планируется вскрывать. Два основных фактора, влияющих на угольный пласт, – это геотектонические и техногенные воздействия. На схеме они представлены двумя классами: «Геотектонические воздействия» и «Техногенные воздействия», в них записаны параметры, влияющие на процесс возникновения внезапных выбросов угля и газа. Далее при влиянии на угольный пласт этих двух воздействий возникает газонапряженное деформированное состояние пласта. Класс носит одноименное название. В нем указываются условия, при которых возникают геомеханические процессы изменения состояния пласта. Вследствие этого происходят процессы деструкции межатомных и межмолекулярных связей. Класс также носит одноименное название. Здесь аналогично все признаки и условия записываются в классе. Согласно этому, появляются источники газообразования механохимической природы дополнительно к сорбционным. Класс также носит одноименное название, фиксируя все знания о природе протекания процесса. Следующая стадия, приводящая к внезапному выбросу угля и газа, – это высокий уровень энергонасыщения массива в окрестностях забоя. Здесь фиксируются все данные о характеристиках энергонасыщения массива. В работе [18] говорится об «... особых свойствах выбросоопасных участков (зон) угольного пласта и прилегающего к нему породного массива: они напряжены, причем энергию деформации несут все макро- и микросоставляющие угольно-породного массива. Энергия этих деформаций аккумулируется на всех этапах геологического развития угленосной толщи и сохраняется (не релаксируя) на молекулярном и надмолекулярном уровнях в органической части системы «уголь–газ», а также в окрестностях различного рода дефектов. В результате энергетически насыщенная система при нарушении термодинамического равновесия, обусловленного техногенным

воздействием, разрушается, выделяя не только свободный газ, но и газ, растворенный и вновь образованный...».

Заметим, что нужно предвидеть возможность качественного перехода массива в выбросоопасное состояние и воздействовать заранее на его свойства так, чтобы не допустить этого процесса [6]. Для этого рекомендуется создать многоуровневый индустриальный граф знаний, который учитывает неполные, недостоверные и противоречивые знания и данные для выявления скрытых закономерностей, происходящих до возникновения внезапного выброса угля и газа.

Выводы

В основе исследования лежит проблема внезапных выбросов угля и газа. Рассмотрение связано с положением о том, что процесс рассматривается до того момента, пока выброс не произошел. В изучении данного вопроса предложен междисциплинарный подход с позиции интеллектуального управления и внутренних переходных процессах, которые проявляются в настоящее время в угледобыче.

Предложен в первом приближении индустриальный граф знаний для иллюстрации причинно-следственных связей возникновения внезапных выбросов угля и газа. Задача изучения процесса осложняется многообразием информации, неполноты, недостоверности и противоречивости знаний и данных по этому вопросу.

Для решения этого вопроса рекомендуется создать многоуровневый индустриальный граф знаний. В результате получения семантически не противоречивого индустриального графа знаний, где будут структурированные знания необходимые для построения математической модели прогноза внезапных выбросов угля и газа, в которые учитывают внутренние переходные процессы при условии возникновения или отсутствия внезапных выбросов угля и газа.

Статья подготовлена по программе ФНИ государственных академий наук Тема 1 – Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложно-структурных месторождений полезных ископаемых (№ 0405-2019-0005).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зыков В. С., Лазаревич Т. И. Классификация динамических явлений в угольных шахтах // Уголь. 2016. № 11. С. 47–53. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2016-11-47-53>
2. Булат А. Ф., Дырда В. И. Внезапные выбросы угля и газа в контексте нелинейной неравновесной термодинамики // Уголь Украины. 2013. № 12. С. 24–33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr_2013_12_6
3. Зыков В. С., Абрамов И. Л. Уточнение классификации динамических явлений в угольных шахтах // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2015. № 3. С. 74–84.
4. Зыков В. С. Факторы и свойства горного массива, определяющие вид опасности по геодинамическим явлениям // Вестник КузГТУ. 2014. № 5 (105). С. 9–17.
5. Зыков В. С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах. Кемерово: Ин-т угля и углехимии СО РАН, 2010. 333 с.
6. Яковлев В. Л., Азев В. А., Макаров А. М. Внутрипроизводственное планирование в условиях инновационного развития угледобывающего предприятия. Челябинск: АБРИС, 2019. 164 с.
7. Яковлев В. Л. Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. 284 с. <https://doi.org/10.25635/IM.2020.54.57311>
8. Осипова И. А. Подход к созданию комплексной модели исследования прогноза внезапных выбросов угля и газа // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 170–177. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-170-177>
9. Грицко Г. И. Внезапные выбросы метана в шахтах // Наука в Сибири. 2007. URL: <http://www.nsc.ru/HBC/article.phtml?nid=428&id=17>
10. Zou X. A Survey on Application of Knowledge Graph // Journal of Physics: Conference Series, 2020. Vol. 1487. P. 1–11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1487/1/012016>
11. Zhu Y., Zhou W., Xu Y., Liu J., Tan Y. Intelligent Learning for Knowledge Graph towards Geological Data // Scientific Programming. 2017. Vol. 2017. P. 1–13. <https://doi.org/10.1155/2017/5072427>
12. Le Phuoc D., Quoc H. H. M., Quoc H. N., Nhat T. T., Hauswirth M. The graph of things: a step towards the live knowledge graph of connected things // Journal of Web Semantics. 2016. Vol. 37-38. P. 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.websem.2016.02.003>
13. Liu H., Sun F., Fang B., Zhang X. Robotic room-level localization using multiple sets of sonar measurements // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2017. Vol. 66, № 1. P. 2–13. <https://doi.org/10.1109/TIM.2016.2618978>
14. Liu H., Yu Y., Sun F., Gu J. Visual-tactile fusion for object recognition // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2016. Vol. 14(2). P. 1–13. <https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2549552>
15. Liu Y., Li H., Garcia-Duran A., Niepert M., Onoro-Rubio D., Rosenblum D. S. MMKG: Multi-modal Knowledge Graphs / P. Hitzler et al. (eds) // The Semantic Web. ESWC 2019. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2019. Vol. 11503. P. 459–474. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21348-0_30
16. Zhao M., Wang H., Guo J., Liu D., Xie C., Liu Q., Cheng Z. Construction of an industrial knowledge graph for unstructured chinese text learning // Applied Science: electronic scientific journal. 2019. Vol. 9, issue 13. <https://doi.org/10.3390/app9132720>
17. Муромцев Д., Волчек Д., Романов А. Индустриальные графы знаний – интеллектуальное ядро цифровой экономики // Control Engineering Россия. 2019. Т. 5, № 83. С. 32–39.
18. Обухов А. А., Фролков Г. Д., Артемьев В. Б. Структурно-химическая механика углей метаноморфического ряда пластов, опасных по внезапным выбросам угля и газа. Шахты: Изд-во Юж.-Рос. отд-ния АГН РФ, 2000. 151 с.

Статья поступила в редакцию 24 августа 2020 года

Transition processes in coal field development in the light of intelligent control

Viktor Leont'evich YAKOVLEV*
Irina Aleksandrovna OSIPOVA**

Institute of Mining of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance of the work. The problem of sudden outbursts of coal and gas has been studied for more than a century and a half using various approaches to study this process. In order to prevent accidents and conduct safe mining operations. Today this problem remains relevant in the territory of the Russian Federation. In connection with the changed external and internal challenges of the development of coal mining at Russian mining enterprises, it is proposed to consider the problem in the light of two aspects, one of which is the geographical location of subsoil use objects and intelligent control.

Objective. The work is devoted to the study of the development of transient processes at a coal mining enterprise from the standpoint of intellectual management. The task of the work is to create in the first approximation an industrial knowledge graph.

Method and methodology of the work. The study is based on a problem-oriented approach to solving the issue of safe mining, namely, to thoroughly study the problem of sudden emissions of coal and gas before the release occurs. To solve the existing problem, it is proposed to create an industrial graph of knowledge, taking into account the peculiarities of geomechanical processes occurring in the mountain range. In the created industrial knowledge graph, the main classes are shown that contribute to the presentation and structuring of knowledge about the causes of sudden coal and gas outbursts for a particular coal seam being put into production.

Results. Because of the study, based on the construction of an industrial knowledge graph, we can conclude that it is necessary to create a classification with geomechanically specific phenomena and their features. Study of normative and reference information and identification of semantic patterns in them. All these studies are complicated by the large volumes of data, their fragmentation, and in some cases the unreliability and inconsistency of information. When obtaining a semantically non-contradictory industrial graph of knowledge, knowledge can be "useful" for constructing a mathematical model for predicting sudden coal and gas emissions.

Keywords: transition process, emission, coal, gas, intelligent control, industrial knowledge graph.

The work was carried out within the framework of the State assignment, No. 0328-2019-0005 (2019-2021).

REFERENCES

1. Zykov V. S., Lazarevich T. I. 2016, Classification of dynamic phenomena in coal mines. *Ezhemesyachnyj nauchno-tekhnicheskij i proizvodstvenno-ekonomicheskij zhurnal Ugol'*, no. 11, pp. 47–53. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2016-11-47-53> (In Russ.)
2. Bulat A. F., Dyrda V. I. 2013, Sudden coal and gas emissions in the context of nonlinear non-equilibrium thermodynamics. *Ugol' Ukrainy*, no. 12, pp. 24–33. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr_2013_12_6 (In Russ.)
3. Zykov V. S., Abramov I. L. 2015, Clarification of classification of dynamic phenomena in coal mines. *Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti*, no. 3, pp. 74–84. (In Russ.)
4. Zykov V. S. 2014, Factors and properties of the mountain massif, determining the type of hazard by geodynamic phenomena. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 5 (105), pp. 9–17. (In Russ.)
5. Zykov V. S. 2010, *Vnezapnye vybrosy uglya i gaza i drugie gazodinamicheskie yavleniya v shahtah* [Vnezapnye vybrosy uglya and gauze and second gasodinamicheskie yavleniya v shahtah]. Kemerovo, 333 p.
6. Yakovlev V. L., Azev V. A., Makarov A. M. 2019, *Vnutriproizvodstvennoe planirovanie v usloviyah innovacionnogo razvitiya ugledobyvayushchego predpriyatiya* [Internal production planning in conditions of innovative development of the coal-mining enterprise]. Chelyabinsk, 164 p.
7. Yakovlev V. L. 2019, *Issledovanie perehodnykh processov – novoe napravlenie v razvitii metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov* [Study of transition processes – a new direction in the development of a methodology for the integrated development geo-resources]. Ekaterinburg, 284 p. <https://doi.org/10.25635/IM.2020.54.57311> (In Russ.)
8. Osipova I. A. 2020, Approach to creating an integrated model for research forecast of extraordinary emissions of coal and gas. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*, no. 3-1, pp. 182–189. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-182-189> (In Russ.)
9. Gritsko G. I. 2007, *Vnezapnye vybrosy metana v shahtah* [Sudden methane emissions in mines]. Science in Siberia. URL: <http://www.nsc.ru/HBC/article.php?nid=428&id=17>

✉ yakovlev@igduran.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5860-9626>

**minesur@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3823>

10. Zou X. 2020, A Survey on Application of Knowledge Graph. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1487, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1487/1/012016>
11. Zhu Y., Zhou W., Xu Y., Liu J., Tan Y. 2017, Intelligent Learning for Knowledge Graph towards Geological Data. *Scientific Programming*, vol. 2017, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1155/2017/5072427>
12. Le Phuoc D., Quoc H. H. M., Quoc H. N., Nhat T. T., Hauswirth M. 2016, The graph of things: a step towards the live knowledge graph of connected things. *Journal of Web Semantics*, vol. 37–38, pp. 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.websem.2016.02.003>
13. Liu H., Sun F., Fang B., Zhang X. 2017, Robotic room-level localization using multiple sets of sonar measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 1, pp. 2–13. <https://doi.org/10.1109/TIM.2016.2618978>
14. Liu H., Yu Y., Sun F., Gu J. 2016, Visual-tactile fusion for object recognition. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 14(2), pp. 1–13. <https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2549552>
15. Liu Y., Li H., Garcia-Duran A., Niepert M., Onoro-Rubio D., Rosenblum D. S. 2019, MMKG: Multi-modal Knowledge Graphs. In: Hitzler P. et al. (eds). *The Semantic Web. ESWC 2019. Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer, vol. 11503, pp. 459–474. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21348-0_30
16. Zhao M., Wang H., Guo J., Liu D., Xie C., Liu Q., Cheng Z. 2019, Construction of an industrial knowledge graph for unstructured chinese text learning. *Applied Science: electronic scientific journal*, vol. 9, issue 13. <https://doi.org/10.3390/app9132720>
17. Muromtsev D., Volchek D., Romanov A. 2019, Industry knowledge graphs – the intellectual core of the digital economy. *Control Engineering Rossiya*, vol. 5, no. 83, pp. 32–39.
18. Obuhov A. A., Frolov G. D., Artem'ev V. B. 2000, *Strukturno-himicheskaya mekhanika uglej metanomorficheskogo ryada plastov, opasnykh po vnezapnym vybrosam uglja i gaza* [Structural and chemical mechanics of coals of methanomorphous series of seams dangerous for sudden coal and gas emissions]. Shakhty, 151 p.

The article was received on August 24, 2020