

УДК 004.94:622.015

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-110-119>

Алгоритм геометрического сравнения моделей сетей горных выработок для автоматизации обеспечения их достоверности

Д. Е. Шабанов¹✉

¹Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация

e-mail: alvarsondar@gmail.com

Аннотация. Рассмотрено использование моделей сети горных выработок для обеспечения безопасности ведения горнодобывающих работ, отражающих геометрию и структуру сети горных выработок, необходимых для проведения расчетов, на которых основывается проектирование вентиляции в шахте и построение планов ликвидации аварии. Поэтому важной является достоверность моделей, однако на данный момент на рынке отсутствуют решения, позволяющие автоматизированно обеспечивать такой процесс. В связи с этим была поставлена и решена научная задача создания алгоритма геометрического сравнения моделей сети горных выработок. Предложенный в статье алгоритм позволяет автоматизировать процесс проверки достоверности создаваемых моделей. Использование ГИС, которая применяет данный алгоритм, позволит улучшить качество создаваемых моделей, избавиться от рисков, вносимых человеческим фактором, оптимизировать обновление планов ликвидации аварий и снизить человеческие трудозатраты. Практическая значимость исследований заключается в том, что разработанный автором алгоритм позволяет обеспечивать контроль создаваемых моделей сетей горных выработок и оперативно обновлять планы ликвидации аварии с учетом изменений геопространственных данных.

Ключевые слова: модель сети горных выработок, алгоритм геометрического сравнения, расчетная сетка

Для цитирования:

Шабанов Д. Е. Алгоритм геометрического сравнения моделей сетей горных выработок для автоматизации обеспечения их достоверности. *Вестник СГУГиТ*. 2025. Т. 30, № 6. С. 110–119. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-110-119>

Geometric comparison algorithm for validating mining excavation network models

D. E. Shabanov¹✉

¹Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation

e-mail: alvarsondar@gmail.com

Abstract. The study investigates the use of underground mining excavation network models to enhance safety in mining operations by accurate representing the geometry and structure of mine workings, which are essential for ventilation design calculations and emergency response planning. Although model fidelity is paramount, currently no commercial tools enable automated verification. Accordingly, the research addresses the scientific challenge of developing a geometric comparison algorithm for mining excavation network models. The proposed algorithm automates model validation processes. Its integration into geographic information systems mitigates human error, optimizes emergency plan updates, and reduces labor requirements. The practical signifi-

cance lies in enabling real-time quality control of mining excavation network models and prompt revision of accident mitigation plans in response to geospatial data updates.

Keywords: mine excavation network model, geometric comparison algorithm, computational grid

For citation:

Shabanov D. E. (2025). Geometric comparison algorithm for validating mining excavation network models. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]*. Vol. 30, No. 6. pp. 110–119. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-110-119>

Введение

Угольные шахты относятся к категории опасных производственных объектов. Ежегодно на таких предприятиях фиксируются аварийные ситуации, обусловленные скоплением и выбросами угля и газа, приводящими к взрывам, пожарам и человеческим жертвам [1, 2]. В связи с этим обеспечение безопасности ведения горных работ в шахтах на основе создания систем вентиляции – одна из ключевых задач угледобывающей промышленности [3, 4]. Планирование вентиляционных сетей шахты – сложный процесс, включающий проведение расчета вентиляции, определение устойчивости проветривания и расчет взрывобезопасных расстояний при взрывах газа [5–7]. В случае возникновения аварийных ситуаций, несмотря на проведенные превентивные мероприятия, персонал шахты должен располагать утвержденными планами ликвидации аварий (ПЛА). Планы ликвидации аварий представляют собой регламентирующие документы, в которых формулируется комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на устранение последствий аварийной ситуации и обеспечение спасения персонала, находящегося в зоне ее действия [8, 9]. Построение ПЛА включает в себя, в частности, расчет кратчайших маршрутов аварийного выхода людей. Для проведения вышеуказанных расчетов необходима информация о структуре и геометрии выработанного пространства шахты.

Формирование моделей выработанного пространства происходит в несколько этапов. На первом из них производятся маркшейдерские работы, включающие определение пространственных координат и глубин участков выработанного пространства с применением

специализированного геодезического оборудования, в частности, электронных тахеометров [10]. С помощью специального программного обеспечения, в качестве которого может выступать программный комплекс «Вентиляция», создается модель сети горных выработок, основанная на данных, полученных маркшейдерами [11]. «Вентиляция» предоставляет специальные формы ввода данных, при помощи которых производится последовательное создание объектов топологии шахты, таких как ветви (прямолинейные участки горной выработки) и узлы (места сопряжения трех и более ветвей). Узлы характеризуются координатами в трехмерном пространстве. Ветви характеризуются парой узлов (начальный и конечный), а также дополнительными атрибутами, например, площадью сечения, углом наклона и др. Также модель может содержать другие объекты, такие как вентиляторы или перемычки, которые должны располагаться на ветвях и которые характеризуются относительными координатами (т. е. расположением относительно начала ветви; например, для объекта, располагающегося посередине ветви, такая координата будет равна 0,5), а также дополнительными атрибутами. В конечном итоге модель сохраняется в формате JSON, который позволяет легко считать из него информацию другими системами и сформировать список объектов для дальнейших расчетов и визуализации [12]. Построенная модель используется для расчета воздухораспределения в шахте, расчета устойчивости при пожаре, параметров водораспределения в подземном пожарно-оросительном и водоотливном трубопроводе шахты и прочих расчетов, связанных с обеспечением безопасности ведения угледобывающих процессов.

По результатам проведения маркшейдерских работ по формированию данных о выработанном пространстве определяются координаты объектов и составляются тематические карты, что служит топографической основой планов ликвидации аварии [13, 14]. Для хранения и обработки геопространственных данных, а также их редактирования в случае выявления изменений в модели сети горных выработок следует использовать геоинформационные системы [15–17]. Они позволяют эффективно управлять геоинформационными данными, в том числе в рамках решения задач по обеспечению безопасности проведения угледобывающих процессов [18–20].

Так как добыча угля – это длительный процесс, возникает необходимость поддерживать модель сети горных выработок в актуальном состоянии. Выработанное пространство при выполнении очередных этапов очистных работ прирастает новыми участками. Одновременно под действием гравитации, тектонических напряжений и производственных действий в массиве горных пород формируются зоны повышенного горного давления, в результате чего на участках горных выработок возникают трещины, некоторые участки могут оказаться погашены либо со временем меняются их геометрические параметры [21, 22]. В результате могут происходить горизонтальные (например, сближение противоположных сторон выработки) и вертикальные (например, подъем почвы) деформации выработок, вызываемые напряжением, оказываемым на кровлю выработанного пространства [23, 24]. Чтобы отобразить произошедшие изменения, создаются новые версии изначально построенной модели выработанного пространства шахты, основанные на новых маркшейдерских данных [25, 26]. Модели могут содержать ошибки, допускаемые в процессе ввода данных. Например, могут быть неправильно введены координаты объекта или ошибочно удалена ветвь. Это является серьезным просчетом, ведь неправильное представление о параметрах горных выработок или об их связи друг с другом может привести к тому, что результаты расчетов вентиляции для недостоверной модели не будут соответствовать требованиям безопасно-

сти. Таким образом, новые версии моделей нуждаются в проверке на достоверность. Однако они могут включать в себя десятки тысяч объектов, что делает невозможной оперативную и качественную проверку без использования специализированных автоматизированных средств.

Топологическая модель сети горных выработок представляет из себя частный случай топологических транспортных моделей. Топологические транспортные модели представляют из себя графы, состоящие из точек и соединяющих их звеньев, и, как правило, используются для анализа и прогнозирования транспортных потоков и оптимизации маршрутов. В связи со спецификой задач, решаемых с помощью топологических транспортных моделей, их сравнение зачастую сводится к выявлению изоморфизма. Однако для сетей горных выработок подобный подход является нерелевантным, так как при их сравнении необходимо учитывать не только связи между узлами, но и расположение узлов в пространстве. Основой для существующих вариантов автоматизации предполагает сравнение моделей по уникальным идентификаторам объектов. За каждым объектом, из которого состоит модель, закреплен собственный уникальный номер, и сравнение моделей можно провести, сравнив номера объектов, входящих в эти модели, но у данного метода есть ряд существенных недостатков. Во-первых, номера объектов могут произвольно измениться в ходе построения новой модели, и в таком случае указанный метод окажется нерабочим. Во-вторых, подобный метод позволит определить появление в созданной модели новых объектов или удаление старых, но не позволит заметить возможные изменения в координатах одного и того же объекта. Исходя из этого, актуальной научной задачей является отсутствие автоматизированного способа сравнения моделей сети горных выработок, позволяющего добиться высокой достоверности результатов.

Научная новизна предлагаемого способа заключается в осуществлении геометрического сравнения различных версий моделей выработанного пространства, который в от-

личие от имеющихся на данный момент алгоритмов позволяет оценить изменения, внесенные в модель, не привязываясь к конкретному разбиению пространства на объекты, которое может носить произвольный характер. Кроме проверки достоверности новых версий модели, предложенный алгоритм позволяет автоматизировано пополнять ПЛА [27].

Описание алгоритма

Прежде чем приступать к сравнению, необходимо определиться с его допустимой точностью. Дело в том, что некоторыми геометрическими особенностями расположения ветвей в пространстве можно пренебречь при определенных обстоятельствах. Например, в случае если в двух моделях присутствует ветвь, исходящая из одной и той же точки, в одном и том же направлении, однако углы, под которыми они направлены, могут несущественно различаться на значения порядка 3–5 градусов. Также может возникнуть ситуация, когда узел, соединяющий одни и те же ветви в двух разных моделях, может незначительно сместиться из-за неточности, допущенной при вводе данных. Как следствие, в одном случае данные ветви будут располагаться на одной прямой, а в другом – будут образовывать ломаную линию, как на приведенном ниже рис. 1.

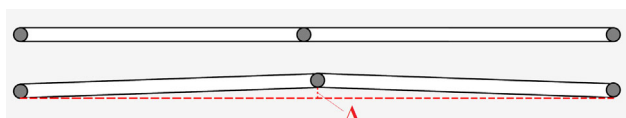


Рис. 1. Изменения в топологии, вызванные смещением общего для ветвей узла. Буквой дельта (Δ) обозначается смещение узла, которое в рамках алгоритма сравнивается с заданной точностью

Формально в обоих приведенных случаях имело место изменение положения ветвей выработанного пространства. Однако на практике пользователь может решить, что отклонение узла ветви на величину, не превышающую введенное им значение, является допустимым. Это связано с тем, что фактически подобные изменения не внесут значимых различий при совершении расчетов в задачах

противоаварийной устойчивости. Величина допускаемого отклонения определяется маркшейдерами опытным путем для каждого конкретного случая. Как правило, она зависит от размеров выработанного пространства и особенностей залегания углепородного массива, в частности значений углов, под которыми залегают обрабатываемые пласты. Таким образом, для второго примера ветви, образующие ломаную, стоит представить как ветви, лежащие на одной прямой, в случае, если отклонение их общей вершины соотносится с пользовательским значением допустимой погрешности. В процессе сравнения данные участки сетей горных выработок будут определены как идентичные.

Базовый процесс геометрического сравнения двух сетей горных выработок состоит из следующих шагов.

1. В качестве исходных данных алгоритма выступают исходная топология $T_{old} = \{b_1^{old}, b_2^{old}, \dots, b_m^{old}\}$, где b_i^{old} – ветвь с узлами $x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots$; новая топология $T_{new} = \{b_1^{new}, b_2^{new}, \dots, b_n^{new}\}$, где b_j^{new} – ветвь с узлами $y_1^{(i)}, y_2^{(i)}, \dots$; заданное пользователем значение погрешности $\varepsilon \geq 0$.

Для каждой пары ветвей (b_i^{old}, b_j^{new}) , где $i \in \{1, \dots, m\}$, $j \in \{1, \dots, n\}$, проверить условие эквивалентности

$$\max \|x_k^{(i)} - y_k^{(i)}\| \leq \varepsilon,$$

где $\|*\|$ – евклидова норма.

Если условие выполняется, пометить b_j^{new} и b_i^{old} как совпадающие и исключить их из общего списка для обеих топологий. На следующем изображении показана визуальная демонстрация шага 1 для топологий $G_1 = \{V_1, E_1\}$ и $G_2 = \{V_2, E_2\}$, где $V_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, $E_1 = \{(1, 2), (2, 6), (6, 4), (3, 2), (3, 5)\}$, $V_2 = \{1, 2, 3, 4, 7, 8\}$, $E_2 = \{(1, 7), (7, 8), (7, 2), (2, 4), (3, 2)\}$. Ветви (3, 2)

обеих топологий помечены желтым цветом как одинаковые.

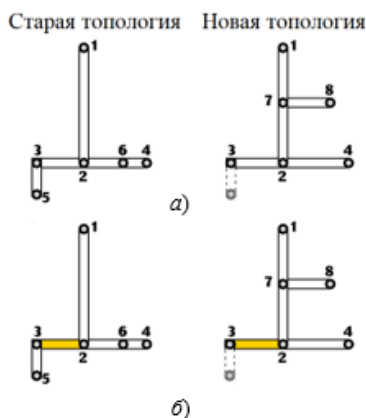


Рис. 2. Визуализация первого шага алгоритма: а) исходные данные; б) данные после первого шага

2. Для каждой $b_j^{new} \in T_{new}$ составить список $L_j = \{b_i^{old} \in T_{old} \mid \text{len}(b_i^{old}) \geq \text{len}(b_j^{new})\}$. Если $L \neq \emptyset$, то для каждой $b_i^{old} \in L$ проверить, не является ли b_j^{new} частью b_i^{old} . Пусть x_1, x_2 – узлы b_i^{old} , y_1, y_2 – узлы b_j^{new} . Необходимо построить параметрическое уравнение прямой $r(t)$ по x_1, x_2 и проверить, что для y_s , где $s \in [1, 2]$,

$$\text{dist}(y_s, r(t)) \leq \varepsilon \text{ (лежат на прямой),}$$

$$\exists t_s \in [0, 1] : r(t_s) \approx y_s \text{ (в пределах отрезка).}$$

Если условия выполняются, то пометить b_j^{new} как часть b_i^{old} , удалить b_j^{new} из списка ветвей. При этом b_j^{new} добавляется в ассоциативный массив M , где

$$M[b_i^{old}] \leftarrow M[b_i^{old}] \cup \{b_j^{new}\}.$$

Этот массив пополняется после каждой итерации, в рамках которой были найдены b_j^{new} , являющиеся частью b_i^{old} . После каждого обновления массива происходит уточнение:

$$\text{len}(b_i^{old}) = \sum_{b \in M[b_i^{old}]} \text{len}(b).$$

Если они удовлетворяются, то заданная ветвь удаляется из списка ветвей старой топологии. Визуализация второго шага представлена на рис. 3. Желтым цветом обозначены ветви (1, 2), (1, 7), (7, 2), помеченные как одинаковые. Дугами фиолетового цвета помечены участки ветви (1, 2), которые хранились в массиве соответствующего объекта структуры.

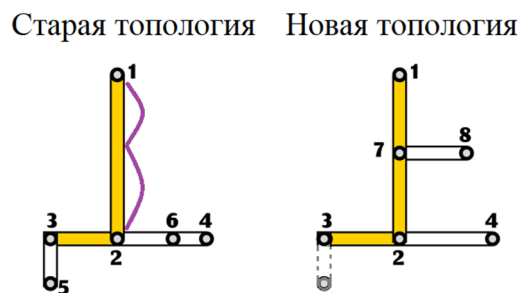


Рис. 3. Визуализация второго шага алгоритма

3. Выполняются действия, аналогичные действиям из шага 2, однако в нем топологии меняются местами, т. е. составляется список $L_i = \{b_j^{new} \in T_{new} \mid \text{len}(b_j^{new}) \geq \text{len}(b_i^{old})\}$, после чего происходит проверка, не является ли b_i^{old} частью $b_j^{new} \in L_i$. Для ветвей из новой топологии составляется аналогичная структура пар «ключ – значение». Визуализация третьего шага представлена на рис. 4. Желтым цветом обозначены ветви (2, 6), (6, 4), (2, 4), помеченные как одинаковые. Дугами фиолетового цвета помечены участки ветви (2, 4), которые хранились в массиве соответствующего объекта структуры.

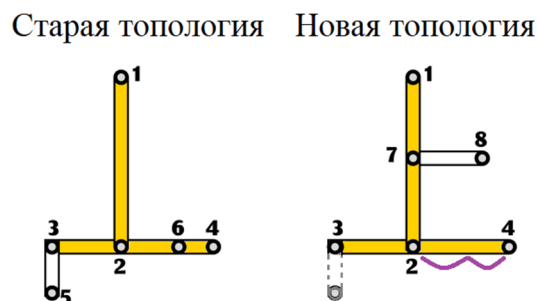


Рис. 4. Визуализация третьего шага алгоритма

4. Каждая оставшаяся ветвь $b_j^{new} \in T_{new}$ сравнивается с ветвью $b_i^{old} \in T_{old}$. Пусть

x_1, x_2 – узлы b_i^{old} , y_1, y_2 – узлы b_j^{new} . Если для b_j^{new} не находится такого b_i^{old} , для которого выполняется условие коллинеарности $b_j^{new} \parallel b_i^{old}$ либо же $b_j^{new} \parallel b_i^{old}$, но при этом $\forall i \in \{1, 2\}$, если $y_i = \delta_i(x_2 - x_1)$, то $\delta_i \notin [0, 1]$, тогда b_j^{new} помечается как новая и удаляется из списка.

Если же находится b_i^{old} , с которой происходит пересечение, то определяется зона пересечения $intersect: \{id \leftrightarrow (p_1, p_2)\}$, где id – идентификатор ветви b_i^{old} , p_1, p_2 – относительные координаты точек пересечения. В ассоциативном массиве M , созданном на втором шаге, ищется $M[b_i^{old}]$ такой, что идентификатор $b_i^{old} = id$. В соответствующий этому ключу массив заносится созданный выше объект и происходит сравнение длин по принципу, объясненному в п. 2. Та часть ветви из новой топологии, которая не входит в область пересечения, помечается как новая, сама же ветвь удаляется из списка.

Если для b_j^{new} был создан соответствующий объект в структуре, созданной на третьем шаге, и в ходе сравнения не находится b_i^{old} , которые бы пересекались с ней, то выполняются следующие действия. Определяется, какую часть ветви занимают участки из массива внутренних промежутков, и для этой части создаются объекты $intersect: \{id \leftrightarrow (p_1, p_2)\}$, где id – идентификатор ветви b_j^{new} , p_1, p_2 – относительные координаты точек пересечения, которые помечаются как общие. Для остальной части также создаются аналогичные по структуре объекты и помечаются как новые.

5. Повторяются действия, описанные в предыдущем шаге, однако уже оставшиеся ветви b_i^{old} сравниваются с ветвями b_j^{new} . Зоны пересечения также помечаются как общие, а непересекающиеся участки помечаются как удаленные. Визуализация шагов 4 и 5 изображена на рис. 5. Зеленым цветом

изображена ветвь (7, 8), помеченная как новая. Красным цветом изображена ветвь (3, 5), помеченная как удаленная.

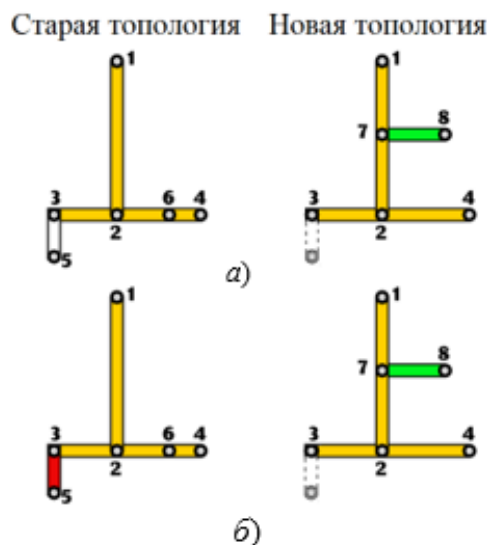


Рис. 5. Визуализация последних шагов алгоритма: а) визуализация четвертого шага; б) визуализация пятого шага

В результате подобного сравнения каждая ветвь из обеих топологий (либо целиком, либо будучи разбитой на участки, заданные относительными координатами) помечается либо как общая, либо как новая (для ветвей из новой топологии), либо как удаленная (для ветвей из старой топологии). Для наглядного изображения результатов сравнения ветви и участки ветвей каждой категории помечаются разными цветами при визуализации. Достоинство данного метода заключается в том, что он не привязан к тому, как именно сеть будет разбита на объекты. Таким образом, в случае, если, например, длинная ветвь старой топологии будет в новой топологии разбита на совокупность более коротких, алгоритм все равно сможет определить, что эти участки сетей являются идентичными.

Однако при использовании описанного метода в представленном варианте возникает недостаток, связанный с необходимостью неоднократно проходить циклом по массивам из всех ветвей топологии, количество которых, как правило, исчисляется тысячами или даже десятками тысяч. Это может негативно сказаться на скорости работы алгоритма. В связи с этим разумно дополнить алгоритм

несколькими деталями, которые позволят оптимизировать его работу.

Во-первых, ветви в обеих топологиях должны быть отсортированы, например, по координатам стартового узла при условии, если ветвь направлена слева направо, либо координатам конечного узла в обратном случае. То есть первой в списке ветвей топологии будет находиться ветвь, для которой координата X стартового будет наименьшей из имеющихся. В случае если у нескольких ветвей координата X стартового узла будет одинаковой, сравнение идет по координате Y , затем по Z . Использование сортировки позволит заменить итерационный проход по всем ветвям топологии на бинарный поиск, что позволит существенно сократить время работы алгоритма [28].

Во-вторых, ускорить произведение сравнений ветвей может помочь разбиение исследуемых пространств сетей горных выработок на фрагменты путем построения расчетной сетки. Сети должны быть идентичны для обеих сравниваемых топологий. В таком случае друг с другом будут сравниваться уже отдельные соответственные фрагменты, образовавшиеся после построения сеток, а не топологии целиком. Это позволит сократить количество сравниваемых друг с другом ветвей.

Заключение

В рамках данной работы была рассмотрена проблематика, связанная с использованием моделей сети горных выработок для обеспечения безопасности ведения горнодобывающих работ. Модели, отражающие геометрию и структуру сети горных выработок,

необходимы для проведения расчетов, на которых основывается проектирование вентиляции в шахте и построение планов ликвидации аварии. Поэтому важно следить за достоверностью моделей, однако на данный момент на рынке отсутствуют решения, позволяющие автоматизированно обеспечивать данный процесс. В связи с этим была поставлена и решена задача создания алгоритма геометрического сравнения моделей сети горных выработок. По результатам решения задачи были получены следующие выводы.

Во-первых, для проведения достоверного геометрического анализа моделей сети горных выработок необходимо абстрагироваться от конкретного случая разбиения выработанного пространства на составляющие. Одни и те же участки выработанного пространства в разных версиях модели могут быть описаны разным набором объектов, что было показано в примерах при описании алгоритма. Таким образом, пообъектное сравнение моделей может оказаться некорректным, в связи с чем в рамках данной статьи был предложен метод, опирающийся на сравнение пространственных характеристик участков выработанного пространства.

Во-вторых, разбиение исследуемых пространств сетей горных выработок на фрагменты путем построения расчетной сетки позволяет увеличить скорость проведения геометрического анализа. Ускорение становится особенно заметным на шахтах больших размеров, характеризующихся большим количеством объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Информация по аварийности. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору РОСТЕХНАДЗОР [Электронный ресурс]. – URL: <http://usib.gosnadzor.ru/info/> (дата обращения: 20.02.2025).
2. Зыков В. С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах. Кемерово : ПОЛИГРАФ, 2010. 334 с.
3. Захаров В. Н., Вартанов А. З., Малинникова О. Н., Петров И. В., Федаш А. В. Обеспечение безопасности горных работ – задача фундаментальной и прикладной науки. Вестник Научного центра. 2017. № 4. С. 8–16.
4. Галушко В. Т., Зорин А. Н. Выбросы породы в горных выработках шахт Донбасса. Киев : Наукова думка, 1972. 168 с.
5. Зыков В. С. Прогноз и предотвращение газодинамических явлений в пластовых выработках угольных шахт: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.04. Зыков Виктор Семенович. Кемерово, 1997. 40 с.

6. Шабаров А. Н., Цирель С. В. Обеспечение геодинамической безопасности при подземной разработке месторождений. Горный журнал. 2017. № 9. С. 65–70.
7. Большинский М. И., Лысиков Б. А., Каплюхин А. А. Газодинамические явления в шахтах. Севастополь : Вебер, 2003. 284 с.
8. Гоффарт Т. В., Васильев А. А. Практические задачи обеспечения безопасности в угольных шахтах. Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55, № 4. С. 138–145. DOI 10.15372/FGV20190418. EDN WTQWDZ.
9. Насибуллина Т. В., Лукашов О. Ю. Решения для подземной шахтной навигации в кризисных ситуациях. Уголь. 2020. № 4 (1129). С. 29–32. DOI <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2020-4-00-00>.
10. Байкенжин М. А., Азимхан Т. А. Подземные маркшейдерские опорные сети. Вестник науки. 2023. Т. 1, № 6 (63). С. 962–971.
11. Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Костеренко В. Н., Тимченко А. Н., Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю. Компьютерные технологии для решения задач плана ликвидации аварий. М. : Горное дело ООО «Кимерийский центр», 2011. 160 с.
12. Шульман В. Д., Шабанов В. В., Сухов П. А., Чунихин А. О. Сравнительный анализ форматов сериализации и передачи данных JSON, XML, CBOR и GPB. StudNet. 2021. Т. 4, № 7. С. 1686–1696.
13. Кувашкина Т. А. Использование ГИС-технологий в шахтных вентиляционно-дегазационных системах. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2004. № 4. С. 148–156.
14. Андрияшина Ю. Н., Бугаков П. Ю., Касьянова Е. Л., Кацко С. Ю., Колесников А. А., Комиссарова Е. В., Лисицкий Д. В., Молокина Т. С., Радченко Л. К., Пошивайло Я. Г., Утробина Е. С., Янкелевич С. С. Цифровая картография : монография / под науч. ред. Д. В. Лисицкого. Новосибирск : СГУГиТ, 2023. 442 с.
15. Янкелевич С. С. Теоретико-методологические аспекты тематической картографии на основе геопространственных знаний. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2022. Т. 66, № 4. С. 51–58. DOI 10.30533/0536-101X-2022-66-4-51-58.
16. Lisitsky D., Yankelevich S., Poshivailo Y. et al. The evolution of mapping: from geodata to geoinformation and geoknowledge. 21st International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021 (16–22 August 2021). 2021. Vol. 21, № 2.1. P. 781–788.
17. Степанов Ю. А. Компьютерное моделирование в задаче обеспечения безопасности ведения горных работ. Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 1. С. 67–72.
18. Степанов Ю. А. Обеспечение информационной поддержки ведения горных работ с использованием ГИС-технологий. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 4 (104). С. 118–122.
19. Потапов В. П., Опарин В. Н., Логов А. Б., Замараев Р. Ю., Попов С. Е. Геоинформационная система регионального контроля геомеханических ситуаций на основе энтропийного анализа сейсмических событий (на примере Кузбасса). Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 3. С. 15–35.
20. Krassakis P., Pyrgaki K., Gemeni V., Roumpos C., Louloudis G., Koukouzas N. GIS-Based Subsurface Analysis and 3D Geological Modeling as a Tool for Combined Conventional Mining and In-Situ Coal Conversion: The Case of Kardia Lignite Mine, Western Greece. Mining. 2022. Vol. 2 (2). Pp. 297–314.
21. Адушкин В. В., Опарин В. Н. Физика и геомеханика формирования и развития очаговых зон разрушения горных пород в природных и горнотехнических системах: современное состояние, перспективные направления фундаментальных исследований и прикладных разработок. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 56. С. 24–44.
22. Соловицкий А. Н. О регистрации информации при проведении геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры при освоении угольных месторождений Кузбасса. Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 6-5 (48). С. 152–155.
23. Петухов И. М., Батугина И. М. Геодинамика недр. 2-е изд. М. : Недра; 1999. 287 с.
24. Малышев Ю. Н., Сагалович О. И., Лисуренко А. В. Техногенная геодинамика. Кн. 1: Аналитический обзор. Актуальные проблемы. М. : Наука, 1996. 430 с.

25. Яковлев Д. В., Лазаревич Т. И., Поляков А. Н., Мулев С. Н. Концепция построения систем контроля состояния горного массива как элемента многофункциональной системы безопасности угольных шахт. Сборник научных трудов ВНИМИ. Посвящен 100-летию юбилею выдающегося горного инженера Б. Ф. Братченко. 2012. С. 7–17.
26. Cao Y., Zhong Y. Collaborative Control Digital Twin Technology for Mines. Proceedings of the 2025 4th International Conference on Engineering Management and Information Science (EMIS 2025) (Beijing, China, 14–16 March 2025). Advances in Computer Science Research, 2025. Pp. 96–104.
27. Палеев, Д. Ю., Лукашов О. Ю. Совершенствование подготовки планов ликвидации аварии с использованием программных комплексов «Вентиляция», «Ударная волна» и «Водоснабжение». Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 6. С. 227–237.
28. Chang S. Data structures and algorithms. Software Engineering and Knowledge Engineering, Vol. 13. 2003. 360 p.

REFERENCES

1. Accident information. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision ROSTECHNADZOR Retrieved from <http://usib.gosnadzor.ru/info/> (date of access: 02/20/2025) [in Russian].
2. Zykov V. S. (2010) Vnezapnye vybrosy uglja i gaza i drugie gazodinamicheskie javlenija v shahtah [Sudden outbursts of coal and gas and other gas-dynamic phenomena in mines]. Kemerovo: Firma POLIGRAF, 334 p. [in Russian].
3. Zaharov V. N., Vartanov A. Z., Malinnikova O. N., Petrov I. V., Fedash A. V. (2017). Mining operations' safety provision - fundamental and applied science task. Vestnik Nauchnogo centra [Bulletin of the Scientific Center], 4, 8-16 [in Russian].
4. Galushko V.T., Zorin A.N. (1972) Vybrosy porody v gornyh vyrabotkah shaht Donbassa [Rock emissions in the mine workings of Donbass mines]. Kiev: Naukova dumka, 168 p. [in Russian].
5. Zykov V. S. (1997). Prognoz i predotvrashhenie gazodinamicheskikh javlenij v plastovyh vyrabotkah ugol'nyh shaht [Forecasting and prevention of gas-dynamic phenomena in coal mine seam workings] Extended abstract of doctor's thesis. Kemerovo [in Russian].
6. Shabarov A. N., Cirel' S. V. (2017). Ensuring geodynamic safety during underground mining. Gornyj zhurnal [Mountain magazine], 9, 65-70 [in Russian].
7. Bol'shinskij M. I., Lysikov B. A., Kapljuhin A. A. (2003) Gazodinamicheskie javlenija v shahtah [Gas-dynamic phenomena in mines]. Sevastopol: Veber, 284 p. [in Russian].
8. Goffart, T. V. (2019). Practical safety tasks in coal mines. Fizika gorenija i vzryva [Physics of combustion and explosion], 55(4), 138-145. – DOI 10.15372/FGV20190418. [in Russian].
9. Nasibullina T. V., Lukashov O. Ju. (2020). Solutions for underground mine navigation in crisis situations. Ugol' [Coal], 4(1129), 29-32. – DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2020-4-00-00> [in Russian].
10. Baikenzhin M. A., Azimkhan T. A. (2023). Underground surveying support networks. Vestnik nauki [Bulletin of Science], 1 (6 (63)), 962-971 [in Russian].
11. Paleev D. Ju., Lukashov O. Ju., Kosterenko V. N., Timchenko A. N., Vasenin I. M., Shrager Je. R., Krajnov A. Ju. (2011). Computer technologies for solving the problems of the accident elimination plan. Moskva : Gornoe delo [Moscow : Mining], 160 p. [in Russian].
12. Shul'man V. D., Shabanov V. V., Suhov P. A., Chunihin A. O. (2021). Comparative analysis of JSON, XML, CBOR and GPB serialization and data transfer formats. StudNet [StudNet], 4 (1), 1686-1696 [in Russian].
13. Kuvashkina T. A. (2004). Use of GIS technologies in mine ventilation and degassing systems. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 4, 148-156 [in Russian].
14. Andrijuhina Ju. N., Bugakov P. Ju., Kas'janova E. L., Kacko S. Ju., Kolesnikov A. A., Komissarova E. V., Lisickij D. V., Molokina T. S., Radchenko L. K., Poshivajlo Ja. G., Utrobina E. S., Jankelevich S. S. (2023) Cifrovaja kartografija [Digital cartography]. Novosibirsk: SSUGT, 442 p. [in Russian].
15. Jankelevich S. S. (2022). Theoretical and methodological aspects of thematic cartography based on geospatial knowledge. Izvestija vuzov «Geodezija i ajerofotos#emka» [News of universities "Geodesy and aerial photography"], Vol. 66, 4, 51-58 [in Russian].

16. Lisitsky, D., Yankelevich, S., Poshivailo, Y. & et al. (2021). The evolution of mapping: from geodata to geoinformation and geoknowledge. *21st International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM 2021* (16–22 August 2021), Vol. 21, No 2.1, 781–788.
17. Stepanov Ju. A. (2016). Computer modeling in the task of ensuring the safety of mining operations. *Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti [Bulletin of the Scientific Center for the safety of work in the coal industry]*, 1, 67-72 [in Russian].
18. Stepanov Ju. A. (2014). Providing information support for mining operations using GIS technologies. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]*, 4(104), 118-122 [in Russian].
19. Potapov V. P., Oparin V. N., Logov A. B., Zamaraev R. Ju., Popov S. E. (2013). Geoinformation system of regional control of geomechanical situations based on entropy analysis of seismic events (using Kuzbass as an example). *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh [Physical and technical problems of mineral development]*, 3, 15-35 [in Russian].
20. Krassakis P., Pyrgaki K., Gemeni V., Roumpos C., Louloudis G., Koukouzas N. (2022). GIS-Based Subsurface Analysis and 3D Geological Modeling as a Tool for Combined Conventional Mining and In-Situ Coal Conversion: The Case of Kardias Lignite Mine, Western Greece. *Mining*, 2(2), 297-314. –<https://doi.org/10.3390/mining2020016>
21. Adushkin V. V., Oparin V. N. (2015). Physics and geomechanics of generating and developing focal zones of rocks destruction in natural and mining-engineering systems: current state, perspectives in fundamental investigations and applied developments. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]*, 56, 24-44 [in Russian].
22. Solovickij A. N. (2016). About registration of information during the realization of geodesic monitoring of the tensely deformed state of the earth crust during the development of coal deposits in Kuzbass. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]*, 6-5 (48), 152-155 [in Russian].
23. Petuhov I.M., Batugina I.M. (1999) *Geodinamika nedr [Geodynamics of the subsurface]*. 2nd ed. Moscow: Nedra, 287 p. [in Russian].
24. Malyshev Ju.N., Sagalovich O.I., Lisurenko A.V. (1996) *Tehnogennaja geodinamika. Kniga 1: Analiticheskij obzor. Aktual'nye problemy [Technogenic Geodynamics. Book 1: Analytical Review. Current Issues.]* Moscow: Nauka, 430 p. [in Russian].
25. D.V. Jakovlev, T. I. Lazarevich, A.N. Poljakov, S.N. Mulev (2012). The concept of building systems for monitoring the state of a rock mass as an element of a multifunctional safety system for coal mines. *Sbornik nauchnyh trudov VNIMI [Collection of scientific papers of VNIMI]*, 7-17 [in Russian].
26. Cao Y., Zhong Y. (2025). Collaborative Control Digital Twin Technology for Mines. In *Proceedings of the 2025 4th International Conference on Engineering Management and Information Science (EMIS 2025)* (pp. 96-104). *Advances in Computer Science Research*. – 10.2991/978-94-6463-736-6_13
27. Paleev D. Ju., Lukashov O. Ju. (2013). Improving the preparation of accident response plans using the software complexes "Ventilation", "Shock wave" and "Water supply". *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]*, 6, 227-237 [in Russian].
28. Chang S. (2003) Data structures and algorithms. *Software Engineering and Knowledge Engineering*, Vol. 13, 360 p.

Об авторах

Данила Евгеньевич Шабанов – аспирант кафедры цифровых технологий.

Author details

Danila E. Shabanov – Ph. D. Student, Department of Digital Technologies

Получено / Received 02.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 06.08.2025

Принята к публикации / Accepted 21.08.2025