ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(4):169-181
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 504.05:622:004 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_169

ПОСТРОЕНИЕ ГИБРИДНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО РЕГИОНА НА ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА

С.А. Дерябин[1], Е.В. Мисинева[1]

[1] НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: deryabin.sa@misis.ru

Аннотация: Одной из ключевых стратегических задач сегодня является поиск эффективных способов поддержки экологической безопасности природных ресурсов и увеличения объемов добычи полезных ископаемых. Работа промышленных предприятий, в особенности горнодобывающей отрасли, негативно сказывается как на экологическом состоянии прилегающих к ним территорий, так и на состоянии регионов в целом. В связи с этим руководству предприятий важно обладать инструментом оперативной и легко интерпретируемой оценки воздействия производства на окружающую среду. Целью данной работы является повышение эффективности процессов мониторинга экологического состояния горнопромышленных регионов при долгосрочном планировании и управлении производственными работами. Исследование осуществлялось посредством построения гибридной имитационной модели с использованием агентно-ориентированного подхода с элементами системной динамики и дискретно-событийного моделирования. В результате разработанная модель позволяет осуществлять динамическую оценку состояния атмосферного воздуха горнопромышленного региона, а также варьирование параметров, влияющих на степень загрязнения, во время прогона модели. Полученные результаты исследования в дальнейшем могут быть интегрированы в процессы управления горнодобывающими предприятиями для принятия решений в области интенсификации производства.

Ключевые слова: экологическое моделирование, агентно-ориентированный подход, мультиагентное моделирование, геоинформационная мультиагентная система, горная промышленность, загрязнение атмосферного воздуха, оценка экологического состояния, гибридная имитационная модель.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда, проект № 19-17-00184.

Для цитирования: *Дерябин С. А., Мисинева Е. В.* Построение гибридной имитационной модели экологического состояния горнопромышленного региона на основе мультиагентного подхода // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 4. – С. 169–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_169.

Hybrid simulation modeling of ecological state of a mining region using a multi-agent approach

S.A. Deryabin[1], E.V. Misineva[1]

[1] National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: deryabin.sa@misis.ru

© С.А. Дерябин, Е.В. Мисинева. 2022.

Abstract: One of the key strategic objectives of the present day is the effective maintenance of ecological safety of natural resources and the increase in mineral production. Operating production facilities, especially in the mining industry, has an adverse effect on the ecological state of adjacent areas and in the whole region. In this connection, management should possess a tool of operational and readily interpretable evaluation of the impact exerted by industry on the environment. This study aims to enhance ecological monitoring efficiency in mining regions in long-term planning and production control. The study consisted in construction of a hybrid simulation model using an agent-oriented approach with some elements of system dynamics and discrete-event simulation. The resultant model enables dynamic assessment of atmospheric air condition in a mining region, as well as variation of pollution rate factors during the model run. The research results can be further on integrated in the processes of managerial decision-making on intensification of production in the mining industry.

Key words: ecological modeling, agent-oriented approach, multi-agent modeling, geoinformation multi-agent system, atmospheric air pollution, ecological state assessment, hybrid simulation model

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-17-00184.

For citation: Deryabin S. A., Misineva E. V. Hybrid simulation modeling of ecological state of a mining region using a multi-agent approach. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(4):169-181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_169.

Введение

Современное состояние горнодобывающей отрасли показывает непрерывные тенденции роста количества новых объектов добычи полезных ископаемых и масштабов существующих производств. Главным образом данные тенденции связаны с изучением новых, более совершенных технологий, позволяющих работать в ранее недоступных регионах с суровыми климатическими условиями и извлекать полезные ископаемые с больших глубин и с меньшим процентным содержанием полезного компонента. В то же время вследствие отработки таких месторождений возникают техногенные проявления, которые по форме и динамике сильно отличаются от встречавшихся ранее [1], что требует более строгого подхода к вопросам контроля безопасного ведения горных работ [2]. Разработка и внедрение различных роботизированных и полностью автономных горнотранспортных комплексов и специализированных автоматизированных систем управления позволяют обеспечить непрерывность и безопасность производственных процессов в изменяющихся условиях [3]. Однако применение подобных технических решений существенно увеличивает нагрузку на экологическое состояние окружающей среды [5]. Нивелирование этой нагрузки является ключевой стратегической целью как на государственном уровне, так и на уровне управления предприятиями, и, в конечном счете, предопределяет необходимость внедрения технологий с использованием техногенных отходов в замкнутом производстве [6, 7].

Актуальность изучения проблем и поиска решений в области рационального природопользования подтверждается большим количеством научных работ

[8—10]. Большое внимание в работах уделяется разработке новых методов оперативной оценки состояния окружающей среды с использованием средств дистанционного зондирования и внедрения эколого-ресурсосберегающих технологий [11, 12]. Часть таких решений предполагает традиционное исследование точечных замеров проб (почвы, воды, воздуха) с использованием стационарных пунктов автоматического контроля. Однако данный подход нельзя назвать совершенным вследствие ограниченного объема информации, не репрезентативно описывающей общее экологическое состояние крупных регионов, тем более для наглядной интерпретации динамики изменений такого состояния в оперативном режиме. Если ранее этой информации в горнодобывающей отрасли было достаточно для оценки надежности краткосрочного прогноза [13], то в условиях постоянного изменения условий и факторов необходима разработка методики с учетом большого количества данных и быстротечности их изменений.

Таким образом, горнопромышленные регионы остаются подвержены рискам загрязнения окружающей среды, а их контроль и предвосхищение во многом возлагается на сами горнодобывающие предприятия [14]. Вследствие этого руководству предприятий, заинтересованных наибольшим образом в увеличении прибыли [15], необходимо находить баланс между интенсификацией добычных работ и перспективой наложения штрафных санкций при нарушении правил в области экологической безопасности [16]. В настоящее время разработанные аналитические модели, применяемые в горнодобывающей промышленности [17], не могут в полной мере осуществлять контроль загрязнения окружающей среды. Невозможность эффективно оценить динамику изменения экологического состояния окружающей среды в условиях интенсификации работ без простого, наглядного и легко интерпретируемого инструмента существенным образом осложняет принятие решений руководствами компаний и, соответственно, повышает риски загрязнения окружающей среды. В связи с этим целью данного исследования является повышение надежности и эффективности процессов мониторинга экологического состояния горнопромышленных регионов посредством разработки имитационной модели, позволяющей осуществлять легко интерпретируемые долгосрочные прогнозы.

Анализ современных подходов и инструментов экологического мониторинга горнопромышленных регионов

Очевидно, что деятельность горнодобывающих предприятий может приводить к серьезным загрязнениям важных природных компонентов: атмосферного воздуха, водных ресурсов, почвы [18, 19]. При этом основным загрязнителем природных компонентов, в особенности атмосферного воздуха, являются горнодобывающие предприятия открытого типа. Как правило, контроль за показателями выбросов вредных веществ, получаемых в результате буровзрывных [20] и транспортно-технологических работ [21—23], трудно осуществим по причине сложности математических расчетов и отсутствия достоверных инструментов оперативного получения и обработки данных [24].

Широко применяемая в нашей стране система экологического мониторинга (рис. 1) состояния природной среды имеет ряд недостатков, связанных с необходимостью постоянного перемещения передвижных постов забора проб вследствие стохастических изменений параметров технологических процессов

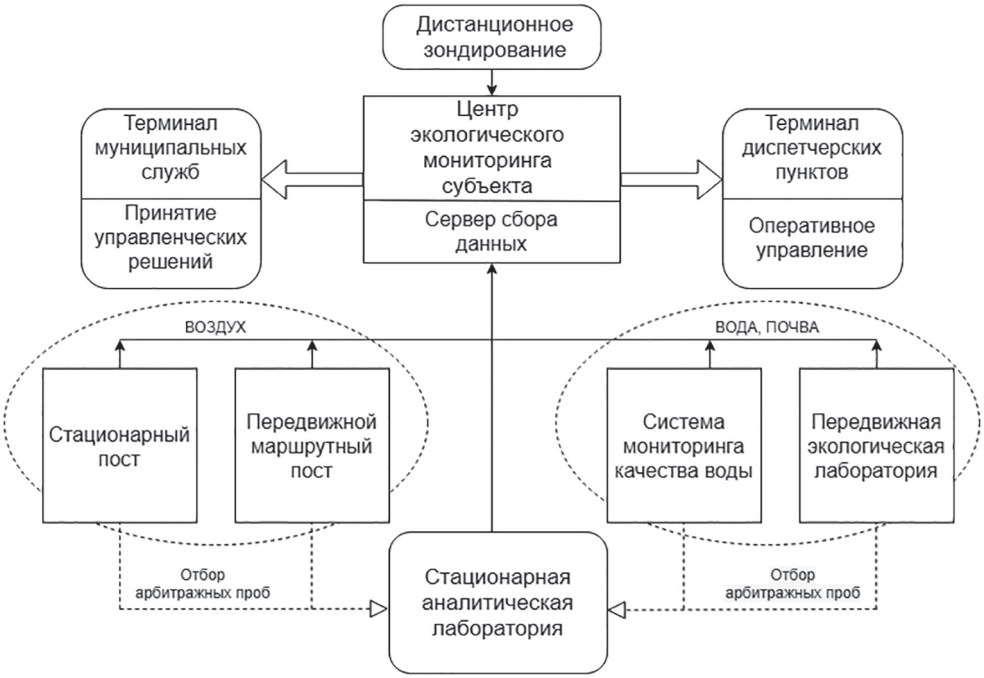

Рис. 1. Обобщенная схема системы экологического мониторинга
Fig. 1. Generalized ecological monitoring flow-chart

(масштабов транспортно-технологических работ, точек проведения буровзрывных работ) и природных явлений (скорость, направление ветра и др.). Используемые же методы дистанционного зондирования также имеют ряд недостатков, связанных с невозможностью получения оперативных данных из-за малого количества спутников, а также сложностью математических расчетов и интерпретации получаемых результатов для принятия краткосрочных и долгосрочных управленческих решений по организации производства [25].

При формализации задачи высокоточной оперативной оценки и прогнозирования экологического состояния горнопромышленного региона данный объект исследования представляется сложной и слабоструктурированной системой, в которой можно выделить большое количество стохастических взаимосвязанных явлений [26]. Для анализа состояния подобных сложных объектов, как правило, применяют отдельные подходы имитационного моделирования. В частности, одним из наиболее современных и точных подходов является агентно-ориентированное моделирование, позволяющее не только достаточно эффективно абстрагировать представление сложных взаимосвязей внутри системы, но и использовать отдельные элементы таких классических подходов, как дискретно-событийное моделирование и системная динамика для их математического описания.

В нашем понимании гибридное имитационное моделирование является подходящим инструментом для оценки и прогнозирования экологического состояния промышленного региона, так как позволяет наиболее эффективно исследовать структуру плохо поддающейся формализации системы, чтобы понять ее поведение и проверить динамику изме-

нений при различных сценариях и, при необходимости, оптимизировать отдельные показатели.

Формализация задачи экологического мониторинга

Попытка формализации причинно-следственных связей динамики экологического состояния региона по совокупности всех показателей деятельности горнодобывающих предприятий представляется весьма трудоемкой и сложной задачей. В рамках настоящей работы делается акцент на одном из наиболее важных экологических аспектов открытой разработки месторождений — передаче в атмосферу вредных веществ, производимых во время буровзрывных и транспортно-технологических работ.

Предлагаемая модель оценки экологического состояния горнопромышленного региона описывает взаимосвязь таких ключевых составляющих, как агентов-загрязнителей (предприятий открытой добычи), агентов окружающей среды (отдельных геоструктурных единиц региона) и состояний агентов, используемых для интегрированной оценки экологического состояния окружающей среды. Состояние агентов-загрязнителей определяется в виде количественной оценки производимых выбросов вредных веществ в атмосферу в такт модального времени, а состояние агентов окружающей среды определяется по параметрам переноса пыли от агентов-загрязнителей. Таким образом, горнопромышленный регион представляется как геоинформационная мультиагентная система, воспроизводящая динамику экологического состояния в соответствии с интенсивностью деятельности предприятий. Для определения первоначальной структуры мультиагентоной системы предлагается зональное разделение территории региона, как показано на рис. 2.

Рис. 2. Разделение территории горнопромышленного региона на экологические зоны: зона 1 — территория предприятия; зона 2 — территория, прилегающая к предприятию и подверженная загрязнению; зона 3 — территория региона
Fig. 2. Ecological zoning of mining region area: zone 1 — area of industrial plant; zone 2 — adjacent area exposed to pollution; zone 3 — area of region

Вся геоинформационная мультиагентная система обладает такими параметрами, как общая площадь региона, массив координат, описывающий единичные участки (точки) этой площади и попадание в них горнодобывающих предприятий открытого типа. Для каждой точки координат вводится параметр оценки экологического состояния в момент времени в виде относительной концентрации вредных веществ в воздухе. Далее геоинформационная система представляется в виде Мурова пространства как среда мультиагентного взаимодействия. Агентами системы выступают единичные участки площади (при экспериментальном моделировании с масштабом в 1 км^2), которые взаимодействуют друг с другом посредством передачи вредных веществ в атмосфере.

На основании исходного массива координат определяется структура (расположение) начальной популяции агентов в пространстве, представляющее собой условно статическую часть системы. Динамика системы формулируется че-

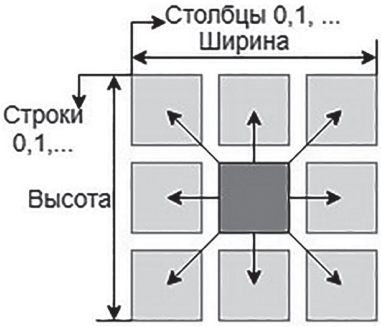

Рис. 3. Мурова модель соседства
Fig. 3. Murovian space model of neighborhood

рез изменение состояний агентов (экологическую оценку) при передаче объема вредных веществ и выражается категориальными признаками: «не загрязнен», «подвержен загрязнению» и «загрязнен». В начальной популяции агентов выбирается число «загрязняющих» (в зависимости от расположения и площади горнодобывающих предприятий), которые воспроизводят в каждый такт модального времени некоторый объем вредных веществ и распространяют его на соседей.

Построение имитационной модели

Исходя из условий необходимости интенсификации добычных работ, в качестве единицы модельного времени t выбран месяц, обуславливающий как свойства самих технологических процессов, так и возможность оперативного долгосрочного прогнозирования. Количество агентов N в начальной популяции определяется в соответствии с занимаемой регионом географической площадью S, где i — популяция агентов:

$$N(i) = S. \quad (1)$$

Исходя из количества n^* и занимаемых площадей s^* карьеров, определим количество загрязняющих агентов i^*:

$$i^* = \sum_{1}^{n^*} s^*\left(n^*\right). \quad (2)$$

Стоит отметить, что s^* и n^* могут быть заданы как в виде статических параметров, так и в виде динамически настраиваемых, с целью исследования воздействия на регион вследствие увеличения или сокращения масштабов добычи. В предлагаемой модели агенты расположены в двумерном дискретном пространстве, представляющего из себя массив ячеек (сгруппированных координат x, y). Соседние агенты определяются согласно модели Мура (рис. 3).

В представленной ниже формуле k — количество взрывов, проводимых при добыче полезных ископаемых в единицу модального времени, y_1 — среднее значение объема вредных веществ, поступающих в атмосферу при проведении одного взрыва. Так как процессы добычи полезных ископаемых не стационарны в рамках эксперимента, k задается случайным образом на интервале от 0 до 2 со средним значением в 2. Значение параметра y_1 определено как суммарный выброс загрязняющих веществ во время взрыва и варьируется случайным образом в диапазоне от 1 до 2 т в единицу модального времени. Объем загрязняющих веществ, поступающий в атмосферу при проведении взрывных работ v_1 в единицу модального времени t, представлен в следующем виде:

$$v_1 = k * y_1. \quad (3)$$

Аналогичным образом задается объем загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух в процессе функционирования объектов горнотранспортного комплекса v_2:

$$v_2 = j * y_2, \quad (4)$$

где j — количество единиц техники; y_2 — среднее количество загрязняющих веществ, выбрасываемое единицей техники за месяц.

Значение параметра y_2 задается в диапазоне от 1,5 до 3 т в единицу модаль-

ного времени. Необходимо отметить, что количество единиц техники является целевым настраиваемым параметром в условиях интенсификации работ, но в рамках экспериментального моделирования также задается случайным образом на интервале от 0 до 50, что может быть обусловлено плановым и аварийным ремонтом техники, а также другими технологическими простоями.

Таким образом, значения y_1, y_2 задавались в виде случайной переменной с помощью треугольной функции распределения вероятностей.

Для оценки прироста объемов вредных веществ в единицу модального времени, производимых одним горнодобывающим предприятием, использована следующая формула:

$$dv_{n*}/dt = v_1 + v_2 = k * y_1 + j * y_2. \quad (5)$$

Тогда как для каждого отдельного агента-загрязнителя прирост загрязнения, соответственно, имел вид:

$$\frac{dv_{i*}}{dt} = \frac{\sum_1^{n^*} v_1 + v_2}{i^*} = \frac{\sum_1^{n^*} k * \gamma_1 + j\gamma_2}{i^*}. \quad (6)$$

Дополнительно в общую модель был включен фактор наличия ветра, оказывающий вклинение на уровень загрязненности атмосферного воздуха (имеется в виду рассевание вредных веществ в атмосфере). Однако при экспериментальном моделировании расчет проводился для наиболее неблагоприятных (для рассеивания примесей) погодных условий, то есть для безветренной погоды. При этом был учтен поправочный безразмерный коэффициент φ, равный 0,2, обуславливающий осаждение крупнодисперсной пыли в неподвижном воздухе. Коэффициент может задаваться в зависимости от предельно допускаемой концентрации примесей в атмосферном воздухе. Для описания процесса передачи состояния между агентами использовано фактическое расстояние каждого

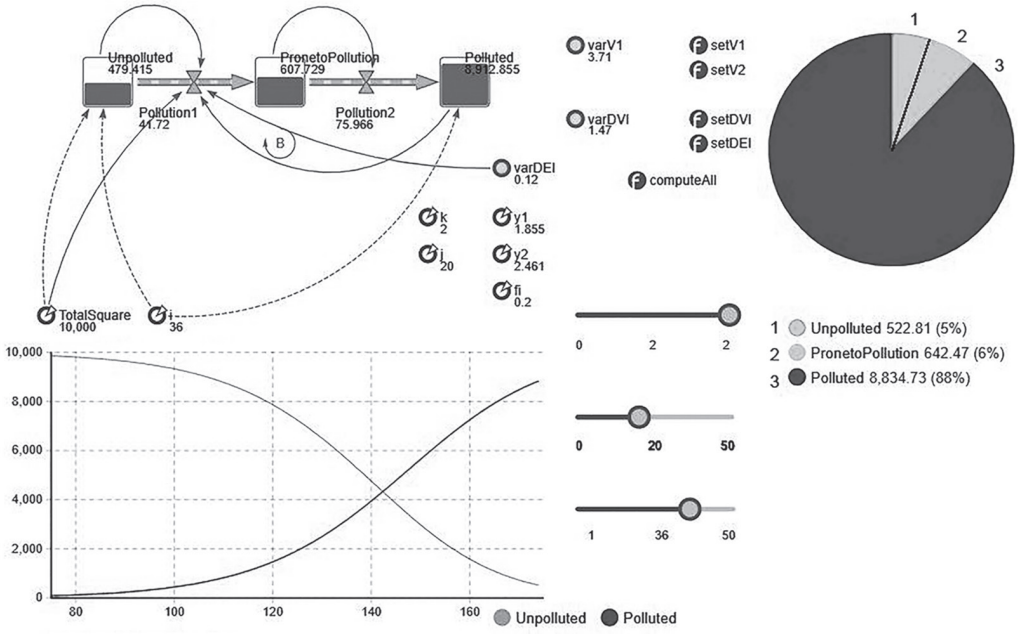

Рис. 4. Панель настроек модели и визуализации результатов прогона
Fig. 4. Board of model setting and run outcome visualization

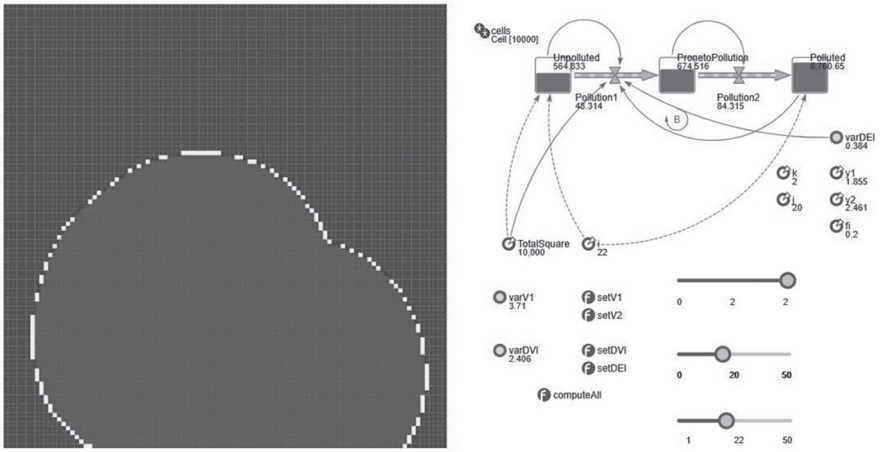

Рис. 5. Визуализация прогона модели в Муровом пространстве
Fig. 5. Visualization of model run in Murovian space

агента от агентов-загрязнителей, которое определяется через взвешенную сумму разниц координат:

$$l = \frac{\sum_{1}^{i^*} \sqrt{\left(x_i - x_{i^*}\right)^2 - \left(y_i - y_{i^*}\right)^2}}{i^*}. \quad (7)$$

Оценка экологического состояния каждого агента e_i рассчитывалась по следующей формуле:

$$e_i(t) = e_i(t-1) + \frac{1}{l}\left(1 - \frac{1}{\frac{dv_{i^*}}{dt}}\right) - \varphi, \quad (8)$$

при этом введены следующие категориальные оценки:

$$e_i(t): \begin{cases} >1 - \text{ агент загрязнен} \\ =1 - \text{ подвержен загрязнению} \\ <1 - \text{ не загрязнен} \end{cases}$$

Интегральная оценка экологического состояния региона определена через взвешенную сумму состояний каждого участка региона (агента):

$$E = \frac{\sum_{1}^{i} e_i}{i}. \quad (9)$$

Программная реализация предложенной модели и экспериментальные функциональные прогоны для оценки ее работоспособности осуществлялись в среде AnyLogic. На рис. 4 продемонстрированы отдельные пользовательские инструменты динамической настройки параметров модели (бегунки) и визуализации результатов прогона модели.

В целях возможности динамического внесения изменений в ход моделирования (условного управляющего воздействия) во время выполнения модели доступно численное варьирование таких параметров, как количество загрязняющих агентов, количество производимых взрывов и единиц добычной и транспортной техники. Динамика изменения количества незагрязненных и загрязненных участков региона (состояний агентов) сформирована в виде диаграммы потоков и накопителей. На рис. 5 продемонстрирован тестовый прогон модели с визуализацией представления геоинформационной мультиагентной среды в пространстве Мура.

Обсуждение результатов

В ходе экспериментального моделирования определено, что предложенная

концептуальная модель работоспособна и отвечает целям исследования. Однако полученные результаты, очевидно, не отражают всю сложность динамики экологического состояния региона ввиду отсутствия в модели реальных фактических данных о деятельности горнопромышленных предприятий, а также таких параметров, как твердость и крепость разрабатываемых пород, качественные характеристики добываемого полезного ископаемого, состав используемых взрывчатых веществ, способ и схема взрывания, характеристики очистного оборудования, используемого при проведении специальных мероприятий, непосредственно направленных на предотвращение загрязнения атмосферного воздуха. Также можно отметить, что для более точного описания распространения загрязнений в атмосферном воздухе необходимо учитывать географические и климатические особенности региона — рельеф местности и температурную стратификацию атмосферы.

В целом же, полученная геоинформационная мультиагентная модель оценки экологического состояния горнопромышленного региона показала свою функциональную пригодность, она вполне наглядна и значительно облегчает восприятие полученных в результате моделирования данных и, при существенных доработках, может быть интегрирована в процессы управления производством для прогнозирования последствий интенсификации работ.

Заключение

В рамках проведенного исследования были получены следующие результаты:

Проведен анализ критически важных параметров мониторинга экологического состояния горнопромышленных регионов, в ходе которого отобраны такие параметры, которые, с одной стороны, оказывают наибольшее воздействие на состояние окружающей среды, а с другой, могут быть представлены к виду, пригодному для проведения имитационного моделирования, а также легко интерпретируемы с точки зрения процессов управления горнодобывающими предприятиями открытого типа.

Разработана гибридная имитационная математическая модель экологического состояния горнопромышленного региона, включающая в себя отдельные подходы и прикладные инструменты таких методов, как системная динамика, дискретно-событийное и мультиагентное моделирования.

Осуществлена программная реализация предложенной модели, позволяющая динамически настраивать параметры в ходе итеративных прогонов, а также предоставляющая легко интерпретируемую визуализацию результатов для оперативного прогнозирования экологического состояния региона при принятии решений по управлению предприятием в части интенсификации производственных работ.

Вклад авторов

Дерябин С.А. — генерация идеи исследования, постановка задачи, анализ результатов и подготовка публикации.

Мисинева Е.В. — выполнение работы по систематизации материалов, программная реализация и подготовка материалов для публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вознесенский А. С., Кидима Мбомби Л. К.* Формирование синтетических структур и текстур горных пород при их моделировании в среде COMSOL Multiphysics // Горные науки и технологии. — 2021. — Т. 6. — № 2. — С. 65—72. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-2-65-72.

2. *Хайрутдинов М. М.*, *Конгар-Сюрюн Ч. Б.*, *Хайрутдинов А.*, *Тюляева Ю. С.* Повышение безопасности при извлечении водорастворимых руд путем оптимизации параметров закладочного массива // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 1. — С. 53—59. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-01-53-59.

3. *Трубецкой К. Н.*, *Галченко Ю. П.*, *Сабянин Г. В.* Методические основы экологической оценки техногенного изменения литосферы // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 2. — С. 162—168.

4. *Базарова С. Б.* Воздействие горнодобывающих предприятий на экосистему региона и оценка эффективности их экологической деятельности // Региональная экономика и управление. — 2007. — № 2(10). — С. 60—70. URL: https://eee-region.ru/article/1008/.

5. *Голик В.*, *Дмитрак Ю.*, *Габараев О.*, *Кожиев Х.* Минимизация влияния горного производства на окружающую среду // Экология и промышленность России. — 2018. — № 22(6). — С. 26—29. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-26-29.

6. *Хайрутдинов М. М.*, *Конгар-Сюрюн Ч. Б.*, *Тюляева Ю. С.*, *Хайрутдинов А.* Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — № 331(11). — С. 30–36. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2883.

7. *Хохряков А. В.*, *Ларионова И. В.*, *Москвина О. А.*, *Цейтлин Е. М.* Системный подход к обеспечению экологической безопасности в горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 501—517. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-501-517.

8. *Бурдзиева О. Г.*, *Шевченко Е. В.* Эколого-экономические аспекты хранения отходов горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 8. — С. 37—42.

9. *Myaskov A., Temkin I., Deryabin S., Marinova D.* Factors and objectives of sustainable development at the implementation of digital technologies and automated systems in the mining industry // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 174, article 04023. DOI: 10.1051/e3sconf/202017404023.

10. *Rybak J., Adigamov A., Kongar-Syuryun C., Khayrutdinov M., Tyulyaeva Y.* Renewable-resource technologies in mining and metallurgical enterprises providing environmental safety // Minerals. 2021, vol. 11, no. 10, article 1145. DOI: 10.3390/min11101145.

11. *Patil G. P.*, *Balbus J., Biging G., Jaja J., Myers W. L., Taillie C.* Multiscale advanced raster map analysis system: Definition, design and development // Environmental and Ecological Statistics. 2004, vol. 10, no. 2, pp. 113—138. DOI: 10.1023/B:EEST.0000027205.77490.8c.

12. *Kolesenkov A. N.*, *Kostrov B. V.*, *Ruchkin V. N.*, *Ruchkina E. V.* Algorithms of fire seat detection, modelling their dynamics and observation of forest fires via communication technologies / 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2015). Piscataway, NJ: IEEE, 2015, pp. 254–257. DOI: 10.1109/MECO.2015.7181916.

13. *Куприянов В. В.*, *Бондаренко И. С.* Применение нечеткой логики для оценки достоверности моделей краткосрочного прогноза состояния горношахтного оборудования // Горный журнал. — 2021. — № 5. — С. 76—79. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.08.

14. *Zástrová P., Niemiec D., Marschalko M., Durd'ak J., Duraj M., Yilmaz I., Drusa M.* Analysis the purposes of land use planning on the hard coal tailing dumps // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016, vol. 44, no. 2, article 022034. DOI: 10.1088/1755-1315/44/2/022034.

15. *Sychev A. E.*, *Zaytseva E. V.*, *Tolkachyov P. S.* Economic digitalization: contradictions and prospects // Socio-economic Systems: Paradigms for the Future. Studies in Systems, Decision and Control. 2021, vol. 314, pp. 353–359. DOI: 10.1007/978-3-030-56433-9_37.

16. *Требования* к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых. — М.: МПР России, 2000. — С. 30. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

17. *Vostrikov A. V.*, *Prokofeva E. N.*, *Goncharenko S. N.*, *Gribanov I. V.* Analytical modeling for the modern mining industry // Eurasian Mining. 2019, vol. 2, pp. 30—35. DOI: 10.17580/em.2019.02.07.

18. *Крупская Л. Т.*, *Орлов А. М.*, *Голубев Д. А.*, *Колобанов К. А.*, *Филатова М. А.* Оценка экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья закрытых горных предприятий в Приамурье и Приморье // Горные науки и технологии. — 2020. — Т. 5. — № 3. — С. 208—223. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-208-223.

19. *Игнатьева М. Н.*, *Юрак В. В.*, *Душин А. В.*, *Стровский В. Е.* Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к циркулярной экономике // Горные науки и технологии. — 2021. — Т. 6. — № 2. — С. 73—89. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-2-73-89.

20. *Papán D., Valašková V., Drusa M.* Numerical and experimental case study of blasting works effect // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016, vol. 44, no. 5, article 052052. DOI: 10.1088/1755-1315/44/5/052052.

21. *Темкин И. О.*, *Мясков А. В.*, *Конов И. С.*, *Дерябин С. А.* О методах построения и функционировании цифровой платформы управления транспортно-технологическими процессами в карьерах // Горный журнал. — 2019. — № 11. — С. 82—86. DOI: 10.17580/gzh.2019.11.15.

22. *Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I., Ivannikov A.* Design of a digital 3D model of transport–technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information // Sensors. 2021, vol. 21, no. 18, article 6277. DOI: 10.3390/s21186277.

23. *Куприянов В. В.*, *Бондаренко И. С.* Обеспечение безопасности железнодорожных перевозок промышленных грузов на горнодобывающих предприятиях // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 4. — С. 56—62. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-4-56-62.

24. *Романов Э. В.*, *Лелецкий А. В.*, *Лабунин К. А.* Глобальный мониторинг состояния биосферы // Достижения науки и образования. — 2019. — № 8-1(49). — С. 25—26.

25. *Киселевская К. Е.* Применение метода дистанционного зондирования земли для экологического мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 1. — С. 188—190.

26. *Корчагина Т. В.*, *Степанов Ю. А.*, *Бурмин Л. Н.* Метод оценки экологических показателей воздействия на окружающую среду в районах размещения угольных предприятий // Уголь. — 2018. — № 8. — С. 119—123. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-8-119-123. ГИАБ

REFERENCES

1. Voznesensky A. S., Kidima-Mbombi L. K. Formation of synthetic structures and textures of rocks when simulating in COMSOL Multiphysics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, vol. 6, no. 2, pp. 65—72. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-2-65-72.

2. Khayrutdinov M. M., Kongar-Syuryun Ch. B., Khayrutdinov A. M., Tyulyaeva Yu. S. Improving safety when extracting water-soluble ores by optimizing the parameters of the backfill mass. *Occupational Safety in Industry*. 2021, no. 1, pp. 53—59. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-01-53-59.

3. Trubetskoy K. N., Galchenko Y. P., Sabyanin G. V. Ecological evaluation of the production-induced change in the lithosphere. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no. 2, pp. 162—168. [In Russ].

4. Bazarova S. B. Impact of mining on the ecosystem of the region and the assessment of the effectiveness of their environmental performance. *Regional'naya ekonomika i upravlenie*. 2007, no. 2(10), pp. 60—70. [In Russ]. URL: https://eee-region.ru/article/1008/.

5. Golik V., Dmytrak Yu., Gabaraev O., Kozhiev K. Minimizing the impact of mining on the environment. *Ecology and Industry of Russia*. 2018, no. 22(6), pp. 26—29. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-26-29.

6. Khayrutdinov M. M., Kongar-Syuryun Ch. B., Tyulyaeva Yu. S., Khayrutdinov A. M. Cementless backfill mixtures based on water-soluble manmade waste. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2020, no. 331(11), pp. 30–36. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2883.

7. Khokhryakov A. V., Larionova I. V., Moskvina O. A., Tseytlin E. M. A system approach to environmental safety management in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 501 — 517. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-501-517.

8. Burdzieva O. G., Shevchenko E. V. Ehkologo-ehkonomicheskie aspekty hraneniya othodov gornogo proizvodstva. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 8, pp. 37 — 42. [In Russ].

9. Myaskov A., Temkin I., Deryabin S., Marinova D. Factors and objectives of sustainable development at the implementation of digital technologies and automated systems in the mining industry. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 174, article 04023. DOI: 10.1051/e3sconf/202017404023.

10. Rybak J., Adigamov A., Kongar-Syuryun C., Khayrutdinov M., Tyulyaeva Y. Renewable-resource technologies in mining and metallurgical enterprises providing environmental safety. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 10, article 1145. DOI: 10.3390/min11101145.

11. Patil G. P., Balbus J., Biging G., Jaja J., Myers W. L., Taillie C. Multiscale advanced raster map analysis system: Definition, design and development. *Environmental and Ecological Statistics*. 2004, vol. 10, no. 2, pp. 113 — 138. DOI: 10.1023/B:EEST.0000027205.77490.8c.

12. Kolesenkov A. N., Kostrov B. V., Ruchkin V. N., Ruchkina E. V. Algorithms of fire seat detection, modelling their dynamics and observation of forest fires via communication technologies. *4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2015)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, pp. 254–257. DOI: 10.1109/MECO.2015.7181916.

13. Kupriyanov V. V., Bondarenko I. S. Fuzzy logic in reliability assessment of short-term forecast models for mining equipment. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 5, pp. 76 — 79. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.08.

14. Zástrová P., Niemiec D., Marschalko M., Durd'ak J., Duraj M., Yilmaz I., Drusa M. Analysis the purposes of land use planning on the hard coal tailing dumps. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016, vol. 44, no. 2, article 022034. DOI: 10.1088/1755-1315/44/2/022034.

15. Sychev A. E., Zaytseva E. V., Tolkachyov P. S. Economic digitalization: contradictions and prospects. *Socio-economic Systems: Paradigms for the Future. Studies in Systems, Decision and Control*. 2021, vol. 314, pp. 353–359. DOI: 10.1007/978-3-030-56433-9_37.

16. *Trebovaniya k monitoringu mestorozhdenij tverdyh poleznyh iskopaemyh* [Requirements for monitoring of solid mineral deposits], Moscow, MPR Rossii, 2000, pp. 30.

17. Vostrikov A. V., Prokofeva E. N., Goncharenko S. N., Gribanov I. V. Analytical modeling for the modern mining industry. *Eurasian Mining*. 2019, vol. 2, pp. 30 — 35. DOI: 10.17580/em.2019.02.07.

18. Krupskaya L. T., Orlov A. M., Golubev D. A., Kolobanov K. A., Filatova M. A. Assessment of environmental hazard of accumulated mineral processing waste of closed mining enterprises in the Amur river region and Primorye. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020, vol. 5, no. 3, pp. 208 — 223. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-208-223.

19. Ignatyeva M. N., Yurak V. V., Dushin A. V., Strovsky V. E. Technogenic mineral accumulations: Problems of transition to circular economy. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, vol. 6, no. 2, pp. 73 — 89. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-2-73-89.

20. Papán D., Valašková V., Drusa M. Numerical and experimental case study of blasting works effect. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016, vol. 44, no. 5, article 052052. DOI: 10.1088/1755-1315/44/5/052052.

21. Temkin I. O., Myaskov A. V., Konov I. S., Deryabin S. A. Construction and functioning of digital platform for transportation control in opencast mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 11, pp. 82 — 86. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.11.15.

22. Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I., Ivannikov A. Design of a digital 3D model of transport–technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 18, article 6277. DOI: 10.3390/s21186277.

23. Kupriyaniv V. V., Bondarenko I. S. Ensuring the safety of railway transportation of industrial goods at mining enterprises. *Occupational Safety in Industry*. 2021, no. 4, pp. 56—62. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-4-56-62.

24. Romanov E. V., Leleckij A. V., Labunin K. A. Global monitoring of the state of the biosphere. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya*. 2019, no. 8-1(49), pp. 25—26. [In Russ].

25. Kiselevskaya K. E. A remote earth probing method for the ecological monitoring. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2009, no. 1, pp. 188—190. [In Russ].

26. Korchagina T. V., Stepanov Yu. A., Burmin L. N. Method of environmental impact indicators assessment within coal enterprises footprint . *Ugol'*. 2018, no. 8, pp. 119—123. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-8-119-123.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дерябин Сергей Андреевич[1] — зав. лабораторией,
e-mail: deryabin.sa@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3165-7032,
Мисинева Елизавета Владимировна[1] — студентка,
[1] НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Дерябин С.А., e-mail: deryabin.sa@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.A. Deryabin[1], Head of Laboratory,
e-mail: deryabin.sa@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3165-7032,
E.V. Misineva[1], Student,
[1] National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: S.A. Deryabin, e-mail: deryabin.sa@misis.ru.

Получена редакцией 24.11.2021; получена после рецензии 21.12.2021; принята к печати 10.03.2022.
Received by the editors 24.11.2021; received after the review 21.12.2021; accepted for printing 10.03.2022.