

# К ПРОБЛЕМЕ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДЕФОРМАЦИОННО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ИНДУЦИРОВАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ, НА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ УГОЛЬНЫХ ШАХТ КУЗБАССА

В.Н. Опарин<sup>1</sup>, В.П. Потапов<sup>1,2</sup>, Т.А. Киряева<sup>1</sup>, В.Ф. Юшкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия, e-mail: oparin@misd.ru

<sup>2</sup> Институт вычислительных технологий СО РАН (Кемеровский филиал), Кемерово, Россия

**Аннотация:** В работе акцентируется внимание на том, что накоплен значительный опыт и большой объем информации об особенностях протекания сейсмических процессов, индуцированных землетрясениями. Меньше это относится к «техногенной» сейсмичности, в первую очередь, с позиций осмысления причинно-следственных и установления количественных связей между этими процессами и технологиями ведения горных работ с применением крупномасштабных промышленных взрывов в регионах интенсивного недропользования с их тектонически активным обрамлением. К последним относится Кузбасс, находящийся в непосредственном сопряжении с Алтае-Саянской складчатой областью на юге Западной Сибири. Такой опыт обобщен в двухтомной монографии [1]. В монографии отмечено, что обеспечение безопасных условий ведения горных работ осуществляется как открытыми, так и подземными геотехнологиями. Новый этап в понимании сложности решения этой проблемы наступил с открытием таких законов, как нелинейные упругие волны маятникового типа и «поршневой» механизм протекания массо-газообменных процессов, которые происходят в напряженных массивах горных пород блочно-иерархического строения и в окрестностях горных выработок. Поэтому в данной статье ставится актуальная проблема геомеханико-геодинамически и геоэкологически безопасного недропользования на юге Западной Сибири по разработке методов и геоинформационных средств комплексной оценки влияния нелинейных деформационно-волновых процессов, индуцированных сейсмическими и взрывными воздействиями, на геомеханическое состояние бортов карьеров и газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса.

**Ключевые слова:** сейсмическая активность, облачные геоинформационные технологии, нелинейные деформационно-волновые и механо-эрозионные процессы, углеметан, карьеры, угольные шахты, спутниковые наблюдения и гиперспектральная съемка, горно-геологические и природно-климатические условия, мощные технологические взрывы, землетрясения, Кузбасс, Алтае-Саянская геодинамически активная складчатая область.

**Благодарность:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00051).

**Для цитирования:** Опарин В. Н., Потопов В. П., Киряева Т. А., Юшкин В. Ф. К проблеме разработки методов и геоинформационных средств комплексной оценки влияния нелинейных деформационно-волновых процессов, индуцированных сейсмическими воздействиями, на геомеханическое состояние бортов карьеров и газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 8. – С. 5–39. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-5-39.

---

**Development of methods and means for integrated  
geo-information-based analysis of influence exerted  
by nonlinear deformation and wave processes induced  
by seismic forces on geomechanical behavior of pit walls  
and on gas-dynamic activity in coal mines in Kuzbass**

V.N. Oparin<sup>1</sup>, V.P. Potapov<sup>1,2</sup>, T.A. Kiryaeva<sup>1</sup>, V.F. Yushkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russia, e-mail: oparin@misd.ru

<sup>2</sup> Kemerovo Branch of the Federal Research Center for Information  
and Computational Technologies, Kemerovo, Russia

---

**Abstract:** The huge experience and ample data are available on the features of seismic processes stimulated by earthquakes. The situation is different in the field of mining-induced seismicity, first of all, in terms of understanding of the cause effect relationship and finding of quantitative relationships between seismicity and mining technologies with large-scale blasting in the regions of heavy subsoil use in the conditions of active tectonics. One of such regions is Kuzbass adjacent to the Altai–Sayan folded area in the south of West Siberia. The gained experience is generalized in the two-volume monograph [1]. The monograph states that safety of mining is achievable both with opencast and underground geotechnologies. A new stage in understanding of the problem difficulty arrived with the newly discovered nonlinear pendulum elastic waves and ‘piston’ behavior of mass and gas exchange in the high-stress hierarchy of blocks in surrounding rock mass around underground openings. In this respect, this article defines an urgent problem of geomechanically, geodynamically and geocologically safe subsoil use in the south of West Siberia based on development of informational methods and facilities for the integrated assessment of influence exerted by nonlinear deformation and wave processes induced by seismic events and blasting on geomechanics of pit wall rock mass and on gas dynamics in coal mines in Kuzbass.

**Key words:** seismic activity, cloud geoinformation technologies, nonlinear deformation and wave processes, mechanical erosion, coal–methane, open pit coal mines, underground coal mines, satellite observation and hyperspectral survey, mining and geological conditions, climatic and natural conditions, massive blasting, earthquakes, Kuzbass, Altai–Sayan seismically active folded area.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 20-05-00051.

**For citation:** Oparin V.N., Potapov V.P., Kiryaeva T.A., Yushkin V.F. Development of methods and means for integrated geo-information-based analysis of influence exerted by nonlinear deformation and wave processes induced by seismic forces on geomechanical behavior of pit walls and on gas-dynamic activity in coal mines in Kuzbass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(8):5-39. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-5-39.

---

## **1. Введение: о существующих предпосылках решения сформулированной проблемы и ассоциированного круга задач**

За последние десятилетия в России и за рубежом накоплен значительный опыт и большой объем информации об очаговых зонах и особенностях протекания сейсмических процессов, индуцированных землетрясениями [1 – 12]. В значительно меньшем объеме это относится к «техногенной» сейсмичности: в первую очередь, с позиций осмысления причинно-следственных и количественных связей между технологиями ведения горных работ с активным применением мощных промышленных взрывов в регионах крупномасштабного недропользования с их тектонически активным обрамлением [13 – 17]. К последним относится, например, Кузбасс, находящийся в непосредственном сопряжении с сейсмоактивной Алтае-Саянской складчатой областью на юге Западной Сибири. Такой опыт обобщен в недавно вышедшей капитальной двухтомной монографии международного коллектива ведущих ученых [1]. Отмечено, что обеспечение безопасных условий ведения горных работ осуществляется как открытыми, так и подземными геотехнологиями. Новый этап в понимании сложности решения этой проблемы наступил с открытием таких законов, как нелинейные упругие волны маятникового типа и «поршневой» механизм протекания массо-газообменных процессов, которые происходят в напряженных массивах горных пород блочно-иерархического строения и в окрестностях горных выработок.

Исследование проводилось с целью обоснования актуальности проблемы разработки методов и геоинформационных средств комплексной оценки влияния нелинейных деформационно-волновых процессов, индуцируемых сейсмически-

ми воздействиями, на геомеханическое состояние бортов карьеров, а также газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса на базе недавно открытого «поршневого механизма» массо-газообменных процессов в многофазных геосредах. Для этого, безусловно, необходимы соответствующие экспериментальные данные, сбор и систематизация уже имеющейся информации по объектам недропользования, ее аналитическая обработка и комплексная интерпретация с привлечением возможностей современных геоинформационных систем Big Data [18 – 20].

С учетом достигнутых в последние годы результатов, опубликованных в работах [1, 13, 21, 22], особое внимание здесь следует уделить, в первую очередь, условиям и ситуациям, при которых источниками возникновения низкоскоростных групп маятниковых волн являются очаги природных и техногенных землетрясений, а их последствием — нелинейные сейсмодеформационные, газодинамические и иные ассоциированные с ними геомеханико-геофизические процессы на рудниках, угольных шахтах, в породах бортов карьеров и угольных разрезов. Также необходимо учесть существенное взаимное влияние территориально сопряженных рудных и угольных месторождений Кузбасса, установленное в работе [23].

Для системного анализа большого объема разнородной натурной информации особое внимание необходимо будет уделить исследованиям и разработке специального локального геопортала, ориентированного на информационно-аналитическое обеспечение решения задач комплексной оценки геомеханического влияния на районы активного недропользования, включая важные компоненты для определения состояния окружающей среды горнодобывающих предприятий Кузбасса [24].

В связи с обозначенной выше проблемой естественным образом возникают вопросы: (1) имеются ли ныне достаточные предпосылки для решения связанного с ней круга задач; а если их недостаточно, то (2) — какого качества исследования и разработки следовало бы осуществить дополнительно, с учетом несомненной актуальности сформулированной в названии данной статьи проблемы? На базе уже имеющегося научного задела рассмотрим эти вопросы ниже. Они связаны, в первую очередь, с анализом достигнутых результатов научных исследований и разработок в таких основных направлениях, как: теоретические основы для описания взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических, а также массо-газообменных процессов в многофазных углепородных массивах горных пород и геоматериалах; оценка роли сейсмичности и природно-климатических факторов в медленно протекающих механо-эрозионных процессах в прибортовых зонах карьерных пространств и их породных обнажениях на основе количественного анализа экспериментальных данных инструментальных измерений: «уровней значимости» влияния землетрясений и мощных технологических взрывов в наземных и подземных условиях на интенсивность газодинамической активности угольных шахт и механо-эрозионных процессов в прибортовых зонах карьеров (угольных разрезов) с учетом энергетических характеристик и удаленности от очаговых зон соответствующих динамических событий природного и/или техногенного характера; и, наконец, современные возможности облачных геоинформационных систем (Big Data) в решении сложных задач обеспечения геомеханико-геодинамической и геоэкологической безопасности ведения крупномасштабного горного производства в областях актив-

ного недропользования юга Западной Сибири.

В следующих разделах логически последовательно представим данные такого анализа достигнутых результатов по выделенным выше аспектам сформулированной проблемы, включая и оригинальные, еще неопубликованные, но существенно дополняющие обсуждаемые.

1. Об экспериментально-теоретических основах взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических процессов в многофазных напряженных углепородных массивах при нарушении их равновесного термодинамического состояния.

Обозначенная в названии настоящей статьи проблема во многом связана с представлениями о механизмах взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических массо-газообменных процессов в многофазных углепородных массивах, вмещающих отрабатываемые продуктивные пласты, и наличием аналитического аппарата для их корректного описания. По существу, это составляет методологическую основу для принятия решений как в построении специализированного вида мониторинговых систем, так и выделения «критериальных показателей». На их базе проводится комплексная оценка геомеханического и экологического состояний контролируемых объектов и/или геосистем в целом с позиции возможного их перехода в новые «фазовые состояния», в том числе и «катастрофического» вида.

Значимость результатов экспериментально-аналитических исследований в построении теории взаимодействия между нелинейными геомеханическими и физико-химическими процессами при безопасной и энергоэффективной отработке угольных месторождений Кузбасса, например, с позиций их выбросо-

и пожароопасности, трудно переоценить. В современных условиях по мере освоения глубоких горизонтов все более возрастает роль горного давления, температурного и геоструктурного факторов, а также наличия усиливающегося влияния сейсмического фона от землетрясений и технологических взрывов достаточно большой зарядовой мощности и их общей энергии [13].

Современные достижения в данном направлении с открытиями принципиальной значимости отражены в [25], а также в монографиях [1, 26]. Отметим важнейшие из этих достижений, поскольку ими, по существу, заложены экспериментально-аналитические основы теории взаимодействия между нелинейными геомеханическими и физико-химическими процессами при отработке угольных месторождений Кузбасса. При этом учитывается недавно открытый «поршневой механизм» [25] протекания массо-газообменных процессов в напряженных углепородных массивах и обусловленное им существенное влияние волн маятникового типа от природно-техногенных землетрясений и мощных технологических взрывов на газодинамическую активность угольных шахт [22]. Здесь доказано важное для построения нового уровня геомониторинговых систем научное положение о наличии взаимного геомеханико-термодинамического, газо-флюидодинамического и тектонофизического влияния территориально сопряженных областей с локализованными в их пределах месторождениями органической и неорганической природы. Это установлено на примере комплексного анализа структурно-геологических, тектоно-магматических, геомеханико-геодинамических и иных физико-механических, а также физико-химических характеристик Кузнецкого угольного бассейна и железорудного района Горной Шории и Хака-

сии юга Западной Сибири [23]. Феноменологическую основу для данного научного положения составили результаты выполненных лабораторных и натуральных экспериментов. Были применены современные облачные и BIG DATA геоинформационные технологии по соответствующим объектам недропользования Кузбасса по специально сформированному и запатентованному информационным банкам данных — каталогам, относящимся к стратиграфическому ресурсу угля и метана, метаноносности углей, внезапных выбросов, а также метаноемкости углей Кузбасса за длительный период времени.

Так, впервые проведенный комплекс обобщающих аналитических, экспериментальных лабораторных и натуральных исследований на региональном уровне позволил заключить следующее:

- Существует тесная связь между метаноемкостью и стадиями метаморфизма углей. В качестве показателя стадии метаморфизма углей может быть использован выход летучих веществ. В процессе метаморфизма каменных углей происходит их активация как сорбентов, которая выражается в усилении способности к поглощению газов, возрастающей, как правило, со степенью метаморфизма — в направлении от газовых углей к антрацитам. Для бурых и длиннопламенных углей зависимость сорбционной способности по отношению к газам имеет несколько иной характер: по мере метаморфизации ископаемых углей жесткость скелета угольного вещества возрастает и, следовательно, способность углей к абсорбции уменьшается.

- Пористость природных углей достаточно слабо зависит от выхода летучих веществ (стадий метаморфизма): средние значения (при сравнительно высокой дисперсии данных) описываются слабо «выпуклой» функцией зави-

симости пористости от выхода летучих веществ. Поэтому ее влияние на выход летучих веществ (стадии метаморфизма) практически можно не учитывать.

- В результате увлажнения пласта в угле усиливается проявление его пластических свойств, понижаются соответственно прочность и скорость газовой выделения. Молекулы воды обладают большим «сродством» к поверхности угля, чем молекулы метана, и присутствие воды в угле значительно снижает его сорбционную метаноемкость. Установлено, что увеличение влажности угольного пласта даже на 2% практически вдвое снижает энергию его газовой компоненты. Меняя давление и длительность воздействия воды на угольный пласт можно получить различные эффекты: добиваться «торможения» газовой выделения или дегазировать угольный пласт.

- Изменение метаморфизма природных углей зависит от глубины их залегания. Трендовый анализ экспериментальных данных выхода летучих веществ показал преимущественно возрастание стадий метаморфизма природных углей с глубиной залегания угольных пластов. Известные отклонения связаны с особенностями проявления регионального метаморфизма углей и геологического возраста угольных пластов.

- Влияния петрографических характеристик угля на его метаноемкость установлено не было.

- Показано, что современные геоинформационные технологии, рассчитанные на обработку больших объемов и потоков данных, качественно меняют подходы к получению новых закономерностей и, чаще всего, меняют и уже ставшие привычными представления о взаимодействии вещественных и структурных компонент горного массива. Проведенные расчеты по различным моделям data mining подтверждают друг дру-

га и позволяют получать новые сведения о характеристиках процессов, происходящих в угольном пласте, заранее не опираясь на физические представления о них.

Таким образом, метаноемкость углей тесно связана с их физико-химическими свойствами и физико-механической структурой угольного вещества: пористостью, влажностью и выходом летучих веществ. При этом адсорбционная способность ископаемых углей существенно меняется с изменением горно-геологических условий их залегания, зависит от их степени метаморфизма и химического состава. Способность угля поглощать и удерживать в себе газ повышается с ростом степени метаморфизма и газового давления и понижается с увеличением температуры, влажности и зольности углей.

Отмеченные результаты весьма важны для понимания механизма формирования очаговых зон таких катастрофических событий, как внезапные выбросы угля и газа в подземных выработках и их возможных последствий. С этой целью проведен комплекс механико-математического моделирования распространения двухфазного потока из газа и пылевидного угля с учетом расширения газа на стадии развития внезапного выброса в угольной шахте, который позволил сделать заключение об адекватности предложенного метода численного моделирования [27]. Здесь установлено, что упругая энергия угля составляет несколько тысячных от суммарной энергии внезапного выброса, поэтому на стадии его развития данный показатель можно не учитывать, а энергия переноса угля полностью генерируется за счет энергии расширения газа.

Метод численного моделирования и оригинальная экспериментальная система для определения закономерности затухания данного двухфазного потока

разработаны с учетом влияния энергии расширения газа на характеристики распространения смеси пылевидного угля и газа. Численное моделирование выполнено с учетом экспериментальных данных, позволивших установить динамико-кинематические характеристики распространения ударной волны внезапного выброса. В частности, доказано, что пылевидный уголь и газ под высоким давлением практически мгновенно выталкиваются из полости от внезапного выброса, расширяются и сжимают воздух в выработке, создавая ударные волны выброса. Ударная волна, генерируемая потоком пылевидного угля и газа во время внезапного выброса, затухает в осевом направлении выработки, а объемная доля содержания пылевидного угля при этом играет весьма важную роль.

Отмеченные выше сведения свидетельствуют о принципиальной значимости газовой компоненты и структурного строения углей и углепородных массивов в определении и прогнозировании их геомеханической реакции на различного вида «внешние» воздействия (источники природного или техногенного характера), где учет их термодинамического и напряженно-деформированного состояния, многофазности, блочно-иерархического строения и энергетических параметров источников развития нелинейных деформационно-волновых процессов приобретает фундаментальную значимость [28]. Этот аспект, по существу, изучался авторами настоящей работы на примере «последствия» крупных землетрясений на газодинамическую активность шахт Кузбасса с позиций теории нелинейных упругих волн маятникового типа, лежащей также в основе динамического взаимодействия между геомеханическими (деформационно-волновыми) и физико-химическими процессами в угольных пластах [22, 25].

Более подробно на этом важном аспекте остановимся ниже.

Здесь же необходимо отметить, что аналитической основой для описания установленных детерминированных связей между существующими нелинейными геомеханическими и физико-химическими процессами в напряженных угленосных массивах под влиянием изменяющегося термодинамического их состояния, а также природно-техногенных землетрясений, взрывов и других динамических источников явилось установление операторного соответствия между физико-химическим уравнением И. Ленгмюра и кинематическим уравнением В.Н. Опарина для волн маятникового типа в [25].

## **2. О влиянии землетрясений и мощных технологических взрывов на газодинамическую активность шахт и сейсмоземиссионные процессы в зонах влияния угольных разрезов (карьеров)**

Принципиально важным результатом экспериментально-теоретических исследований и анализа натурных данных явилось доказательство в [22] того факта, что существует детерминированная связь между нелинейными деформационно-волновыми процессами, индуцируемыми природно-техногенными землетрясениями, распространяющимися в породных массивах в виде пакетов волн маятникового типа «квазиметрового» скоростного диапазона, и режимами повышенной «осциллирующего вида» газодинамической активности в угольных шахтах Кузбасса. Это позволило предложить методологию и методику комплексного геомеханико-газодинамического мониторинга катастрофических событий с включением информационных каналов систем автоматизированного газового контроля (АГК), которыми осна-

щены практически все угольные шахты, но до сих пор не используются в мониторинговых системах прогнозирования катастрофических событий, индуцированных землетрясениями и мощными технологическими взрывами, на шахтах и угледобывающих карьерах Кузбасса.

Доказательство наличия отмеченной связи вначале осуществлялось на следующих примерах. Это газодинамические последствия от крупных землетрясений, произошедших в Кузбассе: по местному времени — 19 июня 2013 г. в 06:02 с  $ML = 6,1$ ,  $m_b = 5,5$  в пределах Бачатского угольного разреза; а также 9 ноября 2016 г. — два техногенных землетрясения в районе Калтанского угольного разреза. Первое из них было зарегистрировано в 22:37 МСК (02:37 местного времени) магнитудой 3,0; второе — в 00:38 МСК (04:38 местного времени) магнитудой 4,1. Эпицентры их находились примерно в одном районе на глубине около 2 км. Газодинамические «последствия» от этих землетрясений контролировались по записям датчиков метановыделения, соответственно, на шахтах «Чертинская Южная», «Алардинская» и «Осинниковская». Подробное описание и их анализ с позиций тео-

рии волн маятникового типа подробно отражены в статье [22]. Здесь приведем лишь некоторые дополнительные иллюстрации, с очевидностью свидетельствующие о «детерминированной связи» между временами прихода маятниковых волн, индуцированных этими землетрясениями, со скоростями «квазиметрового» диапазона ( $\sim 0,11 \div 0,54$  м/с) и последующим длительным «осциллирующим» процессом повышения уровней газовыделения в пределах контролируемых шахт большим количеством датчиков систем АГК. Соответствующие иллюстрации приведены на рис. 1. Звездочкой и прямой вертикальной линией здесь показаны дата и время землетрясения.

В подтверждение отмеченных в [22] основных результатов представим аналогичные экспериментальные данные, зафиксированные записями на датчиках системы АГК по тем же шахтам Кузбасса («Алардинская» и «Осинниковская»), но уже как «последствие» от недавнего землетрясения, произошедшего 30 июля 2019 г. на хребте «Бийская грива» с магнитудой 3,7 на глубине 3,47 км с эпицентрными расстояниями до шахт 38,37 км и 41,7 км соответственно (по дан-

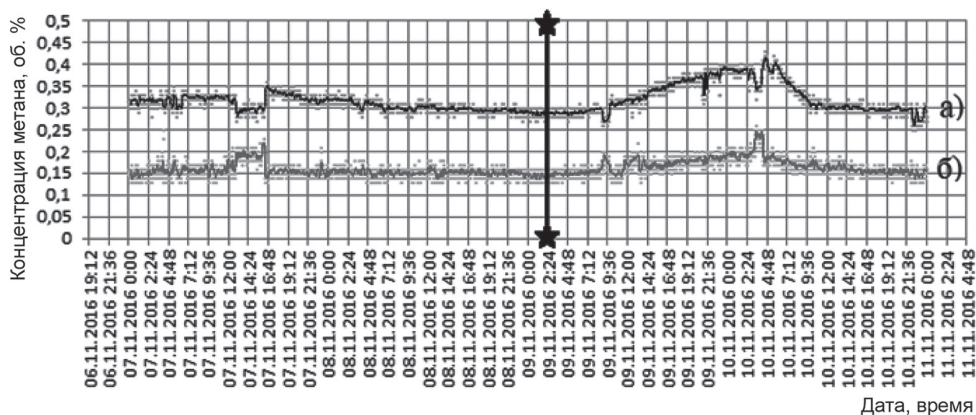


Рис. 1. Записи концентрации метановыделения на одном из датчиков метана системы АГК на шахте «Алардинская»: куток (а); исходящий поток (б)

Fig. 1. Records of methane release concentration from air and gas control sensor in Alarda Mine: niche (a); outgoing flow (b)



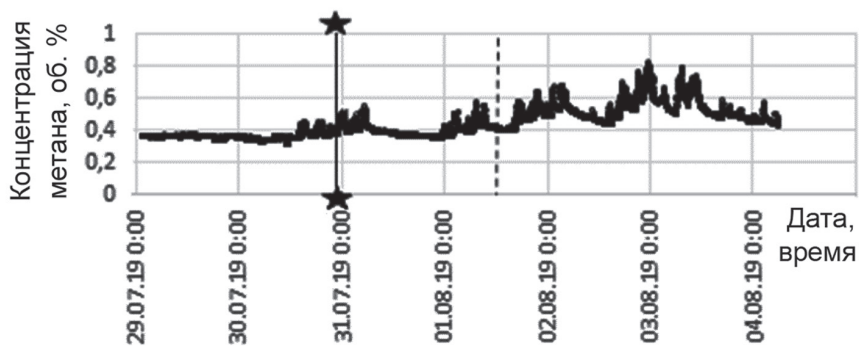


Рис. 2. Записи концентрации метановыделения на одном из датчиков метана системы АГК на шахте «Осинниковская» (расстояние от очага землетрясения 41 700 м)

Fig. 2. Records of methane release concentration from air and gas control sensor in Osinniki Mine: (distance to earthquake source 41 700 m)

ным сейсмологических служб СО РАН). Датчики метана в шахтах зафиксировали всплески его концентрации: примеры записей приведены на рис. 2 и 3. Звездочкой и прямой вертикальной линии здесь также показаны дата и время землетрясения (30 июля 23:05:43). Штриховой линией — дата и время начала режима повышенного газовыделения.

Так, если по датчику концентрации метана шахты «Осинниковская» 30 июля 2019 г. можно с необходимой точностью определить время начала повышенного метановыделения, индуцированного землетрясением, то на шахте «Алардинская» это можно было сделать,

из-за наличия фоновой «зашумленности», только с привлечением дополнительной информации. На рис. 2 явно выражены несколько «всплесков» после землетрясения: 1 пик — через 14,5 ч; второй — через 33,5 ч. Для их идентификации необходимо было использовать соответствующие шахтные сейсмограммы (рис. 4). На рис. 4, а показана сейсмограмма участка 1 (см. рис. 3) — начала повышенного метановыделения. На нем представлено достаточно хаотичное распределение «пику», связанное с заранее не идентифицируемыми факторами увеличения концентрации метана на всех датчиках этой шахты. По оси ординат отложены номера дат-

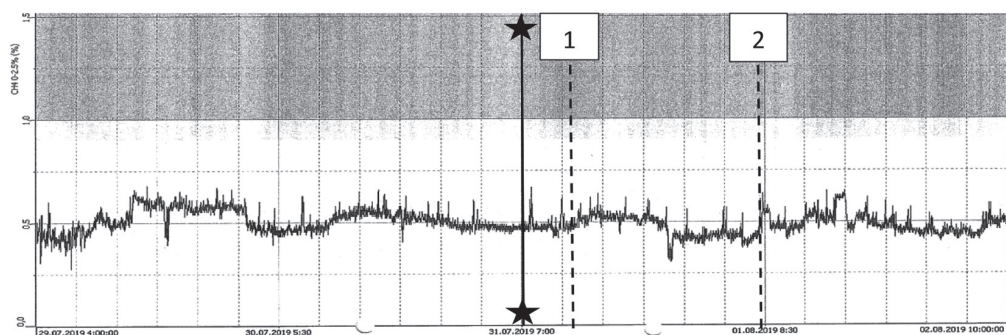


Рис. 3. Записи концентрации метановыделения на одном из датчиков метана системы АГК на шахте «Алардинская» (расстояние от очага землетрясения 38 370 м)

Fig. 2. Records of methane release concentration from air and gas control sensor in Alarda Mine: (distance to earthquake source 38 370 m)

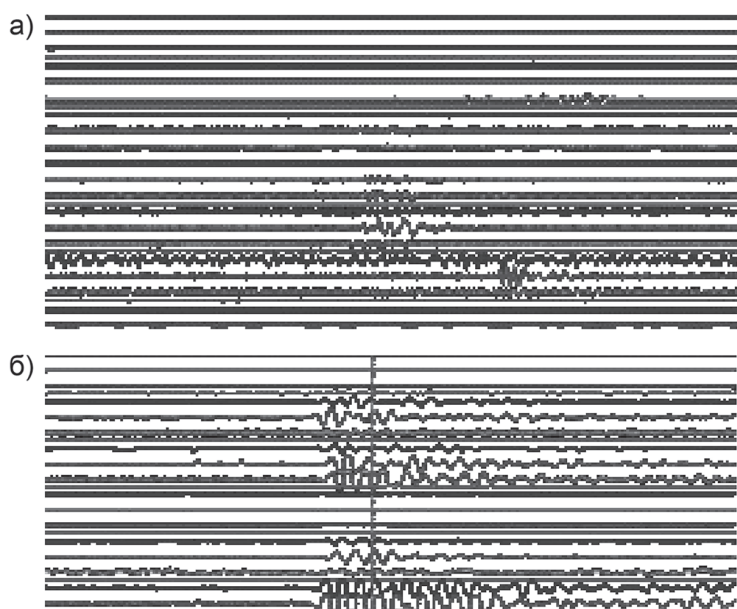


Рис. 4. Сейсмограммы участков 1 и 2 (см. рис. 3), зарегистрированные на шахте «Алардинская»  
 Fig. 4. Seismograms for areas 1 and 2 (see Fig. 3) in Alarda Mine

чиков концентрации метана в шахте «Алардинская». На рис. 4, б — аналогично для участка 2 (см. рис. 3).

С учетом известных расстояний от шахт до очага землетрясения, скорости маятниковых волн оценены: для шахты «Осинниковская» — 0,57 м/с; для шахты «Алардинская»: по первому пику — 0,74 м/с, по второму пику — 0,32 м/с. Их значения находятся в пределах оцененного ранее в [22] скоростного диапазона для маятниковых волн, с учетом имеющихся погрешностей по определению расстояния и времени вступления.

Для более точной идентификации временного сдвига между волновыми пакетами сейсмической и газодинамической активности оценивались доминирующие частоты маятниковой волны по временному интервалу записи сейсмограммы любого из датчиков на рис. 4. Пример определения доминантной частоты для волнового пакета одного из датчиков приведен на рис. 5.

По длительности упругого волнового пакета (~25 с) доминирующий период колебаний составил  $T = 0,2$  с. Следовательно, доминантная частота ма-

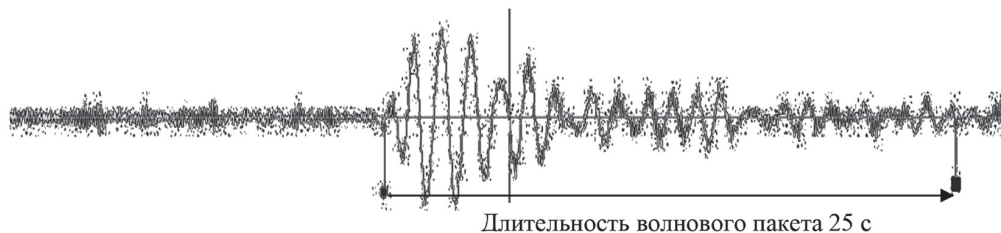


Рис. 5. Форма волнового пакета на сейсмограмме для участка 2 (по рис. 3), зарегистрированная на шахте «Алардинская» (в увеличенном масштабе)

Fig. 5. Waveform in seismogram for area 2 (see Fig. 3) in Alarda Mine (zoomed)

ятниковой волны ( $v = 1/T$ ) равна  $\sim 5$  Гц. Отсюда следует, что время от момента возникновения землетрясения до начала существенного повышения газодинамической активности шахты «Алардинская» Кузбасса составляет  $\sim 33,5$  ч, и оно вполне может быть использовано для проведения соответствующих профилактических мероприятий по повышению уровня безопасности ведения горных работ, в том числе — изменения режима функционирования горнодобывающего предприятия.

О подобного же рода влиянии массовых взрывов на сейсмоэмиссионные процессы в окрестностях угольных разрезов Кузбасса подробное описание дано авторами настоящей статьи в недавней публикации [29]: при количественном анализе пространственной и «бимодальной» во времени структуры сейсмических событий, индуцированных этими взрывами. Здесь впервые использован энергетический подход в рамках теории волн маятникового типа, с применением специальной сканирующей функции сопутствующего этим волнам сейсмоэмиссионного процесса [13] в пространстве и времени в виде траекторий миграции приведенных центров сейсмоэнерговыведения от взрывов.

### **3. О механо-эрозионных процессах и количественном описании структурной иерархии массивов горных пород по данным дистанционных лазерных измерений.**

В работе [29] авторами настоящей статьи, посвященной влиянию природно-климатических и техногенных факторов на развитие механо-эрозионных и сейсмоэмиссионных процессов в окрестностях угольных разрезов Кузбасса, основное внимание уделено анализу и обобщению современных достижений, относящихся к: (1) трещинно-техноген-

ной сейсмичности в Кузбассе (как центральной части, так и отдельным угольным разрезам) с оценкой их связи с развитием глубинных разломов; (2) «бимодальной» структуре (вообще-полимодальной) сейсмоэмиссионных процессов, индуцируемых мощными технологическими взрывами на рудниках и угольных разрезах; (3) геологическому строению, природно-климатическим и гидрогеологическим характеристикам контролируемого района с разрабатываемыми угольными месторождениями, с соответствующими им физико-механическими свойствами горных пород и параметрами ведения открытых горных работ в угольном разрезе; (4) характеру и механизму развития трещин в грунтах и вмещающих продуктивные пласты породах; (5) инженерно-геологическим и природно-климатическим факторам, комплексно влияющим на геомеханическое состояние бортов угольных разрезов, с количественными оценками параметров расхождения берегов трещин в зависимости от их местоположения относительно верхней кромки борта угольного разреза; (6) механизму активизации глубинных разломов вблизи угольных разрезов с поступлениями в них поверхностных и грунтовых вод и способствующему гидроразрыву пластов, а также «резонансной сейсмораскачке» геоблоков при сейсмических воздействиях и формированию последовательно связанных землетрясений «роевого типа» [1, 15, 30]; (7) новым требованиям к комплексному мониторингу сейсмо-деформационных волновых процессов при ведении открытых горных работ при освоении угольных месторождений.

В последнем случае — в позиции (7) — придается особое внимание детальному обследованию участков активных сейсмопроявлений на территории угольных разрезов с целью установления

«сейсмодислокаций» и сопутствующих им дискретных форм развития нелинейных деформационных процессов как для эпицентральных зон землетрясений, так и в пределах горных отводов — своеобразных «сейсмоземиссионных аттракторов», связанных с формированием и развитием определенного масштабного уровня сейсмоземиссионно-дислокационных структур — геомеханических волноводов мятниковых волн, часто скрытых осадочным чехлом на поверхности Земли для «непосредственных» наблюдений, но со временем «неожиданно» проявляющихся в виде протяженных зияющих разломов вдоль периметра карьерного пространства на определенных расстояниях (рис. 6, а).

Для контроля геомеханического состояния окрестных пород при отступании линии бортов карьеров разработана методика и частично организован сезонный мониторинг изменений деформированного состояния горного массива из рыхлых отложений, алевролитов и песчаника в бортах угольного разреза. Наблюдение осуществлялось маркшейдерскими, сейсморазведочными и GPS методами для количественной оценки развития процессов разрушений, определения параметров реформирования и самоорганизации пород под воздействием природно-климатических и геотехнологических факторов:

- выбран временно выведенный из эксплуатации участок одного из угольных разрезов Кузбасса с протяженными разломами вдоль кромки борта для создания геомеханико-геодинамического полигона с оснащением приборами планового и высотного сейсмо-деформационного и GPS-мониторинга на основе выделения маркшейдерских профильных линий, выбора геофизических трасс и базовых пунктов GPS-трилатерации, охватывающих наиболее проблемные места деструктивных деформационных

проявлений на исследуемом участке угольного разреза;

- оборудованы и используются: сейсморазведочная трасса по уступу борта песчаника (с датчиками вертикальной и горизонтальной ориентации осей чувствительности) для наблюдений инверсии сейсмических и прочностных свойств горных пород, выявления соответствующих признаков деструктивных техногенно-сейсмических проявлений в бортах и их прогнозирования; трасса по отвалу алевролита (с датчиками вертикальной ориентации) с целью оценки параметров уплотнения пород;

- выполнены обследования участков деформационных проявлений на склоне алевролита методами наземного лазерного сканирования с помощью системы Scan Station-2 для выявления трещинно-структурных дислокаций, их ориентации и форм развития сопутствующих эрозионных разрушений в приповерхностных слоях борта.

Практическая польза результатов выполнения такой работы заключается в количественном определении значимых параметров разрушения отвальных пород (алевролиты и песчаники в равных долях составляют до 80% при добыче угля) на блоки преимущественно прямоугольной или близкой к ним форме (песчаник) и блоки древовидно-полигональной формы (алевролит). Это определяет особенности отсыпки и послойного их упрочнения в отвалах естественным образом.

Начальный цикл проведенных экспериментальных исследований позволил оценить особенности разрушений песчаников и алевролитов для выбранных условий. Так, установлено, что отслоения краевой части бортов угольного разреза происходит в основном по вертикали (рис. 6, а, б), а дефектность приповерхностных слоев связана с образованием систем трещин в песчаниках и

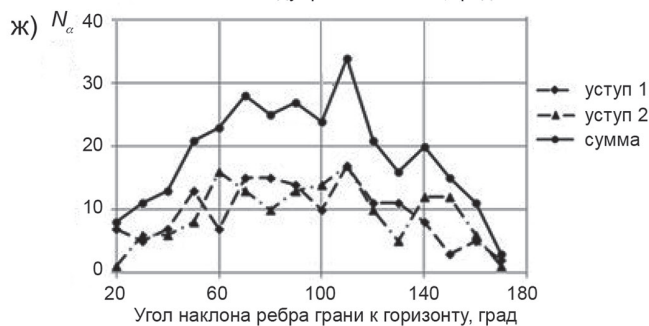
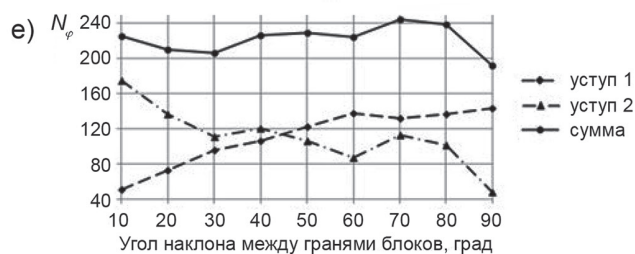
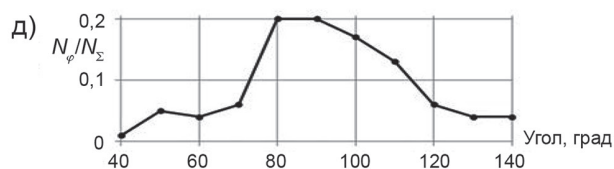
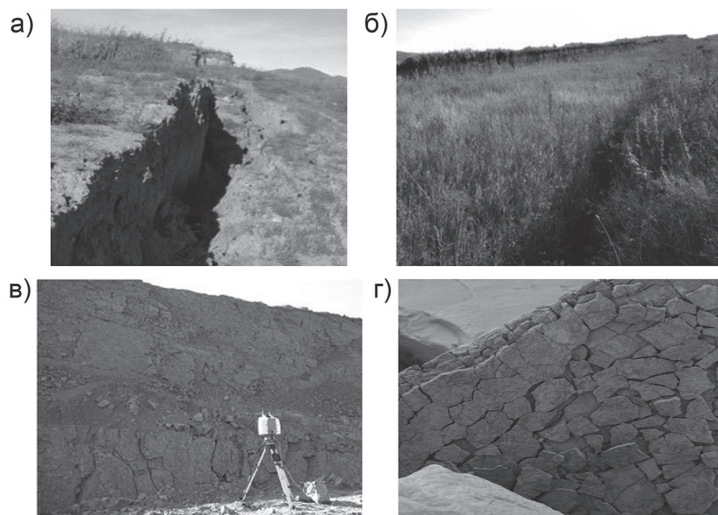


Рис. 6. Развитие трещин по периметру борта в песчаниках (а, б), откосах (в) и блоках алевролита (г); графики распределения углов между ребрами граней в блоках песчаника (д) и алевролита (е) по уступам борта и углов наклона ребер блоков алевролита к горизонту (ж);  $N_{\Sigma}$  — число выделенных углов;  $N_{\varphi, \alpha}$  — число одинаковых углов между гранями и наклона к горизонту

Fig. 6. Growth of fractures along the pit wall limit (a, b), in slopes (c) and in blocks of siltstone (d); distribution of angles between edges and sides in blocks of sandstones (e) and siltstone (f) in pit wall benches and angles of edges of siltstone blocks relative to a horizon (g);  $N_{\Sigma}$  — number of identified angles;  $N_{\varphi, \alpha}$  — number of equal angles between sides of blocks and angles relative to a horizon

алевролитах под воздействием взрывов и природно-климатических факторов. При этом формируются преимущественно блоки, близкие к прямоугольной (песчаник) и древовидно-полигональной (алевролит) форме (рис. 6, д, е). По откосу алевролита преобладают трещины с направлением, близким к вертикали (рис. 6, ж).

Следует отметить, что методические основы для формирования объемной цифровой модели поверхности бортов карьеров, а также количественного описания форм поверхности подземных выработок и камерных полостей при массовых взрывах зарядов по данным лазерного сканирования разработаны в [31, 32]. Здесь же приведены результаты их успешного применения для натуральных условий разрабатываемых железорудных и угольных месторождений Кузбасса подземными и открытыми геотехнологиями.

#### **4. О современных достижениях облачных геoinформационных систем (Big Data) и их возможностях в решении задач геомеханико-геодинамической и геоэкологической безопасности**

О ведущей роли современных информационных технологий для обеспечения безопасного и энергоэффективного функционирования сложнейших горнотехнических систем гигантского минерально-сырьевого комплекса России при разработке месторождений полезных ископаемых как жизненно необходимого «инструментария» по его управлению и для прогнозирования стратегического развития, по крайней мере, на обозримое перспективу, в современную эпоху уже нет необходимости приводить какие-либо новые доказательства. Оперативная многопараметрическая и комплексная оценка текущего состояния иерархически построенных крупных природно-

технических систем с тенденциями их эволюции во времени и пространстве ставят с необходимостью новые задачи с привлечением больших объемов разного качества информации о составных элементах таких Систем в недропользовании [1]. Об этом свидетельствуют и новые достижения в нелинейной геомеханике и геодинамике (см п. 3).

Так, отмеченные выше результаты проведенных авторами [1, 21, 22, 25, 29] экспериментально-теоретических исследований по доказательству существования детерминированной связи между динамико-кинематическими характеристиками индуцируемых землетрясениями и мощными взрывами нелинейных упругих волн маятникового типа с сопутствующими им режимами повышенной газодинамической активности угольных шахт, а также сейсмоземиссионных процессов в окрестностях бортов угольных разрезов Кузбасса с очевидностью требуют включения в комплексный анализ огромных потоков информации, поступающих одновременно по каналам АГК и соответствующих сейсмологических служб. А это — совершенно новое направление исследований, сулящее качественно новый уровень решения актуальных ныне задач обеспечения безопасного функционирования угледобывающих предприятий Сибири — энергетической «кузнецы» России, с ее стратегическими запасами сырья для разных отраслей промышленности [23].

В настоящее время меняется сама парадигма обработки горнотехнических данных, что обусловлено значительным увеличением разнородных потоков информации, поступающей от средств измерения; накоплением и структуризацией ее пространственно-временного вида [16 — 21]. В данном аспекте актуальны исследования и разработки специальных локальных геопорталов, ориентированных на информационно-аналитическое

обеспечение задач по оценке состояния окружающей среды обширных горно-промышленных регионов. Технологии геопорталов все более широко используются в нашей стране и особенно за рубежом, где уже имеются многочисленные реализации с различными типологиями и функциональными возможностями. По А.В. Кошкареву, в соответствии с уровнями инфраструктуры пространственных данных, можно выделить национальные, региональные и локальные геопорталы [33]. Отличительной особенностью любого геопортала является наличие набора функций, которые он может поддерживать, и соотношения между ними. В отличие от уже имеющихся разработок [34–37], которые реализуют типовые сервисы (поисковые, визуализации, загрузки данных, их трансформирования, а также вызова других сервисов), авторы настоящей статьи предлагают подход, ориентированный на облачные технологии, которые значительно расширяют как виды сервисов, так и их функциональные возможности [17–20]. В частности, ни один из ныне действующих геопорталов не позволяет провести расчеты, например, по оценке степени загрязнения воздушной среды в районах с высокой техногенной нагрузкой или оценить изменение геомеханико-геодинамического состояния разрабатываемого горного массива в пределах горных отводов и далее за определенный промежуток времени. Также в технологиях геопорталов редко используются средства интеллектуального анализа геоданных и системы геовычислений. К примеру, Геопортал Роскосмоса [38] и Геопортал МГУ [39] предлагают услуги только по просмотру, поиску и заказу космоснимков в определенные временные съемочные интервалы.

В последние годы усиливается внимание к изучению количественного влияния структурного фактора массивов гор-

ных пород на геомеханические процессы в верхних горизонтах четвертичных отложений и полускальных пород бортов карьеров месторождений твердых полезных ископаемых [1, 29]. В работах [31, 32] приведены данные, свидетельствующие о ключевой роли этого фактора в развитии квазистатической и динамической реакции горных пород при их разрушении под влиянием природно-климатических воздействий, образовании подземных полостей, формировании откосов с учетом способов разработки полезных ископаемых. На основе концепции о блочно-иерархическом строении горных пород и их массивов, выдвинутой акад. М.А. Садовским [40, 41], дан мощный импульс поиску новых методов количественного описания структурных отдельностей геосреды [42]. Такой (канонический) подход является основополагающим для контроля процессов деформирования иерархически построенной геосреды, что позволило количественно определять не только размеры ее структурных отдельностей, но и отслеживать динамику кластеризации, объяснять механизмы знакопеременной реакции и зональной дезинтеграции породных массивов [13, 25, 31, 32]. Выявление структурных изменений в грунтах и породах является актуальным и с позиций определения эрозионных переформирований в бортах карьеров, выделения границ устойчивости добычных забоев, обводнения нижележащих горизонтов.

В настоящее время нет адекватных физических моделей развития эрозионных процессов, позволяющих количественно описывать деструкцию и оседание грунтовых массивов. Существующие модели основаны либо на идеализированных механико-математических, либо на «осредненных» эмпирических представлениях, сильно упрощающих реальную картину развивающихся процессов.

При таких подходах обычно не учитывается ряд влияющих факторов механо-эрозионных преобразований, связанных с изменяющимися горно-геологическими, природно-климатическими, гидрологическими и сейсмическими условиями (см. п. 3).

В этой связи особую важность приобретают количественные характеристики механо-эрозионных процессов на природных объектах недропользования; достаточно детально определенные по результатам полевых структурно-деформационных исследований оползнеопасных участков, а также с привлечением космоснимков, измеренных как непосредственно в периоды деструкции и оседаний грунта, так и после его завершения. Получение количественных зависимостей влияния на динамику эрозионных процессов геологических, гидрологических и температурных факторов с учетом сейсмических воздействий — это, несомненно, актуальная научная задача для натурального изучения условий ведения открытых горных работ Кузбасса, где активно [13] используются взрывы с большими зарядами ВВ (от 150 до 300 т и более). Без применения современных геоинформационных систем Big Data в комплексном анализе регистрируемой информации решение подобного уровня задач практически невозможно.

Для повышения технологической эффективности отработки месторождений твердых полезных ископаемых с учетом необходимости обеспечения устойчивости как подземных горных выработок в рудниках, так и бортов и откосов в карьерах большое значение приобретает применение высокоточных электронных систем инициирования скважинных зарядов при ведении горных работ. В дополнение к обычно применяемым методикам выбора параметров буровзрывных работ при проектировании массовых

взрывов необходимо учитывать структурно-геологическое (блочнo-иерархическое) строение пород массива, разрушаемых взрывом, с учетом изменчивости их физико-механических свойств в пределах «отрабатываемого пространства». Для реализации этих целей необходима разработка соответствующих методических подходов применения измерительных средств активно развиваемых ныне сейсмо-деформационных мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности функционирования горнодобывающих предприятий Сибири [1, 2].

Следует особо подчеркнуть, что по затронутому выше аспектам обсуждаемой проблемы к настоящему времени уже осуществлен достаточно крупный научный задел в ИВТ СО РАН и его Кемеровском филиале [1, 17 — 20, 24 и др.].

Так, в направлении создания «геоинформационной оболочки» для комплексной региональной мониторинговой системы [22] разработан и испытан на примере Кузбасса пилотный образец распределенной геоинформационной системы, работающий в режиме предпроцессорной обработки потоков пространственной информации о геомеханических и геодинамических событиях, происходящих в районах с большой техногенной нагрузкой, позволяющий также оценить экологические риски по отдельным видам окружающей среды [43].

Были для этого разработаны: информационная модель метаописаний сейсмических событий для раздела «Сейсмический каталог» геопортала; концептуальные и информационные модели баз данных геомеханических и геодинамических явлений Кузбасса; архитектура и пилотный образец программного комплекса геопортала, работающей в режиме предпроцессорной обработки потоков пространственной информации о геомеханических и геодинамических событи-



ях, происходящих в районах с большой техногенной нагрузкой. Выполнена актуализация сейсмической информации на основе данных за 1963–2019 гг. Также на основе методов науки о данных разработаны комплексы визуального анализа сейсмической информации, позволяющие получать новые знания о взаимосвязи естественных и техногенных явлений; с использованием сервисов геопортала предложен новый подход к интеграции геодинамической и экологической информации; выполнена новая редакция архитектуры и информационного обеспечения геопортала по геомеханическим и геодинамическим событиям для интеграции различных информационных ресурсов с учетом особенностей решаемых задач по оценке динамики окружающей среды горнопромышленных регионов. Созданы модели метаданных, хранилище геоданных, сервисов облачных вычислений для программно-аппаратного комплекса геопортала.

Сформирована система программных интерфейсов для реализации вычислительных моделей по комплексной оценке состояния и динамики окружающей среды. Создан интерфейс к вычислительному комплексу для ресурсоемких этапов обработки интерферометрических и гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли, а также применительно к совместной оценке деформаций и состояния окружающей среды. Осуществлено тестирование разработанной геоинформационной системы, по результатам которого произведена ее доводка на различных тематических выборках конкретных данных в промышленном регионе с интенсивными горными работами в Кузбассе. Проведенные работы по исследованию возможностей применения методов глубокого обучения для нейронных сетей нового поколения позволили определить

их архитектуры, которые могут быть использованы при дальнейшем решении задач комплексного геомеханического и геоэкологического мониторингов, а также нелинейной геотомографии [44].

По существу, использованные при разработке обсуждаемой геоинформационной системы методические приемы предполагается опробовать и при необходимости развить применительно к количественному анализу динамико-кинематических характеристик маятниковых волн от землетрясений и взрывов, существенно влияющих (при определенных энергетических уровнях и удалении от очаговых зон) на геомеханическое состояние устойчивости бортов карьеров с различной глубиной их отработки с позиций влияния масштабных и скоростных параметров механо-эрозионных преобразований обнажений и их окрестных зон. Существенный задел для подобного рода исследований отражен в работах [1, 13, 15–25, 44].

С учетом необходимой комплексности исследований и крупномасштабности изучаемых объектов недропользования в Кузбассе, многопараметричности связей, подлежащих установлению, авторами настоящей статьи планируется создание для горных наук базовой, легко расширяемой системы на уровне мировых стандартов в области больших данных (Big Data), которая позволит решать задачи, связанные как с потоками пространственных данных, так и с методами их обработки на основе Data Science. Это позволит не только осуществлять регламентированный сбор геоданных, но и их структурированное хранение, обработку и анализ с целью получения новых, ранее неизвестных («скрытых») зависимостей. Специфика исследуемого объекта горнопромышленного региона, где происходит интенсивное техногенное воздействие на окружающую среду, требует создания новых инстру-

ментов. Такие инструменты, с одной стороны, должны позволить организовать регламентированный сбор и хранение пространственной информации с виртуальной интеграцией различных информационных ресурсов, включая гиперспектральные и радарные данные дистанционного зондирования Земли, а с другой стороны, решать в интерактивном режиме многие задачи, связанные с оценкой геодинамического и экологического состояния конкретных горнотехнических объектов.

Для этого необходимо разработать соответствующие прикладные интерфейсы с использованием технологий Java сервлетов, где следовало бы рассмотреть отдельный аспект, напрямую связанный с количественной оценкой установленного в [23] значительного влияния температурного фактора от крупного кластера магматических месторождений Алтае-Саянской складчатой области на характер газодинамической активности шахт сопряженного с ней Кузнецкого угольного бассейна, а также на особенности смещения на поверхности Земли при ее подработке.

Аналитическая обработка интегрированных данных должна строиться с использованием средств интеллектуального их анализа, включая уже разра-

ботанные программные средства энтропийного анализа [45]. Дополнительные данные могут быть получены из других источников при помощи метаописания и системы облачного сервиса. Особенно это касается сейсмических данных, необходимых для оценки геомеханико-геодинамических событий в горном массиве. В качестве основных системных веб-сервисов авторами предполагается использовать такие, как DAAS (сбор и трансформирование данных), SAAS (программные средства анализа данных), PAAS (реализация ресурсоемких вычислений на удаленных кластерах).

Гиперспектральные данные дистанционного зондирования Земли необходимо использовать как для оценки отдельных элементов окружающей среды, так и динамики изменения их составляющих в целом. В частности, методами отображения многомерных данных на фазовую плоскость предполагается оценить степень техногенного воздействия в районах закрытых предприятий. Здесь могут быть использованы как типовые алгоритмы обработки гиперспектральных данных, реализованных в программных системах ENVI, Multispectr, так и специально разработанные программные средства обработки многомер-



Рис. 7. Общая схема характеристик в рамках технологий BIG DATA  
 Fig. 7. General scheme of characteristics within BIG DATA technologies

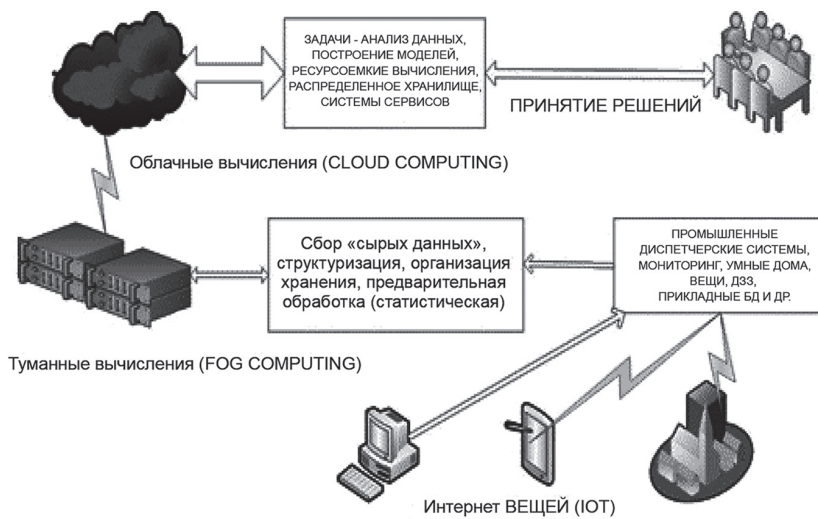


Рис. 8. Общая схема взаимодействия современных распределенных систем обработки пространственных данных при наличии туманных вычислений

Fig. 8. General chart of interaction between modern distributed systems of spatial data processing with foggy computations

ных данных с учетом специфики решаемых задач. Установление натуральных закономерностей взаимосвязи эрозионного деформирования, структурных изменений и сейсмических проявлений в грунтах и породах бортов карьеров, как показал опыт [1, 29, 31, 32], можно осу-

ществлять методами и средствами наземного лазерного сканирования, инженерной сейсморазведки, тахеометрических и GPS измерений.

На рис. 7 – 13 представлены некоторые иллюстрации практической реализации отмеченного выше научного за-

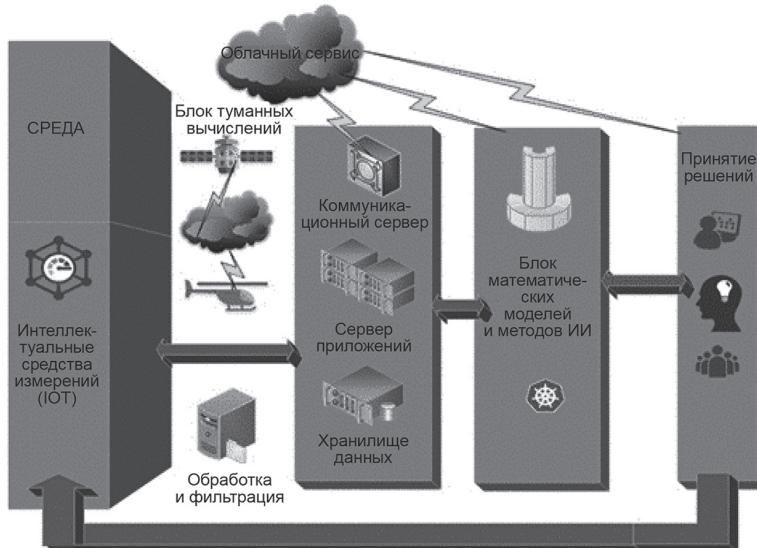


Рис. 9. Общая концептуальная схема цифрового двойника системы геомеханического мониторинга

Fig. 9. General conceptual scheme of digital duplicate of geomechanical monitoring system

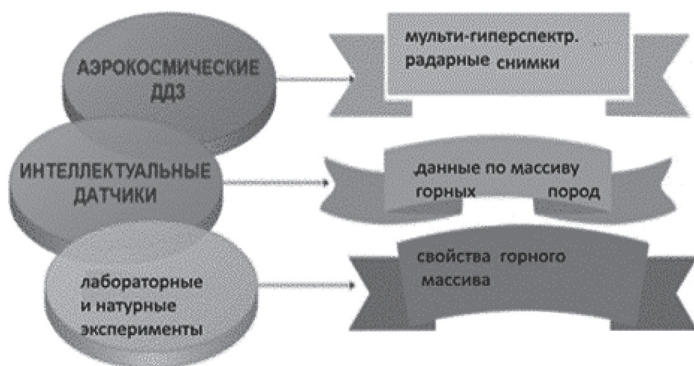


Рис. 10. Концептуальная схема мультимодального подхода  
 Fig. 10. Conceptual flow chart of multimodal approach

дела в формировании «общесистемной геоинформационной оболочки» [13] комплексного мониторингового контроля геомеханико-геодинамического и геоэкологического состояния горно-техни-

ческих и природных систем одного из стратегически важных регионов России. Более подробно соответствующие иллюстрации представлены в интернет-ресурсах [33 – 39].

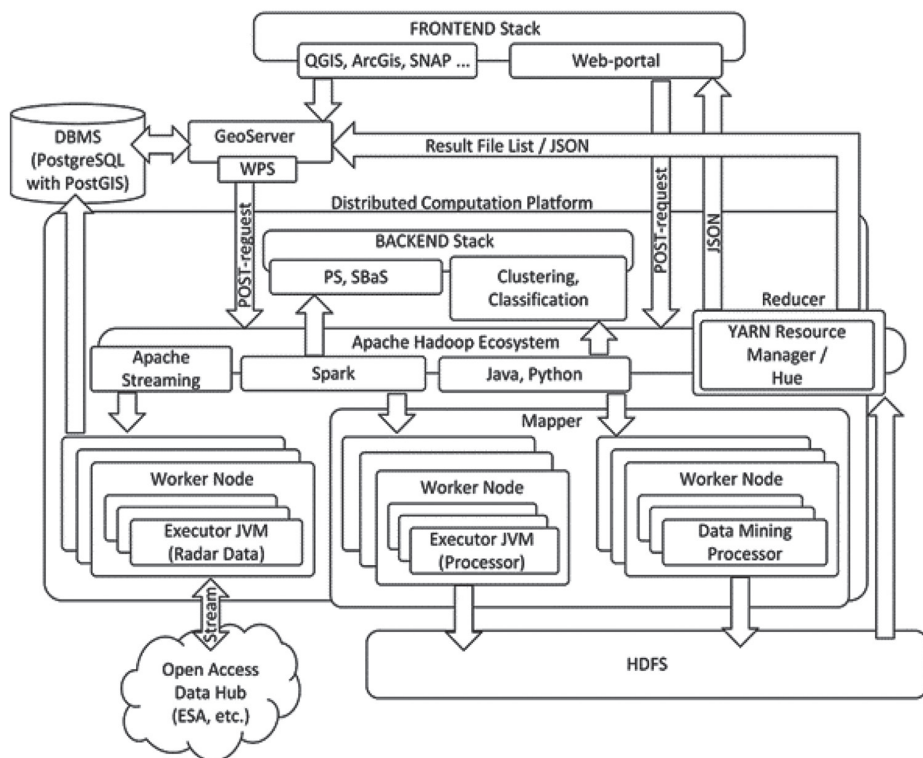


Рис. 11. Концептуальная схема взаимодействия программно-аппаратных компонентов кластера в рамках высокопроизводительной информационной среды туманных вычислений

Fig. 11. Conceptual flow chart of interaction between hardware / software cluster components within heavy-duty information environment of foggy computations

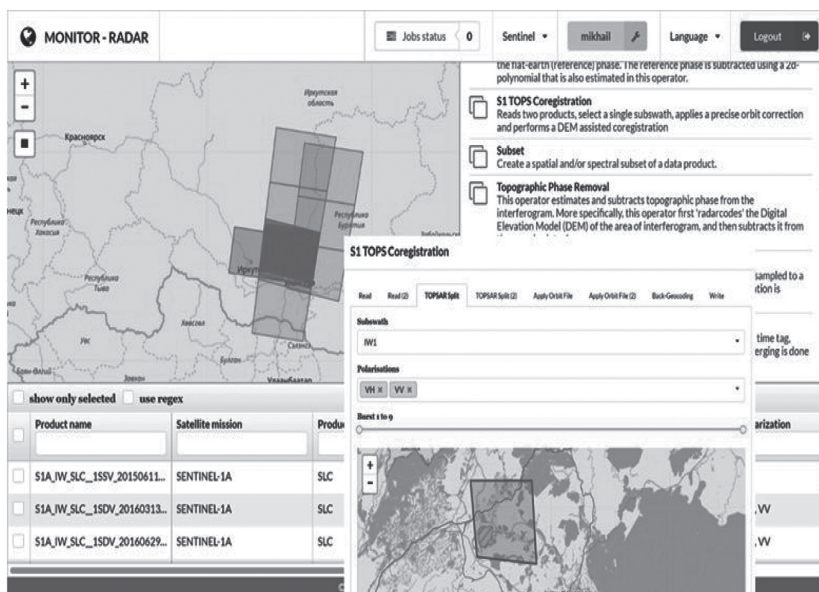


Рис. 12. Общий вид web-интерфейса экспериментального программного комплекса  
 Fig. 12. General view of web-interface of experimental software system

Таким образом, применительно к горнодобывающему комплексу Кузбасса в настоящее время имеются большой научный потенциал и уже многолетний опыт разработки различных классов прикладных геоинформационных систем, ориентированных на широкий круг задач контроля геомеханико-геодинамиче-

ской и геоэкологической безопасности, связанных с актуальными проблемами функционирования горнопромышленных регионов. В настоящее время разработана уникальная распределенная информационно-аналитическая система для оценки степени воздействия конкретного угледобывающего предприятия

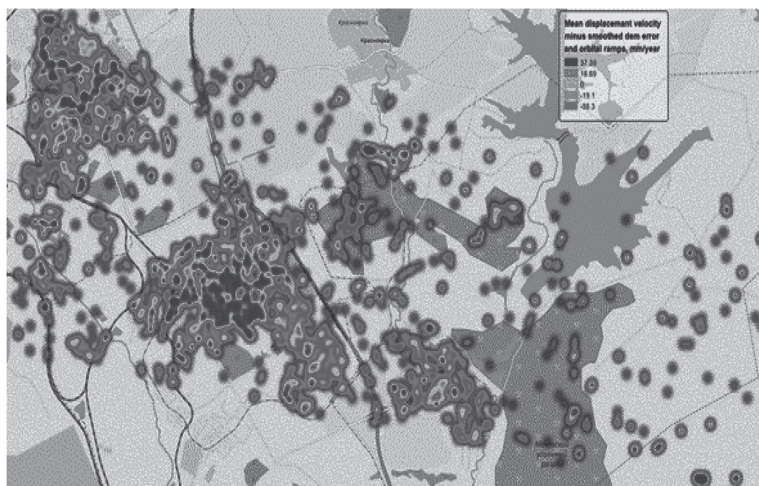


Рис. 13. Карта расчета скоростей смещения поверхности в районе г. Польсаево  
 Fig. 13. Chart of ground displacement velocities in the area of Polysaev

на состояние окружающей среды (включая почву, воздух и водные ресурсы). Для решения задач разработаны алгоритмы и программы по обработке многомерных данных, в основе которых лежат Big Data технологии, которые апробированы на широком классе данных, начиная от задач вибродиагностики и природно-техногенной сейсмики и заканчивая задачами комплексной оценки экологического состояния горнодобывающих предприятий Кузбасса.

### **5. О современных достижениях и актуальных задачах физического моделирования особенностей развития массо-газообменных процессов в углеродных геоматериалах в изменяющихся термодинамических условиях напряженных массивов горных пород**

Мировая практика показывает, что современные технологии дегазации продуктивных пластов недостаточно безопасны для эффективной отработки угольных месторождений. Это вызывает необходимость развития новых подходов к решению данной проблемы. Но для этого требуется более глубокое изучение механизмов и особенностей развития массо-газообменных процессов в напряженных угольных пластах.

Создать надежные мониторинговые системы диагностики и прогнозирования катастрофических событий при отработке угольных пластов на больших глубинах (внезапные выбросы угля и газа, подземные пожары), предложить эффективные меры по их профилактике невозможно без предварительной подготовки. Для этого необходимо адекватное физическое моделирование взаимодействия термодинамических и физико-химических процессов в многофазных углекислотных пластах по мере роста температуры и горного давления с уве-

личением глубины освоения угольных месторождений [1, 25, 26].

В последнее время российскими и зарубежными учеными активно развиваются представления о свойствах углекислотного пласта как твердого углекислотного раствора [26, 46 – 51]. Процесс распада углекислоты на уголь и метан протекает с выделением упругой энергии, приводящей не только к динамическому разрушению собственно угля, но и к выносу его значительного объема в горную выработку потоком выделяющегося газа [27]. Таким образом, динамика развития геомеханических процессов в многофазных органо-минеральных средах определяется не только свойствами твердых компонентов полезных ископаемых (см. также п. 1), но и соотношениями между внутренней упругой энергией содержащихся в них жидкости и газа и внешней упругой энергией, связанной с изменяющимися глобальными геодинамическими и «локальными» геомеханическими полями (напряженно-деформированным состоянием породных массивов за счет ведения горных работ) [1, 7, 25, 26].

Отмеченные проблемы, в силу их фундаментальности, в настоящее время могут решаться как с учетом наличия уже весьма обширного натурального экспериментального материала [1], так и на базе современных и развития новых методов комплексного анализа взаимодействия определяющих факторов органо-минерального геовещества в сложных массообменных процессах, связанных с извлечением полезных ископаемых из напряженных, вообще говоря, многофазных массивов горных пород в изменяющемся поле температур [26]. Поэтому разработка методов комплексного анализа геомеханического состояния углекислотных образцов, в которых роль газа (метана) является одной из основных, в сочетании с данными натурных наб-

людений, способны значительно расширить теоретические возможности для принятия безопасных и эффективных технологических решений по угледобыче. Совокупность полученных новых знаний позволит более подробно рассмотреть реакцию газовой компоненты обрабатываемого угольного пласта на изменение геомеханической обстановки в массиве горных пород для повышения надежности технологических решений.

В ИГД СО РАН в развитие феноменологических основ теории взаимодействия между геомеханическими, тепловыми и физико-химическими процессами в метаноносных угольных пластах Кузбасса при их отработке выполнен достаточно большой комплекс лабораторных исследований [1, 26], в т.ч. и на специальном стенде по испытанию угольных образцов различной стадии метаморфизма на одноосное жесткое нагружение до разрушения со скоростью  $\sim 3,3 \cdot 10^{-6}$  м/с в сравнении с натурными экспериментальными данными по угольным месторождениям. В частности, представлены зависимости от давления изменения температуры образцов угля и охватывающих их гранитных прослоек с использованием высокоточного сканирующего компьютерного тепловизора. Установлена связь изменений температуры образцов угля при их нагружении до разрушения с выходом летучих веществ и предельной внутренней энергией релаксации метаноносности угольных пластов месторождений Кузбасса.

Совместное с тепловизионным использование лазерного измерительного комплекса ALMEC-tv по высокоточному и детальному контролю спекл-методом деформационно-волновой картины на сканируемых образцах угля в процессе их нагружения позволило впервые доказать гипотезу В.Н. Опарина о возможности возникновения нелинейных — «маятникового типа» — движений струк-

турных элементов в угольных образцах в изменяющемся поле температур, что имеет принципиальное значение для осуществления не учитываемых ранее массо-газообменных процессов в напряженных угольных пластах различного марочного состава при их отработке [25].

Установленные закономерности позволили заключить, что при отработке угольных месторождений углететановые пласты «генетически» способны при определенных геомеханических и термофизических условиях сформировать газодинамический возмущающий импульс от внутренних напряжений, достаточный для развития процессов их саморазрушения с сопутствующими выбросами угля и газа. Полученные за последнее десятилетие экспериментальные результаты изучения особенностей развития массо-газообменных процессов в углеродных геоматериалах направлены на решение фундаментальных проблем геомеханики и рудничной аэрогазодинамики при подземной разработке угольных месторождений, содержащих энергетически значимую газовую компоненту, представляющую опасность по катастрофическому развитию техногенных процессов [1, 26]:

- в канонической шкале иерархических представлений [42] впервые введен и успешно опробован обобщенный показатель количественного описания петрографических свойств углей, с использованием которого дана классификация и описано распределение петрографических групп угольных пластов районов Кузбасса, что имеет практически важное значение для картирования участков шахтных полей при выделении потенциально опасных зон по выбросам угля, пород и газа;

- разработаны основные положения и методика использования измерений инфракрасного излучения с поверхности угольных образцов для диагностики

изменения их напряженно-деформированного состояния и получены первые экспериментальные результаты, обосновывающие эффективность этой методики;

- исследованы текстурные характеристики различных партий природных углей, что позволило найти корреляции между параметрами текстуры углей Кузбасса. Установлены корреляционные связи между свойствами пористой структуры угольного пласта и внутренней энергией углеметанового вещества;

- на основе изменений энергетических показателей метастабильных состояний газонасыщенного угля в [26] разработаны методы энергетического анализа газодинамической активности углеметановых пластов Кузбасса. При этом учитываются изменения температуры и эволюция полей микродеформаций в угольных геоматериалах, что определяет условия возникновения и начало развития процесса саморазрушения углеметановых пластов Кузбасса: в результате необратимых процессов, происходящих на микроструктурном уровне, в угле возникают поля напряжений и деформаций, энергия которых реализуется в виде локальных фазовых переходов.

С привлечением современных стендов и приборно-измерительного оборудования академических институтов СО РАН (Института катализа им. Г.К. Борескова, Института физики полупроводников имени А.В. Ржанова), а также ЦКП ИГД СО РАН, авторам удалось [1, 25, 26]:

- изучить изменение структуры углей различной стадии метаморфизма при их нагревании до 800 °С (среднее расстояние между углеродными сетками, как оказалось, практически не меняется и составляет  $3,5 \cdot 10^{-10}$  м, а исходные угли содержат в среднем 4 сетки, толщина углеродного слоя после нагревания уменьшается на 1–2 сетки, диа-

метр углеродного слоя в результате термообработки увеличивается до 20%);

- установить, что не более 85% метана в угле находится в связанном (растворенном) состоянии. С этой целью проводилось: экспериментальное изучение остаточной газоносности угля; измерение пористости и удельного объема пор; изучение экспериментальных данных по оценке доли сорбированного и растворенного метана в предельной газоносности угольного пласта.

При этом впервые установлена непосредственная (обратная) связь между выбросо- и пожароопасностью угольных пластов с позиций единой постадийной термомеханической и термохимической зависимости в поведении угольного вещества при его формировании в натуральных условиях и последующего извлечения ведением горных работ.

Для диагностики термохимического состояния очаговых зон при формировании подземных пожаров в углепородных массивах в процессе отработки угольных месторождений и разработки оперативных инструментальных методов их контроля, а также эффективных методов профилактики подобного рода катастрофических событий исследовано количественное содержание жидких, газообразных и твердых фаз угольных образцов, их качественного состава в продуктах пиролиза каменного угля различной стадии метаморфизма при их нагревании в широком диапазоне температур. Оказалось, что для всех групп образцов природных углей с ростом температуры характерно уменьшение массовых долей метана ( $\text{CH}_4$ ) и этана ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) и увеличение массовой доли водорода ( $\text{H}_2$ ), угарного газа ( $\text{CO}$ ). Следовательно, именно эти газы могут являться источниками интенсификации процессов горения в угольных пластах, а сжиженный азот и инертные газы в определенном их сочетании способны эффективнее по-



давливать процессы самовозгорания и горения углей. Поэтому необходим поиск соответствующих «рецептурных» решений, которые могут составлять основу для самостоятельных технологических решений, имеющих значительный инновационный потенциал в угольной промышленности.

Из отмеченного выше следует, что одной из основных задач для перспективных исследований является разработка новых моделей геомеханического состояния углепородного массива, в которой роль метана является преобладающей. Они способны существенно расширить возможности теоретических прогнозов для принятия технологических решений в угледобыче и обеспечения предварительной дегазации месторождений.

Таким образом, комплексные лабораторные и натурные исследования по детальному изучению особенностей проявления «поршневого» механизма возникновения и развития нелинейного массо-газообменного процесса в угольных пластах различной стадии метаморфизма и количественному его описанию в рамках теории волн маятникового типа — актуальная ныне фундаментальная задача, имеющая большой прикладной потенциал. Для конструктивного его применения, в ИГД СО РАН совместно с ИФП СО РАН реализуется ныне проект по созданию специализированного стенда по анализу «тонких» массо-газообменных процессов в углепородных геоматериалах в изменяющихся ( $P, V, T$ ) условиях их термодинамического состояния и газовых компонент.

На рис. 14–15 представлены, соответственно, схематично стенд для исследования «поршневого механизма» протекания массо-газообменных процессов и фотография угольного образца, вклеенного в металлический модуль для проведения испытаний на специальном

гидравлическом прессе до 15 т нагрузки. С этой целью разработаны также оригинальные системы тензодатчиков для измерения давления, перемещений и линейных деформаций, сервисное программное обеспечение для компьютерной обработки и визуализации графической информации для задаваемых (в т.ч. — «гистерезисного» вида) режимов нагружения на испытываемые углепородные образцы.

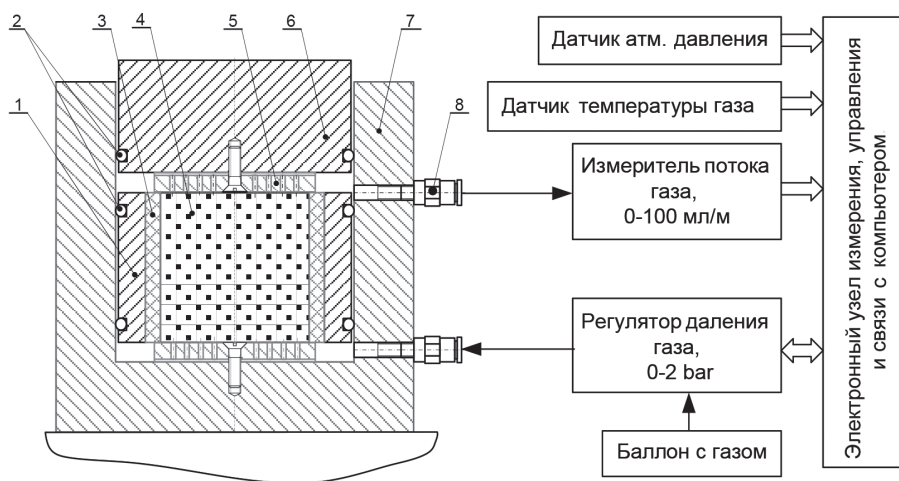
Здесь лишь отметим, что первые предварительные испытания стенда показали достаточно необычные результаты: даже при весьма малом уровне внешнего одноосного нагружения угольного образца, проходящий через него поток воздуха (40–70 мл/мин) увеличивается на ~25% (на 10–15 мл/мин), а при снятии нагрузки — возвращается к прежнему значению. Описание результатов исследований «поршневого механизма» протекания массо-газообменных процессов в угольных образцах будет представлено в необходимом объеме по завершении запланированного комплекса исследований в отдельных научных статьях.

## **6. Обсуждение результатов**

Поставленные в данной статье проблемы и задачи, а также обозначенные пути их решения способны значительно расширить теоретические и прикладные возможности для принятия научно обоснованных технологических решений по безопасной угледобыче, в первую очередь, в Кузбассе.

Среди важнейших задач комплексных геомеханико-геодинамических и геоэкологических направлений исследований и разработок отмечены:

(1) обоснование методологии, разработка и апробация методов комплексного геомеханико-газодинамического мониторинга для прогнозирования крупных динамических (до катастрофических)



Модуль для проведения испытаний

- |                        |                                   |
|------------------------|-----------------------------------|
| 1. Обойма              | 5. Газораспределительная пластина |
| 2. Уплотнители         | 6. Пуансон                        |
| 3. Герметик            | 7. Корпус модуля                  |
| 4. Исследуемый образец | 8. Быстроразъемный газовый штуцер |

Рис. 14. Стенд для исследования «поршневого механизма» протекания массо-газообменных процессов  
 Fig. 14. Test bench for 'piston mechanism' of mass and gas exchange processes

событий на шахтах и механо-эрозионных процессов на карьерах Кузбасса, индуцированных распространением низкоскоростных нелинейных деформационно-волновых процессов из очаговых зон, а также оценка их конкретных скоростных диапазонов и амплитудно-периодных спектров (волн маятникового типа);

(2) создание и широкая апробация на натуральных данных распределенной интегрированной информационно-аналитической среды, позволяющей решать широкий класс задач по анализу и управле-

нию физическими процессами горного производства в районах с высокими техногенными нагрузками; сбор и структурирование, в том числе уникальной, информации, по базовым разноуровневым деформационным процессам, происходящим в массивах горных пород при добыче полезных ископаемых, а также организация удаленного доступа к ней на основе систем облачного сервиса;

(3) в соответствии с п. (2), методами искусственного интеллекта (нейронных сетей с глубоким обучением) разработ-



Рис. 15. Фотография угольного образца, вклеенного в металлический модуль для проведения испытаний  
 Fig. 15. Picture of coal sample embedded in steel module for testing

ка принципиально новых моделей прогноза газодинамических явлений в шахтах и механо-эрозионных процессов в прибортовых зонах карьеров, коррелирующих с процессами смещения на поверхности земли и учитывающих структурную иерархию геоблоков по их размерам в массивах горных пород, в т.ч. геотектонических;

(4) создание прогнозных геомеханико-геоэкологических карт, связывающих районы с наиболее интенсивными смещениями на поверхности земли, полученными средствами радарной интерферометрии, с районами отработки угольных пластов с интенсивными газодинамическими явлениями.

Для реализации этих укрупненных задач исследований, безусловно, необходимо будет:

- разработать комплексный подход, заключающийся в интеграции разнородной пространственной информации, получаемой также и спутниковыми технологиями дистанционного зондирования Земли (мульти- и гиперспектральной съемки, комплексируемой с радарными снимками), с дальнейшей обработкой и анализом гетерогенных информационных потоков средствами науки о данных (data science), а также ориентацией на новейшие методы машинного и глубокого обучения. Такой подход позволяет не только получать новые знания о характере влияния сейсмической активности на процессы горного производства, но и оценивать уровень их взаимосвязи между собой. Это необходимо для создания распределенной интегрированной информационно-аналитической среды, позволяющей решать широкий класс задач по анализу и управлению физическими процессами горного производства в районах с высокими техногенными нагрузками на базе знаний по деформационным процессам, происходящим в массивах горных пород и на поверх-

ности Земли при добыче полезных ископаемых, а также организовывать удаленный доступ к ней на основе систем облачного сервиса;

- обосновать методологию и разработать методику комплексного геомеханико-газодинамического мониторинга катастрофических событий, применение которых на основных объектах недропользования Кузбасса позволит экспериментально исследовать особенности распространения возникающих от землетрясений низкоскоростных (квазиметрового диапазона) групп волн маятникового типа, способных индуцировать повышенную циклическую газообильность в шахтах и механо-эрозионную активность в прибортовых зонах карьеров. Это имеет большое экономико-технологическое и социальное значение для совершенствования управления газопроявлениями при ведении горных работ и повышения их безопасности в угольной отрасли;

- разработать и создать методическое обеспечение интеграции пространственных данных по скоростям смещений поверхности Земли в районах с высокими техногенными нагрузками, а средствами геопространственного анализа данных — составить прогнозную карту, связывающую районы с наиболее интенсивными смещениями, полученными средствами радарной интерферометрии, с районами отработки угольных пластов, отличающихся интенсивными газодинамическими процессами. На этой основе методами искусственного интеллекта (нейронных сетей с глубоким обучением) можно будет разрабатывать принципиально новые модели прогноза газодинамических явлений, коррелирующих с процессами смещения на поверхности Земли и учитывающих иерархию геоблоковой структуры массивов горных пород, в том числе и тектоническую нарушенность;

- сформировать уникальные базы геоданных, включающих в себя векторные и растровые слои различной тематической направленности, разнообразные данные дистанционного зондирования Земли и сейсмические данные, которые позволят проследить их динамику в историческом аспекте с особенностями влияния на характер физических процессов, происходящих в массивах горных пород, подверженных интенсивному техногенному воздействию на соответствующих территориях;

- в развитие феноменологических основ теории взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе при их отработке открытым способом, следует провести комплекс лабораторных и натурных исследований взаимосвязи эрозионного деформирования, структурных и угольных разрезов под влиянием сезонных природно-климатических факторов с увеличением глубин их отработки, а также динамики массо-газообменных процессов на угольных образцах различного марочного состава в изменяющихся полях температур и давления (P, V, T-условиях).

### **Выводы**

Обосновывается постановка актуальной проблемы и методолого-методический подход к ее решению, который позволит получить следующие основные результаты:

- (1) разработать и опробовать методы комплексного геомеханико-газодинамического мониторинга и прогнозирования крупных динамических (до катастрофических) событий на карьерах и шахтах Кузбасса, индуцированных распространением низкоскоростных нелинейных деформационно-волновых процессов из очаговых зон землетрясений и взрывов, а также с оценкой их скорост-

ных диапазонов и амплитудно-периодных спектров;

- (2) создать и апробировать на натуральных данных распределенную интегрированную информационно-аналитическую среду, позволяющую решать широкий класс задач по анализу и управлению физическими процессами горного производства в районах с высокими техногенными нагрузками; собрать и структурировать уникальную разнородную информацию, в том числе по базовым деформационным процессам, происходящим в массивах горных пород при добыче полезных ископаемых, а также организовать удаленный доступ к ней на основе систем облачного сервиса;

- (3) методами искусственного интеллекта (нейронных сетей с глубоким обучением) разработать принципиально новые модели прогноза газодинамических явлений в шахтах и механо-эрозионных процессов в прибортовых зонах карьеров, коррелирующих с процессами смещения на поверхности земли и учитывающих структурную иерархию блоков по их размерам в массиве горных пород, с учетом геотектонических. Это позволит создать прогнозную геомеханико-геоэкологическую карту, связывающую районы с наиболее интенсивными смещениями на поверхности земли, полученными средствами радарной интерферометрии, для районов отработки угольных пластов с интенсивными газодинамическими процессами.

Ожидаемые результаты реализации таких исследований и разработок способны значительно расширить теоретические и прикладные возможности специалистов горного производства по принятию технологических решений для экономически эффективного и геомеханико-геоэкологически безопасного использования в сейсмически активном регионе юга Западной Сибири на примере угольного Кузбасса. При этом ши-

роко применяемые на угольных предприятиях системы автоматизированного газового контроля (АГК) приобретают новые возможности для их комплексирования с данными сейсмологических и деформационно-волновых информационных каналов.

В статье приведены новые экспериментальные данные: (а) подтверждающие существенное влияние землетрясений и мощных технологических взрывов на газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса (на примере землетрясения 30.07.2019 г. на хребте «Бийская грива» с магнитудой 3,7 на глубине 3,47 км с эпицентрными расстояниями до шахт «Алардинская» и «Осинниковская» 38,37 км и 41,7 км, соответственно); (б) об особенностях про-

текания механо-эрозионных процессов в прибортовых зонах карьеров Кузбасса; (в) о современных достижениях облачных геоинформационных систем Big Data в решении региональных задач геомеханико-геодинамической и геоэкологической безопасности ведения горных работ в районах интенсивного недропользования с тектонически активным обрамлением на юге Западной Сибири; (г) по оригинальным результатам физического моделирования, свидетельствующего о важной роли «поршневого механизма» в особенностях протекания нелинейных массо-газообменных процессов при одноосном нагружении угольных образцов на специальном стенде – совместной разработке ИГД СО РАН и ИФП СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах* / Под ред. Н.Н. Мельникова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. – Т. 1. – 549 с.; 2019. – Т. 2. – 546 с.

2. *Oparin V. N., Yushkin V. F., Porokhovskiy N. N., Grishin A. N., Kulinich N. A., Rublev D. E., Yushkin A. V.* Effect of large-scale blasting on spectrum of seismic waves in a stone quarry // *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50, No 5. Pp. 865 – 877.

3. *Wang Kaixing, Pan Yishan, Dou Linming.* Energy transfer in block-rock mass during propagation of pendulum-type waves // *Chinese J. Geotech. Eng.* 2016. Vol. 38, No 12. Pp. 2309 – 2314.

4. *De La Torre Ch. A., Bradley B. A., Lee R. L.* Modeling nonlinear site effects in physics-based ground motion simulations of the 2010 – 2011 Canterbury earthquake sequence // *Earthquake Spectra*. 2020. Vol. 36. Pp. 856 – 879. DOI: 10.1177/8755293019891729.

5. *Bradley B. A., Razafindrakoto H. N. T, Polak V.* Ground-motion observations from the 14 November 2016 Mw 7.8 Kaikora, New Zealand earthquake and insights from broadband simulations // *Seismological Research Letters*. 2017. Vol. 88. No 3. Pp. 740 – 756. DOI: 10.1785/0220160225.

6. *Deschenes M., Wood C., Wotherspoon L., Bradley B.* Development of deep shear wave velocity profiles in the Canterbury Plains, New Zealand // *Earthquake Spectra*. 2018. Vol. 34. No 3. Pp. 1065 – 1089.

7. *Райс Дж.* Механика очага землетрясений. – М.: Мир, 1982. – 217 с.

8. *Раутиан Т. Г., Халтурин В. И.* Очаговые спектры землетрясений. Землетрясения и процессы их подготовки. – М.: Наука, 1991. – С. 82 – 93.

9. *Соболев Г. А., Пономарев А. В.* Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.

10. *Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России* / Под. ред. В.В. Адушкина и А.А. Маловичко. – М.: ГЕОС, 2013. – 384 с.

11. *Кочарян Г. Г.* Геомеханика разломов / Отв. ред. В.В. Адушкин. – М.: ГЕОС, 2016. – 424 с.

12. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование среды и сейсмический процесс. — М.: Наука, 1987. — 100 с.
13. Adushkin V. V., Oparin V. N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media // Journal of Mining Science. Pp. I: 2012, Vol. 48, No 2, Pp. 203–222; Pp. II: 2013, Vol. 49, No 2, Pp. 175–209; Pp. III: 2014, Vol. 50, No 4, Pp. 623–645; Pp. IV: 2016, Vol. 52, No 1, Pp. 1–35.
14. Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика / Под ред. Н.Н. Мельникова. Ч. 1, 2. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004. — 422 с.
15. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / Под ред. Н.Н. Мельникова. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. — 632 с.
16. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / Под ред. М.Д. Новопашина. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 449 с.
17. Bychkov I. V., Vladimirov D. Ya., Oparin V. N., Potapov V. P., Shokin Yu. I. Mining information science and Big Data concept for integrated safety monitoring in subsoil management // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52, No 6. Pp. 1195–1209.
18. Bychkov I. V., Oparin V. N., Potapov V. P. Cloud technologies in mining geoinformation science // Journal of Mining Science. 2014. Vol. 50, No 1. Pp. 142–154.
19. Потапов В. П., Попов С. Е., Костылев М. А. Метод обработки радарных данных на базе системы массово-параллельного исполнения заданий Apache Spark // Вычислительные технологии. — 2017. — Т. 22. — № 1. — С.60–74
20. Москвичев В. В., Бычков И. В., Потапов В. П., Тасейко О. В., Шокин Ю. И. Информационная система территориального управления рисками развития и безопасностью // Вестник Российской академии наук. — 2017. — Т. 87. — № 8. — С. 696–705.
21. Bagaev S. N., Orlov V. A., Panov S. V., Parushkin M. D. Pendulum waves and their singling out in the laser deformograph records of the large earthquakes // Journal of Mining Science. 2010. Vol. 46. No 3. P. 217 – 224.
22. Oparin V. N., Adushkin V. V., Kiryaeva T. A., Potapov V. P., Cherepov A. A., Tyukhrin V. G., Glumov A. V. Effect of pendulum waves from earthquakes on gas-dynamic behavior of coal seams in Kuzbass // Journal of Mining Science. 2018. Vol. 54. No 1, pp. 3–14.
23. Опарин В. Н., Адушкин В. В., Киряева Т. А., Потапов В. П. Региональная кластеризация угольных месторождений Кузбасса по газодинамической активности // Горный информационно-аналитический бюллетень. ч. I. — 2018. — № 9. — С. 5–24. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-5-24. ч. II. — 2018. — № 10. — С. 5–29. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-5-29.
24. <http://topuch.ru/v-p-ananeev-a-d-potapov/index10.html#pages>.
25. Oparin V. N. Theoretical fundamentals to describe interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams // Journal of Mining Science. 2017. Vol. 53, No 2. Pp. 201–215.
26. Киряева Т. А. Разработка методов энергетического анализа и прогнозирования газодинамической активности углетановых пластов Кузбасса. — LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. — 332 с.
27. Zhou A. T., Wang K., Kiryaeva T. A., Oparin V. N. Regularities of two-phase gas flow under coal and gas outbursts in mines // Journal of Mining Science. 2017. Vol. 53, No 3. Pp. 533–543.
28. Wang K. X., Aleksandrova N. I., Pan Y. S., Oparin V. N., Dou L. M., Chanyshv A. I. Effect of block medium parameters on energy dissipation. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2019. Vol. 60. No 5. Pp. 926–934.
29. Опарин В. Н., Адушкин В. В., Юшкин В. Ф., Потапов В. П. О влиянии природно-климатических и техногенных факторов на развитие механо-эрозионных и сейсмоземиссионных процессов в окрестностях угольных разрезов Кузбасса // Горный информацион-

но-аналитический бюллетень. — 2019. — № 9. — С. 72–101. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-72-101.

30. Лазаревич Т. И., Мазикин В. П., Малый И. А., Поляков А. Н., Харкевич А. С., Шабаров А. Н. Геодинамическое районирование Южного Кузбасса. — Кемерово: Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела — межотраслевой научный центр ВНИМИ, 2006. — 181 с.

31. Oparin V. N., Yushkin V. F., Klimko V. K., Rublev D. E., Izotov A. S., Ivanov A. V. Analytical description of surface of blasting-formed underground cavities by laser scanning data // Journal of Mining Science. — 2017. — Vol. 53. — No 4. — Pp. 789–800.

32. Oparin V. N., Sereдович V. A., Yushkin V. F., Ivanov A. V., Prokop'eva S. A. Application of laser scanning for developing a 3D digital model of an open-pit side surface // Journal of Mining Science. — 2007. — Vol. 43. — No 5. — Pp. 545–554.

33. <http://www.gisa.ru/45968.html/>

34. <http://www.ideo.es/>

35. <http://www.geoportail.fr>

36. <http://www.geoconnections.org>

37. <http://geodata.gov>

38. <http://geoportal.ntsomz.ru/>

39. <http://www.geogr.msu.ru:8082/api/index.html>

40. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН. — 1979. — Т. 247. — № 4. — С. 829–831.

41. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. О свойстве дискретности горных пород // Садовский М. А. Избранные труды. — М.: Наука, 2004. — С. 337–352.

42. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011. — 264 с.

43. Oparin V. N., Potapov V. P., Giniyatullina O. L., Bykov A. A., Schastlivtsev E. L. Integrated monitoring of induced air pollution in mining regions // Journal of Mining Science. 2017. Vol. 53, No 5. Pp. 945–953.

44. Опарин В. Н., Адушкин В. В., Востриков В. И., Усолицева О. М., Мулев С. Н., Юшкин В. Ф., Киряева Т. А., Потапов В. П. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Ч. I: Формулировка и обоснование задачи исследований // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 1. — С. 5–25. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25.

45. Logov A. B., Oparin V. N., Potapov V. P., Schastlivtsev E. L., Yukina N. I. Entropy analysis of process wastewater composition in mineral mining region // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51, No 1. Pp. 186–196.

46. Алексеев А. Д., Айруни А. Т., Васючков В. Ф., Зверев И. В., Синолицкий В. В., Долгова М. О., Эттингер И. Д. Свойство органического вещества угля образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов: научное открытие, РАЕН, диплом № 9, 1994.

47. Малинникова О. Н., Ульянова Е. В., Долгова М. О., Зверев И. В. Изменение микроструктуры ископаемых углей в результате внезапных выбросов угля и газа // Горный журнал. — 2017. — № 11. — С. 27–32.

48. Шпак А. П., Алексеев А. Д., Ульянова Е. В., Трачевский В. В., Чистоклетов В. Н. Природа метаногенерации в угольных пластах // Доповіді Національної академії наук України. — 2012. — № 6. — С. 105–110.

49. Захаров В. Н., Малинникова О. Н. Исследование структурных особенностей углей выбросоопасных пластов // Записки горного института. — 2014. — Т. 210. — С. 43–52.

50. Zhou H., Dai H., Ge C. Quality and quantity of pre-drainage methane and responding strategies in Chinese outburst coal mines // Arabian Journal of Geosciences. 2016. Vol. 9. Pp. 1–14.

51. Han Y., Wang J., Dong Y., Hou Q., Pan J. The role of structure defects in the deformation of anthracite and their influence on the macromolecular structure // *Fuel*. 2017. Vol. 206. Pp. 1 – 9. **IVAB**

## REFERENCES

1. *Geomekhanicheskie polya i protsessy: eksperimental'no-analiticheskie issledovaniya formirovaniya i razvitiya ochagovykh zon katastroficheskikh sobytiy v gornotekhnicheskikh i prirodnykh sistemakh*. Pod red. N. N. Mel'nikova [Geomechanical fields and processes: experimental and analytical research into initiation and growth of source zones of disastrous events in geotechnical and natural systems. Mel'nikov N. N. (Ed.)], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2018. Vol. 1, 549 p.; 2019. Vol. 2, 546 p.

2. Oparin V. N., Yushkin V. F., Porokhovskiy N. N., Grishin A. N., Kulinich N. A., Rublev D. E., Yushkin A. V. Effect of large-scale blasting on spectrum of seismic waves in a stone quarry. *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50, No 5. Pp. 865 – 877.

3. Wang Kaixing, Pan Yishan, Dou Linming. Energy transfer in block-rock mass during propagation of pendulum-type waves. *Chinese J. Geotech. Eng.* 2016. Vol. 38, No 12. Pp. 2309 – 2314.

4. De La Torre Ch. A., Bradley B. A., Lee R. L. Modeling nonlinear site effects in physics-based ground motion simulations of the 2010 – 2011 Canterbury earthquake sequence. *Earthquake Spectra*. 2020. Vol. 36. Pp. 856 – 879. DOI: 10.1177/8755293019891729.

5. Bradley B. A., Razafindrakoto H. N. T., Polak V. Ground-motion observations from the 14 November 2016 Mw 7.8 Kaikora, New Zealand earthquake and insights from broadband simulations. *Seismological Research Letters*. 2017. Vol. 88. No 3. Pp. 740 – 756. DOI: 10.1785/0220160225.

6. Deschenes M., Wood C., Wotherspoon L., Bradley B. Development of deep shear wave velocity profiles in the Canterbury Plains, New Zealand. *Earthquake Spectra*. 2018. Vol. 34. No 3. Pp. 1065 – 1089.

7. Rice John *Mekhanika ochaga zemletryaseniy* [Earthquake focus mechanics], Moscow, Mir, 1982, 217 p.

8. Rautian T. G., KHALTURIN V. I. *Ochagovye spektry zemletryaseniy. Zemletryaseniya i protsessy ikh podgotovki* [Focal spectra of earthquakes. Earthquakes and their incipience], Moscow, Nauka, 1991, pp. 82 – 93.

9. Sobolev G. A., Ponomarev A. V. *Fizika zemletryaseniy i predvestniki* [Earthquakes: Physics and precursors], Moscow, Nauka, 2003, 270 p.

10. *Vzryvy i zemletryaseniya na territorii Evropeyskoy chasti Rossii*. Pod red. V. V. Adushkina, A. A. Malovichko [Blasting and earthquakes in the territory of European Russia. Adushkin V. V., Malovichko A. A. (Eds.)], Moscow, GEOS, 2013, 384 p.

11. Kocharyan G. G. *Geomekhanika razlomov*. Pod red. V. V. Adushkina [Faulting geomechanics. Adushkin V. V. (Ed.)], Moscow, GEOS, 2016, 424 p.

12. Sadovskiy M. A., Bolkhovitinov L. G., Pisarenko V. F. *Deformirovanie sredy i seismicheskii protsess* [Deformation of a medium and seismic process], Moscow, Nauka, 1987, 100 p.

13. Adushkin V. V., Oparin V. N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed media. *Journal of Mining Science*. Pp. I: 2012, Vol. 48, No 2, Pp. 203 – 222; Pp. II: 2013, Vol. 49, No 2, Pp. 175 – 209; Pp. III: 2014, Vol. 50, No 4, Pp. 623 – 645; Pp. IV: 2016, Vol. 52, No 1, Pp. 1 – 35.

14. *Tekhnogennaya seismichnost' pri gornykh rabotakh: modeli ochagov, prognoz, profilaktika*. Pod red. N. N. Mel'nikova [Induced seismicity in mining: models of source areas, prediction, precaution. Mel'nikov N. N. (Ed.)]. Parts 1, 2. Apatity, Izd-vo KNTS RAN, 2004, 422 p.

15. *Destruktsiya zemnoy kory i protsessy samoorganizatsii v oblastiakh sil'nogo tekhnogenogo vozdeystviya*. Pod red. N. N. Mel'nikova [Destruction of the Earth's crust and self-organization processes in the areas of heavy manmade impact. Mel'nikov N. N. (Ed.)], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2019, 632 p.



16. *Sovremennaya geodinamika massiva gornyykh porod verkhney chasti litosfery: istoki, parametry, vozdeystvie na ob'ekty nedropol'zovaniya*. Pod red. M.D. Novopashina [Modern geodynamics in the top lithosphere: sources, parameters, impact. Novopashin M. D. (Ed.)], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2008, 449 p.
17. Bychkov I. V., Vladimirov D. Ya., Oparin V. N., Potapov V. P., Shokin Yu. I. Mining information science and Big Data concept for integrated safety monitoring in subsoil management. *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52, No 6. Pp. 1195 – 1209.
18. Bychkov I. V., Oparin V. N., Potapov V. P. Cloud technologies in mining geoinformation science. *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50, No 1. Pp. 142 – 154.
19. Potapov V. P., Popov S. E., Kostylev M. A. Radar data processing technique based on the mass-parallel task execution system Apache Spark. *Vychislitel'nye tekhnologii*. 2017. vol. 22, no 1, pp. 60 – 74
20. Moskvichev V. V., Bychkov I. V., Potapov V. P., Taseyko O. V., Shokin Yu. I. Informational system of the territorial risk and safety control. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. 2017, vol. 7, no 8, pp. 696 – 705. [In Russ].
21. Bagaev S. N., Orlov V. A., Panov S. V., Parushkin M. D. Pendulum waves and their singling out in the laser deformograph records of the large earthquakes. *Journal of Mining Science*. 2010. Vol. 46. No 3. P. 217 – 224.
22. Oparin V. N., Adushkin V. V., Kiryaeva T. A., Potapov V. P., Cherepov A. A., Tyukhrin V. G., Glumov A. V. Effect of pendulum waves from earthquakes on gas-dynamic behavior of coal seams in Kuzbass. *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 54. No 1, pp. 3 – 14.
23. Oparin V. N. Adushkin V. V., Kiryaeva T. A., Potapov V. P. Regional clustering of coal fields in Kuzbass with respect to gas-dynamics activity. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* Part I. 2018, no 9, pp. 5 – 24. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-5-24. Part II. 2018, no 10, pp. 5 – 29. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-5-29.
24. <http://topuch.ru/v-p-ananeev-a-d-potapov/index10.html#pages>.
25. Oparin V. N. Theoretical fundamentals to describe interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, No 2. Pp. 201 – 215.
26. Kiryaeva T. A. *Razrabotka metodov energeticheskogo analiza i prognozirovaniya gazodinamicheskoy aktivnosti uglemetanovykh plastov Kuzbassa* [Methods for energy analysis and gas dynamics prediction in coal-methane beds in Kuzbass], LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019, 332 p.
27. Zhou A. T., Wang K., Kiryaeva T. A., Oparin V. N. Regularities of two-phase gas flow under coal and gas outbursts in mines. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, No 3. Pp. 533 – 543.
28. Wang K. X., Aleksandrova N. I., Pan Y. S., Oparin V. N., Dou L. M., Chanyshv A. I. Effect of block medium parameters on energy dissipation. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019. Vol. 60. No 5. Pp. 926 – 934.
29. Oparin V. N., Adushkin V. V., Yushkin V. F., Potapov V. P. Influence of natural climate and mining-induced impact on mechanical erosion and seismic noise in the areas of open pit coal mines in Kuzbass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(9):72-101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-72-101.
30. Lazarevich T. I., Mazikin V. P., Malyy I. A., Polyakov A. N., Kharkevich A. S., Shabarov A. N. *Geodinamicheskoe rayonirovanie Yuzhnogo Kuzbassa* [Geodynamic zoning in South Kuzbass], Kemerovo, 2006, 181 p.
31. Oparin V. N., Yushkin V. F., Klimko V. K., Rublev D. E., Izotov A. S., Ivanov A. V. Analytical description of surface of blasting-formed underground cavities by laser scanning data. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53. No 4. Pp. 789 – 800.
32. Oparin V. N., Sereдович V. A., Yushkin V. F., Ivanov A. V., Prokop'eva S. A. Application of laser scanning for developing a 3D digital model of an open-pit side surface. *Journal of Mining Science*. 2007. Vol. 43. No 5. Pp. 545 – 554.

33. <http://www.gisa.ru/45968.html/>
34. <http://www.ideo.es/>
35. <http://www.geoportail.fr>
36. <http://www.geoconnections.org>
37. <http://geodata.gov>
38. <http://geoportal.ntsomz.ru/>
39. <http://www.geogr.msu.ru:8082/api/index.html>
40. Sadovskiy M.A. Natural lumpiness of rocks. *Doklady Akademii nauk*. 1979, vol. 247, no 4, pp. 829 – 831. [In Russ].
41. Sadovskiy M.A., Bolkhovitinov L. G., Pisarenko V.F. Discreteness property of rocks. *Sadovskiy M.A. Izbrannye trudy* [Sadovskiy M.A. Selected works], Moscow, Nauka, 2004, pp. 337 – 352.
42. Oparin V.N., Tanayno A.S. *Kanonicheskaya shkala ierarkhicheskikh predstavleniy v gornom porodovedenii* [Canonical scale of hierarchical representation in the rock science], Novosibirsk, Nauka, 2011, 264 p.
43. Oparin V.N., Potapov V.P., Giniyatullina O.L., Bykov A.A., Schastlivtsev E.L. Integrated monitoring of induced air pollution in mining regions. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, No 5. Pp. 945 – 953.
44. Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Usoltseva O.M., Mulev S.N., Yushkin V.F., Kiryaeva T.A., Potapov V.P. An experimental and theoretical framework of nonlinear geotomography. Part I: Research problem statement and justification. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(1):5-25. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25.
45. Logov A.B., Oparin V.N., Potapov V.P., Schastlivtsev E.L., Yukina N.I. Entropy analysis of process wastewater composition in mineral mining region. *Journal of Mining Science*. 2015. Vol. 51, No 1. Pp. 186 – 196.
46. Alekseev A.D., Ayruni A.T., Vasyuchkov V.F., Zverev I.V., Sinolitskiy V.V., Dolgova M.O., Ettinger I.D. *Svoystvo organicheskogo veshchestva uglja obrazovyyvat' s gazami metastabil'nye odnofaznye sistemy po tipu tverdykh rastvorov: nauchnoe otkrytie, RAEN, diplom № 9* [Properties of coal organics to form meta-stable single-phase systems by type of solid solutions], 1994.
47. Malinnikova O.N., Ul'yanova E.V., Dolgova M.O., Zverev I.V. Microstructural changes in coal in consequence of coal and gas outbursts. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no 11, pp. 27 – 32. [In Russ].
48. Shpak A.P., Alekseev A.D., Ulyanova E.V., Trachevskiy V.V., Chistokletov V.N. Nature of methane generation in coal layers. *Doklady NAN Ukrainy*. 2012. No 6. pp. 105 – 110.
49. Zakharov V.N., Malinnikova O.N. Investigation of structural peculiarities of coals of outburst-prone seams. *Zapiski Gornogo instituta*. 2014. Vol. 210. pp. 43 – 52. [In Russ].
50. Zhou H., Dai H., Ge C. Quality and quantity of pre-drainage methane and responding strategies in Chinese outburst coal mines. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016. Vol. 9. Pp. 1 – 14.
51. Han Y., Wang J., Dong Y., Hou Q., Pan J. The role of structure defects in the deformation of anthracite and their influence on the macromolecular structure. *Fuel*. 2017. Vol. 206. Pp. 1 – 9.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Опарин Виктор Николаевич<sup>1</sup> – член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий отделом, e-mail: oparin@misd.ru,  
 Потопов Вадим Петрович<sup>1</sup> – д-р техн. наук, профессор, директор, Институт вычислительных технологий СО РАН (Кемеровский филиал), e-mail: ict@ict.nsc.ru,  
 Киряева Татьяна Анатольевна<sup>1</sup> – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: coalmetan@mail.ru,

Юшкин Владимир Федорович<sup>1</sup> — д-р техн. наук,  
ведущий научный сотрудник, e-mail: L14@ngs.ru,  
<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН.  
Для контактов: Опарин В.Н., e-mail: oparin@misd.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Oparin<sup>1</sup>, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences,  
Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Professor, Head of Department, e-mail: oparin@misd.ru,  
V.P. Potapov<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Director, Kemerovo Branch of the Federal Research Center for Information  
and Computational Technologies, 650025, Kemerovo, Russia, e-mail: ict@ict.nsc.ru,  
T.A. Kiryaeva<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: coalmetan@mail.ru,  
V.F. Yushkin<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, e-mail: L14@ngs.ru,  
<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630091, Novosibirsk, Russia.  
**Corresponding author:** V.N. Oparin, e-mail: oparin@misd.ru.

Получена редакцией 09.04.2020; получена после рецензии 22.06.2020; принята к печати 20.07.2020.  
Received by the editors 09.04.2020; received after the review 22.06.2020; accepted for printing 20.07.2020.



---

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

---

## КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННОЕ И ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

(№ 1224/08–20 от 26.05.2020; 10 с.)

Карпенко Сергей Михайлович<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: ksm\_62@mail.ru,  
Мухина Елена Михайловна<sup>1</sup> — магистрант,  
<sup>1</sup> ГИ НИТУ «МИСиС».

На примере результатов энергетических обследований одного из автотранспортных предприятий г. Москвы с помощью ППП STATISTICA подтверждена корреляционная связь и построены регрессионные модели зависимостей абсолютного и удельного потребления электроэнергии от объемов производства. Разработана прогнозная мультипликативная модель электропотребления с учетом факторов сезонности, обусловленных неравномерной работой в течение года систем освещения, кондиционирования, а также оборудования для мойки машин. Определены характеристики прогнозной модели.

Ключевые слова: автотранспортные предприятия, электропотребление, корреляционно-регрессионное моделирование, коэффициент корреляции, прогнозное моделирование, мультипликативная модель, фактор сезонности, средняя относительная ошибка аппроксимации.

## CORRELATION-REGRESSION AND PREDICTIVE MODELING OF POWER CONSUMPTION IN ROAD TRANSPORT COMPANIES

S.M. Karpenko<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: ksm\_62@mail.ru,  
E.M. Mukhina<sup>1</sup>, Master's Degree Student,

<sup>1</sup> Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

On the example of the results of energy surveys of one of the motor transport enterprises in Moscow, the correlation relationship was confirmed with the help of statistics and regression models of the dependence of absolute and specific electricity consumption on production volumes were constructed. A predictive multiplicative model of power consumption has been developed, taking into account seasonal factors caused by uneven operation of lighting, air conditioning, and car washing equipment throughout the year. The characteristics of the forecast model are defined.

Key words: road transport companies, power consumption, correlation and regression modeling, correlation coefficient, predictive modeling, multiplicative model, seasonality, average relative error of the approximation.