



**В.Н. ОПАРИН, Т.А. КИРЯЕВА,
В.П. ПОТАПОВ, В.Ф. ЮШКИН**

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГЕОМЕХАНИКЕ



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА ИМ. Н. А. ЧИНАКАЛА
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННЫХ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. Н. Опарин, Т. А. Киряева, В. П. Потапов, В. Ф. Юшкин

**НОВЫЕ МЕТОДЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ГЕОМЕХАНИКЕ**

Ответственный редактор
академик РАН В. В. Адушкин

НОВОСИБИРСК
2021

УДК 55:531+004:622
ББК 26.3:22.2+32.97:33
О-60

DOI 10.53954/9785604642856



Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 21-15-00032,
не подлежит продаже

Опарин В. Н.

Новые методы и информационные технологии в экспериментальной геомеханике /

О-60 В. Н. Опарин, Т. А. Киряева, В. П. Потапов, В. Ф. Юшкин; отв. ред. В. В. Адушкин, Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела, ФИЦ ИВТ. — Новосибирск: СО РАН, 2021. — 292 с.

ISBN 978-5-6046428-5-6

В монографии отражены результаты экспериментальных и аналитических исследований количественного описания взаимосвязей нелинейных геомеханических и физико-химических процессов в многофазных напряженных угленосных массивах горных пород и геоматериалах при нарушении их равновесного термодинамического состояния в натуральных условиях ведения подземных и открытых горных работ.

Особое внимание уделено современным научным достижениям и открытиям в нелинейной геомеханике и геофизике, связанным с исследованиями процессов формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горно-технических и природных геосистемах. Для теоретического описания взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в многофазных угольных пластах при их разработке в настоящей работе впервые дано доказательство существования аналитического «операторного продолжения», связывающего между собой уравнение Ленгмюра и кинематическое уравнение Опарина для волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения. В значительной мере оно основано на микро-наноструктурном анализе особенностей в строении угольного вещества в зависимости от стадий его метаморфизма методами рентгенофазового анализа и масс-спектрометрии в режиме *in situ*.

Авторами предлагается новый методологический подход к созданию современных комплексных систем геомеханического мониторинга, основанный на мультимодальности экспериментальных данных и технологиях цифровых фабрик, что позволяет достаточно просто и быстро вести их разработку, с ориентацией на различные профильные прикладные горно-технологические аспекты с учетом перехода на обработку и анализ больших данных. Разработана методика и осуществлен сбор натурной информации по развитию механо-эрозионно-деформационных процессов и связанных с ними сейсмических проявлений в четвертичных отложениях бортов карьеров Кузбасса под влиянием сезонных природно-климатических факторов.

Монография адресована механикам, геомеханикам, геофизикам, разработчикам современных комплексных систем геомеханического мониторинга в природной среде и будет полезна студентам старших курсов горных и геофизических специальностей университетов, а также преподавателям и аспирантам.

УДК 55:531+004:622
ББК 26.3:22.2+32.97:33

Утверждено к печати Ученым советом Института горного дела СО РАН

Рецензенты:

доктор технических наук М. В. Рыльникова
доктор технических наук О. В. Тайлаков

ISBN 978-5-6046428-5-6

© Опарин В. Н., Киряева Т. А.,
Потапов В. П., Юшкин В. Ф., 2021
© Оформление.
Сибирское отделение РАН, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
РАЗДЕЛ 1. К проблеме разработки новых методов и геоинформационных средств комплексной оценки деструктивного влияния нелинейных деформационно-волновых процессов, индуцированных сейсмическими воздействиями, на геомеханическое состояние бортов карьеров и газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса, геоэкологическое состояние объектов крупномасштабного недропользования	10
ГЛАВА 1.1. Об экспериментально-теоретических основах взаимодействия нелинейных геомеханических и физико-химических процессов в многофазных напряженных углепородных массивах при нарушении их равновесного термодинамического состояния	11
ГЛАВА 1.2. О влиянии землетрясений и мощных технологических взрывов на газодинамическую активность шахт и сейсмодиссипационные процессы в зонах влияния угольных разрезов (карьеров)	13
ГЛАВА 1.3. О механо-эрозионных процессах и количественном описании структурной иерархии массивов горных пород по данным дистанционных лазерных измерений	17
ГЛАВА 1.4. О современных достижениях в развитии облачных геоинформационных систем (Big Data) и их возможностях в решении задач геомеханико-геодинамической и геоэкологической безопасности	19
ГЛАВА 1.5. О современных достижениях и актуальных задачах физического моделирования особенностей развития массогазообменных процессов в углеродных геоматериалах в изменяющихся термодинамических условиях напряженных массивов горных пород	26
Выводы по разделу 1	30
Список литературы к разделу 1	—
РАЗДЕЛ 2. Энергетические основы «пассивной» геотомографии на волнах маятникового типа и эмиссионные геомеханико-геофизические процессы	33
ГЛАВА 2.1. Динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа в напряженных геосредах и эмиссионные процессы	—
2.1.1. <i>О формализованных связях динамико-кинематических характеристик волн маятникового типа с напряженно-деформированным состоянием геосред</i>	35
2.1.2. <i>О канонической связи энергетических классов сейсмособытий с размерами релаксирующих геоблоков</i>	41
2.1.3. <i>О количественной оценке энергетического вклада тектонических и геомеханических полей в развитие сейсмодиссипационных процессов</i>	43
Выводы по главе 2.1	47
Список литературы к главе 2.1	—
ГЛАВА 2.2. Волны маятникового типа и «геомеханическая температура»	49
2.2.1. <i>Нелинейные геомеханические эффекты и их обусловленность блочно-иерархическим строением напряженных массивов горных пород</i>	—
2.2.2. <i>Классические виды температур и «геомеханическая температура»</i>	55
Выводы по главе 2.2	56
Список литературы к главе 2.2	—
ГЛАВА 2.3. Энергетический подход к анализу сопряженных деформационно-волновых и сейсмоэлектромагнитно-эмиссионных процессов при формировании очаговых зон катастрофических событий	58
2.3.1. <i>Существующие предпосылки для развития основ «пассивной» геотомографии на маятниковых волнах</i>	—

2.3.2.	О современных теоретических представлениях и феноменологических данных по основным этапам и стадийности процессов возникновения и эволюции очаговых зон катастрофических событий в пространственно-временной структуре эмиссионных геомеханико-геофизических, геохимических и иных полей в напряженных массивах горных пород и их геоматериалах	64
2.3.3.	О корреляции феноменологических «предвестников» катастрофических событий с временными этапами T_i ($i \in 0, +, \pm, -, *$) возникновения и эволюции очагов землетрясений, горных ударов, а также в окрестных зонах нелинейного их влияния	73
	Выводы по главе 2.3	78
	Список литературы к главе 2.3	79
ГЛАВА 2.4.	Термодинамические периоды T_i ($i \in 0, +, \pm, -, *$), деформационно-волновые циклы и «предвестники» катастрофических событий	83
2.4.1.	О существующих представлениях по физике и механике возникновения и формирования очаговых зон катастрофических проявлений горного давления	84
2.4.2.	Формализованные связи между очагами землетрясений и их «предвестниками» в сравнении с термодинамическими периодами T_i развития нелинейных деформационно-волновых процессов	88
	Выводы по главе 2.4	95
	Список литературы к главе 2.4	—
ГЛАВА 2.5.	Энергетическая функция сканирования нелинейных деформационно-волновых и сопряженных эмиссионных процессов в задачах диагностики, контроля и прогнозирования катастрофических событий на объектах горного недропользования и ее обобщение	97
2.5.1.	Сканирующая функция $R_E(t, \tau)$ в анализе нелинейных геомеханических процессов и индуцированных ими полей сейсмознерговыделения на рудниках медно-никелевых месторождений Норильска	98
2.5.2.	Сканирующая функция $R_E(t, \tau)$ в анализе индуцированной сейсмичности при отработке продуктивных пластов угольных месторождений Кузбасса	126
2.5.3.	К методу оценки скорости движения поверхности очаговой зоны катастрофических событий U_E	138
2.5.4.	Обобщенная векторная функция $\vec{R}_E[D t, \tau]$ и ее производные для сканирования энергоэмиссионных полей в пределах шахт и рудников, а также очаговых зон динамических до катастрофических проявлений горного давления	139
	Выводы по главе 2.5	141
	Список литературы к главе 2.5	142
РАЗДЕЛ 3.	Волны маятникового типа и «поршневой механизм» индуцирования ими нелинейных массогазообменных процессов в продуктивных пластах и их геоматериалах угольных месторождений Кузбасса	144
ГЛАВА 3.1.	Теоретические основы описания взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами при освоении угольных месторождений	—
3.1.1.	О «поршневом механизме» возникновения массогазообменных процессов в напряженных геосредах	146
3.1.2.	Уравнение Ленгмюра	148
3.1.3.	Кинематическое уравнение В. Н. Опарина для волн маятникового типа	150
3.1.4.	О взаимосвязи между уравнением Ленгмюра и кинематическим уравнением В. Н. Опарина для волн маятникового типа	152
	Выводы по главе 3.1	154
	Список литературы к главе 3.1	—
ГЛАВА 3.2.	Микронаноструктурный анализ особенностей строения угольного вещества в зависимости от стадий его метаморфизма	156
3.2.1.	Методы исследования структурных характеристик образцов углей	157
3.2.2.	Проведение эксперимента	160
3.2.3.	Влияние температуры на структуру угля	161
3.2.4.	Исследование пористой структуры углей	167
	Выводы по главе 3.2	170
	Список литературы к главе 3.2	171

ГЛАВА 3.3. Калибровочные коэффициенты связи между уравнением адсорбции Ленгмюра и кинематическим уравнением В. Н. Опарина для волн маятникового типа по данным натурных измерений на угольных месторождениях Кузбасса	172
3.3.1. <i>Определение калибровочных коэффициентов связи между уравнением адсорбции и кинематическим уравнением для маятниковых волн на основе натурных данных для продуктивных угольных пластов</i>	173
3.3.2. <i>Определение количественных значений структурного физико-химического инварианта μ_{Δ}^* для углей различных стадий метаморфизма, а также сопряженного с ним структурного параметра геосреды $v^*[\sigma]$</i>	–
3.3.3. <i>Определение скоростей распространения P-, S- и маятниковых μ-волн в углях различных стадий метаморфизма</i>	174
3.3.4. <i>Скорости распространения продольных и поперечных волн в угольных шахтах Кузбасса</i> ...	175
3.3.5. <i>Определение ϑ_e — средней скорости (по модулю) трансляционного движения «соударяющихся» геоблоков диаметром Δ</i>	177
3.3.6. <i>Определение коэффициентов сорбции a, b и калибровочных коэффициентов α и β</i>	–
Выводы по главе 3.3	178
Список литературы к главе 3.3	–
ГЛАВА 3.4. Метод физического моделирования «поршневого механизма» протекания массогазообменных процессов в углепородных геоматериалах	179
3.4.1. <i>Создание специализированного стенда по анализу массогазообменных процессов в углепородных геоматериалах</i>	180
3.4.2. <i>Выполнение измерений</i>	181
Выводы по главе 3.4	183
Список литературы к главе 3.4	–
ГЛАВА 3.5. Эффект бифуркации физико-химических параметров угольных пластов и его влияние на их выбросоопасность	184
3.5.1. <i>Эффект бифуркации параметров метаноемкости углей</i>	185
3.5.2. <i>Влияние пористости на выбросоопасность угольных пластов</i>	186
3.5.3. <i>Влияние влажности на выбросоопасность угольных пластов</i>	187
Выводы по главе 3.5	189
Список литературы к главе 3.5	–
ГЛАВА 3.6. Влияние нелинейных деформационно-волновых процессов, индуцированных сейсмическими воздействиями, на газодинамическую активность угольных шахт	190
Выводы по главе 3.6	194
Список литературы к главе 3.6	–
РАЗДЕЛ 4. Развитие современных информационных технологий в решении задач нелинейной геомеханики	196
ГЛАВА 4.1. Метод количественной оценки природной и техногенной геодинамической активности на основе расчетов полей линеаментов с использованием спутниковых данных дистанционного зондирования Земли	–
4.1.1. <i>Программный комплекс для расчета полей линеаментов на основе спутниковых данных дистанционного зондирования Земли</i>	–
4.1.2. <i>О количественной оценке трещиноватости/нарушенности массивов горных пород с применением спутниковых методов дистанционного зондирования Земли</i>	197
4.1.3. <i>Метод построения розы-диаграммы</i>	199
4.1.4. <i>Технология создания программного продукта</i>	200
4.1.5. <i>Тестирование программного продукта</i>	203
4.1.6. <i>Анализ роз-диаграмм</i>	211
Выводы по главе 4.1	214
Список литературы к главе 4.1	215
ГЛАВА 4.2. Модели метаданных, базы геоданных, облачные вычисления и базовые слои электронных карт для типового геопортала горнопромышленных регионов Сибири	216

4.2.1.	<i>Цифровые фабрики данных как базовые геоинформационные элементы современных комплексных систем геомеханического мониторинга (новые подходы)</i>	217
4.2.2.	<i>Данные тестирования информационной системы с типовым геопорталом для горнопромышленных регионов Сибири (работа цифровых двойников)</i>	222
4.2.2.1.	<i>Работа специализированного программного комплекса «сейсмика» для районов Кузбасса (иллюстрации)</i>	—
4.2.2.2.	<i>О работе программного комплекса автоматизированного сбора и обработки радарных и сейсмических данных для решения задач мониторингового контроля геомеханико-геодинамической и геологической безопасности объектов крупномасштабного недропользования Сибири</i>	226
	Выводы по главе 4.2	231
	Список литературы к главе 4.2	232
РАЗДЕЛ 5.	Методы комплексного геомеханико-геофизического мониторинга деформационно-волновых и механо-эрозионных процессов в бортах карьеров и окрестностях выработок на объектах недропользования Сибири	233
ГЛАВА 5.1.	Метод аналитического описания форм поверхности подземной камеры при взрывах зарядов по данным лазерного сканирования	—
5.1.1.	<i>Напряженное состояние и технология отработки подземной камеры Таштагольского рудника в этаже $-210 \div -140$ м</i>	234
5.1.2.	<i>Определение форм реальной поверхности технологической камеры методом лазерного сканирования</i>	237
5.1.3.	<i>Аналитическое описание форм поверхности подземной камеры по результатам лазерного сканирования после взрывных работ</i>	241
	Выводы по главе 5.1	245
	Список литературы к главе 5.1	246
ГЛАВА 5.2.	О влиянии природно-климатических факторов на развитие механо-эрозионных и сейсмо-эмиссионных процессов в окрестностях угольных разрезов Кузбасса	247
5.2.1.	<i>О природно-техногенной сейсмичности в Кузбассе</i>	—
5.2.2.	<i>Особенности в развитии сейсмической активности, характерные для территорий угольных разрезов в центральной части Кузбасса</i>	251
5.2.3.	<i>Геологическое строение, тектоническая, гидрологическая и природно-климатическая характеристика района угольного месторождения</i>	253
5.2.4.	<i>Физико-механические свойства горных пород</i>	255
5.2.5.	<i>Параметры ведения открытых горных работ в угольном разрезе</i>	256
5.2.6.	<i>Характер и механизмы развития трещин в грунтах и породах</i>	257
5.2.7.	<i>Инженерно-геологические и природно-климатические факторы, комплексно влияющие на геомеханическое состояние бортов угольного разреза</i>	258
5.2.8.	<i>О механизмах эрозионного разрушения грунтов и пород в бортах угольных разрезов</i>	260
5.2.9.	<i>К механизму активизации глубинных разломов вблизи угольных разрезов</i>	261
	Обсуждение результатов и выводы по главе 5.2	262
	Список литературы к главе 5.2	264
ГЛАВА 5.3.	Методы комплексного деформационно-волнового контроля геомеханического состояния бортов и окрестных зон нелинейного влияния карьеров и угольных разрезов юга Западной Сибири	266
5.3.1.	<i>О факторах формирования эрозионных процессов в бортах угольных разрезов и методах их контроля</i>	—
5.3.2.	<i>О влиянии геолого-гидрологических условий и структурных особенностей грунтов и пород на развитие эрозии бортов карьеров</i>	268
5.3.3.	<i>Методы контроля механо-эрозионных процессов в грунтах бортов карьеров и угольных разрезов</i>	271
5.3.4.	<i>О реализации деформационно-волнового мониторинга в отложениях бортов карьеров и угольных разрезов</i>	273
	Выводы по главе 5.3	275
	Список литературы к главе 5.3	276

ГЛАВА 5.4. О перспективных направлениях использования экспериментальных данных сейсмодиформационного мониторинга в буровзрывных работах на карьерах	277
5.4.1 Состояние проблемы и предлагаемые пути ее решения	—
5.4.2. Количественное определение блочного строения бортов и уступов карьера	279
5.4.3. Определение пересечения скважинами зоны разлома в глубине массива	280
5.4.4 О механизме разрушения блочных геосред при подрыве скважинных зарядов	282
5.4.5. К определению параметров взрывной волны в породном массиве	283
5.4.6. К определению геомеханических свойств горных пород по данным сейсмических измерений	285
5.4.7. О выборе и оценке интервалов замедления при взрывании горных пород	286
Выводы по главе 5.4	288
Список литературы к главе 5.4	—
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	290
SUMMARY	291