

УДК 622.015, 622.1

**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ СЛОЖНОСТИ УСЛОВИЙ ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТОК
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА КАРЬЕРА**

М. Р. Пономаренко, Ю. И. Кутепов

*Санкт-Петербургский горный университет, E-mail: pnmry@yandex.ru,
Васильевский остров, 21 линия, 2, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия*

Обоснована возможность применения типизации горнотехнических объектов по степени их сложности для определения структуры и состава деформационного мониторинга. В качестве основы для типизации предложено использовать частные показатели, характеризующие инженерно-геологические, гидрогеологические и горно-геологические условия разработки месторождений полезных ископаемых. На основе существующих нормативных документов, а также с учетом современного масштаба ведения открытых горных работ и текущих параметров современных горнотехнических объектов сформулирована система частных показателей для оценки условий разработки карьеров. Представлено решение задачи многокритериального анализа влияния выделенных частных показателей на результирующий показатель сложности карьеров. Предложена методика деформационного мониторинга карьеров в зависимости от сложности их условий. Апробация выполнена применительно к карьере “Центральный” Хибинского месторождения апатит-нефелиновых руд плато Расвумчорр.

Природно-технические системы, деформационный мониторинг, типизация горнотехнических объектов, открытая разработка месторождений, сложность горнотехнических объектов, многокритериальный анализ

DOI: 10.15372/FTPRPI20210611

Современный этап развития Российской Федерации сопровождается ростом процессов техногенеза на территориях разработок месторождений полезных ископаемых (МПИ). При открытых горных работах данный процесс проявляется в интенсификации образования сложных природно-технических систем (ПТС), представляющих собой сочетания взаимозависимых и взаимообусловленных природных и природно-технологических объектов. Обеспечение безопасности и технико-экономической эффективности их формирования требует организации и выполнения комплексного мониторинга их состояния, включающего инженерно-геологическую, гидрогеологическую, технологическую и деформационную составляющие. Достаточно очевиден тот факт, что общая структура и содержание каждого из перечисленных видов комплексного мониторинга (методы, приборная база и т. д.) для каждой ПТС не могут быть одинаковыми по наполнению и должны зависеть от сложности по горно-геологическим условиям разработки МПИ [1]. Обоснование компонентов мониторинга с увязкой в единую систему должно базироваться на подробном изучении условий формирования и функционирования конкретной ПТС.

Мониторинг безопасности технологических процессов разработки МПИ декларируется рядом нормативных документов [1, 2], однако по факту отсутствуют общепринятые методики его выполнения и обоснованная нормативно-правовая база. Кроме того, учитывая современные масштабы недропользования, постоянный рост объемов вскрышных горных работ, увеличение размеров горных выработок и отвалов, разработанные ранее классификации отдельных показателей горнотехнических объектов уже потеряли свою актуальность. Перечисленные обстоятельства предопределили в рамках данного исследования разработку методики оценки сложности горнотехнических объектов открытой разработки (на примере карьеров) на основе анализа и типизации их условий с учетом текущего уровня недропользования для обоснования выполнения одного из компонентов мониторинга состояния ПТС — деформационного мониторинга.

АНАЛИЗ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА

В действующих правилах [2] описаны факторы, которые необходимо учитывать при оценке устойчивости указанных объектов. Факторы, влияющие на устойчивость бортов угольных разрезов, разделены на четыре основные группы: инженерно-геологические, гидрогеологические, физико-географические и горнотехнические [3].

В требованиях к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых приведены факторы, на основе анализа которых МПИ можно отнести к одному из трех классов:

I — месторождения с простыми условиями разработки (гидрогеологическими, инженерно-геологическими, геокриологическими, горно-геологическими и др.), отработка которых существенно не влияет на окружающую среду;

II — месторождения, отработка которых может существенно повлиять на окружающую среду;

III — месторождения, отработка которых может привести к крупным авариям или тяжелым экологическим последствиям [1].

Однако не указано, как именно требуется выполнять эту классификацию, а также не представлена программа мониторинга для выделенных классов.

Вопросам типизации ПТС посвящен ряд научных исследований. Предложенная в [4] типизация позволяет на основе анализа условий открытой разработки угольных месторождений рассматривать только детальные ПТС (борт, участок, откос отвала), в то время как решение задач обоснования комплексного деформационного мониторинга карьера (разреза) следует осуществлять на уровне локальных ПТС. Данная в [5] типизация условий устойчивости отвалов угольных месторождений Кузбасса, обеспечивая достаточно подробный анализ условий формирования ПТС “отвал + основание”, не позволяет оценить ее сложность для обоснования состава и методики мониторинга. Таким образом, существующие сегодня подходы, к сожалению, не учитывают в полной мере все ключевые характеристики объектов открытой разработки и не могут быть применены для обоснования комплексного деформационного мониторинга.

ВЫДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЛОЖНОСТИ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ КАРЬЕРОВ

На основании выполненного анализа и в соответствии с факторами, приведенными в [1 – 3], выделены частные показатели сложности карьеров и разрезов, характеризующие инженерно-геологические, гидрогеологические, физико-географические и горнотехнические условия открытой разработки МПИ (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Показатели сложности карьеров и разрезов

Условия разработки МПИ	Показатели
Инженерно-геологические	Тип месторождений по горным породам; деформационные процессы и поведение массивов
Горнотехнические	Конструктивные особенности (глубина)
Гидрогеологические	Степень обводненности
Физико-географические	Общая сейсмичность; форма и высота рельефа; особенности климатических условий

На следующем этапе для каждого показателя разработана соответствующая шкала (табл. 2), основанная на использовании существующих нормативных документов. Приведенные в них подходы и классификации актуализированы в соответствии с современными особенностями открытой разработки, текущими параметрами горнотехнических объектов. Цель разработки данной типизации — обоснование программы деформационного мониторинга [6].

Один из важнейших показателей предложенной типизации сложности условий карьеров — их глубины. В [7] выделяют весьма мелкие (до 20 м), мелкие (21 – 50), средней глубины (51 – 100), глубокие (101 – 200), весьма глубокие (201 – 1000 м) открытые горные выработки (карьеры). В [8] представлена классификация земель, нарушенных при открытых горных работах, в рамках которой, например, террасированные карьерные выемки по глубине подразделяются на очень глубокие и сверхглубокие (свыше 100 м), глубокие (30 – 100 м), средне-глубокие (15 – 30 м). В [9] дана классификация карьеров по глубине и по типам применяемого на них транспортного оборудования.

Учитывая, что после разработки некоторых рассмотренных типизаций прошло достаточно времени, существенно изменились применяемые технические средства и механизмы, используемые в технологических процессах материалы и вещества, а также появились новые способы и схемы открытой разработки. С учетом современных реалий горного производства предлагается выделять малую (до 40 м), сравнительно малую (40 – 100), среднюю (100 – 200), большую (200 – 400) и очень большую (более 400 м) глубины карьеров [6].

Важнейшим показателем, определяющим условия отработки МПИ, также является тип горных пород. В настоящее время существует ряд общепринятых классификаций горных пород, учитывающих их отдельные признаки, например, крепость (классификация М. М. Протодьяконова), прочность при растяжении, устойчивость в бортах карьеров, способ и трудности разработки [10], прочность структурных связей; трещиноватость и содержание крупных отдельностей [2], дренируемость [3]; тип деформационного поведения [11, 12] и др. После выполнения их анализа рекомендовано для типизации по сложности условий использовать разделение на пять типов горных пород по физико-механическим свойствам [13]: твердые (скальные горные породы); относительно твердые (полускальные горные породы); рыхлые несвязные горные породы; мягкие связные горные породы; горные породы особого состояния (мерзлые), при этом твердые скальные породы разделить на монолитные и трещиноватые, а в группу горных пород особого состояния включить плавунные породы [6].

Для характеристики деформационных процессов предлагается использовать разделение из методических указаний [14] по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости: оползни на уступах и бортах; обру-

шения уступов и бортов, топплинг; вывалы. Согласно [15], необходимо учитывать осадки и провалы на подработанных участках (это актуально и для отвальных и гидротехнических сооружений).

Гидрогеологические условия карьеров предлагается разделять по степени их обводненности [16] на четыре группы: весьма обводненные, обводненные, умеренно обводненные, слабо обводненные и практически не обводненные. Итоговая система частных показателей инженерно-геологических, гидрогеологических и горно-геологических условий для оценки сложности карьеров представлена в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Показатели типизации карьеров

Показатель	Шкала показателя	Экспертная оценка в баллах
Конструктивные особенности (глубина)	Малая (до 40 м)	1
	Сравнительно малая (40 – 100 м)	3
	Средняя (100 – 200 м)	5
	Большая (200 – 400 м)	7
	Очень большая (более 400 м)	10
Тип месторождения по горным породам	Твердые — скальные (монокристаллические)	3
	Относительно твердые — полускальные	6
	Твердые — скальные (трещиноватые)	4
	Рыхлые несвязные	4
	Мягкие связные	6
Степень обводненности	Особого состояния — мерзлые, плавунные	1
	Слабо обводненные и необводненные	3
	Умеренно обводненные	7
	Обводненные	10
Разрушения, деформационные процессы и поведение массивов	Весьма обводненные	1
	Оползни уступов	3
	Оползни на бортах	6
	Фильтрационные деформации	4
	Вывалы	5
	Обрушения уступов, топплинг	8
	Обрушения бортов	10
Осадки и провалы на подработанных территориях	10	

Для оценки физико-географических условий анализируется территория горного предприятия в целом, а именно следующие ее характеристики: сейсмичность территории (максимальная интенсивность сейсмических сотрясений), форма и высота рельефа, особенности климатических условий (наличие климатических факторов, снижающих устойчивость и усиливающих деформации карьеров) (табл. 3).

Оценка общей сейсмичности района ведения открытых горных работ, т. е. определение максимальной интенсивности сейсмических сотрясений, выполняется по картам общего сейсмического районирования территории Российской Федерации [17, 18]. Рассматривая горно-технические объекты как объекты повышенной ответственности, в соответствии с [17, 18] выделяется пять классов сейсмичности: ≤ 6 , 7, 8, 9, > 9 .

Форма и высота рельефа, влияющие на особенности проведения открытых горных работ, анализируются на основе классификации [19]: равнины отрицательные (ниже уровня моря), низменные (0 – 200 м), возвышенные (200 – 500 м) и нагорные (выше 500 м); плоскогорья

(500–1000 м); горы низкие (до 1000 м), средние (1000–2000 м) и высокие (более 2000 м). Для оценки влияния климатических условий предлагается учитывать факторы, усиливающие интенсивность выветривания горных пород и разрушающих деформаций, такие как резкие изменения температуры воздуха (10 °С в сутки и более), ветровая нагрузка, атмосферные осадки высокой интенсивности, продолжительные морозы (–30 °С и ниже) и продолжительная жара (30 °С и выше) [20], глубокое промерзание пород, продолжительное залегание снежного покрова [6].

ТАБЛИЦА 3. Показатели типизации территории ведения открытых горных работ

Показатель	Шкала показателя	Экспертная оценка в баллах
Максимальная интенсивность сейсмических явлений	≤ 6	3
	7	5
	8	7
	9	8
	> 9	10
Форма и высота рельефа	Равнины отрицательные (ниже уровня моря)	1
	Равнины низменные (0–200 м)	2
	Равнины возвышенные (200–500 м)	3
	Равнины нагорные (выше 500 м)	4
	Плоскогорья (500–1000 м)	5
	Горы низкие (до 1000 м)	6
	Горы средние (1000–2000 м)	8
	Горы высокие (более 2000 м)	10
Климатические факторы	Резкие изменения температуры воздуха	1
	Ветровая нагрузка	1
	Атмосферные осадки высокой интенсивности	1
	Продолжительные морозы (≤ –30 °С) и продолжительная жара (≥ 30 °С)	1
	Глубокое промерзание пород	1
	Продолжительное залегание снежного покрова	1

Предложенная система по мере необходимости может быть дополнена частными показателями, что позволит повысить достоверность определения сложности исследуемого объекта. В частности, для анализа карьеров могут быть использованы следующие показатели: угол откоса, направление падения борта и коэффициент запаса, степень трещиноватости (блочности) массива горных пород [21, 22], расчлененность рельефа и др.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ КАРЬЕРОВ

Для оценки сложности условий разработки карьеров использовался методический подход, основанный на методах нечеткого логического вывода и теории планирования эксперимента [23]. Предложенная методика оценки сложности адаптировалась применительно к условиям горнорудного карьера. Сложность горнотехнического объекта рассматривается как векторное свойство и оценивается с применением частных показателей $F = \{f_i, i = 1 \dots m\}$. Так, при оценке сложности карьеров $m = 5$ (глубина, тип месторождения по горным породам, степень обводненности, деформационные процессы, физико-географические условия).

Реализация предложенного подхода включала следующие этапы:

1) экспертная оценка выбранных ранее показателей по 10-балльной шкале (результат опроса представлен в табл. 2, 3);

2) экспертная оценка сложности объекта на основе анализа одновременно нескольких показателей для учета их взаимного влияния:

— построение лингвистической шкалы для каждого частного показателя; пример шкалы представлен в табл. 4 (f_i = глубина карьера принимает значения $T(f_i) = \{\text{низкий, ниже среднего, средний, выше среднего, высокий}\}$; аналогично строятся шкалы для остальных показателей;

— построение матрицы опроса экспертов с минимальными и максимальными значениями каждого из показателей f_i (f_1 — глубина, f_2 — тип месторождения по горным породам, f_3 — степень обводненности, f_4 — деформационные процессы, f_5 — физико-географические условия); цель опроса экспертов на данном шаге — определить, какое значение примет показатель сложности карьера $f_{\text{рез}}$ (низкая, ниже среднего, средняя, выше среднего, высокая) при разных высказываниях, например, когда показатель f_1 имеет значение высокий, а f_2, f_3, f_4, f_5 — низкий;

— опрос экспертов и получение значений результирующего показателя $f_{\text{рез}}$.

ТАБЛИЦА 4. Лингвистическая шкала показателя “глубина карьера”

Шкала	Терм (значение лингвистической переменной)
Малая (до 40 м)	Низкий
Сравнительно малая (40 – 100 м)	Ниже среднего
Средняя (100 – 200 м)	Средний
Большая (200 – 400 м)	Выше среднего
Очень большая (более 400 м)	Высокий

3) получение количественного значения сложности карьера, т. е. расчет $f_{\text{рез}}$:

$$f_{\text{рез}} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} f_i f_j + \dots + \lambda_{12\dots m} f_1 f_2 \dots f_m,$$

λ_i — коэффициенты полинома для учета влияния отдельно взятых показателей и их совокупностей (λ_{ij} , λ_{ijk} и т. д.);

4) расчет $f_{\text{рез}}$ с использованием крайних значений показателей объектов. Установлено, что сложность объекта с минимальными значениями всех рассматриваемых показателей равна 0.2, с максимальными — 1;

5) выделение классов сложности: разделение полученного на предыдущем этапе диапазона значений сложности [0.2; 1] на четыре класса (простые, средние, сложные и особо сложные объекты [6]) (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5. Классы объектов по сложности

Показатель сложности	Класс объектов
$0.2 \leq f_{\text{рез}} < 0.4$	Простой
$0.4 \leq f_{\text{рез}} < 0.6$	Средний
$0.6 \leq f_{\text{рез}} < 0.8$	Сложный
$0.8 \leq f_{\text{рез}} \leq 1.0$	Особо сложный

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА КАРЬЕРОВ

В [2] рекомендовано осуществлять выбор методов и методики мониторинга с учетом природных и горнотехнических факторов, типов деформаций, скоростей развития и масштабов деформаций (пример реализации данного подхода представлен в [24]). Однако наиболее эффективные методы определяются в зависимости от объекта наблюдений, в качестве которых рассматриваются детальные ПТС (борт карьера/разреза, участок борта, уступ и др.). Кроме того, не уточняются какие именно технологии съемки следует применять. В этой связи, в соответствии с полученной классификацией (табл. 5), разработана программа выполнения деформационного мониторинга карьеров отдельно для каждого из четырех классов сложности (табл. 6).

ТАБЛИЦА 6. Состав комплекса деформационного мониторинга карьеров

Метод деформационного мониторинга	Сложность карьера			
	простая	средняя	сложная	особо сложная
Визуальные	+	+	—	—
Наземные инструментальные	—	+	+	+
Мониторинг глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС-мониторинг)	—	+	+	+
Наземное лазерное сканирование	—	—	—	+
Наземная радарная съемка	—	—	—	+
Аэрофотосъемка	—	—	+	+
Космическая радарная съемка	—	—	+	+
Оптическое дистанционное зондирование Земли из космоса	—	—	+	+

Наблюдение особо сложных карьеров выполняется с использованием наиболее полного комплекса автоматических площадных методов (включая наземное лазерное сканирование, аэрофотосъемку, наземную и космическую радарную съемку), для того чтобы минимизировать присутствие человека на опасных участках. При этом возможно использование наземных точечных методов (инструментальных маркшейдерских и ГНСС-наблюдений) на отдельных, требующих уточнения участках при условии обеспечения безопасности выполнения съемки. Особое внимание при этом уделяется дистанционному зондированию Земли из космоса — оптической и радиолокационной съемке. Радиолокационная съемка используется в качестве дополнения к наземной системе высокоточных площадных и точечных наблюдений, а именно как базовый метод регулярного мониторинга для оперативного получения данных по всей территории МПИ (и их дальнейшего использования для расчета устойчивости и моделировании деформационных процессов с использованием различных методик [25–29]) и выявления участков, на которых необходимо дополнительно провести высокоточные (наземные и дистанционные) наблюдения. Оценка качественных параметров деформаций может осуществляться с применением космической съемки в оптическом диапазоне (данных высокого и сверхвысокого пространственного разрешения). Визуализацию результатов обработки материалов космической съемки рекомендуется выполнять на базе веб-технологий [30–32].

Мониторинг сложных карьеров базируется на площадных наблюдениях с использованием аэрокосмической съемки и с дальнейшим уточнением данных по результатам выполнения локальных наземных наблюдений. Мониторинг карьеров средней сложности может выполняться с применением неавтоматизированных инструментальных средств наземных наблюдений, а также визуальными методами. Простые карьеры контролируются с помощью визуальных наблюдений.

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предложенная методика апробирована для условий карьера “Центральный” месторождения апатит-нефелиновых руд плато Расвумчорр (Хибинский массив, Мурманская область). Условия открытой разработки данного месторождения и характеристики карьера (на анализируемый период) приведены в табл. 7. Его глубины открытых горных выработок достигают отметок: на западном фланге месторождения по южному борту — +460 м, в центральной части — +550 м; в восточном торце — +685 м. Месторождение сложено преимущественно крепкими скальными трещиноватыми породами. Обводнение карьера связано с наличием водоносного горизонта кристаллических пород. К числу наиболее распространенных деформаций относятся осыпи, локальные обрушения и вывалы, периодические осыпания мелких камней и незначительные сдвиги отдельных стоящих крупных валунов; также по данным космической радарной интерферометрии зафиксированы локальные оседания на смежных с карьером участках, подработанных действующим подземным рудником [6, 33].

ТАБЛИЦА 7. Анализ и экспертная оценка условий разработки карьера “Центральный”

Показатель	Характеристика	Экспертная оценка в баллах
Глубина карьера	Очень большая (более 400 м)	10
Тип месторождения по горным породам	Твердые — скальные (трещиноватые), особого состояния (мерзлые)	7
Степень обводненности	Слабо обводненные и необводненные	1
Деформационные процессы	Вывалы, осадки на подработанных территориях	15
Физико-географические условия	Сейсмическая интенсивность 7 баллов Горы низкие Отрицательные среднегодовые температуры воздуха, продолжительные морозы, длительное залегание снежного покрова, существенная ветровая нагрузка, глубокое промерзание пород	10

Анализ условий разработки выбранного МПИ подтвердил необходимость учета упомянутых физико-географических факторов. Для исследуемой территории характерны сложные климатические условия Заполярья (отрицательные среднегодовые температуры воздуха, продолжительные морозы, длительное залегание снежного покрова, существенная ветровая нагрузка), сильная расчлененность рельефа Хибинского массива, природная и техногенная сейсмичность (7 баллов в соответствии с [17, 18]) вследствие как тектонического строения, так и многолетнего ведения открытых и подземных горных работ. Перечисленные особенности отрицательно влияют на устойчивость карьера и других сооружений, увеличивая сложность их мониторинга и управления.

В соответствии с предложенной методикой выполнена оценка сложности карьера и получена ее количественная характеристика, равная 0.7, что позволяет отнести карьер “Центральный” к классу сложных объектов [6, 34]. На основании представленного подхода к выбору методов деформационного мониторинга (табл. 6) на исследуемом карьере рекомендуется использовать преимущественно площадные автоматизированные дистанционные методы (табл. 8). Это обусловлено в первую очередь большим количеством опасных участков, а также ограниченным периодом выполнения наблюдений из-за продолжительного залегания снежного покрова. Следовательно, мониторинг требуется проводить в достаточно сжатые сроки, обеспечивая при этом необходимый пространственный охват.

ТАБЛИЦА 8. Рекомендованные методы мониторинга деформаций на карьере “Центральный”

Частные задачи деформационного мониторинга	Методы деформационного мониторинга
Определение величин, скорости, направления деформаций	Базовые: космическая радарная интерферометрия, лазерное сканирование, наземная радарная съемка Дополнительно: наземная инструментальная съемка
Определение качественных показателей	Оптическое дистанционное зондирование Земли из космоса

Учитывая такие климатические особенности района, как существенная ветровая нагрузка, облачность, туман, еще большую актуальность приобретает метод космической радарной интерферометрии, который в сравнении, например, с аэрофотосъемкой не зависит от освещенности земной поверхности и облачного покрова, обеспечивая возможность высокоточного определения деформаций. Эффективность данного метода для районов Крайнего Севера подтверждена в работах [6, 30, 33 – 35], поэтому его рекомендуется использовать для регулярного оперативного мониторинга карьера и выявления на его территории участков, требующих дополнительного контроля с применением комплекса как наземных, так и дистанционных технологий съемки.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования подтвердили актуальность проблемы научно-методического обоснования комплексного мониторинга состояния природно-технических систем и его компонентов (инженерно-геологического, гидрогеологического, технологического и деформационного мониторинга). Анализ состояния вопроса деформационного мониторинга показал, что, несмотря на обозначенную в ряде нормативных документов необходимость учета условий ПТС для организации ее наблюдения, до сих пор отсутствуют конкретные методики выполнения такой оценки и взаимодействия выявленных характеристик ПТС с используемыми методами мониторинга. Именно согласованность объектов и средств их наблюдения позволяет повысить эффективность мониторинга в целом. Предложен подход к оценке сложности локальных ПТС, рассмотренный на примере одного вида горнотехнических объектов — карьеров. Разработанная система частных показателей, характеризующих основные особенности инженерно-геологических, гидрогеологических и горнотехнических условий месторождений полезных ископаемых, а также методика расчета сложности анализируемых объектов в ходе исследований подтвердили свою применимость для оценки сложности карьеров и последующего обоснования выполнения их деформационного мониторинга.

Перспективные направления дальнейших исследований связаны с адаптацией предложенной типизации и методики выполнения деформационного мониторинга применительно к отвальным и гидротехническим сооружениям, объектам подземной разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Требования** к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых. Утверждены МПР России 04.08.2000 г.
2. **Приказ Ростехнадзора № 439.** Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности “Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов” от 13.11.2020 г. Зарегистрировано в Минюсте России 18.12.2020 г. № 61603.
3. **Правила обеспечения** устойчивости откосов на угольных разрезах. Утверждено Госгортехнадзором РФ 16.03.1998 г. — СПб.: ВНИМИ, 1998. — 208 с.
4. **Сергина Е. В.** Комплексный мониторинг состояния природно-технических систем открытой разработки угольных месторождений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2015. — 22 с.
5. **Васильева А. Д.** Инженерно-геологическое обоснование устойчивости высоких отвалов угольных месторождений Кузбасса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2020. — 20 с.
6. **Пономаренко М. Р.** Разработка метода деформационного мониторинга открытых горных работ в условиях Крайнего севера с использованием космического радиолокационного зондирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2018. — 19 с.
7. **Дриженко А. Ю.** Развитие теории карьерных горнотранспортных систем // ГИАБ. — 2014. — № 10. — С. 134–142.
8. **ГОСТ Р 59060-2020.** Национальный стандарт Российской Федерации. Охрана окружающей среды. Земли. Классификация нарушенных земель в целях рекультивации. Утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 30.09.2020 г. № 712-ст.
9. **Тарасов П. И., Фурин В. О., Ворошилов А. Г., Лобанов С. В., Невалин В. М.** Конструктивные схемы гусеничных самосвалов для работы на повышенных уклонах // ГИАБ. — 2007. — № 1. — С. 336–343.
10. **Справочник.** Открытые горные работы / К. Н. Трубецкой, М. Г. Потапов, К. Е. Веницкий, Н. Н. Мельников и др. — М.: Горн. бюро, 1994. — 590 с.
11. **Кутепова Н. А.** Инженерно-геологическое обоснование прогноза гидрогеомеханических процессов при ведении горных работ: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — СПб., 2010. — 39 с.
12. **Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А.** Методология инженерно-геологического изучения гидрогеомеханических процессов в техногенно нарушенных массивах при разработке МПИ // ГИАБ. — 2014. — № 8. — С. 123–131.
13. **Ломтадзе В. Д.** Инженерная геология. Инженерная петрология. — Л.: Недра, 1984. — 511 с.
14. **Инструкция** по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Утверждена Госгортехнадзором РФ 21.07.1970 г. — Л.: ВНИМИ, 1971. — 188 с.
15. **Орлов Г. В.** Сдвигание горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки. — М.: Горн. кн., МГГУ, 2010. — 199 с.
16. **Сыроватко М. В.** Гидрогеология и инженерная геология при освоении угольных месторождений. — М.: Госгортехиздат, 1960. — 499 с.

17. **Комплект карт** ОСР-2016 территории Российской Федерации. Масштаб 1:8000000. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах / В. И. Уломов, М. И. Богданов, 2016.
18. **СП 14.13330.2018.** Свод правил. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Утверждены Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 24.05.2018 г. № 309/пр.
19. **Мильков Ф. Н.** Общее землеведение. — М.: Высш. шк., 1990. — 335 с.
20. **Хандожко Л. А.** Экономическая метеорология. — СПб.: Гидрометеиздат, 2005. — 491 с.
21. **Шабаров А. Н.** Типы и механизмы геодинамической опасности при разработке месторождений полезных ископаемых и эксплуатации заглубленных и наземных инженерных сооружений // Зап. ГИ. — 2010. — Т. 188. — С. 15.
22. **Кутепова Н. А., Кутепов Ю. И., Шабаров А. Н.** Инженерно-геологическое обеспечение безопасности производства горных работ в водонасыщенных массивах // Зап. ГИ. — 2012. — Т. 197. — С. 197–202.
23. **Зеленцов В. А., Павлов А. Н.** Многокритериальный анализ влияния отдельных элементов на работоспособность сложной системы // Информационно-управляющие системы. — 2010. — № 6. — С. 7–12.
24. **Кретов С. И., Исмагилов Р. И., Бадтиев Б. П., Шарковский Д. О., Павлович А. А., Свириденко А. С.** Организация комплексного мониторинга устойчивости внешних отвалов, сложенных породами с низкой несущей способностью, на слабом основании в условиях ПАО “Михайловский ГОК” // Горн. пром-ть. — 2019. — № 3. — С. 15–19.
25. **Cheskidov V., Kassymkanova K.-K., Lipina A., and Bornman M.** Modern methods of monitoring and predicting the state of slope structures, E3S Web of Conferences, 2019, Vol. 105. — Article ID 01001.
26. **Zhabko A., Volkomorova N., and Zhabko N.** Theoretical basis for calculation of the quarries sides for collapse, E3S Web of Conferences, 2020, Vol. 177. — Article ID 01004.
27. **Protosenya A. G. and Kutepov Y. Y.** Stability estimation of hydraulic fills in undermined areas, Min. Informat. Analyt. Bulletin, 2019, No. 3. — P. 97–112.
28. **Yutiaev E., Meshkov A., Popov A., and Shabarov A.** Allocation of the geo-dynamically hazardous zones during intensive mining of flat-lying coal seams in the mines of SUEK-Kuzbass JSC, E3S Web of Conferences, 2019, Vol. 134. — Article ID 01022.
29. **Morozov K., Shabarov A., Kuranov A., Belyakov N., Zuyev B., Vlasenko D., Demekhin D., and Bakhtin E.** Geodynamic monitoring and its maintenance using modeling by numerical and similar materials methods, E3S Web of Conferences, 2019, Vol. 129. — 01012.
30. **Ponomarenko M. R. and Pimanov I. Yu.** Implementation of synthetic aperture radar and geoinformation technologies in the complex monitoring and managing of the mining industry objects, Adv. Intellig. Systems Comput., 2017, Vol. 574. — P. 291–299.
31. **Zelentsov V., Potryasaev S., Pimanov I., and Semenov A.** Intellectual information platform bringing together diverse data and models for the interdisciplinary projects implementation and environmental management, IOP Conf. Series: Earth Environmental Sci., 2020, Vol. 509. — Article ID 012061.
32. **Zelentsov V. A., Alabyan A. M., Krylenkoet I. N., Pimanov I., Ponomarenko M. R., Potryasaev S., Semenov A., Sobolevskii V. A., Sokolov B., Yusupov R. M.** A model-oriented system for operational forecasting of river floods, Herald of the Russian Academy of Sciences, 2019, Vol. 89, No. 4. — P. 405–417.

33. **Пonomarenko M. R., Kutepov Y. I., Volkov M. A., and Grinuk A. P.** Satellite methods within integrated land surface deformation monitoring in a mine field, *Min. Inform. Analyt. Bulletin*, 2020, No. 12. — P. 103–113.
34. **Пonomarenko M. R. and Kutepov Yu. I.** Using the typification of mining-engineering facilities to substantiate deformation monitoring of opencast mining // *Известия УГГУ*. — 2020. — № 4. — С. 115–122.
35. **Кантемиров Ю. И., Баранов Ю. Б., Киселевский Е. В., Билянский В. В., Никифоров С. Э., Грязнов В. Г., Болсуновский М. А., Lanzl R.** Контроль деформаций зданий и сооружений на застроенных территориях в пределах горных отводов месторождений нефти и газа в условиях Крайнего Севера // *Зап. Ги.* — 2010. — № 185. — С. 247–249.

Поступила в редакцию 11/VI 2021

После доработки 20/VII 2021

Принята к публикации 11/XI 2021