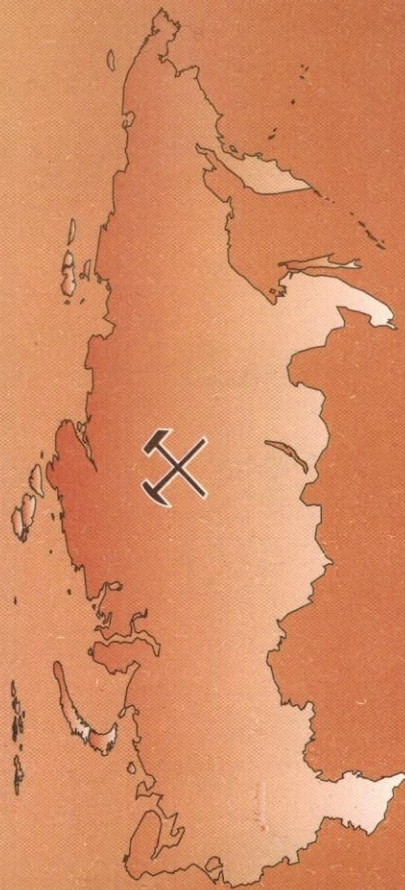


МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ТЕХНИКА,
ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ
РАБОТ**

**МЕТОДЫ КЛАССИФИКАЦИИ
ГОРНЫХ ПОРОД
ДЛЯ ВЫБОРА
ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО
ИНСТРУМЕНТА
ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН**



ОБЗОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Геоинформарк
Москва • 2001

РГАСНТИ 38.59.15
УДК 550.853

Архипов А.Г., Блинов Г.А. Методы классификации горных пород для выбора породоразрушающего инструмента при бурении скважин. – М., 2001. – 56 с.: ил. (Техн., технол. и организация геол.-разв. работ). Обзор / ЗАО "Геоинформмарк". – Библиогр: с. 55-56 (26 назв.).

Дан анализ действующих отечественных и зарубежных классификаций горных пород, используемых при выборе породоразрушающего инструмента для бурения скважин. Описаны теоретические, экспериментальные и производственные исследования, позволившие ВИТРу предложить новую классификацию горных пород, унифицированную с классификациями ведущих зарубежных буровых фирм.

*Алексей Германович Архипов
Геннадий Александрович Блинов*

**Методы классификации горных пород для выбора
породоразрушающего инструмента при бурении скважин**

Редактор Г.Г.Дружков
Технический редактор М.К.Кузьмина
Корректор М.А.Гоголева
Компьютерная графика: Т.Н.Аверчича
Компьютерная верстка: Г.Н.Дроздова

Подписано в печать с оригинал-макета 01.10.01.

Формат 60х84/16. Гарнитура "Times New Roman". Отпечатано на ризотрафе.

Печ. л. 3,5. Уч.-изд.л. 3,94. Тираж 190 экз. Заказ 35.

ЗАО "Геоинформмарк". 109172, Москва, ул. Гончарная, 38. Тел. ред. 915-60-84

**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "ГЕОИНФОРММАРК"

**ТЕХНИКА, ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ**

*Обзорная информация
Выпуск 1*

**МЕТОДЫ КЛАССИФИКАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД
ДЛЯ ВЫБОРА ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН**

Издается с 1964 г.

Москва 2001

Выходит 4 раза в год

РГАСНТИ 38.59.15

УДК 550.853

А.Г.Архипов, Г.А.Блинов
(ВИТР)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время продолжается интеграция экономики России в мировое сообщество, что обуславливает необходимость проведения работ по унификации стандартов и методических подходов к использованию технических средств и технологии бурения.

Особенно остро вопрос унификации стоит в области классификаций горных пород для выбора породоразрушающего инструмента при бурении. Сложившаяся в развитых странах за рубежом система выбора инструмента для бурения базируется на классификациях, типизирующих формации горных пород с близким характером их влияния на износ породоразрушающего инструмента. Ведущие зарубежные фирмы (Diamont Boart, Craelius, Christensen ets.) имеют подобные классифика-

ЗАО "Геоинформмарк", 2001

ции, которые в ряде случаев регламентируются и национальными стандартами. В силу ряда исторических причин в Российской Федерации до последнего времени отсутствовала классификация, типизирующая формации горных пород с точки зрения технологии бурения (в отличие от геологического понятия термина формация). В значительной степени такая ситуация создавалась вследствие стремления в прошлые годы решить в первую очередь проблему классификации горных пород для планирования и нормирования буровых работ за счет создания интегрального показателя буримости.

Цель настоящего обзора показать существующий уровень развития методов классификаций горных пород для выбора породоразрушающего инструмента при бурении геологоразведочных и нефтегазовых скважин в России и зарубежом.

В обзоре приведен анализ известных классификаций горных пород, используемых в России и зарубежом, рассмотрено приборное обеспечение классификаций, включая новый метод акустико-спектральной диагностики механизма разрушения горной породы, приведена новая классификация горных пород по формациям, разработанная ВИТР по заданию Министерством природных ресурсов РФ для унификации выбора породоразрушающего инструмента при геологоразведочном бурении.

АНАЛИЗ КЛАССИФИКАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ВЕДУЩИМИ ЗАРУБЕЖНЫМИ БУРОВЫМИ ФИРМАМИ

Классификации горных пород в геологоразведочном деле

Поиск и обработка зарубежных источников в области классификаций горных пород по буримости показал, что этому направлению придается большое значение. Все ведущие индустриально развитые страны имеют собственные классификации, причем разработка классификаций производится в фирмах-производителях геологоразведочной техники или национальных организациях, стандартизирующих применяемые технические средства бурения.

В США применяется классификация (табл. 1) международной организации по стандартизации в области алмазного бурения (DCDMA) [26]. Классификация DCDMA приводится в сборнике стандартов технических средств бурения (породоразрушающего инструмента, колон-

Классификация DCDMA (США)

Код DCDMA	Характеристика горных пород формации	Типичные представители горных пород
7	Сверхтвердые, ненарушенные, мелкозернистые, неабразивные	Кремнистый сланец, кварц, яшма
6	Очень твердые, ненарушенные, мелкозернистые, неабразивные	Таконит, кварцит, диорит
5	Твердые, мелкозернистые или среднезернистые ненарушенные	Гранит, андезит, базальт, гнейс, сланец
4	Средне абразивные, средне-крупнозернистые, цельные до слегка трещиноватых	Габбро, монзонит
3	Абразивные, средне-крупнозернистые, разрушенные	Кварцит, конгломерат, песчаник, риолит
2	Абразивные, средне-крупнозернистые, трещиноватые, разрушенные	Песчаник, пегматит, кварцит, таконит
1	Экстремально абразивные, средне-крупнозернистые, сильно трещиноватые, раздробленные и поврежденные	Песчаник, кварцит, гранит

ковых и бурильных труб и т.д.). Специально отмечается, что код формации горных пород, установленный DCDMA, является номером ссылки, которую можно использовать для сравнения с кодовой системой каждого производителя технических средств бурения. Изготовитель выбирает номер кода, который наиболее подходит к его продукции. В примечании к классификации DCDMA говорится, что типы горных пород приведены в качестве примеров.

Классификации фирм-производителей бурового инструмента вместе с описанием формаций горных пород обязательно содержат тип и рекомендуемые параметры породоразрушающего инструмента.

Фирма Hoffman diamond products (США), типизируя формации для импрегнированных коронок (табл. 2) устанавливает оптимальный тип матрицы и одновременно, для удобства клиентов, цвет окраски выпускаемого инструмента [19].

Фирма Longuear (США), выпускающая комплексы для бурения снарядами со съемным керноприемником, рекомендует осуществлять выбор алмазного инструмента исходя также из формации горных пород [15]. Для описания формации горных пород фирма Longuear ис-

Таблица 2
Классификация фирмы Hoffman diamond products (США)

Тип матрицы коронки	Цвет окраски коронки	Характеристика горных пород формации	Типичные представители горных пород
Экстремально твердая	Супер зеленый	Экстремально абразивные, разрушенные, поврежденные, крупнозернистые	Порода экстремально абразивна, сильно повреждена или разрушена
Очень твердая	Зеленый	Очень абразивные, трещиноватые, средне-крупнозернистые	Песчаник, граниты, конгломераты
Твердая	Голубой	Абразивные, средне-крупнозернистые, монолитные или трещиноватые	Порфир, габбро
Среднетвердая	Серый или черный	Средне абразивные, мелко-среднезернистые, монолитные или трещиноватые	Гранит, сланец
Средняя	Красный или рыжий	Легко абразивные, средне-мелкозернистые, средней твердости	Доломит, базальт
Мягкая	Бронзовая	Низко абразивные, твердые, очень твердые или мягкие, монолитные	Гранит, диорит, известняк
Очень мягкая	Медная	Неабразивные, мелкозернистые, твердые, очень твердые, монолитные	Кварцит, таконит
Экстра мягкая	Медная + голубая или черная	Экстремально твердые, очень мелкозернистые, монолитные, неабразивные	Кремнистый сланец, риолит, кварц

пользует следующие определения: экстремально твердая монолитная; монолитная очень твердая; твердая разрушенная; мягкая; мягкая нецементированная.

Фирма Diamont Boart (США) [18], специализирующаяся на выпуске породоразрушающего инструмента для бурения, типизирует формации горных пород. Для выбора импрегнированных коронок установле-

Таблица 3
Классификация фирмы Diamont Boart (США)

Маркировка	Типы формаций горных пород
9	Экстремально твердые, плотные, неабразивные
8	Очень твердые – твердые, плотные, легко абразивные
7	Твердые – очень твердые, плотные, средне абразивные
6	Твердые, трещиноватые и абразивные
5	Среднетвердые – твердые, трещиноватые и абразивные
4	Мягкие – среднетвердые, трещиноватые и очень абразивные
3	Армированный бетон

но семь формаций, каждой из которых присвоен свой код (табл. 3). Для шарошечного бескернового и твердосплавного бурения фирма Diamont Boart разделяет формации горных пород по относительной твердости: мягкие; средние; твердые; очень твердые.

После объединения фирм Diamont Boart (США) и Craelius (Швеция) был разработан единый подход к типизации формаций горных пород для выбора технических средств бурения [16]. Таблица для выбора алмазного и твердосплавного породоразрушающего инструмента для коронкового бурения содержит малое сочетание конструктивных параметров коронок. В примечании к таблице указывается, что в очень твердых разрушенных и абразивных формациях рекомендуется использовать более твердый инструмент, чем нормальный.

Для выбора импрегнированных коронок в характеристику формации горных пород фирма Diamont Boart Craelius добавляет термин "полирующее". Получили приставку "полирующее" и выделены в отдельные формации экстратвердые, очень твердые и среднетвердые-твердые горные породы.

До объединения с Diamont Boart фирма Craelius при использовании импрегнированных алмазных коронок выделяла четыре формации горных пород: твердые и полирующие; среднетвердые-твердые полирующие; среднетвердые-твердые абразивные; твердые абразивные или разрушенные формации [9]. Как следует из табл. 4, после объединения двух фирм, число формаций возросло до восьми и приблизилось к числу формаций, установленных DCDMA, т.е. явно просматривается линия на установление единого числа формаций горных пород для США и Европы.

Таблица 4
Классификация фирмы Diamond Boart Craelius (США-Швеция)

Группа горных пород	Характеристика группы горных пород	Типичные представители горных пород
1	Мягкие	Глина, гипс, мел, мягкий известняк, вулканический туф
2	Мягкие - средние (смешанные породы)	Песок, уплотненная глина, среднетвердый известняк, лед, соль, замороженный грунт
3	Среднетвердые, неабразивные	Мягкий песчаник, песчанистый сланец, песчанистый известняк, глинистый сланец
4	Среднетвердые, абразивные	Среднетвердый песчаник, алевролит, аллювиальные осадки, кальцитовый известняк, среднетвердый известняк
5	Твердые, легко абразивные	Твердый известняк, доломитизированный известняк, кристаллический сланец, серпентин
6	Твердые, неабразивные	Твердый кристаллический сланец, твердый песчаник на кварцевом цементе, известняк, доломит, мрамор, сиенит, перидотит, андезит, диабаз, пегматит, гематит, магнетит
7	Очень твердые	Метаморфизованный кристаллический сланец, гнейс, амфиболит, гранит, базальт, диорит, габбро, порфир, риолит, трахит
8	Ультратвердые	Конгломерат, таконит, абразивный песчаник, абразивный кварцит, порода с пиритом

Таблица для выбора алмазного и твердосплавного породоразрушающего инструмента для колонкового бурения фирмы Craelius практически не отличается от приведенной в табл. 4 и, по-видимому, была взята за основу при объединении с Diamond Boart.

Компания Atlas Corco Craelius, являющаяся отделением фирмы Atlas Corco Groupe (Швеция) и специализирующаяся в области производства алмазного породоразрушающего инструмента, имеет классификацию горных пород и номенклатуру выпускаемого инструмента практически аналогичную фирме Craelius [15]. Это объясняется тем, что фирма Craelius в определенный период входила в группу Atlas Corco.

Фирма Industrial and Mining Bit Manufacturing (IMBM), расположенная в Швейцарии, при выборе породоразрушающего инструмента использует классификацию DCDMA [17]. Выбор алмазного инстру-

мента для бурения ставится в зависимость от твердости, зернистости, абразивности и трещиноватости.

В Чехии [20] для выбора коронок в зависимости от свойств горных пород используется классификация, включающая восемь формаций горных пород. Горные породы характеризуются твердостью и абразивностью. Первые две формации (мягкие горные породы и мягкие или среднетвердые горные породы) характеризуются только твердостью. В описании формаций с номерами 3-6 присутствует как твердость, так и абразивность, в седьмой формации (очень твердые породы) — только твердость, а в восьмой (очень абразивная) — только абразивность.

В Болгарии, выбор параметров алмазного инструмента для бурения рекомендуется производить в зависимости от твердости, структуры, абразивности и трещиноватости горных пород. Однако типизация формаций горных пород по сходному влиянию на износ алмазного инструмента отсутствует.

В Китае [21] рекомендуется выбирать алмазный инструмент на основе механических свойств разбуриваемых формаций. Для характеристики формаций используется твердость и абразивность горных пород. По твердости и абразивности выделяются по три группы. По твердости горные породы разделяются на среднетвердые-твердые; твердые; твердые-экстратвердые. По абразивности: средне-высокоабразивные; низко-среднеабразивные; низко- и очень низкоабразивные. Но типизация формаций, в которой каждой формации присваивается свой код, отсутствует.

Классификации горных пород в бурении на нефть и газ

Основной объем бурения на нефть и газ, как известно, осуществляется шарошечными долотами. Для выбора типа долота используется ряд классификаций горных пород.

Фирма Varel Manufacturing Company (США) использует следующую основную классификацию горных пород для проектирования и выбора оптимальных типов шарошечных долот (табл. 5). На базе данной классификации и, используя достижения в компьютерной технологии, фирма Varel разработала программное обеспечение для проектирования шарошечных долот, которое позволяет быстро вносить изменения в конструкцию. Благодаря данной системе конструкторы в состоянии предсказать эффект результата модификации характеристик долота [13, 22].

Таблица 5

Классификация горных пород фирмы Varel Manufacturing Company

Характеристика комплекса пород	Прочность на сжатие, МПа	Типичные представители горных пород
I. От мягких до средней твердости с низкой прочностью на сжатие	34,5-103,5	Сланцы, алевролит, мягкий известняк, аллювиальные формации
II. Средней твердости абразивные породы	69-138	Тяжелые медные руды, песчаник, кристаллические сланцы, гнейс, мягкие граниты, мягкие железные руды
III. Твердые и абразивные породы с высокой прочностью на сжатие	103,5-138	Кремнистый сланец, флинт (кремнь), кварциты, граниты
IV. Особо твердые и абразивные породы	138 и более	Наиболее тяжелая руда, кварцевые пески

Для выбора оптимальных шарошечных долот различных типов применительно к конкретным комплексам горных пород фирма Varel Manufacturing Company (VMC) использует еще две классификации (табл. 6 и 7), которые детализируют положения основной классификации. Анализ этих классификаций позволяет оценить их как далеко не совершенные и умозрительные, не имеющие внутренней логики и научных зависимостей, которые были бы известны. Однако с пользой могут быть позамыслованы числовые характеристики горных пород по прочности и рекомендуемые значения основных параметров режима бурения (для сравнительных целей при разработке новых классификаций).

Классификации горных пород, применяемые фирмой Smith International, Inc (США) для выбора марки долот, приведенные в каталоге фирмы, рассчитанном на российский потребитель [12], на первый взгляд весьма просты. Основная классификация предусматривает пять групп горных пород, связанных зависимостью с рядом классифицированных по форме и составу резцов, армирующих шарошки (табл. 8). В примечании к этой классификации уточняется: при выборе марки долот фирмы Smith важно учитывать несколько различных подходов в оценке твердости и буримости горных пород в СНГ и США, связанный с различными определениями прочности горных пород – при основном сжатии (в США), и при одноосном сжатии – по штампу (в СНГ).

Таблица 6

Классификация комплексов (формаций) горных пород
для выбора шарошечных долот со вставками из карбида вольфрама
(фирма VMC, США)

Характеристика комплексов горных пород	Прочность на сжатие, МПа	Рекомендуемые тип долота и режим бурения
1. Средней мягкости с низким пределом прочности на сжатие с более твердыми и более абразивными прослойками	34,5-103,5	QMC9 (d = 130...270 мм) n = 50...80 мин ⁻¹ P = 44,5...71,4 даН на 1 мм d (диаметр долота)
2. От средней мягкости до средней твердости с более высокой прочностью при сжатии с многочисленными твердыми прослойками (известняк, доломиты и твердые сланцы)	55,1-103,5	QMC9 (d = 200 мм) n = 50...80 мин ⁻¹ P = 44,5...71,4 даН на 1 мм d
3. Средней твердости с высокой прочностью при сжатии и абразивностью (доломиты, известняк и песчано-глинистый сланец)	68,9-124,1	MC7 (d = 120,6...269,8 мм) n = 35...75 мин ⁻¹ P = 53,5...107,1 даН на 1 мм d
4. Твердые породы (осадочные отложения средней твердости и более мягкие магматические породы)	68,9-124,1	MC76 (d = 158,7...381 мм) n = 35...75 мин ⁻¹ P = 53,5...115,7 даН на 1 мм d
5. От средней твердости до средней твердости с абразивными характеристиками (известняк, кремнистый сланец и песчаник)	68,9-137,8	QMC78 (d = 142,8...381 мм) n = 35...75 мин ⁻¹ P = 53,5...115,7 даН на 1 мм d
6. Твердые и абразивные породы (доломиты, известняк, кремнистые сланцы и прочие твердые породы)	137,8 и более	QMC852 (d = 152,4...250,1 мм) n = 35...60 мин ⁻¹ P = 89,2...142,8 даН на 1 мм d
7. Особо твердые и абразивные (кремнистый сланец, флинт, базальт, кварцитовый песчаник, гранит)	103,5-176 и более	DWN (d = 88,9...104,8 мм) n = 35...60 мин ⁻¹ P = 71,2...124,6 даН на 1 мм d

Таблица 7

Классификация комплексов (формаций) горных пород
для выбора шарошечных долот со стальными зубьями
(фирма VMS, США)

Характеристика комплексов горных пород	Прочность на сжатие, МПа	Рекомендуемые тип долота и режим бурения
1. Мягкие известняки, мягкие глины, красноцвет, мягкие сланцевые глины, сланцы и прочие породы со сравнительно низкой прочностью на сжатие	3,44-20,6	L111 (d = 206,4...660 мм) n = 60...150 мин ⁻¹ P = 35,7...89,2 даН на 1 мм d
2. Мягкие известняки, сланцы и прочие породы со сравнительно низкой прочностью на сжатие	6,88-34,4	L3S (d = 98,4...323,8 мм) n = 60...150 мин ⁻¹ P = 35,7...89,2 даН на 1 мм d
3. Широкий диапазон пород ("грубое" бурение)	6,88-34,4	V3MO (d = 69,8...174,6 мм) n = 50...100 мин ⁻¹ P = 35,7...89,2 даН на 1 мм d
4. Широкий интервал среднетвердых пород, таких как видоизмененный известняк, сланцы, ангидриды и прочие породы, со средней прочностью на сжатие	27,5-68,9	L2 (d = 76,2...406,4 мм) n = 35...85 мин ⁻¹ P = 53,5...107,1 даН на 1 мм d
5. Широкий интервал среднетвердых пород, таких как видоизмененный известняк, сланцы, ангидриды и прочие породы, со средней прочностью на сжатие	27,5-68,9	LH2 (d = 95,3...381 мм) n = 35...85 мин ⁻¹ P = 53,5...107,1 даН на 1 мм d
6. Быстрообрушаемые твердые, но неабразивные породы	55,2-124,1	L1 (d = 120,6...155,6 мм) n = 35...75 мин ⁻¹ P = 24,1...44,7 даН на 1 мм d
7. Твердые породы, такие как шпирит, кремнистый сланец, доломиты, гранитный порфир и прочие породы с высокой прочностью на сжатие и высокой абразивностью	55,2-137,9	LH1 (d = 73...444,5 мм) n = 30...65 мин ⁻¹ P = 24,1...48,2 даН на 1 мм d

Таблица 8

Классификация комплексов (формаций) горных пород
для выбора буровых шарошечных долот фирмы Smith International, Inc (США)

Комплекс горных пород	Режущие структуры (элементы) долота		
	С фрезерованными зубьями	С твердосплавными вставками	Форма реза
I. Очень мягкие	DS	-	-
II. Мягкие породы	DT	1	Клинообразный
III. Мягкие и средние породы	DG	15	"-
		2	"-
		17	Конический
		27	"-
		25	Клинообразный
IV. Среднетвердые породы	V	3	"-
		37	Конический
		4	Клинообразный
		45	"-
		47	Конический
V. Твердые породы	-	5	Клинообразный
		57	Конический
		7	"-
		9	"-

Поэтому рекомендуется при заказе долот делать поправку на 0,5-1 ступень по твердости породы (СНГ – твердые; США – средние или среднетвердые).

Эту рекомендацию будем иметь в виду и мы при дальнейшем анализе классификаций, детализирующих основную. В этой же рекомендации можно увидеть и попытку сблизить российский и западный подход к классификации горных пород для выбора породоразрушающего инструмента (ПРИ), каковой целью задались и авторы настоящего обзора.

Обобщенная классификация фирмы Smith International, Inc (см. табл. 8) составлена авторами настоящего обзора по отдельным, разрозненным (хотя и систематизированным в определенной мере) рекомендациям,

Пример уточненного выбора шарошечных долот с фрезерованными зубьями (фирма SII, США)

Характеристика группы горных пород	Твердость		Тип долота	Код IADC	Тип подшипника	Режим бурения	
	Прочность на сжатие	Частота вращения, мин ⁻¹				Нагрузка на 1 см диаметра долота, Н	Частота вращения, мин ⁻¹
Мягкие породы	Низкая		DSJ	11	Открытый ролик	1800-8900	70-180
			SDS	114	Термезированный ролик	1800-8900	80-200
Средние и средне-твердые	Высокая		FDS	116	Спинодальный ролик	2700-10700	80-150
			DTJ	121	Открытый ролик	3600-8900	80-200
			SDT	124	Термезированный ролик	3600-8900	80-200
			FDT	126	Спинодальный ролик	3600-10700	50-140
			DGJ	131	Открытый ролик	3600-8900	80-200
			SDGH	135	Термезированный ролик	1800-10700	80-170
			FDGH	137	Спинодальный ролик	3600-10700	60-140
			VZJ	211	Открытый ролик	1800-10700	50-120
			SVH	215	Термезированный ролик	1800-10700	70-140
			FVN	217	Спинодальный ролик	1800-10700	50-80

рассеянным по упомянутому выше каталогу фирмы. Выбрав шарошечные долота по данной классификации, исходя из оптимальной конструкции и формы режущих элементов, следует, как советует фирма Smith International, Inc, детализировать и уточнить выбранный тип долота по другим его конструктивным элементам, в частности, по типу подшипника с рекомендацией частоты вращения и осевой нагрузки. Горные породы при этом классифицируются по твердости и прочности на сжатие без числовых значений этих характеристик (табл. 9). Выбор производится отдельно для долот с фрезерованными зубьями и для долот с твердосплавными вставками; в самостоятельную группу выделены "моторные" долота, т.е. применяемые с забойными двигателями.

Интересно, что приводя таблицу сравнительной характеристики некоторых своих долот с долотами российских производителей, фирма Smith использует классификацию горных пород (табл. 10), близкую к используемой при нефтяном бурении в России.

Таблица 10

Рекомендации по областям применения шарошечных долот производства США и России

Область применения (комплекс горных пород)	Код (марка) долота диаметром 215,9 мм		
	Тип долота российского производства	Тип долота фирмы SII	Код по стандарту IADC
1. Мягкие породы	M-ГAY-R 54	FDT	126
2. Мягкие абразивные породы	M3-ГAY-R 0214	F1	437
	M3-ГAY-R 04M	F1	437
3. Мягкие породы с прослойками пород средней твердости	MC-ГН-R 44	SDG	134
	MC-ГAY-R 56	-	134/136
	MC-ГН-R 45	FDG	136
4. Мягкие абразивные породы с прослойками пород средней твердости	MC3-ГН-R 01	A1, F2	517
	MC3-ГAY-R 11M	A1, F2	517
5. Абразивные породы средней твердости	C3-ГН-R 51	F4, F45	617
	C3-ГAY-R 53	F4, F45	617
6. Твердые абразивные породы	T3-ГН-R 15	F47, F57	725
	T3-ГAY-R 40	F6	725
	T3-ГН-R 05	F6	725

Таблица 11
Классификация горных пород фирмы "Упетром" (Румыния)

Группа горных пород по твердости и абразивности	Марка долота
1. Мягкая	S
2. Среднемягкая	SM
3. Средняя	M
4. Средняя абразивная	MA
5. Среднетвердая абразивная	MTA
6. Твердая абразивная	TA
7. Твердая или очень твердая абразивная	TEA

Фирма "Упетром" (Румыния) выпускает широкий набор типоразмеров шарошечных долот для бурения со стальными фрезерованными зубьями и вставками из твердого сплава. Применение определенного типа долота увязывается с твердостью и абразивностью горных пород (табл. 11) [32].

В табл. 12 приведена международная классификация горных пород при шарошечном бурении (по стандарту IADC – МАБП). В этой классификации каждая из восьми групп пород (или "серий" согласно [33]) подразделяется на четыре подгруппы, характеристика которых в каталоге фирмы Smith International, Inc, к сожалению, не приводится.

В результате анализа зарубежных источников в области классификаций горных пород для геологоразведочного дела и бурения на нефть и газ прослеживаются следующие тенденции.

1. Ведущие индустриально развитые страны имеют классификации, типизирующие формации горных пород; в других странах (Болгария, Румыния, Китай) такие классификации отсутствуют. Все классификации направлены на обеспечение выбора оптимального породоразрушающего инструмента для бурения. Выбор породоразрушающего инструмента производят на основе типизации формаций горных пород, которые увязываются с его конструктивными параметрами. Для алмазного инструмента основными конструктивными параметрами являются тип матрицы, размер, насыщенность и качество алмазов.

2. В геологоразведочном деле наиболее распространена классификация горных пород по формациям международной организации по стандартизации в области алмазного бурения (MCDMA). Классификация

Таблица 12
Классификация горных пород для выбора шарошечных долот
(по международному стандарту МАБП-IADC)

Серия	Группа горных пород		Тип рекомендуемых долот
	Характеристика	Тип	
1	Мягкие породы (низкая прочность на сжатие)	1	Долота с фрезерованными зубьями
		2	
		3	
		4	
2	От средних до пород средней твердости (высокая прочность на сжатие)	1	
		2	
		3	
		4	
3	Твердые сильноабразивные породы	1	
		2	
		3	
		4	
4	Мягкие породы (низкая прочность на сжатие)	1	Долота со вставками из твердых сплавов
		2	
		3	
		4	
5	От мягких до пород средней твердости (низкая прочность на сжатие)	1	
		2	
		3	
		4	
6	Среднетвердые породы (высокая прочность на сжатие)	1	
		2	
		3	
		4	
7	Твердые, среднеабразивные и абразивные породы	1	
		2	
		3	
		4	
8	Очень твердые и абразивные породы	1	
		2	
		3	
		4	

МСДМА используется в странах Америки и Европы. При этом основными классифицирующими признаками являются твердость, абразивность, зернистость, трещиноватость, нарушенность, способность заполировывать алмазный инструмент.

РАЗВИТИЕ КЛАССИФИКАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И СТРАНАХ СНГ

Классификации горных пород в геологоразведочном бурении и горном деле

Значительный удельный вес в экономике бывшего СССР и России отраслей, связанных с разведкой и добычей полезных ископаемых, обеспечили интенсивное развитие горно-геологических наук. Расцвет горно-геологических наук пришелся на 1960-1980-е годы. Из-за большого объема разведочного бурения, доходившего до нескольких десятков миллионов метров в год, вопросы планирования и нормирования буровых работ и разработка необходимых для этого классификаций горных пород по буримости вызвали повышенное внимание. Уже к концу 70-х годов различными ведомствами было разработано для применяемых способов бурения более 60 разнообразных классификаций, основанных на параметрах и свойствах горных пород.

По характеру получения показателей буримости Б.И. Воздвиженский (1973) предложил разделить известные классификации горных пород на три основные группы:

- классификации на основе свойств горных пород;
- классификации на основе производственных показателей;
- классификации на основе свойств горных пород и использования производственных показателей.

Классификации на основе свойств горных пород представляют наиболее многочисленную группу. В качестве критерия буримости используется одно из физических свойств горных пород – прочностные характеристики при статической и динамической нагрузке, твердость, абразивность и т.д. Привлекательность создания классификации, основанной на свойствах горных пород, по-видимому, заключалась в кажущейся простоте решения проблемы определения буримости и приборного обеспечения метода. В результате были разработаны разнообразные лабораторные способы определения буримости горной породы, в которых общими чертами явилось механическое воздействие на об-

разец горной породы различными инденторами (Воздвиженский Б.И. и др., 1973; Гинзбург И.М., Оношко Ю.А., 1983).

В горном деле и бурении получили распространение методы определения показателей буримости по результатам раздавливания цилиндрических образцов горных пород на прессах с плоскими инденторами, вдавливания индентора с плоским торцом в пришлифованную поверхность образца горной породы (метод Л.А. Шрейнера), толчения кусков породы определенного размера (метод М.М. Протодаконова и К.И. Сыскова). Н.И. Любимов (1977) предложил использовать динамическую прочность по толчению в качестве одного из основных показателей буримости горных пород.

Широко внедрялась шкала крепости пород М.М. Протодаконова (старшего). Коэффициент f крепости представляет 0,01 от предела прочности породы на одноосное сжатие. По этой классификации все горные породы подразделяются на 10 категорий от $f = 0,3$ (для слабых плывучих пород) до $f = 20$ (для крепких и вязких базальтов, кварцитов и т.д.).

Однако исследования связи полученных физических свойств с техническими показателями бурения не выявили между ними тесных корреляционных зависимостей (Гинзбург И.М., Оношко Ю.А., 1983). Относительно высокая корреляция получена лишь в отдельных случаях, когда способ нагружения образца горной породы приближался к характеру воздействия на забой породоразрушающего инструмента. Например, высокая корреляция установлена между твердостью по штампу и показателями шарошечного бурения, динамической прочностью по толчению и показателями гидроударного бурения.

Для алмазного бурения вообще не был установлен показатель, который имел бы удовлетворительную корреляцию с техническими показателями бурения. Например, О.В. Иванов (1965) в результате стеновых исследований получил очень низкую корреляцию между глубиной внедрения алмаза и твердостью по штампу (коэффициент корреляции 0,52). В.Т. Борисович, Г.А. Яичников и П.И. Шалин (1977) в результате производственных испытаний получили очень низкий коэффициент корреляции (0,42) между расходом алмазов и твердостью по штампу. С сожалением можно констатировать, что в 60-х годах были остановлены работы по методу ВИТР-ОТ, в котором нагружение образца горной породы производилось карбундовым кругом, что в значительной степени реализовывало при испытаниях забойные условия.

Отсутствие удовлетворительной корреляции одного какого-либо физического свойства с техническими показателями бурения предпо-

ределили попытки использования комплексного показателя на основе объединения нескольких (как правило двух) свойств горных пород.

Н.И. Любимовым были предложены объединенные показатели — W и r_m . Показатель W определяли по формуле

$$W = 0,01 \cdot \sigma_{ск} \cdot H_{ист},$$

где $\sigma_{ск}$ — прочность на скалывание; $H_{ист}$ — твердость на истирание.

Показатель r_m определяли по формуле

$$r_m = 3 \cdot F_d^{0,8} \cdot K_{абр},$$

где F_d — динамическая прочность по толчению; $K_{абр}$ — коэффициент абразивности (по Н.И. Любимову).

Классификация горных пород на основе объединенного показателя по динамической прочности и абразивности широко использовалась в геологоразведочном бурении, а сам метод определения показателей буримости (метод ЦНИГРИ) принят в виде ГОСТ 41-89-74 "Породы горные. Метод контрольного определения категорий по буримости для вращательного бурения".

М.М. Протодяконов применял объединенный показатель абразивности и коэффициента крепости $K = 1,56 \cdot (K_{абр} \cdot f)^{1/3}$.

Предложенный Л.А. Шрейнером объединенный показатель твердости и пластичности ($P = P_{ш} \cdot K_{пл}$), который получил наименование "объединенная твердость", использован для классификации горных пород в бывшей ЧССР [25].

Однако объединенные показатели также не имели удовлетворительной корреляции с техническими показателями бурения. Кроме фактора отличия условий испытаний образцов горных пород от реальных забойных условий, на результат влияет сам факт объединения различных показателей. Очевидно, что математическое выражение, связывающее одну или более величин, допускает получение одинакового результата при различных их исходных значениях. Это приводит к курьезным фактам. Например, при использовании метода ЦНИГРИ в одни группы по буримости попадают слабосвязанные горные породы, сложенные острыми абразивными зернами (кварцсодержащие алевролиты, слабые песчаники и др.), и прочные малоабразивные горные породы (глинистые и песчано-глинистые сланцы) [6].

Классификации, базирующиеся на производственных показателях, используют в качестве критериев значения механической скорости бурения, износа породоразрушающего инструмента, энергоемкости бурения, данных геофизических исследований.

Большинство исследователей под термином "буримость" понимали сопротивляемость горной породы разрушению буровым инструментом. Такой подход нашел отражение в работах О.Н. Голубинцева (1968), С.С. Сулакшина (1973), Л.И. Барона, Б.М. Логунцова, Е.З. Позина (1962), В.В. Ржевского, Г.Я. Новика (1978), А.В. Маразмзина и Г.А. Блинова (1977). В качестве показателя буримости рекомендовалось использовать механическую скорость бурения или время бурения 1 м скважины. С.С. Сулакшин определяет буримость как скорость разрушения горных пород при бурении.

На базе такого подхода в геологоразведочном производстве для определения буримости разработано и применяется несколько шкал. Для вращательного бурения все породы по значениям средней механической скорости и углубки за рейс разбиты на 12 категорий (ЕНВ, Гостехиздат, 1963). На практике буримость горной породы на основе механической скорости бурения рекомендуется определять по данным хронометражных наблюдений*.

Предложение использовать в качестве показателя буримости величину удельного расхода алмазов впервые сделал Э.Э. Гитциграт (1965).

Возможность использования энергетических показателей для оценки буримости горных пород рассматривали М.М. Протодяконов, Я.Д. Зайдман и П.П. Назаров (1948), Б.Н. Кутузов (1971), И.А. Тангаев (1975) и другие исследователи. При этом они исходили из положения, что количество затрачиваемой при разрушении энергии можно считать показателем сопротивляемости горной породы разрушению.

Исследования зависимости между удельной энергоемкостью бурения и механической скоростью (Тангаев И.А., 1975), проведенные для шарошечного бурения на карьерах, выявили устойчивую зависимость между ними. Коэффициент корреляции в условиях разных карьеров колебался от 0,79 до 0,83.

Следует отметить, что экспериментальные исследования на карьерах создали благоприятные условия по получению зависимости удельной энергоемкости бурения и механической скорости бурения

* Методика проведения полевых исследований по установлению фактической буримости горных пород, пробуренных алмазными коронками. — Л.: ВИТР, 1967.

вследствие высокой унификации применяемых технических средств и небольших глубин скважин. В разведочном бурении разброс геолого-технических условий и параметров применяемых технических средств бурения значительно шире, что делает проблематичным нахождение общих зависимостей энергоёмкости бурения и свойств горных пород.

Кроме удельной энергоёмкости бурения в качестве показателей буримости предложено несколько энергетических показателей. Н.Х. Богданов (1977) предложил использовать коэффициент буримости f , определяемый по формуле

$$f = K_1 \cdot W \cdot t/V,$$

где W — забойная мощность, t — время, V — объем разрушенной породы, K_1 — коэффициент пропорциональности.

Похожие показатели предложили А.В. Сахаров (1976) и И.П. Петров [34]. Из-за затрудненности в проведении измерений реализуемой на забое мощности ее оценка осуществляется на основе произведения осевой нагрузки и частоты вращения. Коэффициент буримости K_6 по А.В. Сахарову находится по формуле:

$$K_6 = V_{\text{мех}} \cdot S/(P \cdot n),$$

где $V_{\text{мех}}$ — механическая скорость бурения; S — площадь торца коронки; P — осевая нагрузка; n — частота вращения.

Показатель сопротивляемости породы разрушению a , предложенный И.П. Петровым определяется формулой

$$a = P \cdot n/V_{\text{мех}}.$$

Однако очевидно, что оценка энергоёмкости разрушения по показателям А.В. Сахарова и И.П. Петрова, ввиду используемого метода оценки реализуемой мощности по произведению значений осевой нагрузки и частоты вращения, имеет трудно оцениваемую погрешность.

В последние годы интенсивно развивается направление по исследованию зависимости физико-механических свойств разбуриваемых горных пород и технических показателей бурения с данными геофизических исследований скважин, проводимых в процессе или по окончании бурения. Установлена достаточно высокая корреляция между данными акустического каротажа и твердостью породы по штампу. Доказана возможность расчленения геологического разреза по данным из-

мерения параметров физических полей, возникающих на забое и регистрируемых на поверхности или в призабойной зоне [9, 14]. Учитывая связь возникающих физических полей с разрушением горных пород, это направление является весьма перспективным для разработки методов оценки буримости горных пород.

Главным и практически неустраняемым недостатком классификаций, основанных на производственных показателях, является невозможность стандартизировать условия их получения. Хотя фиксируемые показатели на макроуровне и определяются геологическими условиями, применяемыми техническими средствами и технологией бурения на забое, в каждом конкретном случае устанавливается свой механизм разрушения горной породы, параметры которого зависят от таких трудно контролируемых факторов как вибрации снаряда, условия очистки забоя и т.д. Практика бурения показала, что производственные показатели, полученные в практически идентичных условиях, имеют различия.

Из-за невозможности стандартизовать условия получения показателя буримости, классификации, основанные на производственных показателях, носят нестабильный и временный характер и должны постоянно изменяться при совершенствовании технических средств и технологии бурения. Поэтому на практике в геологических организациях буримость пород до настоящего времени устанавливается геологами путем макроскопического определения принадлежности данной породы к той или иной группе действующей классификации (Марамзин А.В., Блинов Г.А., 1977). При таком визуальном, субъективном способе определения буримости возможны ошибки, приводящие к экономическим потерям или трудовым спорам.

Смешанные классификации, базирующиеся на технических показателях бурения и свойствах горных пород. Уже упомянутая выше "Единая классификация горных пород по буримости для механического вращательного бурения скважин" является смешанной классификацией на основе механической скорости бурения, углубки за рейс и петрографического описания пород.

ВНИИГТ разработал смешанную классификацию на основе свойств горных пород, определяемых по методу Л.А. Шрейнера, и данных отработки долот.

Однако смешанные классификации имеют те же недостатки, что и классификации, основанные на свойствах горных пород или на производственных показателях. Кроме этого, применение статистических методов при обработке данных заранее вносит трудно оцениваемую

погрешность ввиду невозможности учесть конкретные условия получения показателя.

Суммируя вышеизложенное, можно отметить, что главными недостатками различных классификаций горных пород в области геологоразведочного бурения и горного дела являются:

для классификаций на основе свойств горных пород – отсутствие удовлетворительной корреляции измеряемых показателей с техническими показателями бурения;

для классификаций, базирующихся на производственных показателях, – невозможность стандартизовать условия получения показателей; для смешанных классификаций – обе вышеприведенные причины.

Таким образом, несмотря на то, что в бывшем СССР было разработано большое число классификаций, ни одна из них не типизировала формаций горных пород.

По-видимому, в силу исторических причин, а также политической и экономической обособленности СССР от индустриально-развитых стран, развитие горно-геологических наук и, в частности, исследования буримости горных пород, шло по особому направлению. Характерной особенностью явилось отсутствие четкого разделения целей классификаций горных пород по буримости для планирования и нормирования буровых работ, с одной стороны, и проектирования и выбора породоразрушающего инструмента для бурения, с другой. Преимущество отдавалось разработке классификаций для планирования и нормирования буровых работ, что отвечало общему направлению развития СССР как единого экономического механизма. Классификации по буримости, как правило, строились на базе одного, интегрального показателя. Однако этими классификациями пытались пользоваться и для выбора породоразрушающего инструмента для бурения.

Отсутствие изначально четко поставленной цели создания классификаций, по-видимому, явилось одной из основных причин отсутствия общепринятого определения понятия “буримость горных пород”.

Особенно остро отсутствие типизации формаций горных пород сказывается в области алмазного бурения. В технической литературе встречаются лишь отрывочные сведения по типизации формаций горных пород по степени влияния на износ алмазного инструмента. В индустриальных указаниях по алмазному бурению геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые (Васильев В.И., Блинов Г.А. и др., 1987) область применения алмазных коронок характеризуется плотностью, трещиноватостью, пережимаемостью по твердости гор-

ных пород. Но отсутствие типизации формаций создает сложности при подборе алмазного инструмента, поскольку разные исследователи вкладывают в эти термины разный смысл.

Немаловажным для понимания сложившейся ситуации в области разработки классификаций горных пород по буримости является исторический факт позднего внедрения алмазного бурения в практику геологоразведочных работ в нашей стране. Первые алмазные коронки из отечественных алмазов месторождений Якутии появились в середине пятидесятых годов. До этого времени применение алмазных коронок, из-за отсутствия достаточного количества алмазного сырья, было строго лимитированным и, как правило, ограничивалось бурением из подземных горных выработок только горных пород свыше VII категории по буримости инструментом диаметром 46 и 36 мм. Уникальность процессов, протекающих на забое при алмазном бурении, не позволило подойти к нему с наработанных позиций дробового и твердосплавного бурения.

Классификации горных пород в бурении на нефть и газ

В области классификации горных пород при бурении на нефть и газ, в отличие от геологоразведочного бурения, исторически сложился подход, близкий к подходу ведущих зарубежных стран и устанавливающий группы горных пород, сходные по влиянию на показатели бурения. Этот факт, по-видимому, связан с значительно меньшим разнообразием горных пород и возможностью их четкой дифференциации при бурении на нефть и газ, чем при геологоразведочном бурении на твердые полезные ископаемые. Согласно ГОСТ 2069-75 горные породы разделены на 13 классов (табл. 13). Для каждого класса рекомендуется использовать определенный тип шарошечного долота. Для бурения с отбором керна по ГОСТ 21210-75 предусмотрено пять типов шарошечных и один тип лопастных бурильных головок, которые соответствуют определенным классам горных пород (табл. 14).

Для указанных классов горных пород АО “Волгабурмаш” (бывш. Самарский долотный завод) изготавливает более 140 типоразмеров шарошечных долот с центральной или комбинированной промывкой (продувкой) забоя, фрезерованным и твердосплавным вооружением шарошек с опорами качения или скользящими [10]. Выбор рациональных типов шарошечных долот и бурильных головок для бурения рекомендуется производить по методике ВНИИБТ на основании совместного учета свойств горных пород и результатов отработки породоразрушающего

Таблица 13
Классы горных пород и типы шарошечных долот (по ГОСТ 21210-75)

Класс горных пород	Тип (по вооружению шарошек) трехшарошечного долота
1. Мягкие	М
2. Мягкие абразивные	МЗ
3. Мягкие с пропластками пород средней твердости	МС
4. Мягкие абразивные с пропластками пород средней твердости	МСЗ
5. Средней твердости	С
6. Абразивные с пропластками пород средней твердости	СЗ
7. Средней твердости с пропластками твердых пород	СТ
8. Твердые	Т
9. Абразивные твердые	ТЗ
10. Твердые с пропластками крепких пород	ТК
11. Твердые абразивные с пропластками крепких пород	ТКЗ
12. Крепкие	К
13. Очень крепкие	ОК

Таблица 14
Классы горных пород и типы бурильных головок

Класс горных пород	Тип (по вооружению бурильной головки)	Исполнение рабочей части бурильной головки
1. Мягкие	М	Лопасты с вставными твердосплавными зубками, с наплавкой или без наплавки их твердым сплавом
2. Мягкие с пропластками пород средней твердости	МСЗ	Шарошки с вставными твердосплавными зубками
3. Средней твердости	СЗ	"-
4. Средней твердости с пропластками твердых пород	СТ	Шарошки с вставными твердосплавными зубками или фрезерованными зубьями с наплавкой или без наплавки их твердым сплавом
5. Твердые	ТЗ	Шарошки с вставными твердосплавными зубками
6. Твердые абразивные с пропластками крепких пород	ТКЗ	"-

инструмента (Марамзин А.В., Блинов Г.А., 1977). Методика позволяет выделить в разрезе характерные пакки горных пород, для которых рекомендованы рациональные типы долот.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПРИБОРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

Традиционные методы

Известные классификации горных пород, предназначенные для выбора породоразрушающего инструмента для бурения, как правило, учитывают *прочностные* и *абразивные* свойства горных пород. В различных классификациях дополнительно учитываются трещиноватость и пережимаемость горной породы, нарушенность массива и зернистость горной породы.

Прочностные свойства горной породы отражают сопротивляемость горной породы проникновению в нее породоразрушающего инструмента и связаны с понятиями твердость и прочность. Прочность горной породы – свойство воспринимать в определенных условиях, не разрушаясь, воздействие механических нагрузок, физических полей, а также влияние неравномерного протекания в них физико-химических процессов. Твердость – свойство горной породы оказывать сопротивление внедрению в ее других тел при сосредоточенном контактом силовом воздействии. Очевидно, что твердость, по сути, является прочностью поверхности горной породы, подвергающейся силовому воздействию. Именно этим можно объяснить частую замену понятий прочность и твердость. К прочностным свойствам можно отнести буримость – технологическую оценку сопротивляемости горной породы разрушению бурением.

Наиболее часто в классификациях при оценке прочностных свойств горных пород используется предел прочности на одноосное сжатие. Это можно объяснить широкой распространенностью метода в различных областях промышленности, наличием испытательных установок и методик. Испытания образцов горных пород в виде цилиндров, призм или кубов проводятся на гидравлических или механических прессах. Методика определения предела прочности горной породы на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ сводится к установлению удельного сопротивления горной породы разрушающему усилию P с учетом опорной площади образца S :

$$\sigma_{сж} = P / S, \text{ Па.}$$

На пределе прочности горной породы на одноосное сжатие основаны классификация фирмы Varel Manufacturing Company (США), международная классификация горных пород при шарошечном бурении (по стандарту IADC – МАНП) и др.

В СНГ классификацией, учитывающей предел прочности горной породы на одноосное сжатие, является шкала крепости М.М.Протодьяконова (старшего). Коэффициент крепости М.М.Протодьяконова k , как указывалось, равен 0,01 от предела прочности породы на одноосное сжатие.

Для определения категорий горных пород по буримости для вращательного механического бурения по ГОСТ-41-89 в ЦНИГРИ разработан прибор ПОАП-2М. Показатель буримости (объединенный показатель) рассчитывается на основе коэффициентов динамической прочности и абразивности, определяемых на отдельных приборах, входящих в комплект прибора ПОАП-2. Определение динамической прочности по методу толчения производится на приборе ПОК. Испытанию подвергают куски горной породы размером 1,5-2 см. Показателем динамической прочности является объем шлама размером менее 0,5 мм, образовавшийся в стакане прибора ПОК после десяти сбрасываний груза на кусочки породы. Отдельно показатель динамической прочности по толчению практически не используется. Коэффициент абразивности определяется на приборе ПОАП по потере массы свинцовой дроби при взаимодействии со шламом горной породы в загрузочных цилиндрах прибора в течение 20 мин.

Твердость горной породы определяется различными методами, в числе которых: царапанье, сбрасывание индентора на поверхность горной породы, статическое и динамическое вдавливание, качания маятника, сверление (резание или бурение).

Наиболее распространенным при определении относительной твердости горной породы является метод царапанья и связанная с ним шкала Мооса. Относительная твердость по методу Мооса определяется путем царапанья исследуемой горной породы острыми крайями эталонных минералов или царапанья эталонных минералов исследуемой горной породой. Шкала Мооса содержит десять минералов-эталонов, твердость которых (в условных единицах) соответствует их номерам: 1 – тальк; 2 – гипс; 3 – кальцит; 4 – флюорит; 5 – апатит; 6 – ортоклаз; 7 – кварц; 8 – топаз; 9 – корунд; 10 – алмаз. В проспекте фирмы Staeius при определении относительной твердости в качестве эталонных мате-

риалов рекомендуется использовать человеческий ноготь (2-3), медную монету (3), кусок стекла (5), мягкую сталь (5,5), легированную сталь (6).

В зарубежных источниках достаточно часто упоминается характеристика твердости (упругости) горной породы по Шору: по высоте отскока индентора, сбрасываемого на поверхность горной породы с фиксированной высоты. В методе Шора в качестве индентора используется боек с алмазным наконечником. Определение твердости производится на специальном приборе – склероскопе Шора. Известен отечественный аналог склероскопа Шора – склероскоп ШРС-1. В СССР также были разработаны методы определения твердости по высоте отскока от поверхности горной породы стального шарика (метод Тархова) и конуса из закаленной стали (метод Шубина). Однако рекомендации об использовании этих методов для характеристик твердости горной породы при выборе породоразрушающего инструмента не встречаются.

При определении твердости методом статического вдавливания используют методы Ю.Бриннеля, С.Роквелла, Виккерса, Кнуппа, Л.А.Шрейнера, Е.Ф.Епштейна, Л.И.Барона и Л.Б.Латмана, отличающиеся в основном типом используемого индентора и режимом нагружения. В качестве показателей твердости используются: разрушающая нагрузка, глубина внедрения индентора, площадь отпечатка индентора на горной породе.

Наибольшее практическое значение для обеспечения классификаций горных пород при бурении на нефть и газ имеет метод Л.А.Шрейнера. Испытания проводятся на приборе УМГП-3 (4). Методика испытания заключается в вдавливании штампа с плоским круглым основанием в шлифованную поверхность горной породы. В процессе вдавливания регистрируется диаграмма “нагрузка – деформация”, на основе которой рассчитывают основные показатели: твердость, упругость, пластичность и работу разрушения. Основной показатель – твердость по штампу – определяется по отношению разрушающей нагрузки к площади штампа.

В зарубежных источниках встречаются данные о характеристиках твердости горных пород по Кнуппу и Виккерсу. Определение твердости (микротвердости) методом статического вдавливания алмазной пирамидки Виккерса в странах СНГ производится на микротвердометре ПМТ-3. Твердость вдавливания (в кг/мм^2) вычисляют как отношение нагрузки к площади отпечатка. Метод дает возможность определять твердость микроскопически малых выделений минералов (10-30 мкм), однако оценка твердости горных пород как петрографических

разностей, состоящих из нескольких породообразующих минералов, требует значительного числа измерений.

В методах определения твердости путем сверления (резание или бурение) производится разрушение поверхности горной породы движущимся инструментом. В качестве показателей твердости используются глубина реза отрезным кругом (прибор ВИТР-ОТ), усилие подачи сверла (прибор МАС О.Н.Голубинцева), скорость линейного износа образца горной породы при истирании торцом алмазного круга (метод Г.А.Сенькина и Ю.А.Оношко). Наибольшее распространение в СССР в шестидесятых годах двадцатого столетия получил прибор ВИТР-ОТ, который в настоящее время стал музейной редкостью.

Абразивные свойства горной породы определяют ресурс и закономерности отработки породоразрушающего инструмента. Общепринятым является определение абразивности как способности горной породы изнашивать породоразрушающий инструмент при бурении. Для инструментального определения абразивности горных пород известно несколько методов, которые можно разделить на производственные и лабораторные.

Для оценки абразивности горной породы в производственных условиях могут использоваться технические показатели бурения, а именно: вид износа и ресурс породоразрушающего инструмента, а также интенсивность уменьшения механической скорости бурения (Гинзбург И.М., Оношко Ю.А., 1983).

В лабораторных условиях абразивность горной породы определяется в основном по степени износа эталонного материала (стержня, колыца и др.) при взаимодействии (трении, сверлении, резании) с образцом горной породы. За рубежом известны классификации горных пород по абразивности в зависимости от износа стальной пластинки и бронзового стержня [23, 24]. Наибольшее распространение в СССР в горном деле и бурении получили лабораторные методы оценки абразивности, предложенные Л.И.Бароном и А.В.Кузнецовым (1972) и Н.И.Любимовым (1977). Их применение, несомненно, сыграло положительную роль в изучении и типизации механических свойств горных пород. Однако, как показал анализ опубликованных материалов, выбор конструктивных параметров алмазного инструмента на основе установленных показателей абразивности существенно затруднен, так как они, как правило, не коррелируют друг с другом и с показателями отработки алмазных коронок. По этому ни один из существующих методов не отвечает в полной мере требованиям количественной оценки абразивности пород для их классификации. По-видимому, именно по

этой причине ни одна из классификаций горных пород для выбора породоразрушающего инструмента не содержит ссылки на метод определения абразивности горной породы. Качественная оценка абразивности горной породы зависит от вида и ресурса породоразрушающего инструмента.

Трещиноватость горных пород в настоящее время, в основном, определяется по состоянию (степени разрушенности) керна, поднятого на поверхность. Для характеристики трещиноватости горной породы при колонковом алмазном бурении П.П.Пономарев ввел показатель удельной кусковатости керна K_y и трещиноватости W . Удельная кусковатость керна K_y определяется как отношение числа кусков на метр полученного керна. Показатель трещиноватости W учитывает диаметр бурения и направление трещин и определяется по формуле

$$W = bK_y \cdot \alpha / \text{tg} \beta,$$

где b – диаметр керна; α – опытный коэффициент, равный 0,7; β – угол встречи плоскости трещины с осью скважины.

По степени трещиноватости на основе удельной кусковатости керна K_y и показателя трещиноватости W горные породы разделены на 5 групп (табл. 15): монолитные, слаботрещиноватые, трещиноватые, сильнотрещиноватые, исключительно трещиноватые – раздробленные (Васильев В.И., Блинов Г.А. и др., 1987).

Таблица 15

Классификация горных пород по трещиноватости для геологоразведочного бурения (ВИТР)

Группа горных пород по степени трещиноватости	Критерии трещиноватости	
	Удельная кусковатость керна K_y , шт/м	Показатель трещиноватости W , см/об
I. Монолитные	1-5	До 0,5
II. Слаботрещиноватые	6-10	0,51-1,0
III. Трещиноватые	11-30	1,01-2,0
IV. Сильнотрещиноватые	31-50	2,01-3,0
V. Исключительно трещиноватые (раздробленные)	Более 50	Более 3,0

Следует отметить, что трещиноватость горной породы непосредственно в массиве может быть определена геофизическими (прежде всего акустическими) методами [14]. Это направление является относительно "молодым" и пока не имеет большого практического значения. В качестве характеристики зернистости горной породы используются размер частиц. Различают породы мелкозернистые (размер частиц до 1 мм), среднезернистые (от 1 до 3 мм), и крупнозернистые (свыше 3 мм). Размер частиц определяется в результате петрографического исследования частиц. В полевых условиях размер частиц можно оценить визуально, прикладывая измерительную линейку к свежему сколу горной породы.

Для определения технических показателей бурения (механической скорости бурения, ресурса породоразрушающего инструмента, удельной энергоёмкости бурения), которые характеризуют буримость горной породы, используют данные хронометража, показания контрольно-измерительных приборов, установленных на буровой установке, и замеры породоразрушающего инструмента.

В целом можно отметить, что к настоящему времени, к сожалению, не сложилось четкого методического подхода в отнесении конкретной горной породы к той или иной группе в классификации. В значительной степени это можно объяснить отсутствием объективного инструментального метода определения сопротивляемости горной породы разрушению бурением.

Метод акустико-спектральной диагностики механизма разрушения горной породы

В ВИТРе разработан новый метод определения буримости горных пород (метод ВИТР-А) на основе физически измеряемой при разрушении горной породы величины — спектра акустических колебаний [1, 3, 6].

Суть метода заключается в воздействии на образец горной породы вращающегося алмазного инструмента и измерений при разрушении в призабойной зоне спектра акустических колебаний в диапазоне частот 7-20 кГц, скорости разрушения и реализуемой мощности.

Преимуществом метода является практическое воссоздание термодинамических условий разрушения горной породы при бурении и использование показателя, характеризующего не свойство, а механизм разрушения горной породы в целом.

В качестве показателей буримости используют параметры механизма разрушения горной породы.

1. Акустический спектр в диапазоне частот 7-20 кГц. Сравнение спектров, полученных в идентичных условиях, позволяет выявлять отличия в механизмах разрушения горных пород. Для групп горных пород с близкими механизмами разрушения может быть построен паспортный спектр-маска, в котором каждая дискретная составляющая имеет определенное значение.

2. Удельная акустическая энергия W_{AV} , выделяющаяся при разрушении; определяется как отношение мощности акустических колебаний N_A в диапазоне частот 7-20 кГц к объемной скорости разрушения v :

$$W_{AV} = N_A / v, \text{ Дж/м}^3.$$

3. Коэффициент распределения энергии при разрушении K_R определяется как отношение мощности акустических колебаний N_A в диапазоне частот 7-20 кГц к реализуемой мощности N_p :

$$K_R = N_A / N_p.$$

При стандартизации условий разрушения акустический спектр, удельная акустическая энергия и коэффициент распределения энергии являются константами горной породы и характеризуют механизм ее разрушения.

Физические основы метода. В результате комплекса исследований ВИТРа по разрушению горных пород бурением с использованием акустических измерений [1, 2, 9, 14] установлено, что спектральный анализ акустических колебаний, регистрируемых в призабойной зоне, позволяет выделить "акустический шум разрушения", находящийся в диапазоне 7-20 кГц. Генезис регистрируемых колебаний связан с колебательным характером взаимодействия резцов (алмазов) породоразрушающего инструмента с забоем скважины и развитием трещин в горной породе.

Каждый акт взаимодействия алмаза с забоем сопровождается возникновением акустического сигнала. Частота f взаимодействия алмаза с забоем определяется его скоростью движения $v_{окр}$ и диаметром d скалываемой частички горной породы:

$$f = v_{окр} / d, \text{ Гц.}$$

При диаметре d скалываемой частички, равном среднему диаметру алмаза, частота f колеблется в пределах от 696 (при размере алмаза

1250 мкм и окружной скорости движения алмаза 0,87 м/с) до 28 938 Гц (при размере алмаза 160 мкм и окружной скорости движения алмаза 4,63 м/с). При армировании коронок алмазным сырьем размером 400-1000 мкм и использовании окружных скоростей от 2 до 4 м/с алмазы при бурении будут взаимодействовать с забоем с частотой в несколько килогерц. Поэтому параметры акустического спектра связаны с амплитудой и частотой взаимодействия алмазов с забоем.

Тип акустического спектра (рис. 1) определяется индивидуальными особенностями механизма разрушения горной породы, которые, в свою очередь, зависят от структурно-текстурных особенностей и минерального состава горной породы [9]. Осадочные горные породы в целом характеризуются низкочастотным акустическим спектром, невысокими значениями удельной акустической энергии W_{AV} , магматические породы – высокими значениями W_{AV} и средне-высокочастотным спектром, метаморфические породы – большим разбросом в значениях W_{AV} и параметров акустического спектра. При этом для каждой горной породы существует предельная частота, ограничивающая расширение акустического спектра, что указывает на существование "естественного" механизма разрушения горной породы.

Испытания более двух тысяч образцов горных пород с различных месторождений России и стран СНГ, представляющих все генетические комплексы горных пород, показали возможность использования метода во всем диапазоне горных пород, разрушаемых механическим способом.

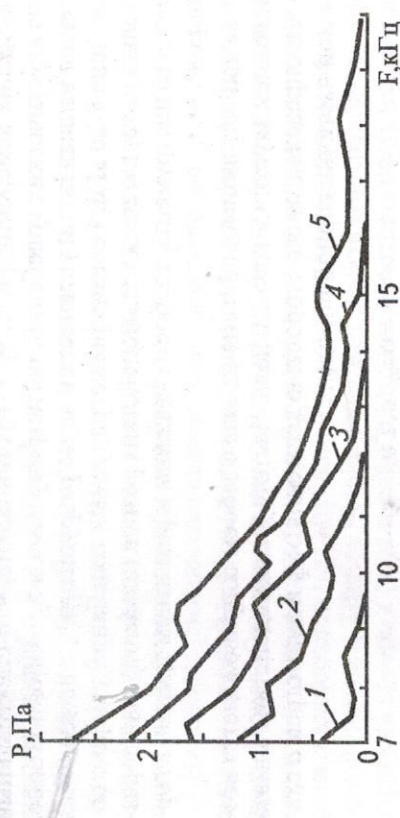


Рис. 1. Акустические спектры при резании филлита (1), перидотита (2), габбро (3), гнейса (4) и кварцита (5)

Технические средства и методика испытаний. Для испытаний образцов горных пород методом акустико-спектральной диагностики механизма разрушения в ВИГРе разработаны лабораторные технические средства: установка УОБ-1 и прибор ПОБ-1 (рис. 2). Принцип их действия заключается в резании образца горной породы алмазным кругом и измерении спектра воздушного шума и реализуемой мощности. Основное отличие заключается в реализуемом режиме нагружения горной породы: в установке УОБ-1 резание горной породы осуществляется с постоянным усилием, а в приборе ПОБ-1 – с постоянной скоростью. Выбор резания в качестве нагрузочного режима основан на сходстве вида воздействия на горную породу при бурении и резании.

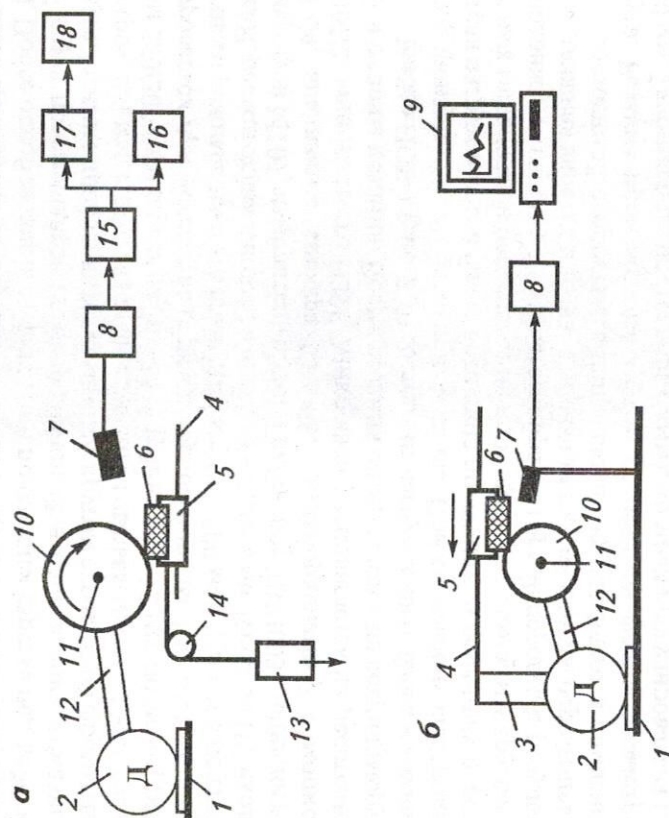


Рис. 2. Схемы работы установки УОБ-1 (а) и прибора ПОБ-1 (б)

1 – основание; 2 – приводной двигатель; 3 – передаточный механизм подвижной каретки; 4 – направляющая; 5 – подвижная каретка; 6 – образец горной породы; 7 – микрофон; 8 – измеритель шума и вибрации ВШВ-003; 9 – ЭВМ; 10 – алмазный круг; 11 – шпиндель; 12 – передаточный механизм шпинделя; 13 – груз; 14 – ролик; 15 – магнитограф; 16 – осциллограф; 17 – анализатор спектра; 18 – самописец

Кроме этого, резание керна вдоль образующей позволяет избежать предварительной подготовки образца горной породы. Отбор образцов производится из керна горных пород, полученного при бурении вращательным способом. Размеры образца (керн): длина 5-6 см при бурении коронками диаметром 46-93 мм.

Установка УОБ-1 (см. рис. 2, а) состоит из модернизированного камережного станка СКР-1 (нагружающего блока) и измерительной системы (ИС). Механизм подачи станка состоит из подвижной каретки 5 с захватом образца горной породы, направляющей, ролика 14 и груза 13. Усилие подачи регулируется массой груза. При включении электродвигателя станка 2 вращение посредством ременного передаточного механизма 12 передается на шпиндель 11 с алмазным кругом 10. После освобождения от фиксации подвижная каретка под действием груза перемещается по направляющей в направлении алмазного круга. Резание производится алмазным кругом сегментной формы диаметром 304 мм, армированным алмазным сырьем марки АС-80, размером 250/200 мкм на связке М6-15. Глубина реза 12 мм, но может регулироваться при установке образца горной породы. Параметры нагрузочного режима: частота вращения круга – 500 мин⁻¹; усилие подачи – 5 даН, расход охлаждающей жидкости – 2 дм³/мин. В состав ИС входят микрофон М101, измеритель шума и вибрации ВШВ003, осциллограф С1-64, анализатор спектра СК4-58, двухкоординатный самописец Н307/2, киловаттметр Н395. Микрофон располагается на расстоянии 0,5 м от зоны резания. Время резания определяется по секундомеру.

Прибор ПОБ-1 (рис. 2, б) состоит из нагружающего блока и компьютеризированной измерительной системы. При включении электродвигателя нагружающего блока вращение посредством ременных передаточных механизмов передается на шпиндель 11 с алмазным кругом 10 и подвижную каретку 5 с захватом образца горной породы. В результате подвижная каретка и захват с образцом горной породы перемещаются с постоянной скоростью в направлении вращающегося алмазного круга. Резание производится кругом сегментной формы диаметром 100 мм. Глубина реза постоянная (6 мм), но может регулироваться при установке образца горной породы. Параметры нагрузочного режима: скорость относительного перемещения круга и образца горной породы – 0,002 м/с; частота вращения круга – 1400 мин⁻¹. Охлаждение круга осуществляется погружением в емкость с технической водой. ИС включает персональный компьютер, комплекс программно-аппаратных средств, датчики и комплект соединительных кабелей. Для измерения воздушного шума использован микрофон М101, входящий в комплект

измерителя шума и вибрации ВШВ-003, для измерения реализуемой мощности – измерительный преобразователь Е848/6-М1. ИС осуществляет: ввод сигналов с датчиков в ЭВМ; расчет параметров сигналов и показателей буримости; сравнение показателей буримости с установленными граничными значениями W_{AV} и K_p и спектр-масками категорий горных пород; выведение результатов расчетов на экран монитора, формирование и печать протокола испытаний.

Показатели буримости определяются следующим образом.

1. Удельная акустическая энергия W_{AV} , выделяющаяся в диапазоне 7-20 кГц при разрушении единицы объема горной породы, как отношение среднеквадратичного значения (СКЗ) звукового давления p^2 к объемной скорости разрушения горной породы v :

$$W_{AV} = p^2 / v, \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3.$$

2. По величине амплитуды на частоте 15 кГц в акустическом спектре “естественные” механизмы разрушения горных пород классифицированы на три типа: высокочастотный (ВЧ) – свыше 70 дБ (относительно нулевого уровня 20 мкПа), среднечастотный (СЧ) – от 50 до 70 дБ и низкочастотный (НЧ) – меньше 50 дБ.

3. Коэффициент распределения энергии при разрушении K_p определяется как отношение СКЗ звукового давления p^2 к мощности N_p , реализуемой при разрушении:

$$K_p = p^2 / N_p, \text{ Па} / \text{Вт}.$$

Использование нового метода в классификации горных пород по буримости и по влиянию на износ породоразрушающего инструмента

Определение категорий горных пород по буримости по классификации ЕНВ. Результаты исследований зависимостей между W_{AV} и прочностными свойствами горных пород, механической скоростью бурения и ресурсом алмазных коронок позволяют утверждать, что удельная акустическая энергия W_{AV} является качественно новым свойством горной породы “прочность на воздействие вращающимся породоразрушающим инструментом” и может использоваться в качестве показателя буримости горной породы [3, 6]. Механическая скорость бурения и ресурс коронки уменьшаются при увеличении W_{AV} разрушаемой горной породы (рис. 3). Диапазон изменения W_{AV} при испытании образцов гор-

прочные ($W_{AV} - 16-26 \text{ Па} \cdot \text{с/м}^3$);
высокопрочные ($W_{AV} - 26-37 \text{ Па} \cdot \text{с/м}^3$);
сверхпрочные ($W_{AV} - \text{свыше } 37 \text{ Па} \cdot \text{с/м}^3$).

Соотношение W_{AV} и кате-

Таблица 16

Соотношение показателя W_{AV}
и категорий горных пород
по буримости ЕНВ

Категория (группа) горных пород по буримости ЕНВ	Диапазон изменения $W_{AV} \times 10^6, \text{ Па} \cdot \text{с/м}^3$
I	Менее 0,01
II	0,01-0,1
III	0,1-1,0
IV	1-4
V	4-8
VI	8-12
VII	12-16
VIII	16-21
IX	21-26
X	26-31
XI	31-37
XII	Более 37

горных пород по буримости ЕНВ установлено эмпирическим способом путем разделения диапазона изменения W_{AV} на 12 поддиапазонов (табл. 16). Результаты испытаний горных пород по методу ВИТР-А качественно совпадают с группированием горных пород в классификации ЕНВ. Классификация некоторых типичных представителей горных пород по категориям буримости ЕНВ и по показателю W_{AV} приведена в табл. 17. Первая категория формируется за счет рыхлых осадочных горных пород (песок, растительный слой и др.). Во II-V категориях находятся песчано-глинистые (глины, су-глинки, алевролиты и др.) и слабометаморфизованные (сланцы глинистые и др.) осадочные горные породы. VI-VII категории формируются за счет осадочных (известняк), вулканогенно-осадочных (туфопесчаник, туф и др.) и метаморфизованных (филлит, метаморфизованный известняк и др.) горных пород. В VIII-XI категории входят в основном магматические (габбро, граниты и др.) и метаморфические (кварциты, гнейсы и др.) горные породы. К XII категории по результатам испытаний отнесены монолитно-сливные метаморфические горные породы (яшмы и др.).

Проведенные исследования позволили выдвинуть предложение об определении уточненного значения буримости по методу ВИТР-А с точностью до сотых долей [6]. Уточненная буримость по методу ВИТР-А определяется по формуле

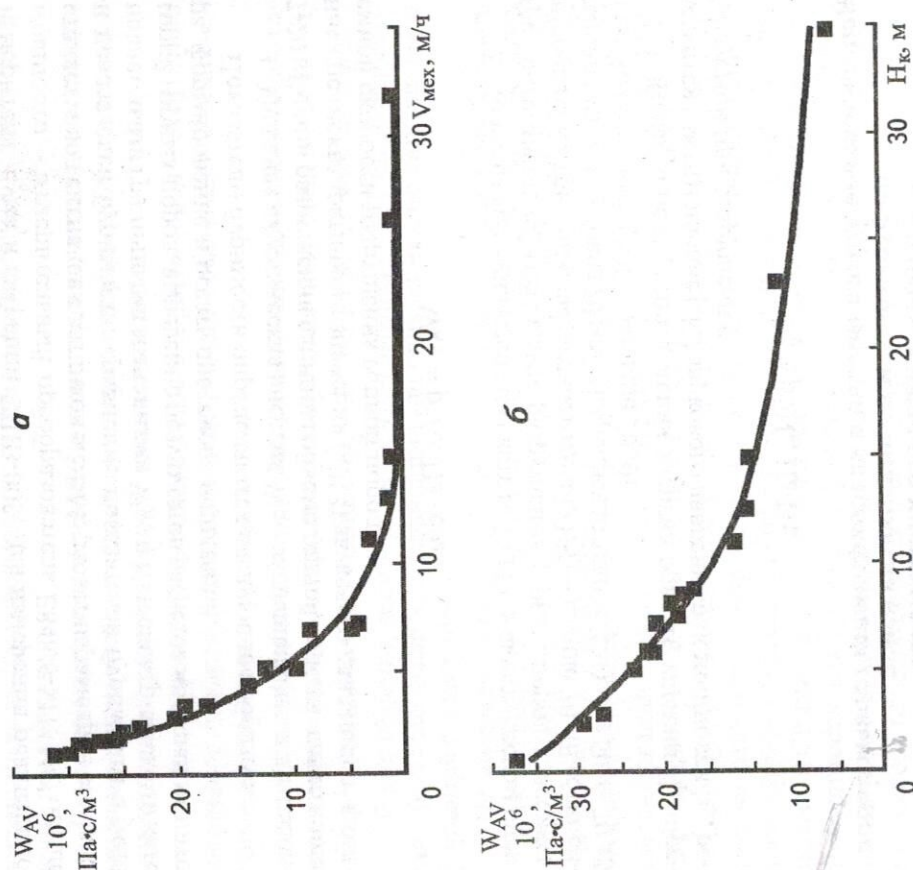


Рис. 3. Зависимости между удельной акустической энергией W_{AV} горной породы и техническими показателями бурения коронкой 01А3-59: механической скоростью бурения $V_{мех}$ (а) и ресурсом H_k (б)

ных пород на установке УОБ-1 составляет не менее 83 дБ (т.е. 14 250 раз): от 4000 $\text{Па} \cdot \text{с/м}^3$ (песок мелкозернистый) до 57 000 000 $\text{Па} \cdot \text{с/м}^3$ (кремень). По прочности на воздействие вращающимся инструментом (по показателю W_{AV}) горные породы разделены на 5 групп: малопрочные ($W_{AV} - \text{менее } 8 \text{ Па} \cdot \text{с/м}^3$); среднепрочные ($W_{AV} - 8-16 \text{ Па} \cdot \text{с/м}^3$);

Классификация горных пород по показателю буримости W_{AV} удельной акустической энергии, выделяющейся при разрушении

Категория (группа) пород по буримости ЕНВ	Значение показателя $W_{AV} \cdot 10^6$, Па · с/м ³	Типичные представители горных пород (значение показателя W_{AV})
I	< 0,01	Ил влажный (< 0,0037), песок мелкозернистый (< 0,0042), торф (0,0047), растительный слой (< 0,0045), супесь (< 0,0057)
II	0,01-1	Глина песчаная (0,024), песок кварцевый глинистый (0,048), суглинок (0,056), глина (0,065), алевролит (0,07)
III	0,1-1	Глина серо-зеленая (0,18), глина аргиллитоподобная (0,45), глина алевролитовая (0,53), аргиллит тонкозернистый (0,61), алевролит тонкозернистый (0,99)
IV	1-4	Песчаник (1,05), уголь (1,9), сланец песчаный (2,0), известняк доломитизированный (2,7), мел (3,1), алевролит кварцсодержащий (3,4), гипс (3,5), аргиллит (3,9)
V	4-8	Сланец глинистый (5,3), песчаник (5,6), мергель (5,6), песчаник (5,8), змеевик (7,7)
VI	8-12	Сланец углистый (8,5), перидотит (8,7), туфопесчаник ожелезненный (9,2), известняк (9,4), сланец песчаноглинистый (9,7), мрамор (11,0), доломит (11,7)
VII	12-16	Известняк мраморизованный (12,1), туф лацитового состава (12,1), скань гранатовый (12,1), перидотит (13,2), филлит (14,9), песчаник (15,1), мрамор (15,9)
VIII	16-21	Туфогравелит (16,2), песчаник кварцитовидный (16,3), туфопесчаник (17,7), микроклин (18,2), иттибрит лацитового состава (18,3), амфиболит (18,4), гранит каолинизированный (19,1), габбро-норит (19,7), известняк (20,1)
IX	21-26	Известняк (21,4), пегматит (21,8), дицит окварцованный (22,8), габбро (23,2), гнейс гранатово-биотитовый (24,0), гранито-гнейс (24,4), гранит биотитовый (24,9), диорит кварцевый (25,9), габбро-диабаз (25,9)

1	2	3
X	26-31	Гнейс окварцованный (26,6), гранит биотитовый (26,6), мигматит-гранит (26,8), фелзит окварцованный (27,2), гранодиорит (28,5), кварцит железистый (28,7), аплит (29,7), плагиогранит (29,8), кварц жильный (30,1), кварцит гематитовый (30,9)
XI	31-37	Яшмоид красный (31,2), кварцит (32,1), песчаник окварцованный мелкозернистый (32,5), кварцит розовый (33,8), кварцит мелкозернистый (34,6), роговик гематито-магнетитовый (36,7), джеспилит (37,0)
XII	>37	Яшма (39,0-40,3), джеспилит (40,3), роговик гематито-магнетитовый (43,5), кремнь (57,0)

$$N_{\text{ВИТРА}} = N + (W_{AV} - W_{AVH}) \Delta W_{AV},$$

где $N_{\text{ВИТРА}}$ – уточненный показатель буримости горной породы; N – показатель буримости горной породы с точностью до целых чисел; W_{AVH} – показатель буримости на нижней границе диапазона значений для данной группы пород, Па · с/м³; ΔW_{AV} – диапазон изменения показателя буримости для данной группы пород, Па · с/м³.

Классификация горных пород по влиянию на износ алмазного инструмента. Физической основой классификации горных пород по влиянию на износ алмазного инструмента явились следующие выводы [1, 7, 8].

1. Различные виды износа алмазных коронок являются следствием определенных комбинаций динамических и тепловых нагрузок, возникающих на забое. Отсюда следует, что более правильно говорить не об абразивных свойствах горной породы, а о характере механизма разрушения, который возникает в результате силового воздействия на горную породу вращающимся алмазным инструментом.

2. Чем выше динамические нагрузки, воспринимаемые алмазами, тем больше удельная акустическая энергия W_{AV} , выделяющаяся при разрушении, и меньше долговечность (ресурс) алмазов.

3. Заполирование алмазного инструмента происходит вследствие реализации механизма разрушения, характеризующегося очень высокой частотой взаимодействия алмазов с забоем при высоких динамических

Классификация механизмов разрушения горных пород по степени влияния на износ алмазной коронки

Группа	Акустические характеристики механизма разрушения			Характер влияния механизма разрушения на износ коронки		Типичные горные породы
	$W_{AV} \times 10^6, \frac{Па \cdot с}{м^3}$	$K_p \times 10^2, \frac{Вт}{Па}$	Тип спектра	Абразивность к алмазу	Абразивность к матрице	
1	1-8	Любой	НЧ	Низкая	Очень низкая	Очень низкая
2	8-16	До 3	СЧ	Средняя	Низкая	Низкая
3	16-26	Свыше 5	СЧ	Высокая	Сверхвысокая	Низкая
4	26-31	3-5	ВЧ	Высокая	Средняя	Средняя
5	31-37	До 3	ВЧ	Очень высокая	Низкая	Высокая
6	Свыше 37	До 3	ВЧ	Сверхвысокая	Очень низкая	Сверхвысокая
						Алеврит, аргиллит, угли, известняк, туф, песчаник, гипс, галит, мергель, Мрамор, известняк, фидлит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранитоиды
						Лавит, перидотит, доломит, амфиболит, Песчаник, перидотит, контломерат, затронутые выветриванием гранито

и тепловых нагрузках. Предположенность к заполированию алмазного инструмента увеличивается при одновременном увеличении W_{AV} и снижении коэффициента K_p . Снижение коэффициента K_p указывает на рост тепловыделения при разрушении, а насыщенность спектра высокочастотными составляющими – на высокую частоту взаимодействия алмазов с забоем. По степени предрасположенности к заполированию алмазного инструмента, на основе соотношения между показателями W_{AV} и K_p , горные породы разделены на 5 групп – очень низкая, низкая, средняя, высокая, очень высокая.

4. Механизм разрушения, характеризующийся повышенным абразивным воздействием к матрице, выделяется по высокому значению коэффициента K_p . Абразивность матрицы алмазного инструмента зависит от крупности, твердости и остроты высвобождаемых при разрушении забоя минеральных зерен. Чем больше твердых, крупных и острых частиц породы высвобождается при разрушении забоя, тем выше скорость изнашивания связки матрицы. Высокое значение коэффициента K_p указывает на преобладание при разрушении затрат энергии на упругие деформации, нарушение сплошности и отсутствие сминания частиц горной породы вследствие их высокой твердости.

По абразивности к связке алмазного инструмента (на основе соотношения между показателями W_{AV} и K_p) породы разделены на 5 групп – малоабразивные, среднеабразивные, абразивные, сильноабразивные; группа “сверхабразивных” горных пород формируется за счет трещиноватых, разрушенных пород высокой и сверхвысокой прочности.

На основе W_{AV} , K_p и типа акустического спектра типизированы “естественные” механизмы разрушения горных пород по характеру влияния на износ алмазной коронки (табл. 18). Разработанная классификация апробирована и хорошо согласуется с результатами обработки алмазного инструмента в производственных условиях.

КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ФОРМАЦИЯМ ДЛЯ ВЫБОРА ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Классификационные признаки новой классификации

Многолетний опыт ВИТР в области геологоразведочного бурения показывает, что существуют группы горных пород с определенным влиянием на износ породоразрушающего инструмента. При бурении алмазы и матрица могут изнашиваться с различной скоростью. Распро-

Принципы построения классификации горных пород ВИТРА

Необходимость объединенной классификации горных пород для вращательного бурения обусловлено частичным перекрытием областей применения алмазного и твердосплавного бурения.

В предлагаемой классификации (табл. 19, гр. 1-3) устанавливается восемь формаций горных пород [4, 5]. Графы 4-10 таблицы характеризуют формации горных пород по физико-механическим свойствам и степени трещиноватости, а в графах 11-15 приведены конструктивные параметры, наличие и рекомендуемые типы породоразрушающего инструмента. Коды формаций изменяются от 1 до 8.

Формация с кодом 1 формируется за счет мягких горных пород. Типичными представителями являются: ил, торф, глина, гипс, мел, мягкий известняк, очень мягкий песчаник, эвапориты, латериты, песок.

Формация с кодом 2 формируется за счет мягких и средней твердости, перемежающихся горных пород. Типичными представителями являются: песок, песчаник слабый, мягкий сланец, соль, алевролит, аргиллит, плотный гипс, доломит, маргитовые железные руды, мерзлая почва, антрацит, апатитовая руда.

Формации 1 и 2 являются областью применения твердосплавного инструмента. Выделение только двух формаций основано на опыте ВИТРА в бурении осадочных горных пород. Как правило, разрезы скважин, пробуренных в осадочной толще, характеризуются значительной перемежаемостью горных пород, что делает достаточно сложным использование узкоспециализированного твердосплавного инструмента.

Формация с кодом 3 формируется за счет горных пород средней твердости (до твердых), абразивных, средне- и крупнозернистых, трещиноватых. Типичными представителями являются: песчаник, пегматит, конгломерат, выветрелые граниты, риолит, сиенит, диорит, керамофир, кварц-касситеритовая порода.

Формация с кодом 4 формируется за счет горных пород от средней твердости до твердых, среднеабразивных, среднетрещиноватых, трещиноватых, монолитных или слаботрещиноватых. Типичными представителями являются: пегматит, габбро, монзонит, гранодиорит, сиенит, гранит, пироксенит, гнейс, миаскит, перидотит, лабрадорит, песчаник, кремнистый сланец, мелкогалечный конгломерат, биотитовый гнейс, йолит, ургит.

Формация с кодом 5 формируется за счет твердых, мелко- и среднетрещиноватых, монолитных горных пород. Типичными представителями являются: микрогранит, андезит, базальт, гнейс, диабаз, порфирит,

страненными видами износа алмазных коронок являются: чрезмерное обнажение алмазов, заполирование алмазов, заполирование алмазов и матрицы (Марамзин А.В., Блинов Г.А., 1977). Очевидно, что при со-блюдении нормального технологического режима общая скорость изна-носа матрицы по высоте зависит от соотношения скоростей изнашива-ния алмазов и матрицы, которые, в свою очередь, определяются комп-лексом свойств разбухающей горной породы.

Термин "**формация горных пород**" с точки зрения технологии буре-ния скважин (в отличие от геологического понятия термина формация) можно определить как "совокупность горных пород, характеризующих-ся близким влиянием на износ породоразрушающего инструмента".

Для типизации формаций необходимо использовать показатели, влияние которых на износ инструмента доказано практикой бурения: твердость, абразивность, зернистость, трещиноватость, нарушен-ность, способность заполировывать алмазный инструмент.

Твердость - способность горной породы сопротивляться внедре-нию в нее другого тела.

Абразивность - способность горной породы изнашивать породо-разрушающий инструмент в процессе бурения.

Зернистость - совокупность расположения частиц в горной поро-де, которые могут различаться по своему внутреннему строению, фор-ме или размеру; по размеру частиц различают породы мелкозернистые (размер частиц до 1 мм), среднетрещиноватые (от 1 до 3 мм), и крупнозер-нистые (свыше 3 мм).

Трещиноватость - совокупность трещин различного происхожде-ния и разных размеров. Для определения степени трещиноватости гор-ной породы предложено использовать удельную кусковатость зерна K_y - число кусков зерна на 1 м его длины (см. табл. 15).

Нарушенность - осложненность массива горной породы геологи-ческими нарушениями. К нарушениям можно отнести разрывы и складки, внедрение магматических тел, пльуны, карсты и др. Влия-ние нарушения массива горной породы на бурение скважины связа-но с появлением осложнений в виде поглощений промывочной жидко-сти, обрушения и обвалов стенок скважины и необходимостью разбу-ривания завалов и т.д.

1	2	3	4	5	6	7	8
5	Твердые, мелко-среднезернистые, монолитные	Микрогранит, андезит, аплит, базальт, диорит, гнейс, диорит, порфирит, баз, порфирит, березит, гранодиорит, долерит, оливинит, порфирит, березит	21-26	<5	ВЧ	3000-4500	18-45 (1,0-2,0)
6	Очень твердые, монолитные, мелкозернистые, неабразивные, полирующие	Кварцит, железистый кварцит, таконит, роговик, аплит, диорит, ороговикованный тонкозернистый альбитофир, мелкозернистый амфиболит, адамеллит, окремненные песчанники и сланцы	26-31	<3	ВЧ	4500-6000	18-30 (2,0-2,5)
7	Сверхтвердые, монолитные, мелкозернистые, неабразивные, полирующие	Кварц сливной, джеспилит, кремнистый сланец, яшма, кремль, микрокварцит, роговик окремненный	>31	<3	ВЧ	6000-8000	10-18 (2,5-3,0)
8	Сверхабразивные, средние и крупнозернистые, сильноокремненные, полирующие	Песчаник кварцевый, гранит, кварцит, гранатовый гнейс, эгириновый сиенит, окарнованные и окремненные сланцы, пегматит	16-31	>5	СЧ, ВЧ	2000-6000	65-90 (2,0-3,0)

Примечания. 1) ОАК – однослойные алмазные коронки; ТС – твердосплавные коронки по методу Л.И. Барона и А.В. Кузнецова; К_{абр} – коэффициент абразивности по методу Н.И. Любимова.

березит, диабаз, гранодиорит, аплит, долерит, оливинит, порфирит, березит, липарит, тонкозернистые зеленокаменные породы.

Формация с кодом 6 формируется за счет очень твердых, монолитных, мелкозернистых, неабразивных, полирующих горных пород. Типичными представителями являются: кварцит, железистый кварцит,

9	10	11	12	13	14	15
VIII-IX	Монолитные (1-5)	ИАК ОАК	Средней твердости (88-93 HRC) 25-35 HRC	800/630-1000/800 мкм от 200-400 до 90-60 шт/кар	В стадии разработки (предусмотрена в планах ВИТР)	И4ДП 02ИЗГ 02И4Г (в порядке исключения)
X-XI	Монолитные (1-5)	ИАК	Мягкая (84-88 HRC)	500/400-800/630 мкм	Отсутствует (требуется разработка)	И4ДП 02ИЗГ 02И4Г (в порядке исключения)
XI-XII	Монолитные (1-5)	ИАК	Очень мягкая (до 84 HRC)	500/400 мкм	Отсутствует (требуется разработка)	И4ДП 02ИЗГ 02И4Г (в порядке исключения)
VII-XI	Сильноокремненные (>31)	ИАК ОАК	Твердая (30-40 HRC) и очень твердая (45-55 HRC)	400-120 шт/кар (1000/800 мкм) 50-30 120-90 шт/кар	Требуется разработка (предусмотрена в планах ВИТР)	И4ДП 02ИЗГ 02И4Г 07А3

кронки; ИАК – импрегнированные алмазные коронки; 2) α – коэффициент абразивности по Н.И. Любимова.

таконит, роговик, аплит, диорит, ороговикованный тонкозернистый альбитофир, мелкозернистый амфиболит, адамеллит, окремненные песчаники и сланцы.

Формация с кодом 7 формируется за счет сверхтвердых, монолитных, мелкозернистых, неабразивных, полирующих горных пород. Типичными представителями являются: кварцит, железистый кварцит,

пичными представителями являются: кварц сливной, джеспилит, кремнистый сланец, яшма, кремень, микрокварцит, окремненный роговик.

Формация с кодом 8 формируется за счет сверхабразивных, средних- и крупнозернистых, сильнотрещиноватых, нарушенных горных пород. Типичными представителями являются: песчаник кварцевый, гранит, кварцит, гранатовый гнейс, эгириновый сиснит, окварцованные и окремненные сланцы, пегматит.

Формация с кодом 8 специально выделена, ибо в породах в нее входящих из-за нарушенности массива и абразивности горных пород происходит повышенный износ алмазного инструмента. Эта формация по составу и свойствам горных пород является (в отличие от других) *комплексной*, так как в ней отражено несколько равнодоминирующих признаков по их влиянию на процесс бурения.

Формации 3-7 являются областью применения алмазного инструмента. В целом с ростом кода формации происходит увеличение твердости, уменьшение зернистости, снижение нарушенности и трещиноватости, увеличение способности к заполированию алмазного инструмента. Очевидно, что для каждой формации горных пород существует рациональное сочетание конструктивных параметров алмазного инструмента: тип матрицы, размер, насыщенность и качество алмазов, что нашло отражение в графах 11-13 табл. 19.

Код формации горных пород является номером ссылки, которую можно использовать для сравнения с кодовой системой каждого производителя технических средств бурения. Изготовитель инструмента выбирает номер кода, который наиболее подходит к его продукции. При выборе инструмента для бурения, фирма-производитель буровых работ (заказчик), исходя из имеющегося опыта бурения, выбирает код формации и сообщает его изготовителю инструмента.

Новая классификация рекомендуется для включения в нормативно-методические документы, каталоги, справочники и в качестве пособия для выбора технических средств бурения (порodоразрушающего инструмента, колонковых и бурильных труб и т.д.).

Методика определения типа и кода формации горной породы

Для определения типа и кода формации горной породы следует использовать следующие характеристики:

трещиноватость и нарушенность геологического разреза;
прочность (твердость) горной породы;

абразивность горной породы;

структуру (зернистость) горной породы.

При определении показателей твердости, абразивности и зернистости рекомендуется использовать лабораторные методы, как более точные и надежные. Наиболее точную информацию о характере влияния горной породы на износ породоразрушающего инструмента и кода формации горной породы даст разработанный ВИТР метод акустико-спектральной диагностики механизма разрушения.

Трещиноватость и нарушенность горной породы проявляются в степени раздробленности зерна на столбики и обломки. В качестве основного количественного показателя трещиноватости принята удельная кусковатость зерна K_y (Васильев В.И., Блинов Г.А. и др., 1987). Удельная кусковатость зерна K_y представляет число кусков (обломков, столбиков) на 1 м выхода зерна и определяется прямым подсчетом после подъема зерна на поверхность.

Прочность (твердость) горной породы. В качестве основных количественных показателей твердости горной породы приняты твердость по штампу (по Л.А.Шрейнеру) и удельная акустическая энергия, выделяющаяся при разрушении (метод ВИТР-А).

Абразивность горной породы рекомендуется определять методами ВИТР-А, Н.И.Любимова, а также Л.И.Барона и А.В.Кузнецова.

В производственных условиях, абразивность горной породы следует оценивать по виду износа породоразрушающего инструмента. При чрезмерном обнажении алмазов, размыве матрицы горная порода имеет повышенную абразивность. Если на торце алмазной коронки алмазы имеют плоские площадки со стекляным блеском и при бурении наблюдается резкое снижение механической скорости или преращение углубки, то горная порода относится к полирующим.

Зернистость горной породы. В лабораторных условиях зернистость породы следует определять в результате петрографических исследований шлифов. При размере зерен до 1 мм порода является мелкозернистой, от 1 до 3 мм – среднезернистой, свыше 3 мм – крупнозернистой. На практике зернистость горной породы можно определить визуально или с помощью линейки, приложенной к свежему сколу или образующей зерна.

Отнесение горной породы к определенной формации производится в соответствии с табл. 19.

При отсутствии возможности выполнить лабораторные исследования рекомендуется использовать визуальные и другие традицион-

ные методы анализа вида износа породоразрушающего инструмента, зернистости, абразивности, твердости и трещиноватости горной породы (Барон Л.И. и др., 1962; Гинзбург И.М., Оношко Ю.А., 1983; Любимов Н.И., 1977).

Апробация классификации

Апробация вновь разработанной классификации осуществлялась ВИТРОМ в двух направлениях:

в НИОКР при создании новых типов породоразрушающего инструмента;

в производственных условиях при классификации по формациям горных пород участков работ производственно-геологических организаций для разработки рекомендаций по рациональным типам породоразрушающего инструмента.

В результате работ в первом направлении на базе классификации разработан сводный (общий) типаж породоразрушающего инструмента для вращательного колонкового бурения и "малый" типаж алмазного породоразрушающего инструмента.

Сводный типаж (см. табл. 19) построен на принципе обеспечения для каждой формации горных пород оптимальной комбинации конструктивных параметров инструмента, обеспечивающей повышение его ресурса и снижение вероятности развития аномальных видов износа.

Малый типаж (табл. 20) принят ВИТРОМ как базовый документ для разработки и поставки на производство породоразрушающего инструмента, который позволит существенно улучшить показатели бурения уже в ближайшее время.

В качестве примера апробации классификации в производственных условиях рассмотрим результаты работ ВИТРА на участке работ Печенгской КГРЭ - Печенгском рудном поле, где характер влияния горной породы на износ породоразрушающего инструмента и код формации горной породы определялся методом акустико-спектральной диагностики механизма разрушения.

На испытания были представлены образцы горных пород Печенгского рудного поля: кварц, микрогранит, гнейс, габро, гнейсогранит, мигматит, песчаник, перидотит, филлит и образцы горных пород без названия. Образцы представляли собой керны диаметром от 31,1 до 42,2 мм, длиной от 5 до 10 см.

Испытания образцов горной породы проведены на установке УОБ-1.

Типаж алмазного инструмента, предусмотренного ВИТРОМ к разработке

Код формации	Тип рекомендуемой алмазной коронки (твердость матрицы)	Типоразмер снаряда	Диаметр, мм	Число типоразмеров	Размер объемных и вставок*
1, 2	Резцовая (с резцами из СТМ и двуслойными пластинами)	Одинарная колонковая Двойная колонковая ССК	46, 59, 76, 93, 112 46, 59, 76, 93, 112 59	8 8 4	Резцы 3-5 мм, двуслойные пластины d 8,0-13,5 мм
5	Импрегнированная (88-93 НРВ)	Одинарная колонковая Двойная колонковая ССК	46, 59, 76, 93, 112 46, 59, 76, 93, 112 59	5 5 2	Алмазы - от 800/630 до 1000/800 мкм
6	Импрегнированная (84-88 НРВ)	Одинарная колонковая Двойная колонковая ССК	46, 59, 76, 93, 112 46, 59, 76, 93, 112 59, 76	5 5 2	Алмазы - от 500/400 до 800/630 мкм
7	Импрегнированная (до 84 НРВ)	Одинарная колонковая Двойная колонковая ССК	46, 59, 76, 93, 112 46, 59, 76, 93, 112 59, 76	5 5 2	Алмазы - 500/400 мкм
8	Импрегнированная, долосойная (45-55 НРС)	Одинарная колонковая Двойная колонковая ССК	46, 59, 76, 93, 112 46, 59, 76, 93, 112 59	10 10 4	Алмазы: 400-120 шт/кар, 1000/800 мкм (ИАК); 50-30... 120-90 шт/кар (ОАК)

*Всего 87 типоразмеров.

Методика испытаний заключалась в резании образца горной породы эталонным алмазным кругом при постоянной глубине реза и постоянном режиме. Режим резания: усилие подачи – 5 даН, частота вращения – 500 мин⁻¹, расход охлаждающей жидкости – 2 дм³/мин. Глубина резания 12 мм. Эталонный алмазный круг диаметром 304 мм, сегментной формы армирован алмазным сырьем марки АС-80 размером 250/200 мкм на связке М6-15.

На основе полученных при испытаниях значений удельной акустической энергии W_{AV} и коэффициента распределения энергии K_p ,

Результаты испытаний горных пород Печенгского рудного поля

Код формации	Характеристика горных пород формации	Акустические параметры механизма разрушения			Степень трещиноватости (K_p , шт/м)
		$W_{AV} \times 10^6$, Па · с/м ³	$K_p \times 10^{-2}$, Па/Вт	Тип спектра	
2	Мягкие и средней твердости, перемежающиеся	6-16	<3,0	НЧ	-
3	От средней твердости до твердых, абразивные, средне- и крупнозернистые, трещиноватые	12-26	>5,0	СЧ-ВЧ	Трещиноватые (11-31)
4	От средней твердости до твердых, среднеабразивные, средне- и крупнозернистые, слаботрещиноватые и монолитные	12-16	>3,0	СЧ	Слаботрещиноватые (6-10)
5	Твердые, мелко-среднезернистые, монолитные	21-26	<5	ВЧ	Монолитные (1-5)
6	Очень твердые, монолитные, мелкозернистые, неабразивные, полирующие	26-31	<4,5	ВЧ	Монолитные (1-5)

а также данных о трещиноватости массива горные породы отнесены к следующим формациям (табл. 21):

Формация 2 (мягкие и средней твердости, перемежающиеся) – филлит.

Для бурения рекомендованы однослойные алмазные коронки, армированные алмазами низкого или среднего качества размером 20-12 шт/кар, со средней твердостью матрицы (25-35 HRC). Промышленно освоены тип коронок – 16А3СВ. Породы данной группы относятся также к области применения твердосплавного инструмента.

Таблица 21

с рекомендуемыми параметрами алмазных коронок

Наименование испытанных горных пород с показателями (W_{AV} , K_p)	Рекомендуемые конструктивные параметры коронок			Рекомендуемые типы освоённых коронок
	Тип коронки	Твердость матрицы	Размер алмазов	
Филлит (16,0; 2,6)	ОАК	СТ (25-35 HRC)	20-8 шт/кар	16А3
Гнейс (25,8; 7,0), мигматит (21,6; 6,2), гнейсогранит (22,4; 6,2)	ИАК	Т (30-40 HRC)	400-120 шт/кар	02И4Г
Обр. 10 (12,4; 3,9), обр. 9 (13,1; 4,2), перидотит (14,0; 3,9), обр. 2 (14,1; 4,0), обр. 7 (14,8; 4,0), обр. 13 (15,5; 4,0), обр. 3 (16,1; 3,8), обр. 5 (17,4; 3,8), обр. 8 (16,5; 4,2), Габбро (25,4; 5,3), обр. 12 (24,6; 5,5)	ОАК	СТ (25-35 HRC)	90-20 шт/кар	07А3
Кварц (30,1; 4,0), микрогранит (28,2; 4,2)	ИАК	М (84-88 HRC)	800-400 мкм	И4ДП 02И3Г 02И4Г

Формация 3 (от средней твердости до твердых, абразивные, средне- и крупнозернистые, трещиноватые) – гнейс, мигматит, гнейсогранит.

Для бурения рекомендованы импрегнированные алмазные коронки, армированные алмазами высокого качества, размером 400-120 шт/кар с твердой матрицей (30-40 HRC). Промышленно освоенный тип коронок – 02И4Г.

Формация 4 (от средней твердости до твердых, среднеабразивные, средне- и крупнозернистые, слаботрещиноватые и монолитные) – обр. 10, обр. 9, перидотит, обр. 2, обр. 7, обр. 13, обр. 3, песчаник, обр. 5, обр. 8.

Для бурения рекомендованы однослойные алмазные коронки, армированные алмазами среднего качества, размером 50 – 30 шт/кар с матрицей средней твердости (25-35 HRC). Промышленно освоенный тип коронок – 07А3.

Формация 5 (твердые, мелко-среднезернистые, монолитные) – габбро, обр. 12.

Для бурения рекомендованы импрегнированные алмазные коронки, армированные алмазами высокого качества, размером 800/630 мкм с матрицей средней твердости (25-35 HRC). Промышленно освоенный тип коронок – 02И3Г.

Формация 6 (очень твердые, монолитные, мелкозернистые, неразвивные, полирующиеся) – кварц, микрогранит.

Кварц, микрогранит представляют наибольшую сложность для бурения, так как в настоящее время мягкая матрица, обеспечивающая постоянное обнажение алмазов и предотвращающая заполирование коронки при бурении, отсутствует. В виде исключения для бурения рекомендованы импрегнированные алмазные коронки типа 02И3Г, армированные алмазами высокого качества, размером 630/500 мкм. Рекомендации ВИТРа приняты технологической службой экспедиции и реализуются в практике буровых работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на изложенном, ВИТР предлагает производственным и другим предприятиям проведение испытаний образцов горных пород (а также искусственных каменных материалов) любой формы размером от 20×40×40 мм (минимальный) до 40×80×80 мм (максимальный), в результате которых определяются:

бурируемость и механическая обрабатываемость горных пород и материалов;

закономерности износа породоразрушающего инструмента (ресурс алмазов, интенсивность износа связки, предрасположенность к заполированию);

оптимальные параметры породоразрушающего инструмента для бурения и резания (качество алмазного сырья, размер алмазов, концентрация, тип связки и др.);

оптимальный режим работы породоразрушающего инструмента (частота вращения, усилие подачи, расход охлаждающей жидкости).

В течение 10 дней после получения образцов заказчику высылаются результаты испытаний с рекомендациями по оптимальным типам породоразрушающего инструмента для бурения и резания (коронкам, долотам, отрезным кругам, канатным и штрипсовым пилам и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Архипов А.Г.* Механизм разрушения горных пород при алмазном бурении и его акустико-спектральная диагностика. – СПб.: ВИТР, 2000.
2. *Архипов А.Г.* Разработка метода ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля. Автореф. дис. канд. техн. наук. – СПб.: СПбГТИ, 1993.
3. *Архипов А.Г.* Новый метод определения прочности горных пород. – В сб.: Методика и техника разведки, № 8(146). – Л.: ВИТР, 1998.
4. *Архипов А.Г., Блинов Г.А., Курочкин П.Н.* Классификация горных пород по формациям и типаж породоразрушающего инструмента. (Методические рекомендации). – СПб.: ВИТР, 1999.
5. *Архипов А.Г., Блинов Г.А., Курочкин П.Н.* Классификация горных пород по формациям и типаж алмазного породоразрушающего инструмента. – В сб.: Материалы рег. совещ. "Применение природных алмазов месторождения Республики Саха (Якутия) для целей изготовления породоразрушающего и прецизионного правящего инструмента. – СПб.: ВИТР, 2000.
6. *Архипов А.Г., Блинов Г.А., Плаевский Д.Н.* Определение буримости горных пород по показателю удельной акустической энергии, выделившейся при разрушении. – В сб.: Методика и техника разведки, № 9-10 (147-148). – СПб., ВИТР, 1999.
7. *Архипов А.Г., Гинзбург И.М., Корнилов Н.И.* Определение абразивности горных пород по характеристикам механизма разрушения. – В сб.: Методика и техника разведки, № 9-10 (147-148). – СПб.: ВИТР, 1999.
8. *Архипов А.Г., Гореликов В.Г.* Исследование распределения энергии на забое при алмазном бурении. – В сб.: Исследование технологий и внедрение новых технических средств для бурения геологоразведочных скважин. – Л.: ВИТР, 1991.
9. *Архипов А.Г., Шатров Б.Б.* Новое направление развития технических средств для определения буримости горных пород. – В сб.: Методика и техника разведки, № 2 (140). – СПб.: ВИТР, 1993.
10. *Каталог буровых долот АО "Волгабурмаш".* – Самара: АО "Волгабурмаш", 1998.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	1
Анализ классификаций горных пород, используемых ведущими зарубежными буровыми фирмами	2
Классификации горных пород в геологоразведочном деле	2
Классификации горных пород в бурении на нефть и газ	7
Развитие классификаций горных пород в Российской Федерации и странах СНГ	16
Классификации горных пород в геологоразведочном бурении и горном деле	16
Классификации горных пород в бурении на нефть и газ	23
Анализ методов приборного обеспечения классификаций горных пород	25
Традиционные методы	25
Метод акустико-спектральной диагностики механизма разрушения горной породы	30
Использование нового метода в классификации горных пород по буримости и по влиянию на износ породоразрушающего инструмента	35
Классификация горных пород по формациям для выбора породоразрушающего инструмента	41
Классификационные признаки новой классификации	41
Принципы построения классификации горных пород ВИТРА	43
Методика определения типа и кода формации горной породы	48
Апробация классификации	50
Заключение	54
Литература	55

11. *Нефтепромысловое оборудование. Краткий каталог на русском языке*. АО "Индустриалэкспорт". - Бухарест, 1996.
12. *Передовая технология оптимального проведения буровых работ*. (Каталог на русском языке). - Smith tool. Rock bits. - Хьюстон, Техас, США, 1998.
13. *Шарошечные долота фирмы ВАРЕЛ*. (Каталог на русском языке). - М.: Фирма СЕТКО, 1998.
14. *Шапоров Б.Б., Архипов А.Г., Андреев О.С.* Исследование акустических явлений при бурении скважин и их использование в геологоразведочной практике. - В сб.: *Исследование и разработка технологии и новых технических средств для геологоразведочного бурения*. - СПб.: ВИТР, 1993.
15. *Bulletin Longyear B-3100B 10 M.*, 1995.
16. *Diamond Boart Craelius product catalogue. Part 2. Printed matter № 110 175/2*, 1990.
17. *Drilling and coring Bits, Catalogue IMBM. Av. Prevale 6.1510 Moudon*. - Switzerland, 1994.
18. *Catalogue Diamond Boart*, 1989.
19. *Catalogue Hoffman diamond products 108 Cedar street - Punxsutawney, Pennsylvania 15767*, 1996.
20. *Lombard Industrial a.s.* (каталог на чешском языке). Czech Republic. 1998.
21. *Low-temperature electroplated synthetic diamond impregnated bits catalogue*. China university of geoscience, yujiahan. - China, Wuhan, 1996.
22. *Mining industrial rock bits. Catalog. Varel manufacturing company*. 1991.
23. *Shepherd R. Physical properties and drillability of main rocks. Colliery Engineering*, № 322, 1950.
24. *Shepherd R. Rotary drilling in coal mines. Colliery Engineering*, № 343, 1952.
25. *Sierba Ladislav. Novi sistem klasifikace hornin pvi vrtani*. - Prace Ustavu geologického inženýrství, № 204-217, Бена, 1972.
26. *Volume DCDMA, section G, page 2*, 1995.