

УДК 622.272 : 622.274

И.И. Айнбиндер, О.В. Овчаренко, П.Г. Пацкевич

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ОТРАБАТЫВАЕМОГО МАССИВА ПРИ ВЫЕМКЕ
ЗАПАСОВ В ОТМЕТКАХ -380/-560 М НА РУДНИКЕ
«ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ»**

Выполнена оценка напряженно-деформированного состояния горного массива при отработке кимберлитовой трубки «Интернациональная» сплошной слоевой системой разработки с оставлением рудного целика и формированием закладочного массива – искусственной кровли, под которой ведутся очистные работы с нисходящим порядком выемки.

Показано, что при таком варианте отработки запасов, в условиях формирующихся под действием горизонтальной составляющей исходного поля напряжений опасных зон вертикальных растягивающих деформаций, достигающих критических значений, и вызывающих расслоение и обрушение рудного и искусственного массивов, невозможно обеспечить безопасность ведения горных работ даже при ужесточении требований к прочности и устойчивости закладочного массива. Предложен возможный вариант технологии, предусматривающий применение высокопроизводительной камерной системы и при этом обеспечивающий полноту выемки, сопоставимую со слоевыми системами.

Ключевые слова: кимберлитовая трубка, сплошная слоевая система разработки, нисходящий порядок выемки, рудный целик, искусственный целик, закладка выработанного пространства, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование.

Кимберлитовая трубка «Интернациональная» отработана открытым способом до абсолютной отметки +85 м. Глубина карьера составляет 315 м, его размеры по поверхности - 580-600 м, по дну – 40-80 м, углы наклона бортов - 45°..

С 1999 г. выемка подкарьерных запасов на глубинах 600 - 960 м осуществляется слоевыми системами с твердеющей закладкой выработанного пространства.

Для полного перехода к выемке запасов подземным способом проведена реконструкция карьера трубки «Интернациональная», в ходе которой дно карьера было очищено от накопившейся обводненной горной массы

и произведено осушение карьера при одновременной выемке руды открытым способом в отм. +114/+85 м с последующим сооружением на дне карьера искусственного целика.

Проектными решениями предусмотрено оставление временного рудного целика в отметках +85/-190 м и выемка запасов в отм. -190/-380 м отработаны с применением слоевых систем разработки с твердеющей закладкой, в результате чего сформирован искусственный массив мощностью 180 м.

Подкарьерные запасы в отметках -380/-560 м отработывают сплошной слоевой системой разработки с нисходящим порядком выемки (рис.1).

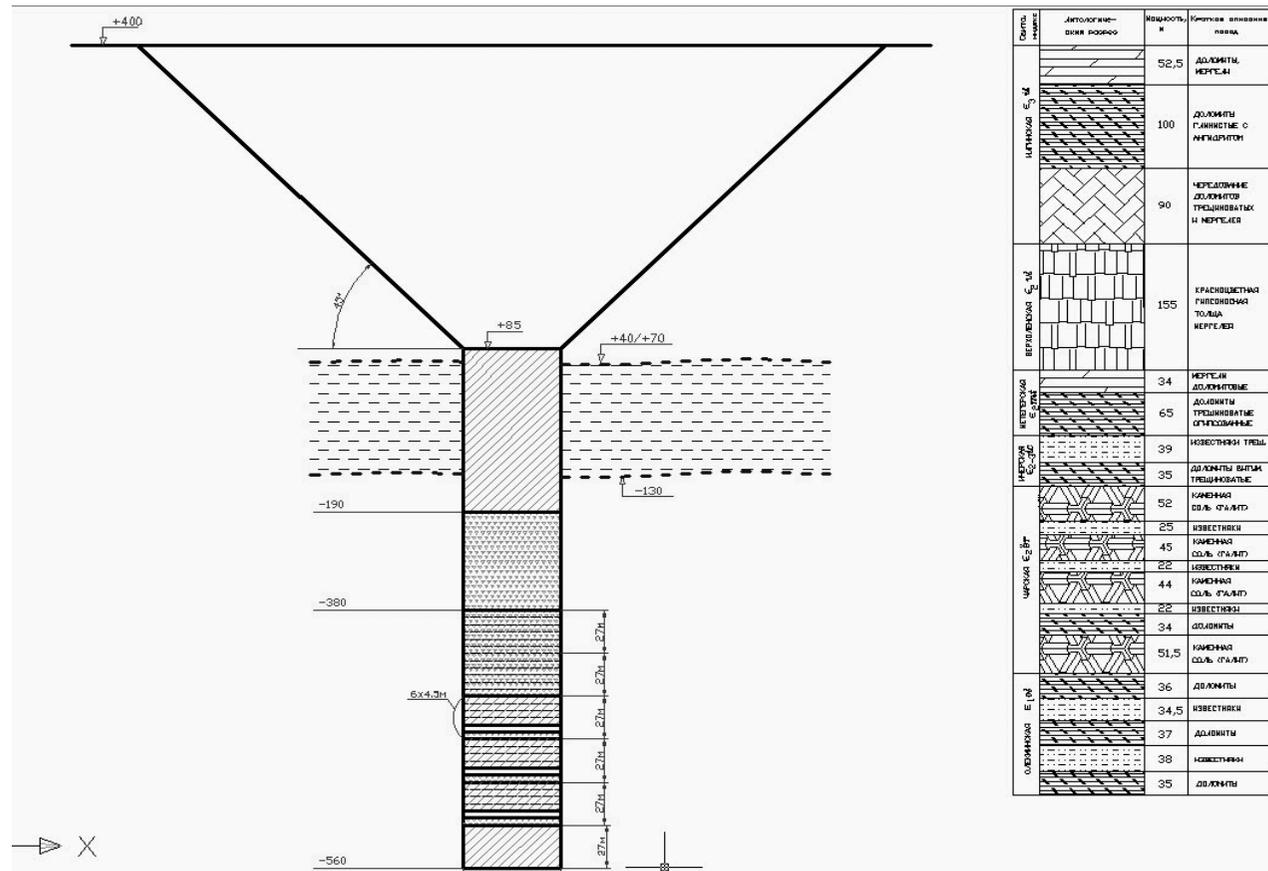


Рис. 1. Схема горных работ к началу выемки запасов в отметках -380/-560 м и геологическое строение обрабатываемого массива

Применительно к условиям разработки субвертикальных рудных тел, какими являются кимберлитовые месторождения, помимо обеспечения устойчивости кровли очистных выработок (при нисходящем порядке) или рабочей площадки (при восходящем порядке), твердеющая закладка должна обеспечивать полноту заполнения выработанного пространства и иметь высокую плотность для минимизации процессов оседания налегающих руд и пород.

Формирование искусственного массива с требуемыми характеристиками слоевыми системами разработки с нисходящим порядком выемки, является технологически сложной задачей. Невысокая прочность закладочного массива обусловлена, в частности, наличием в нем пустот, объем которых достигает 10-20 %.

При рассматриваемой схеме выемки, больших пролетах подработки существует опасность расслоения и обрушения рудного и закладочного массивов, поэтому возрастают требования к прочности и устойчивости формируемого закладочного массива – искусственной кровли, под которой ведутся очистные работы.

Для оценки устойчивости отрабатываемого и закладочного массивов в зоне ведения очистных работ проведено математическое моделирование изменения их напряженно-деформированного состояния (НДС) на этапе отработки запасов в отметках -380/-560 м, когда две верхние выемочные

секции отработаны и заложены, т.е. мощность искусственного целика над отрабатываемыми секциями равна 244 м.

Очистные работы ведутся в нисходящем порядке одновременно в трех выемочных секциях (в отметках – 434/-515 м) с опережением работ на верхних горизонтах. Каждая секция высотой 27 м отрабатывается 6 слоями мощностью по 4,5 м. Выработанное пространство полностью закладывается твердеющим материалом. При послойной выемке рудное тело подрабатывается сразу по всей площади (рис. 2).

Исходные данные для математического моделирования методом конечных элементов:

- размеры карьера в плане по дну – 60×90 м;
- угол откоса борта карьера - 45°;
- глубина карьера от поверхности – 400 м;
- мощность временного рудного целика – 190 м;
- мощность искусственного целика над выемочными секциями -244 м;
- мощность отрабатываемого слоя – 4,5 м;
- напряжения исходного поля:
 - вертикальные - определяются весом налегающих пород;
 - горизонтальные - составляют 0,7 от вертикальных.

Как показал анализ результатов расчетов, в основной части форми-

Физико-механические свойства рудного, породного и закладочного массивов

№ п/п	Породы (закладка)	Модуль деформации, $E \cdot 10^{-3}$, МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Удельный вес, ρ , г/см ³
1.	Кимберлиты	2,8	0,25	2,5
2.	Вмещающие породы (известняки, доломиты, алевролиты)	4,0	0,25	2,7
3.	Галогенно-карбонатная свита	2,85	0,35	2,85
4.	Искусственный закладочный массив	1,0	0,20	2,0

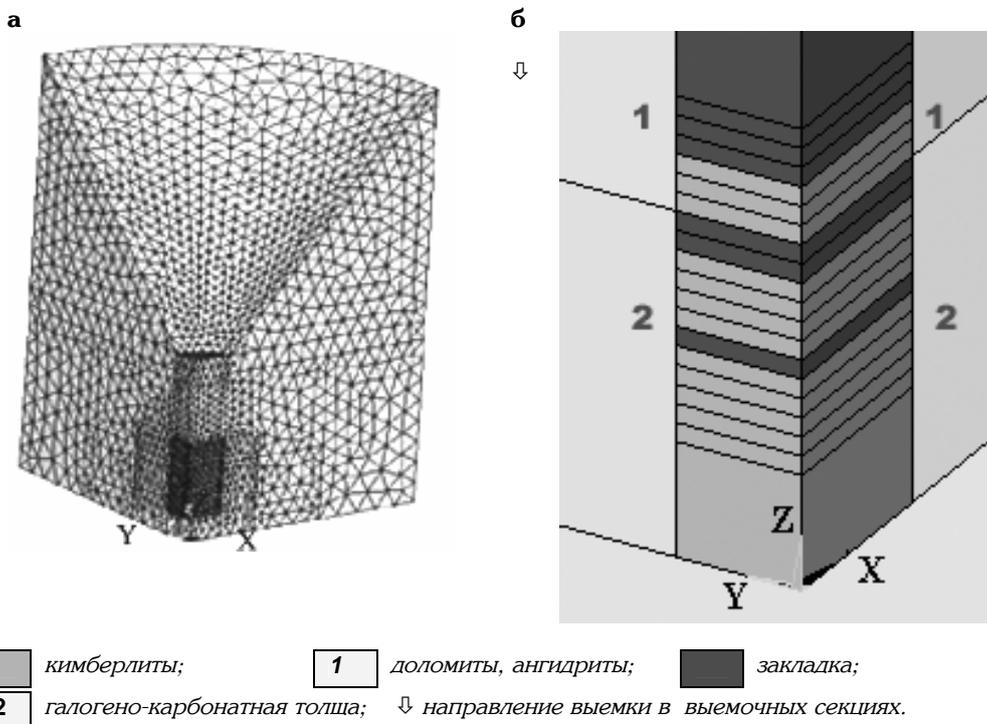


Рис. 2. Моделирование НДС горного массива в зоне ведения очистных работ: а - общий вид модели (разрез по осям трубки); б - последовательность выемки подкарьерных запасов

рующихся в трех секциях закладочных массивов возникают лишь деформации сжатия, что связано с ограничением вертикальных смещений нижележащими кимберлитами, еще не затронутыми горными работами.

Однако, в кимберлитах, залегающих под закладкой, в прилегающих заложённых слоях секций, а также в искусственном целике под дном карьера над обрабатываемыми секциями формируются зоны вертикальных растягивающих деформаций, изменяющихся в интервале $\epsilon_z = 2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$, то есть приближающихся к критическим значениям ($\epsilon_{кр} \sim (1-2) \cdot 10^{-3}$), при которых возможно расслоение как рудного, так и закладочного массивов с образованием секущих трещин и потерей сплошности массива.

Полученное в результате расчетов распределение растягивающих деформаций ϵ_z при последовательной выемке слоев в трех выемочных секциях (гор. -434/-515 м) на начальном этапе работ показано на рис. 3.

Такое распределение деформаций характерно для всех этапов отработки, когда последовательно вынимаются в нисходящем порядке и закладываются три слоя первой секции и, соответственно два и один слой второй и третьей секции, затем - четыре слоя первой секции, три и два слоя второй и третьей секции, наконец, пять слоев первой секции, четыре и три слоя второй и третьей секции, вплоть до полной выемки запасов всех трех секций.

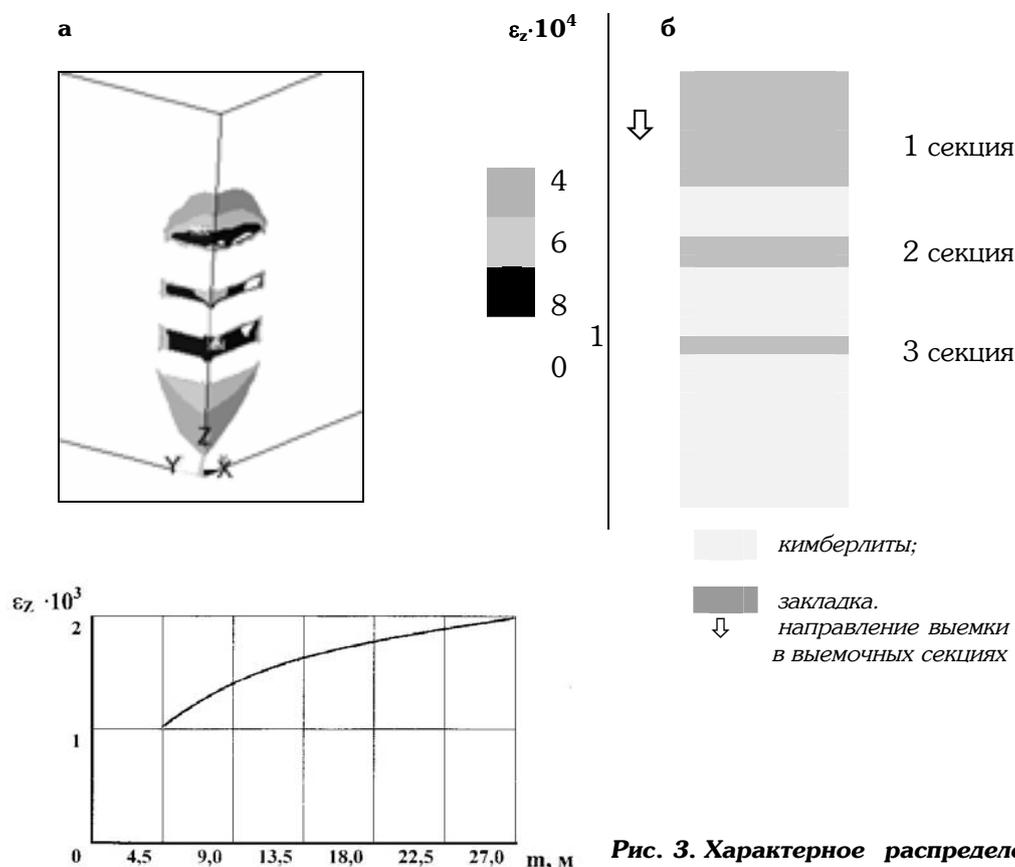


Рис. 3. Характерное распределение деформаций растяжения ϵ_z (а) в массиве, последовательность выемки запасов (б) и зависимость ϵ_z в кровле кимберлитов на контакте с закладочным массивом от мощности (t) залеженных слоев секции (в)

Формирование зон вертикальных растягивающих деформаций обусловлено совместным влиянием двух важных факторов: наличием карьера, разгружающего нижележащий массив, и действием значительной по величине горизонтальной составляющей исходного поля напряжений.

Уже на начальных этапах работ при отстающей выемке нижних горизонтов и, соответственно, ограниченной возможности смещения массива, попадающие в зону разгрузки под выработанным карьером кимберлиты обрабатываемых секций, а также прилегающие слои закладки смещаются вверх, в

сторону выработанного пространства, под действием увеличивающейся с глубиной горизонтальной составляющей исходного поля напряжений.

Зависимость величины растягивающих деформаций в кровле кимберлитов и, соответственно, в прилегающем закладочном массиве, от мощности залеженных слоев секции, показаны на рис. 3, б.

В нижней части искусственного разделительного массива, сформированного до начала отработки секций, величины растягивающих деформаций сохраняются на уровне $\epsilon_z = (2-6) \cdot 10^{-4}$ вплоть до полной отработки трех секций.

Таким образом, выявленные закономерности изменения НДС массива позволили, выделить опасные зоны вертикальных растягивающих деформаций, формирующиеся в кровле кимберлитов на контакте с закладочным массивом под действием закономерно увеличивающейся с глубиной горизонтальной составляющей исходного поля напряжений. Максимальные величины таких деформаций достигают критических значений, равных $\epsilon_{кр} = (1 - 2) \cdot 10^{-3}$, при которых возможно расслоение и обрушение как рудного, так и закладочного массивов.

Следовательно, при рассматриваемом варианте послойной выемки с нисходящим порядком, больших пролетах подработки, опасности расслоения и обрушения рудного и закладочного массивов невозможно обеспечить безопасные условия очистной выемки даже при ужесточении требований к прочности и устойчивости закладочного массива – искусственной кровли, под которой ведутся очистные работы.

Применение нисходящего порядка выемки было обусловлено сложностью поддержания рудной кровли очистных выработок, вследствие специфических физико-механических свойств кимберлита, таких как высокая трещиноватость, зависимость прочностных свойств от водонасыщенности, склонность к серпентинизации. Ведение работ под искусственной кровлей в условиях рудника «Интернациональный» обеспечивает устойчивость очистных выработок и безопасность выемки, однако может привести к накоплению значительного объема пустот и, как следствие, к интенсификации процессов разупрочнения массива, слагающего временный рудный целик.

Для предотвращения негативного развития геомеханических процессов целесообразно изменение технологической схемы очистных работ таким обра-

зом, чтобы добиться снижения усадки массива, исключить последующее накопление пустот. В наибольшей мере для этого подходят слоевые системы разработки с восходящим порядком выемки и камерные системы разработки.

При восходящем порядке выемки усадка закладочного массива на первоначально отработанных нижних слоях компенсируется при отработке и закладке последующих вышележащих слоев, а при камерных системах разработки объем недозакладов минимизируется за счет значительной вертикальной мощности одновременно закладываемых камер.

Применение указанных систем в условиях трубки «Интернациональная» сдерживается необходимостью обеспечения требуемой годовой производительности на ограниченной площади. Понижение горных работ на руднике «Интернациональный» составляет более 40 м/год. При существующей сегодня технологии такая производительность достигается при одновременной работе в трех-четырёх выемочных секциях, разнесенных друг от друга по вертикали, в каждой из которых работает один комбайновый комплекс. Таким образом, горные работы одновременно ведут на участке рудного тела вертикальной мощностью более 100 м.

Формирование нескольких выемочных секций приводит к тому, что массив в зоне ведения горных работ представляет собой чередование слоев закладки и подсеченных сверху и снизу рудных массивов, характеризующихся сложным напряженно-деформированным состоянием с чередованием зон растягивающих и сжимающих напряжений и деформаций и повышенным уровнем горизонтальных напряжений. Поддержание выработок с рудной кровлей в этом случае зачастую затруднительно, что обуславливает необходимость применения нисходяще-

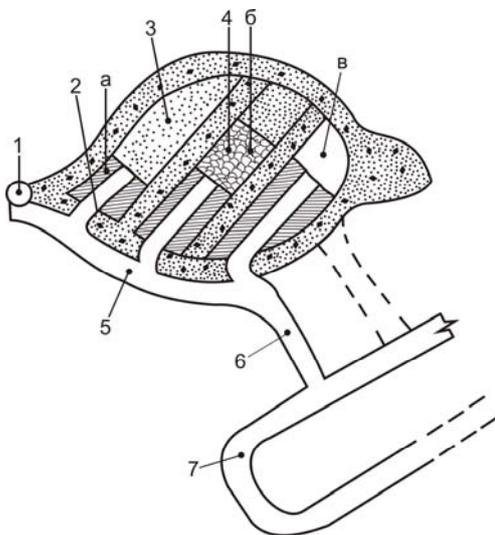


Рис. 4. Камерная система разработки с закладкой выработанного пространства и предварительным оконтуриванием камер: 1 – вентиляционный восстающий; 2 – разрезной орт; 3 – закладка; 4 – отбитая руда; 5 – транспортный штрек; 6 – слоевой заезд; 7 – спиральный съезд; а – бурение скважин; б – отгрузка руды; в – закладка камеры

го порядка выемки с ведением работ под искусственной кровлей.

Следовательно, применение камерных систем разработки и слоевых систем с восходящим порядком выемки возможно только в случаях, когда добычные работы сконцентрированы в пределах одного очистного фронта, либо фронты разнесены на значительное расстояние.

Стратегией развития горных работ на руднике предусмотрено в 2017 году вовлечение в отработку запасов

блоков 1-4, расположенных непосредственно под карьером, и запасов глубоких горизонтов - блоков 9-11 и ниже. Предполагаемая годовая добыча составит около 350 тыс. т из глубоких горизонтов и около 150 тыс. т из подкарьерных запасов. Ведение горных работ на двух участках, отстоящих друг от друга по вертикали на несколько сотен метров, позволяет исключить их взаимовлияние и создает благоприятные условия для применения слоевых систем разработки с восходящим порядком выемки слоев и камерных систем.

Руды трубки «Интернациональная» характеризуются уникально высокой ценностью, это делает приоритетным обеспечение максимально возможной полноты извлечения кимберлитов, что определяет выбор технологии добычи.

На рис. 4 приведен один из возможных вариантов технологии, созданный для сложных геомеханических и гидрогеологических условий, предусматривающий применение высокопроизводительной камерной системы и при этом обеспечивающий полноту выемки, сопоставимую со слоевыми системами.

В целом, комбинация слоевых и камерных систем разработки с закладкой выработанного пространства позволяет обеспечить требуемые технико-экономические показатели в сложных горно-геологических условиях разработки и создает предпосылки устойчивого развития рудника на длительную перспективу. ■■▲

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Айнбиндер Игорь Израилевич – профессор, доктор технических наук, зав. отделом,
e-mail: geoeexpert@ yandex.ru

Овчаренко Оксана Васильевна – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник,
e-mail: geoeexpert@ yandex.ru

Пацкевич Петр Геннадиевич – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник,
e-mail: ppg1975@ hotmail.ru

ИПКОН РАН

UDC 622.272 : 622.274

**GEOMECHANICAL RESEARCHES OF THE STRESS-STRAIN STATE
OF THE ROCK MASS AND ITS DEVELOPMENT DURING THE MINING
OF KIMBERLITE PIPE INTERNATIONAL**

Ainbinder I.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: geoexpert@yandex.ru
Ovcharenko O.V., Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,
e-mail: geoexpert@yandex.ru
Patskevich P.G., Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,
e-mail: ppg1975@hotmail.ru
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russia)

The article contains the results of finite element researches of the stress-strain state of the rock mass and its development during the mining of kimberlites of pipe International and recommended probable variant of the mining technology.

It is shown that with this mining method, under high horizontal stresses that initiate zones of hazardous vertical tensile strains reaching limit values and causing stratification and collapse of ore and backfill mass, it is impossible to ensure safe mining, even under tightened requirements on the backfill mass strength and stability.

The author proposes a mining method alternative with the high capacity chamber mining and extraction output comparable with the slicing system performance.

Key words: kimberlite pipe, stopping, stress-strain state, numerical modeling.



**ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ
ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(ПРЕПРИНТ)**

ГЕМОХРОНОЛОГИЯ КОРУНДА

УДК 549.091.553.7

Барнов Николай Георгиевич — кандидат геолого-минералогических наук, barnov@inbox.

В хронологическом аспекте рассмотрены находки, открытие месторождений, познание, терминология и использование в различных сферах разновидностей минерала корунда. Показана тесная связь освоения обыкновенных и благородных корундов с материально-эстетической эволюцией человечества.

Ключевые слова: геммология, корунд, рубин, сапфир, терминология, хронология, история человечества, технология.

GEMOCHRONOLOGY OF CORUNDUM

Barnov N.G.

In chronological aspect considered finds the discovery, knowledge, terminology and usage in different spheres of varieties of the mineral corundum. Illustrates the close relationship mastering ordinary and noble corundum with the material and aesthetic evolution of mankind.

Key words: gemology, corundum, ruby, sapphire, terminology, chronology, the history of mankind, technology.