

УДК 552.323.6 (571.56)

© А.В.Дроздов, К.Н.Егоров, А.И.Мельников, 2014

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КИМБЕРЛИТОВ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД НА ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТРУБКИ УДАЧНАЯ**А.В.Дроздов (Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА»), К.Н.Егоров, А.И.Мельников (Институт земной коры СО РАН)**

Рассмотрены особенности строения и формирования крупнейшего месторождения алмазов трубки Удачная с существующим диапазоном изменения прочностных показателей кимберлитов и вмещающих осадочных пород. Изложен механизм саморазрушения кимберлитов в результате стрессовой коррозии и воздействия поверхностно-активных веществ, а также шелушения вмещающих кембрийских пород, обусловленного особенностями обстановок осадкообразования.

Ключевые слова: месторождение алмазов, кимберлиты, вмещающие осадочные породы, трещиноватость, прочность, коэффициент крепости.

Дроздов Александр Викторович, DrozdovAV@alrosa.ru, Егоров Константин Николаевич, egorov@crust.irk.ru, Мельников Александр Иванович, mel@crust.irk.ru

EVALUATION OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF KIMBERLITES AND COUNTRY ROCKS ON DEEP HORIZONS OF DEPOSIT PIPE UDACHNY**A.V.Drozdov, K.N.Egorov, A.I.Melnikov**

The morphology and formation of the largest diamond deposit with the existing variation range of strength characteristics of kimberlites and enclosing basic sediments on pipe Udachny were considered. Mechanism of kimberlites self-destruction because of stress corrosion and under the influence of surface-active materials, as well as rocks peeling due to conditions of sediment formation in the Cambrian stratum is stated.

Key words: diamond deposit, kimberlites, country sedimentary rocks, fracturing, strength, hardness coefficient.

Месторождение трубки Удачная обладает рядом генетических, структурно-тектонических, криогидрогеологических и нефтегазоносных особенностей, а именно: низкой устойчивостью блоков

пород в приконтактных частях кимберлитовых тел, структурообразующих зонах нарушений, межтрубном пространстве, переменной обводненностью породных блоков и другими не менее важными

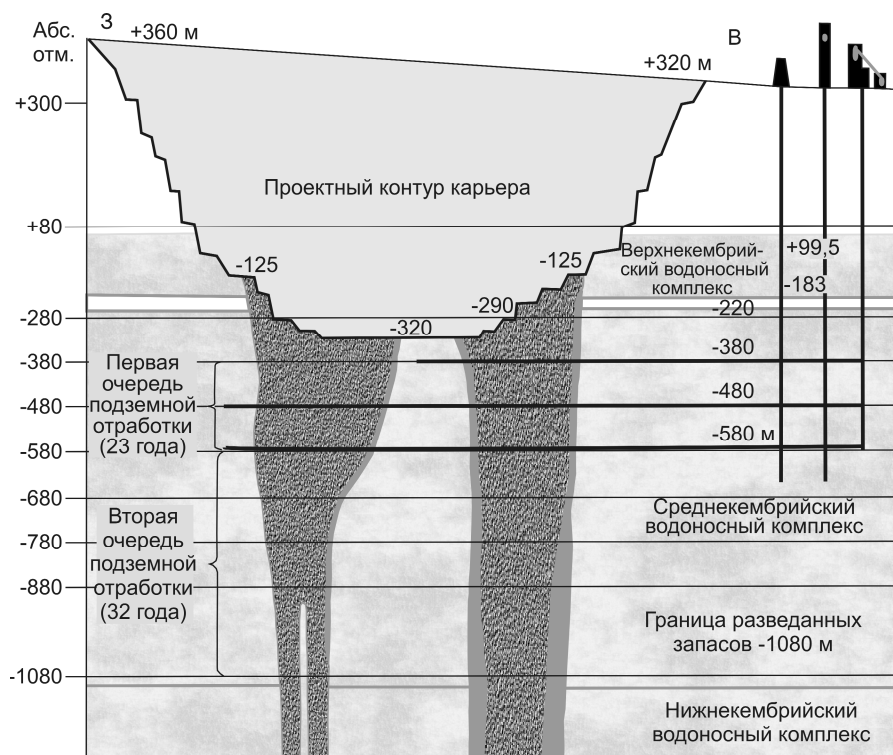


Рис. 1. Схема комбинированной отработки месторождения трубки Удачная:

жирные линии — выработки первого пускового комплекса

ми деталями его строения и показателями свойств. Особенностью вскрываемых подкарьерных интервалов месторождения является наличие опасных зон воздействия геомеханических, гидрогеодинамических, газодинамических факторов. На глубоких горизонтах месторождения количество разнопрочностных блоков и интервалов, зависящих от тектонических нарушений по приконтактовым и структурообразующим зонам, значительно увеличивается.

Трубка Удачная — одно из крупнейших алмазных месторождений в России с глубиной открытой отработки до 610 м и дальнейшим освоением ниже лежащих горизонтов подземным способом (рис. 1). Предусматриваемая производительность подземного рудника 4 млн. т в год. Общая криогидрогеологическая, геомеханическая и газовая ситуация в районе не имеет аналогов в отечественной и мировой практике. Рудный комплекс объекта состоит из двух сопряженных кимберлитовых трубок — Западной и Восточной, четырех структурно сопряженных сателлитных «слепых» кимберлитовых тел и шести кимберлитовых жил [5]. В верхней части разреза обе основные кимберлитовые трубки соприкасаются друг с другом и начиная с глубин 250–270 м расходятся в пространстве. В строении вме-

щающих толщ месторождения участвуют вендские, кембрийские карбонатные и терригенно-карбонатные отложения, а также четвертичные образования различного генезиса. Дочетвертичные породы осадочного чехла интродированы пластовыми телами и дайками долеритов.

Месторождение трубки Удачная расположено в четком разломном узле, образованном пересекающимися диагональными системами региональных тектонических нарушений (северо-восточной и северо-западными), осложненными мелкими околотрубными локальными разрывами [3]. Северо-восточная система более мощная и ранняя, так как контролирует местоположение мелких кимберлитовых тел и жил вблизи двоянных трубок. На глубоких горизонтах эта система четко выражена зонами дробления, окварцевания и пиритизации пород, мелкими параллельными разрывами или крупными трещинами. Особенно четко зоны дробления северо-восточной системы разрывных нарушений наблюдаются в западном теле трубки. Посттубочные зоны разрывных нарушений преимущественно северо-западного направления связаны с пермотриасовыми и позднемезозойскими тектономагматическими активизациями секут трубку Удачная и околотрубные вмещающие породы.

На основании изучения структуры околотрубного пространства и внутреннего строения кимберлитового комплекса трубки установлены три этапа формирования разрывных нарушений и рудного узла в целом [5]. Первый этап связан с северо-восточной системой разрывных нарушений. На втором этапе произошла смена полей напряжений, обусловленная формированием северо-западных дизъюнктивных нарушений и одновременной активизацией северо-восточной системы разломов. Широкое развитие сколовых нарушений северо-восточного направления приводило к пульсационному раскрытию зияющих пустот (раструбов) и

1. Прочностные показатели вмещающих пород глубоких горизонтов

Интервал глубин, м	Породы	Предел прочности, МПа		Коэффициент сцепления, МПа	Угол внутреннего трения, ф, град.
		$\sigma_{сж}$ при сжатии	σ_r при растяжении		
500–600	Доломиты, известняки, доломиты известковистые, известняки окварцованные, брекчия карбонатная	<u>3,2–95,5*</u> 40,67	<u>1,2–8,0</u> 4,66	<u>3,1–84,8</u> 13,49	<u>11,5–40,0</u> 31,33
600–700		<u>5,0–87,0</u> 40,19	<u>1,1–9,8</u> 4,43	<u>1,7–88,1</u> 14,11	<u>14,9–40,0</u> 32,39
700–800	Доломиты, известняки, доломиты известковистые, мергели, ангидриты, брекчия карбонатная	<u>4,8–124,9</u> 50,53	<u>1,3–12,1</u> 5,85	<u>5,5–31,4</u> 13,48	<u>13,1–40,1</u> 32,39
800–900	Доломиты, известняки, известняки доломитизированные, мергели	<u>3,9–98,6</u> 48,89	<u>1,1–9,1</u> 5,69	<u>3,1–88,2</u> 21,85	<u>16,8–41,1</u> 30,94
900–1000	Доломиты, известняки, известняки мраморизованные, известняки окремненные	<u>4,1–128,8</u> 48,38	<u>2,5–9,7</u> 5,3	<u>5,2–40,3</u> 16,75	<u>12,3–40,7</u> 29,03
1000–1100	Доломиты, известняки, известняки мраморизованные	<u>5,0–91,1</u> 48,96	<u>2,0–9,0</u> 5,17	<u>5,4–36,8</u> 13,67	<u>19,5–42,3</u> 32,05
1100–1200	Известняки, известняки мраморизованные, окремненные, брекчия карбонатная, доломиты	<u>12,9–55,8</u> 33,89	<u>2,4–7,3</u> 5,11	<u>6,4–14,2</u> 9,47	<u>20,3–39,0</u> 31,29
1200–1300	Известняки, известняки окремненные	<u>5,0–46,2</u> 30,42	<u>2,12–9,3</u> 5,79	<u>9,3–13,0</u> 10,63	<u>29,0–38,0</u> 34,78
1300–1400	Известняки, доломиты окремненные, известняки окремненные, брекчия карбонатная	<u>3,8–55,8</u> 36,55	<u>2,89–11,5</u> 5,95	<u>5,9–12,8</u> 10,0	<u>28,0–39,7</u> 33,87
1400–1500	Известняки, доломиты окремненные, известняки окремненные, брекчия карбонатная	<u>4,3–87,4</u> 34,99	<u>2,6–9,4</u> 6,22	<u>8,1–16,1</u> 11,69	<u>27,6–40,9</u> 35,71
1500–1600	Доломиты окремненные, известняки окремненные, брекчия карбонатная	<u>48,9–50,4</u> 49,65	<u>5,8–9,8</u> 7,8	<u>14,2–14,8</u> 14,5	<u>27,7–36,0</u> 31,85
1600–1700	Известняки окремненные	57,2	6,1	16,2	36,4

*(min–max)/ среднее.

периодическому внедрению в них основного объема кимберлитовых фаз трубок. На третьем этапе активизировалась северо-западная система разломов и внедрились позднепалеозойские – раннемезозойские дайки долеритов [5].

В результате длительной эволюции земной коры и многократного тектонического воздействия на рудные тела (сжатия, растяжения, перемещений переменного знака вдоль нарушений и т.д.) изменились геодинамическая напряженность породных блоков и физико-механические свойства кимберлитов. По-видимому, не случайно зоны разрывных нарушений, зафиксированных в западном и восточном телах, совпадают с участками кимберлитов с наименьшей крепостью. В западном теле трубки Удач-

ная это линейные зоны северо-западного направления, а в восточном — субмеридиональная зона.

На верхних горизонтах трубки эта закономерная связь несколько нарушается, поскольку крепость кимберлитов связана с криогенным воздействием на рудный и породный массивы, а также более интенсивной их трещиноватостью в приконтактных участках с вмещающими породами. В зонах тектонических нарушений, где наиболее активно происходил водообмен при взаимодействии системы «рассол–порода», отмечаются следы значительного водонасыщения кимберлитов [4]. О глубокой пропитке рассолами таких кимберлитов свидетельствует состав водных вытяжек (после замачивания образцов в дистилляте).

Вскрываемый разрез осадочных толщ в пределах месторождения представлен в основном карбонатными породами — известняками, глинистыми и доломитизированными известняками, доломитами, известковистыми доломитами и мергелями. В нижней части известняково-доломитовой толщи наблюдается обильное окварцевание и окремнение пород. Заметим, что вмещающие породы до горизонта -780 м характеризуются частым чередованием субгоризонтальных пластов и пропластков мощностью от нескольких миллиметров до 4–5 м. Поэтому в процессе проходки подземных горных выработок при снятии давления в кровельной части возможно отслоение (по плоскости напластования) разнотолщинных плиток или кусков отдельных литологических разностей с их последующим обрушением.

Изучение физико-механических свойств разных типов кимберлитов и вмещающих осадочных пород выполнялось на всех этапах освоения месторождения, начиная с разведки верхних горизонтов, и продолжается в настоящее время при строительстве подземного рудника. Обобщенные данные по прочностным показателям основных литологических разностей вмещающих пород трубки Удачная для подкарьерных интервалов до разведанных глубин приведены в табл. 1 [2, 6]. Анализ имеющихся данных показывает, что значительный разброс частных значений сопротивления одноосному сжатию характерен для осадочных пород всех возрастных подразделений.

Следует также подчеркнуть, что использование данных только лабораторных исследований пород в большинстве случаев не корректно. В частности, коэффициенты крепости пород в естественном залегании отдельных блоков для условий объемного сжатия (а не по лабораторным данным разрушенного керна) как по вмещающим осадочным отложениям, так и по кимберлитам значительно выше. Специалистами давно отмечено, что данные лабораторных определений и натурных наблюдений обычно различаются. Это происходит главным образом за счет влияния факторов физического (морозного) выветривания (промерзание-оттаивание) керна и снятия геодинамических напряжений. К сожалению, образцы, поступающие на лабораторные исследования, проходят естественный цикл «заморозки-оттайки», что существенно сказывается на их состоянии и последующих данных прочностных показателей [7]. Поэтому для практического использования необходим дифференцированный подход к оценке тех или иных свойств пород, в частности по обоснованию коэффициентов крепости пород, структурного ослабления и других физико-механических показателей.

Рассмотрим основные природные и техногенные факторы, сказывающиеся на прочностных показателях пород и устойчивости подземных выработок строящегося рудника. Инженерно-геологические особенности месторождения трубки Удачная определяются анизотропией прочностных свойств как кимберлитов разных типов (фаз внедрения), так и разновозрастных вмещающих отложений. В ходе эксплуатационно-разведочных работ было установлено следующее уникальное явление: поднятые на поверхность керны кимберлита первоначально (до 2–3 ч) отличались высокой крепостью, однако через 4 ч и более разрушались на мелкие кусочки. Наиболее ярко процесс саморазрушения проявился для дейтеропорфирового кимберлита (третья фаза внедрения) трубки Удачная-Восточная. Спонтанное разрушение образцов керна кимберлита отмечалось особенно в летний период под воздействием солнечных лучей. Нарушение сплошности керна начиналось с образования густой сети трещин на поверхности образцов. При этом последние как бы «набухают», увеличиваясь в объеме в результате отслаивания серии тонких скорлуповидных пластинок, чешуек по всей поверхности керна. За сравнительно короткий срок (не более 4–5 ч) образцы постепенно рассыпались на очень мелкие фрагменты. Подобные явления также наблюдались при отработке трубки Мир. Одним из факторов, способствующих понижению прочности кимберлитов, является активное воздействие на них природных рассолов. Данное предположение подтверждено экспериментальными работами по обработке высококонцентрированными рассолами разных типов кимберлитов трубки Удачная, некоторых гидротермальных минералов кимберлитов, а также осадочных пород [4].

Исходя из имеющихся данных, можно констатировать, что один из вероятных механизмов саморазрушения кимберлитов — стрессовая коррозия, которая означает процесс медленного роста сети трещин в результате комбинационного действия на породу контактирующей жидкости (рассолов) и давления (тектонических напряжений). Рассолы, выступающие в роли поверхностно-активных веществ, проникают в мельчайшие капиллярные трещины кимберлитов, находящихся в состоянии повышенных геодинамических напряжений. В результате значительно понижается поверхностная энергия породы, контактирующей с рассолами, что может вызывать самопроизвольное диспергирование. Выделенные участки «аномальных» кимберлитов со свойствами саморазрушения частично совпадают с зонами тектонических нарушений в рудных телах.

Обобщение полученных данных по прочностным показателям кимберлитов в первом эксплуата-

ционном блоке для подземной отработки месторождения позволило выявить следующее. К примеру, значения коэффициентов крепости кимберлитов (по М.М.Протодяконову) [1] в интервале с абсолютными отметками -320...-380 м имеют большой разброс (от 1 до 12) и существенно отличаются от проектных. Поэтому планирование горнодобычных работ с использованием буровзрывного способа и последующим обрушением руды следует осуществлять с учетом разнообразия этого показателя свойств кимберлитов.

Отметим еще одну особенность вскрываемого разреза на месторождении. Одним из опасных и осложняющих факторов, с которыми столкнулись шахтостроители при проходке отдельных участков вертикальных и горизонтальных горных выработок, в частности на горизонте -580 м (удачнинская свита нижнего – среднего кембрия), является естественное шелушение осадочных вмещающих пород с последующим обрушением значительных объемов горной массы (до 850 м³) из кровельной и прибортовых частей. При беглом обзоре отдельных участков выработок фиксировалась субвертикальная или наклонная трещиноватость осадочных отложений. Первоначально это объясняли структурно-тектонической обстановкой во вскрываемых породных массивах. При более детальном изучении строения карбонатных толщ выявилась иная картина происхождения этих вывалов.

Вскрытые на руднике Удачный в удачнинской свите подземными горными выработками опасные по устойчивости зоны, которые характеризуются вывалами больших объемов пород, связаны не со структурно-тектонической обстановкой на месторождении, а с фациально-седиментационными условиями осадкообразования кембрийских толщ. Изучение структурно-тектонической позиции месторождения трубки Удачная [3] позволило выделить особую гидрогеологическую структуру — Далдынскую флексуру, обладающую повышенными фильтрационно-емкостными показателями пород в интервале известняково-доломитовой толщи, с которой в основном связано обводнение месторождения. Фиксируются строматолитовые штоко- и шарообразные карбонатные постройки, способные образовывать вывалы. Они прослеживаются в основном к юго-востоку от месторождения в периферийной части карбонатной толщи рифового барьера. Для прогнозирования подобных опасных зон необходим полный фациально-седиментационный анализ всех материалов по местам вскрытия подземными горными выработками ниже-среднекембрийских отложений удачнинской свиты в рифогенной Далдынской структуре.

Для расчета устойчивости уступов и бортов карьеров или стенок подземных горных выработок следует учитывать такие показатели физико-механических свойств пород: объемную плотность, сцепление и угол внутреннего трения. Последние две величины должны характеризовать свойства горных пород не в образце, а в массиве, поэтому требуется проведение натурных испытаний. Физико-механические свойства вмещающих пород и кимберлитов алмазных месторождений определяются на образцах небольших размеров и характеризуют прочность отдельных литологических разностей или типов кимберлитов. Прочностные показатели горного массива или его частей, сложенных теми же породами, значительно ниже, чем в образце, в основном за счет литогенетической и тектонической нарушенности. Они устанавливаются по результатам натурных испытаний или с помощью коэффициента структурного ослабления (λ). Переход от сцепления в образце (C_0) к сцеплению пород в массиве (C_m) выражается зависимостью: $C_m = \lambda C_0$.

Коэффициент структурного ослабления связан рядом факторов, а именно: прочностью пород в монолите, структурным строением массива и его тектонической нарушенностью, механической неоднородностью горного массива и т.д. Он определяется экспериментально, аналитически или методом аналогии. На алмазных месторождениях Якутии натурные испытания проводятся при их разведке в подземных горных выработках и в бортах эксплуатируемых карьеров, при этом коэффициент структурного ослабления имеет различный диапазон изменений. Натурные испытания прочностных свойств вмещающих пород в карьере Удачный осуществлялись в откосах уступов, которые при разработке месторождения подвергаются техногенному (буровзрывному) воздействию. Поэтому трещиноватость отложений в местах проведения экспериментов оказалась несколько выше, чем в целике, а прочность ниже. Диапазон изменений коэффициента структурного ослабления для пород трубки Удачная достаточно широк — от 0,03 до 0,36 (табл. 2) [9].

Основным прочностным показателем крепости пород считается сопротивление исследуемого образца одноосному сжатию, или коэффициент крепости [1]. По результатам статистического анализа имеющихся данных физико-механических исследований образцов по разным скважинам уточнен коэффициент крепости вмещающих пород месторождения. В лабораторных условиях проанализировано >350 проб по определению прочности пород на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$) для анализируемых интервалов глубин. Полученные значения прочности осадочных толщ варьируют в пределах 17,5–

2. Коэффициенты структурного ослабления, полученные при испытаниях в карьере Удачный

Номера испытаний	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
λ_k	0,29	0,24	—	—	0,16	—	0,18	0,21	0,051	0,18	0,09
λ_p	0,2	—	0,25	0,36	—	0,32	—	—	—	—	—
Номера испытаний	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
λ_k	—	0,27	0,049	—	0,29	0,17	0,20	0,22	0,11	0,16	0,12
λ_p	0,196	—	—	0,12	—	—	—	—	—	—	—
Номера испытаний	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
λ_k	0,15	0,091	0,041	—	—	0,05	0,11	0,064	0,074	0,078	0,24
λ_p	—	—	—	0,121	0,266	—	—	—	—	—	—

Примечание. λ_k , λ_p — коэффициенты структурного ослабления, определенные при сдвиге (λ_k) и отрыве (λ_p).

95,4 МПа, т.е. коэффициент крепости для вмещающих пород (по шкале М.М.Протодяконова) [1] колеблется от 1,7 до 9,5. Максимальные его значения соответствуют окремненным породам в интервале кембрийской известняково-доломитовой толщи. Средневзвешенное значение коэффициента крепости находилось по формуле [7]:

$$f = \frac{\sum f_i n_i}{\sum n_i},$$

где f — средневзвешенное значение коэффициента крепости, по М.М.Протодяконову [1]; f_i — исходный коэффициент крепости; n_i — число определений.

Ниже приводятся результаты обработки и пересчетов средневзвешенных значений коэффициентов крепости, полученных по результатам испытаний в лабораторных условиях. Расчеты выполнены для основных и первоочередных выработок строящегося рудника Удачный на горизонтах -380, -480, -580 м и между интервалами -380...-480 м (спи-

ральный съезд). Для примера показана гистограмма коэффициента крепости пород в интервале -380...-480 м (рис. 2).

Результаты статистического пересчета существующих определений показывают, что средневзвешенные значения коэффициента крепости (по М.М.Протодяконову) [1] во вскрываемых интервалах разреза осадочных толщ значительно выше, чем в представленных проектных материалах, и составляют на горизонтах: -580 м — 4,6, -480 м — 7,7, -380 м — 5,3, между -380...-480 м — 5,7.

Таким образом, оценка прочностных показателей кимберлитов и вмещающих осадочных отложений на месторождении трубки Удачная говорит о большом диапазоне их значений, что существенно отличается от проектных величин. Наличие разнопрочностных блоков, участков и зон, зависящих от многих природно-технологических факторов, небезопасно для ведения подземных горных работ. Поэтому необходима детализация и корректировка проектных решений при строительстве подземного рудника и на алмазодобычных работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горная энциклопедия в 5-ти томах / Под ред. Е.А.Козловского. — М.: Советская энциклопедия, 1984–1991.
2. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. — Иркутск: ИрГТУ, 2008.
3. Дроздов А.В., Мельников А.И. Оценка структурно-тектонической обстановки — основа газогидродинамического районирования месторождения (на примере трубки Удачной) // Маркшейдерия и недропользование. 2011. № 4 (54). С. 35–39.
4. Дроздов А.В., Егоров К.Н., Мельников А.И. Оценка взаимодействия системы «рассол-горная порода» в условиях активных геодинамических процессов на

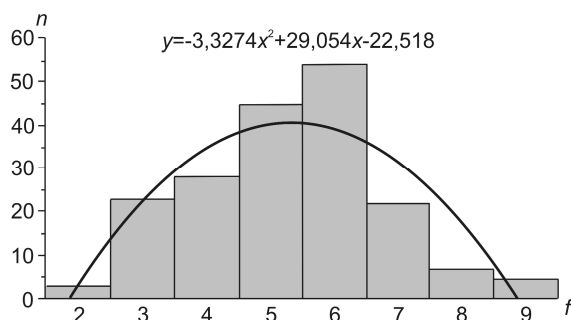


Рис. 2. Гистограмма коэффициента крепости пород в интервале -380...-480 м

- коренных алмазных месторождениях Якутии // Маркшейдерия и недропользование. 2013. № 6 (68). С. 16–21.
5. *Егоров К.Н., Мельников А.И.* Структурно-вещественная эволюция системы кимберлитовых тел трубки Удачная // Руды и металлы. 2012. № 1. С. 53–59.
6. *Коноваленко В.А.* Справочник физико-механических свойств горных пород алмазных месторождений Якутии. – Новосибирск: СО РАН, 2012.
7. *Курилко А.С.* Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на физико-механические свойства горных пород. – Якутск: СО РАН, 2004.
8. *Статистика:* Учебник / Под ред. А.Е.Суринова. – М.: РАГС, 2005.
9. *Термо- и геомеханика алмазных месторождений / А.А.Козеев, В.Ю.Изаков, Н.К.Звонарев.* – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995.