

стратиграфического факторов. По соотношению с водой залежи в этих ловушках можно отнести к безводным, которые обычно образуются в литологически ограниченных природных резервуарах. Коллекторы в подобных резервуарах труднопрони-

цаемые, из них флюиды извлекаются с трудом, и при современных методах извлечения добыча флюидов нерентабельна. Такие залежи в настоящее время не имеют промышленного значения и изучены весьма схематично.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пармузина Л.В. Условия образования верхне-девонских карбонатных отложений и коллекторов в них в северной части Печоро-Колвинского авлакогена. Ухта, 2000. 138 с.
2. Пармузина Л.В. Карбонатные массивы в верхнедевонских мелководно-шельфовых отложениях Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна // Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа. Мат. VII международной конференции. М., 2004. 2 с.
3. Пармузина Л.В. Строение, условия образования и нефтегазоносность верхнедевонских отложений северной части Среднепечорского поперечного поднятия и южной части Печоро-Кожвинского мегавала. СПб.: Недра, 2004. 80 с.
4. Пармузина Л.В., Коккин П.Н. Строение верхнедевонско-нижнетурнейского комплекса юга Печоро-Кожвинского мегавала и Среднепечорского поперечного поднятия // Закономерности размещения зон нефтегазоаккумуляции в Тимано-Печорской провинции. Тр. ВНИГРИ. М., 1986. С. 96–103.

Ухтинский государственный
технический университет
Рецензент — Н.К. Фортунатова

УДК 53.082.7: 549.091.5: 552.323.6

А.В. ПОДГАЕЦКИЙ, Н.Н. ЗИНЧУК, А.Т. БОНДАРЕНКО, А.Д. СЛУКИН

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ КИМБЕРЛИТОВ АЛМАЗОНОСНОЙ ТРУБКИ НЮРБИНСКАЯ (ЯКУТИЯ)

Предложена методика комплексного экспресс-анализа для изучения состава, структуры и петрофизических характеристик кимберлитов. Проведен анализ кимберлитов по разрезу высокоалмазоносной трубки Нюрбинская в интервале глубин 187–587 м. Изучено строение диатремы, вторичная минерализация слагающих пород и изменение их петрофизических характеристик с глубиной. Получены параметрические данные и графические зависимости, объясняющие влияние минерального и химического составов, а также структурно-текстурных особенностей и степени метасоматоза на магнитные, электрические и физические свойства кимберлитов. Приведены материалы, указывающие области практического использования полученных результатов.

Эффективность прогнозирования, вскрытия и отработки месторождений, в том числе алмазоносных, существенно снижается в результате экранирующего влияния мощных перекрывающих отложений, ухудшающих индикационные признаки кимберлитовых тел и препятствующих изучению строения диатрем.

Проведение минералого-аналитических исследований является важной составной частью изучения месторождений алмазов на любой стадии освоения: при поисках, детализации расположения кимберлитовых тел в массиве, определении состава и технологических свойств алмазоносных пород, их отработке и обогащении. Влияние геологических условий на возможность идентификации кимберлитового материала требует использования тонких физических, химических и структурных свойств и особенностей минералов.

Поскольку информативность данных об источнике кимберлитов зависит от условий формирования, положения в массиве вмещающих пород и внутреннего строения, необходим комплексный экспресс-анализ алмазоносных и неалмазоносных кимберлитовых пород, позволяющий учитывать

многие факторы формирования и последующей эволюции пород, в том числе гидротермальные и гипергенные изменения. Комплексный подход к изучению минерального сырья предполагает сравнительный анализ результатов нескольких аналитических методов. Последний позволил нам при проведении исследований в одном цикле измерений суммировать данные о минеральном составе, структуре и петрофизических свойствах горных пород, установить взаимосвязь и проследить динамику изменений при постмагматическом преобразовании на примере недавно открытой высокоалмазоносной трубки Нюрбинская.

Она на поверхности перекрыта терригенными нижнеюрскими отложениями мощностью около 50 м. На уровне эрозионного среза имеет асимметричную линзовидную форму, с небольшим раздувом на северо-восточном фланге и незначительным сужением в центре западной части трубки. С глубиной морфология трубки осложняется. В кимберлитовых породах ее диатремовой части выделяются два петрографических типа — автолитовые кимберлитовые брекчии (АКБ) и порфиновые кимберлиты (ПК), что соответствует концепции

двухфазного строения диатрем Якутской алмазоносной провинции. Основной объем тела трубки выполнен кимберлитовыми брекчиями, а порфиоровые кимберлиты занимают незначительную часть.

Среди АКБ трубки выделяют мелкосреднеобломочные брекчии центральной части рудного тела и карбонатные кимберлитовые АКБ приконтактной зоны северо-восточного и юго-западного флангов трубки. АКБ центральной части трубки представляют собой мелкосреднепорфировые породы зеленовато- или голубовато-серого цветов с автолитовой структурой цемента [2, 3, 11, 12].

Методы исследования

Минеральный состав проб изучался методами рентгеновской дифрактометрии (аппараты ДРОН-3,0, УМ-1; CuK_α излучение) и литолого-петрографического анализа. Последний использовался в сочетании с анализатором изображения для измерения метрических и оптических характеристик, а также статистического и корреляционного анализов измеренных значений (оптические микроскопы МБС-10, «Рейхард» и INAVAL, программное обеспечение на базе IBM PC). Физические и петроэлектрические характеристики кимберлитов (эффективная пористость $n_{\text{эф}}$, влагоемкость W , магнитная восприимчивость χ , плотность σ измерялись по методике [4]. Определение удельного электрического сопротивления ρ_0 , измеренного в постоянном электрическом поле, выполнено на мерзлых породах при отрицательной температуре (-4°C). Элементный состав определялся методами препаративной химии. По разрезу трубки проведено измерение скорости распространения продольных волн в образцах, вырезанных перпендикулярно к оси керна (прибор УК-10ПМС). Качественная оценка количества магнетита в пробах проводилась путем отбора магнитной фракции с помощью магнита. В магнитной фракции содержание магнетита $> 5\%$ и высокие значения магнитной восприимчивости.

Серпентинизация — характерный процесс постмагматического преобразования кимберлитов Якутии, в том числе и в трубке Нюрбинская [1—3, 8, 11, 12]. Исследование минерального состава кимберлитов показало, что особенности кристаллического строения и полиптипия серпентина и развивающихся по нему в гипергенных условиях глинистых минералов тесно связаны с физико-химическими условиями в массиве, и их изучение позволяет реконструировать условия формирования и развития кимберлитовых тел. Структурные исследования серпентина и минералов глин проводились рентгенометрически на ориентированных препаратах (фракция $< 0,002$ мм) и методом получения электронограмм от косых текстур на электронографе ЭМР-102 (аналитик А.П. Жухлистов, ИГЕМ РАН).

Особенность вторичного минералообразования в трубке Нюрбинская — широко развитая хлоритизация кимберлитов и то, что серпентин, как правило, представлен смесью хризотила и лизардита. В этих условиях невозможно полностью избежать наложения спектров серпентина, хлорита и смектитов. Поэтому качественное определение состава

серпентина проводилось по показателю содержания хризотила I_{202} / I_{001} [8].

Пробы по скважине Н-16/138 отобраны с интервалом 10–30 м в диапазоне глубин 187–587 м. Пробуренная в юго-западной части трубки скважина прошла через перекрывающие терригенные нижнеюрские отложения и вскрыла АКБ диатремы, а также зону кимберлитов, интенсивно измененных на контакте с базитовой интрузией и вмещающими терригенно-карбонатными породами нижнего ордовика [2, 3, 9, 11, 12].

Результаты исследований: распределение минерального состава и физических свойств

Характер распределения минерального состава и физических свойств по разрезу (табл. 1) показывает, что в интервале глубин 187–329 м кимберлиты представлены АКБ, причем до глубины 200 м залегают карбонатизированные и метасоматизированные разности, основные породообразующие минералы которых — доломит и слюда. Для этих пород типичны высокие значения эффективной пористости, χ имеет весьма низкие средние значения. Ниже по разрезу, на глубинах 227–329 м, залегают АКБ слабо метаморфизованные, с высоким содержанием серпентина и доломита. Причем из серпентиновых минералов преобладает хризотил.

Начиная с глубины 358 м и до низов профиля расположена зона кимберлитов, претерпевших значительные тектонические и метасоматические изменения на контакте с включениями и интрузиями траппов, а также вмещающими породами. Залегающие в интервале 358–387 м породы не утратили характерную структуру АКБ, но их состав и физические свойства существенно изменились (табл. 1). Серпентин составляет до 77% объема породы, которая обогащена рудными минералами, преимущественно тонкодисперсным магнетитом (до 11%), что на два порядка увеличивает χ ($2560\text{--}4000 \times 10^{-5}$ ед. СИ).

Как отмечалось выше, ПК относятся к породам ранней стадии внедрения, поэтому существенно отличаются от брекчий по структуре и минеральному составу. Например, к ПК относится включение с глубины 406 м. Для него характерно высокое содержание талька, серпентина, кальцита и доломита (табл. 1). Серпентин представлен септохлоритом. Количество рудных минералов в пробе минимально — единичные зерна ильменита и пирита. Смена минерального состава сопровождается резким изменением петрофизических параметров значения $n_{\text{эф}}$ и W уменьшаются в 4–5 раз, а χ — от 3250×10^{-5} до 20×10^{-5} ед. СИ.

Значительные отличия в составе и свойствах наблюдаются у образца крупного метасоматически измененного базальтового включения с глубины 423,8 м. Кроме серпентина в его составе присутствуют роговая обманка, полевой шпат, кальцит, рудные минералы, представленные сростками ильменита и магнетита, при преобладании первого, и слюда. В отличие от кимберлитов слюда в этой породе представлена серицитом, а не флогопитом. Базальт имеет очень плотную, мелкозернистую, тонкокристаллическую структуру, характеризующуюся минимальными значениями $n_{\text{эф}}$ и W , мак-

Минеральный состав и физические свойства кимберлитов

Глубина, м	Серпентин		Кальцит, %	Доломит, %	Хлорит, %	Вермикулит, %	Слюда, %	Кварц, %	Тальк, %	Магнетит, %	Магнитная фракция	χ , 10^{-5} ед. СИ	σ , г/см ³	$n_{эф}$, %	W, %	ρ_0 , Ом·м
	содержание, %	политип														
187			15,0	55,0			21,6	9,4			-	23	2,45	16,0	6,85	90
227	26,7	х	2,3	56,5	0,7	3,4	10,4				-	26	2,42	14,1	6,3	35
241	71,6	х		20,6	1,2	0,4	2,0	4,4			-	23	2,42	13,0	6,2	36
249	64,6	л<х	0,7	27,3	1,6	1,3	1,7	2,7	1,9		-	23	2,45	13,0	5,2	44
262	35,4	х	2,5	50,8	1,1	3,3	6,3	3,2	0,7		-	26	2,49	14,7	6,3	40
279	28,8	х		59,0	1,3		6,8		4,6		-	24	2,50	11,9	5,0	41
310	39,9	х	0,3	53,0	1,0	1,2	3,5		1,1		-	23	2,44	16,2	7,1	37
329	32,5	х		60,0	1,3	1,5	3,5	2,0			-	38	2,36	10,3	4,6	22
358	69,8	л<х	3,1		6,1				10,6	10,4	+	2929	2,30	19,3	8,4	62
372	72,8	л<х	5,5		1,0				10,1	10,7	+	2560	2,40	14,1	6,2	35
383	77,4	л≈х	6,3		0,8		0,5		4,8	11,5	+	4000	2,39	14,8	6,5	125
387	77,1	л≈х	3,5				2,4		6,4	10,7	+	3500	2,38	16,6	7,5	80
406	24,2	с	16,0	17,2					42,6		-	20	2,48	3,56	1,5	53
423,8	36,2	с + л	2,5		0,9		6,1	7,9			-	1300	2,88	1,28	0,45	4400
437	63,5	л≈х	7,3		6,9					20,3	+	3300	2,37	14,8	6,7	42
454	73,7	л<х	5,0		1,9		2,7		4,3	13,9	+	3100	2,37	15,0	6,8	28
457	40,7	л≈х	22,3				20,6			13,3	+	2600	2,66	3,6	1,38	127
462	77,6	л≈х	3,4			1,8	8,9		2,5	5,8	+	700	2,38	15,4	6,9	61
470	88,0	л≈х	2,5		7,0					2,5	+	420	2,33	15,8	7,3	86
471	86,9	л = х	3,6		9,5						-	180	2,30	15,2	7,1	42
472			6,8		7,0				86,2		-	12	2,60	7,2	2,8	141
473	55,3	л = х	4,0		11,2				13,7	15,8	+	2200	2,33	14,9	6,8	68
480	42,9	л<х	19,2		3,2		23,3		7,3	7,2	+	1950	2,66	2,23	0,8	146
507			25,3		8,4	2,2	23,0		41,1		-	1000	2,50	8,2	3,45	30
514			44,9		26,4					28,7	+	8000	2,71	2,36	0,9	19
515	15,0	х	33,0		25,0		27,0				-	29	2,61	3,71	1,45	352
522			45,3		8,2		40,2				-	5300	2,55	9,8	4,0	62
535	48,7	х	25,2		6,6		19,5				-	80	2,65	2,64	1,2	430
543	63,4	л<х	33,3				3,3				-	43	2,51	7,8	3,2	347
549	43,7	х	22,4				33,9				-	70	2,65	3,43	1,3	180
566,5	40,6	л = х	57,8		1,6						-	500	2,61	2,6	1,2	930
587	7,0	н.о	6,9		58,5				27,6		-	2600	2,32	16,4	7,6	38

Примечание. Минеральный состав в % на кристаллическую фазу; политипы серпентина: л – lizardit, х – хризотил, с – септохлорит, н.о – не определялся. Прочие минералы – глубины: 423,8 м – полевые шпаты 22,2; роговая обманка 12,1; ильменит 9,9; пирит 2,4; 457 м – гипс 3,2; 522 м – гипс 6,3; + – присутствует; - – отсутствует.

симальными – σ (табл. 1). При этом ρ_0 составило 4400 Ом·м, что примерно в 100 раз больше средних значений для кимберлитов и в 10 раз меньше, чем в неизмененных базальтах. Наличие рудных минералов, преимущественно ильменита, приводит к росту χ до 1300×10^{-5} ед. СИ. Таким образом, одновременно высокие значения ρ_0 и χ – следствие особенностей структуры и минерального состава указанной пробы, что приближает ее к слабоизмененным коренным долерито-базальтам и базальтам на этой же линии в скважине 16/150 на глубинах 310–397 м: σ 2,94–2,98 г/см³, χ 1500 – 2000×10^{-5} ед. СИ, ρ_0 20000–57000 Ом·м, $n_{эф}$ 0,2–0,5%.

Ниже зоны включений метасоматиты наблюдаются в интервале 437–480 м, причем с глубиной

степень их перекристаллизации возрастает и сопровождается увеличением степени хлоритизации пород. Петрофизические характеристики, за исключением χ , в основном соответствуют параметрам АКБ. Стабильно большая концентрация магнетита (до 20%) обуславливает высокие значения χ , значительно превышающие показатели для большинства кимберлитовых пород Якутии [3, 4, 8].

На глубине 507 м и ниже брекчии подвергаются полной перекристаллизации и утрачивают присущие кимберлитам структурно-текстурные признаки. До глубины 566,5 м профиль вскрывает область апокимберлитовых метасоматитов и проходит по зоне интенсивного дробления боковых пород. При этом кимберлиты оказались как бы инъецированы

Химический состав кимберлитов

Глубина, м	Породообразующие оксиды, %						ППП
	SiO ₂	Σ Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	
227	18,28	4,31	17,27	22,27	0,35	3,73	31,86
241	41,06	6,71	23,73	6,97	0,43	4,25	15,90
249	43,54	5,67	24,14	6,38	0,37	3,79	14,99
262	21,07	3,39	18,0	19,88	0,49	3,08	31,75
279	36,20	5,62	23,24	10,51	0,42	4,15	18,68
310	31,69	5,37	22,87	11,84	0,46	3,65	22,53
372	35,53	7,9	29,35	6,38	1,42	4,33	13,62
383	33,81	10,57	28,44	7,44	0,44	4,39	14,47
387	32,86	10,48	27,93	8,81	0,41	3,79	14,86
437	33,44	8,93	30,60	6,40	0,49	4,31	14,76
454	34,27	8,68	29,30	7,02	0,43	4,00	15,66
457	32,21	9,23	29,29	8,25	0,50	3,88	15,71
462	33,49	7,17	28,58	8,81	0,45	4,40	15,98
470	35,81	7,81	32,34	4,94	0,46	4,07	13,80
471	35,73	6,52	32,26	5,17	0,49	3,56	15,52
472	33,88	4,62	27,73	9,97	0,45	4,10	18,14
473	32,87	5,90	24,11	13,03	0,47	3,44	18,98
480	31,92	3,71	25,28	14,40	0,48	4,54	19,08
543	41,00	2,50	22,27	8,98	0,44	7,79	12,55
566,5	14,88	2,00	14,85	32,30	0,19	3,19	32,15

во вмещающие породы преимущественно карбонатного состава. В интервале 507—522 м выделяется блок наиболее измененных метасоматозом мраморизованных пород, в которых полностью разложен серпентин и наблюдается интенсивная хлоритизация и кальцитизация. Отдельные участки настолько сильно обогащены магнетитом и пиритом, что в них ураганно увеличивается χ : 507 м — преобладание пирита, χ 1000×10^{-5} ед. СИ; 514 м — содержание магнетита 28%, χ 8000×10^{-5} ед. СИ; 522 м — пирит и магнетит, χ 5300×10^{-5} ед. СИ.

Магнитная фракция в составе кимберлитов появляется в метасоматитах с глубины 358 м и особенно развита в мраморизованных породах на уровне 514 м. В подавляющем большинстве случаев ее много в пробах с высоким содержанием лизардита. Ниже 520 м значения χ определяются количеством рудных минералов, среди которых преобладают пирит и ильменит, вследствие чего при высоких значениях χ магнитная фракция не выделяется. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что значения χ значительно варьируют в зависимости от количественного соотношения ферромагнитных (магнетит) и парамагнитных (пирит, ильменит) минералов.

Расположенные ниже, на глубинах 535—566,5 м, породы также относятся к апокимберлитовым метасоматитам, но в меньшей степени переработанным. Серпентин в них сохраняется в качестве главного минерала (40—60%), среди остальных преобладают кальцит и флогопит. Немного меньше рудных минералов, в основном пирит, что приводит к снижению χ до 170×10^{-5} ед. СИ, в то время как ρ_0 возрастает до 470 Ом·м и выше. Пористость и влагоемкость у этих апокимберлитовых метасоматитов низкие, а плотность повышенная (табл. 1).

Образец кимберлита с глубины 587 м отобран из пород, граничащих с мощной трапповой интрузией, прорывающей трубку. Главными минералами этой породы являются хлорит и тальк, отмечена примесь серпентина и кальцита, из рудных присутствуют пирит и магнетит. Интенсивная хлоритизация сопровождается разрыхлением породы, при этом σ падает до $2,32$ г/см³, возрастают $n_{эф}$ и W (табл. 1). Из-за наличия рудных вкраплений χ достигает 2600×10^{-5} ед. СИ.

Состав, структура, петрофизические свойства

Комплекс рентгенографических и петрофизических измерений, дополненный результатами химического анализа (табл. 2), данными изучения структуры пород и определения скорости распространения в них продольных волн (V_p), позволил не только фиксировать изменения состава или отдельных физических параметров, но и проводить корреляционный анализ полученной совокупности данных о геологическом объекте в рамках единой системы состав—структура—петрофизические параметры. Исследование фазового и химического составов кимберлитов показало, что содержание Mg и Si в образцах коррелирует в основном с количествами серпентина, талька, реже, флогопита. Отмечена связь между концентрацией железа и содержанием

серпентина в кимберлитах. При этом концентрация Fe₂O₃ < 4% характерна для проб с преобладанием хризотила, а Fe₂O₃ > 5% — лизардита. У разностей с большим содержанием лизардита χ увеличивается с ростом количества серпентина, а с повышенным количеством хризотила χ постоянно низкая (рис. 1). Такое возможно в случае вхождения железа в состав серпентина при его кристаллизации в форме лизардита [1]. Количество Са определяют карбонаты, в первую очередь кальцит. Следует также отметить, что кальцит замещает серпентин в кимберлитах. Влияние остальных породообразующих минералов проявляется в росте значений χ при увеличении доли хлорита и снижении — талька.

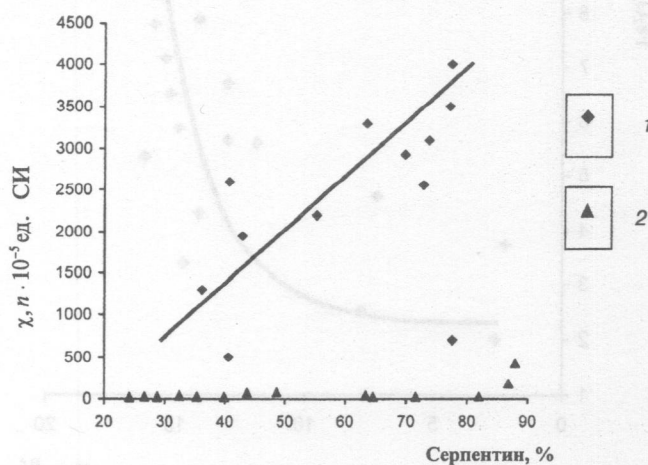


Рис. 1. Зависимость величины магнитной восприимчивости кимберлитов от содержания серпентина: 1 — серпентин с преобладанием лизардита, 2 — хризотила

Эффективная пористость также тесно связана с минеральным и элементным составами кимберлитов. Так, увеличение содержания серпентина заметно повышает ее величину в АКБ и кимберлитах со значениями $n_{эф} > 10\%$. В образцах включений и пробах из зон контактового метаморфизма, где $n_{эф} > 5\%$, указанная зависимость проявляется в меньшей степени. Увеличение количества талька сопровождается снижением значений $n_{эф}$. Вид зависимости между $n_{эф}$ и общим количеством Fe (рис. 2) позволяет заключить, что железо концентрируется в условиях повышенной пористости кимберлитов. Из этого следует, что наблюдаемые процессы образования лизардита, выделения магнетита и хлоритизации пород происходят в условиях свободного доступа выщелачивающих растворов, в то время как оталькование наблюдается в зонах слабого водообмена. Изменение термобарических условий в верхних горизонтах профиля (зона АКБ) и интенсификация фильтрации минерализованных флюидов за счет разуплотнения пород способствуют постепенному выносу Fe и формированию низкотемпературного и более магнезиального поли типа серпентина — хризотила.

Плотность кимберлитов изученного профиля незначительно увеличивается с глубиной и имеет обратную связь с пористостью. Рост содержания серпентина снижает σ , а замещение последнего в составе кимберлитов карбонатами, тальком и слюдой, наоборот, способствует повышению плотности. Полученные данные полностью подтверждают результаты изучения влияния химического состава на σ , которые показали, что повышение магнезиальности и железистости изученных кимберлитов сопровождается снижением их плотности, а при накоплении Са наблюдается рост σ . Выявлена прямая зависимость количества летучих веществ от содержания карбонатов (кальцита и доломита) и обратная — от концентрации магнезиальных мине-

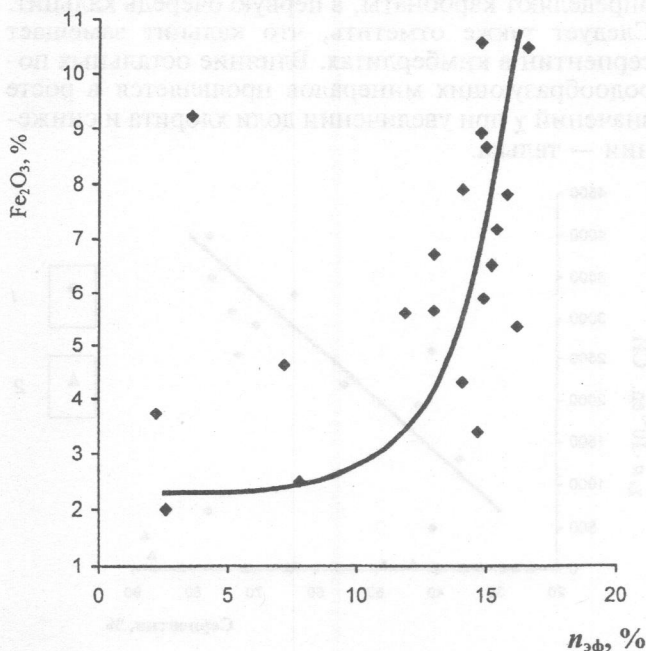


Рис. 2. Взаимосвязь содержания железа и пористости кимберлитов

ралов (серпентина и талька). Следует отметить, что в верхней части профиля, зоне гипергенеза, при замещении серпентина карбонатами преобладает доломит, а в метасоматитах — кальцит.

Изучение кимберлитов методом компьютерного анализа изображений аншлифов в отраженном свете (табл. 3) показывает, что средний размер минеральных зерен кимберлитов уменьшается с глубиной. Рост крупности минеральных агрегатов способствует увеличению плотности и уменьшению пористости (рис. 3, а, б). Тем самым установлено влияние структурно-текстурных особенностей на формирование порового пространства и величину $n_{эф}$. Так, апокимберлитовые метасоматиты контактирующие с вмещающими породами, обособляются на графике в области значений с $n_{эф} < 5\%$. Уменьшение объема порового простран-

Таблица 3

Размер минеральных зерен кимберлитовых пород

Глубина, м	Размер, мм					Средний
	0,05–0,10%	0,10–0,20%	0,20–0,40%	0,40–0,80%	0,80–1,60%	
187	13	46	29	8	2	
241	6	52	27	10	3	0,15
279	30	40	21	7	2	0,12
457	0	21	57	20	1	0,24
472	41	38	13	5	1	0,15
507	67	0	0	0	33	0,16
514	28	40	23	6	2	0,11
522	40	35	17	5	2	0,09
587	44	36	14	5	0	0,08

Таблица 4

Скорость распространения продольных волн в кимберлитах трубки Ньюбрийская

Глубина, м	V_p , м/с
187	1255
227	1141
241	1231
279	1282
329	1353
358	1331
383	1346
406	1482
423,8	1572
457	1071
471	1371
472	1414
507	1023
514	1343
515	1219
522	1522
549	1680
566,5	1458
587	1500

ства снижает электрическую проводимость кимберлитов, в результате чего растет электрическое сопротивление (рис. 3, в), и наоборот. По этой причине высокопористые АКБ в интервале 227—329 м имеют сравнительно низкие значения ρ_0 , а рост электрического сопротивления кимберлитовых пород при увеличении содержания кальция (табл. 1) объясняется тем, что последний вы-

полняет поры, заполненные электропроводящими флюидами.

Влияние состава и структуры пород на результаты геофизических методов поиска, например, акустический каротаж, анализировалось по изменению значений V_p (табл. 3, 4). Изучено влияние на V_p среднего размера минеральных частиц (рис 4, а), а также мелких (0,05—0,10 мм) и крупных (0,4—0,8 мм). Результаты измерений показали,

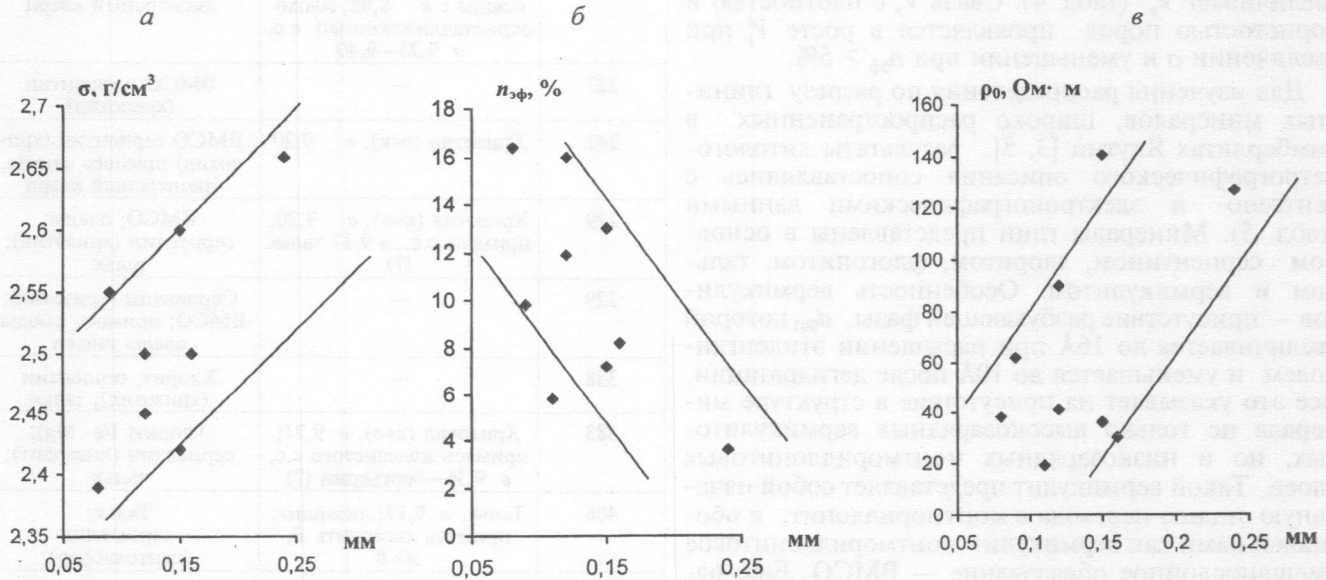


Рис. 3. Влияние зернистости на петрофизические свойства кимберлитов: а — плотность; б — пористость; в — электрическое сопротивление

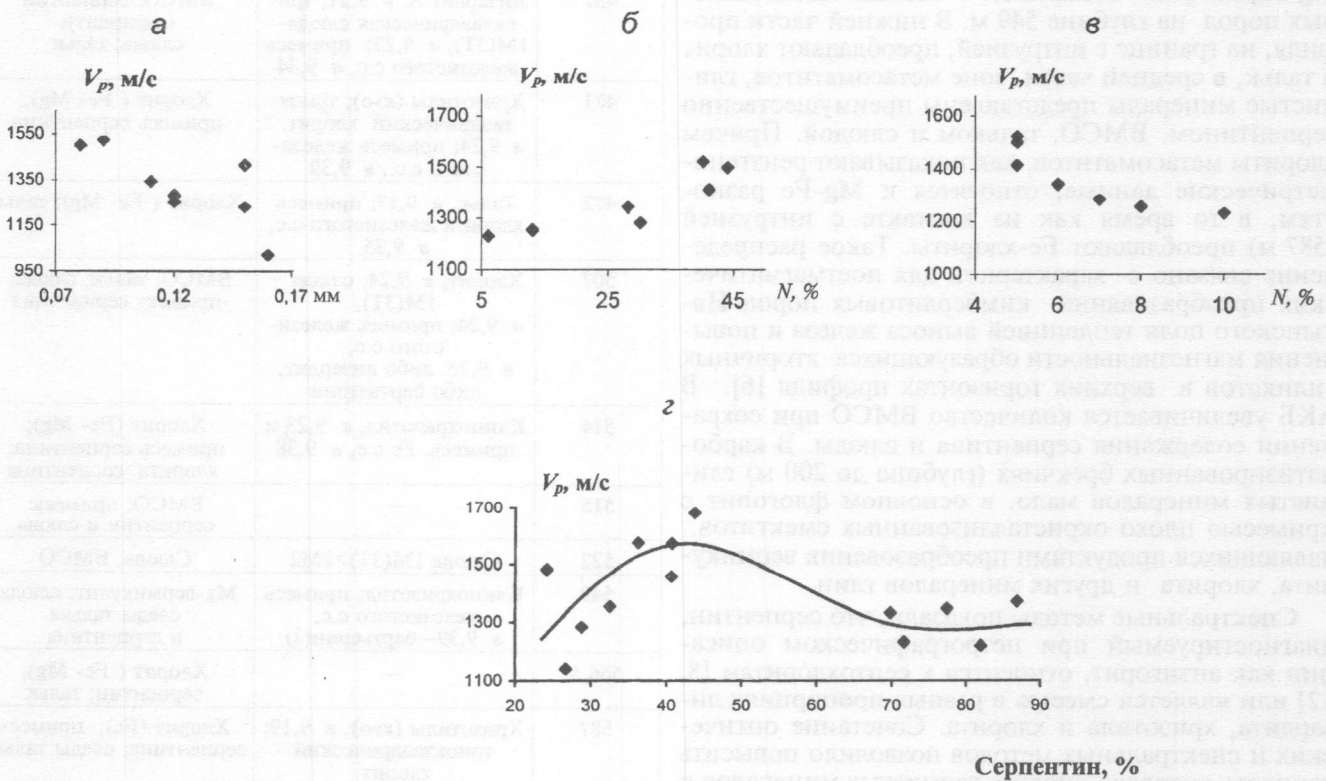


Рис. 4. Зависимость скорости распространения продольных волн от структурно-текстурных особенностей кимберлитовых пород (а — в) и количества серпентина (z): а — от средней крупности минеральных зерен; б, в — количества (N) минеральных зерен: б — фракция 0,05 — 0,10 мм; в — фракция 0,4 — 0,8 мм

Глинистые минералы в кимберлитах трубки Нюрбинская

Глубина, м	Распределение глинистых минералов по результатам:	
	электронографии	рентгенографии фракции <0,002 мм
187	Слюда — флогопит 1М(3Т), σ 9,22; примесь диоктаэдрической слюды с σ 8,98; плохо окристаллизованный с.с., σ 9,25—9,40	Слюда; плохо окристаллизованный смектит (монтмориллонит?); дисперсный кварц
227	—	ВМСО; серпентин (хризотил)
241	Хризотил (о>к), σ 9,20	ВМСО серпентин (хризотил) примесь слюды, дисперсный кварц
279	Хризотил (к>о), σ 9,20; примесь с.с., σ 9,17 тальк (?)	ВМСО; слюда; серпентин (хризотил); тальк
329	—	Серпентин (хризотил); ВМСО; примесь слюды; следы талька
358	—	Хлорит; серпентин (хризотил); тальк
383	Хризотил (к>о), σ 9,21; примесь железистого с.с., σ 9,36—бертьерин (?)	Хлорит (Fe- Mg); серпентин (лизардит); тальк
406	Тальк, σ 9,17; лизардит; примесь лизардита В, А>В	Тальк; серпентин (септохлорит)
423,8	Триоктаэдрическая слюда- 1М(3Т), σ 9,26; примесь 14-7-ангстремного минерала	Примесь слюды; следы глинистых минералов
457	Лизардит А, σ 9,21; триоктаэдрическая слюда- 1М(3Т), σ 9,22; примесь железистого с.с., σ 9,34	ВМСО; серпентин (лизардит); слюда; тальк
471	Хризотилы (к>о); триоктаэдрический хлорит, σ 9,24; примесь железистого с.с., σ 9,39	Хлорит (Fe- Mg); примесь серпентина
472	Тальк, σ 9,17; примесь хлорита железистого с.с., σ 9,35	Хлорит (Fe- Mg); тальк
507	Хлорит, σ 9,24; слюда — 1М(3Т), σ 9,24; примесь железистого с.с., σ 9,35: либо лизардит, либо бертьерин	ВМСО; тальк; слюда; примесь серпентина
514	Клинохризотил, σ 9,23 и примесь Fe с.с., σ 9,38	Хлорит (Fe- Mg); примесь серпентина; хлорита>серпентина
515	—	ВМСО; примесь: серпентин и слюда
522	Слюда 1М(3Т)>2М2	Слюда; ВМСО
549	Клинохризотил; примесь железистого с.с., σ 9,39—бертьерин(?)	Мг-вермикулит; слюда; следы талька и серпентина
566,5	—	Хлорит (Fe- Mg), серпентин; тальк
587	Хризотилы (к>о), σ 9,19; триоктаэдрический хлорит	Хлорит (Fe); примесь серпентина; следы талька

Примечание о — ортохризотил, к — клинохризотил; с.с. — смешанослойный минерал; прочерк — измерения не проводились, σ в Å.

что V_p уменьшается при увеличении крупности частиц (рис. 4, б, в). Отмечен также постепенный рост значений V_p с глубиной. Зависимости V_p от минерального состава свидетельствуют, что для серпентина график состоит из двух частей: участка линейного роста при увеличении количества последнего до 50%, и прямой постоянных значений, при содержании > 65—70% (рис 4, г). Присутствие в породе более 15% кальцита и слюды, как правило, увеличивает V_p (табл. 4). Связь V_p с плотностью и пористостью пород проявляется в росте V_p при увеличении σ и уменьшении при $n_{\text{эф}} > 5\%$.

Для изучения распределения по разрезу глинистых минералов, широко распространенных в кимберлитах Якутии [3, 5], результаты литолого-петрографического описания сопоставлялись с рентгено- и электронографическими данными (табл. 5). Минералы глин представлены в основном серпентином, хлоритом, флогопитом, тальком и вермикулитом. Особенность вермикулитов — присутствие разбухающей фазы, d_{001} которой увеличивается до 16Å при насыщении этиленгликолем и уменьшается до 10Å после дегидратации. Все это указывает на присутствие в структуре минерала не только высокозарядных вермикулитовых, но и низкозарядных монтмориллонитовых слоев. Такой вермикулит представляет собой начальную стадию перехода в монтмориллонит, и обозначен нами как вермикулит-монтмориллонитовое смешанослойное образование — ВМСО. Еще одной причиной разбухания может стать понижение заряда слоя в результате вхождения Са в состав межслоевых катионов [7, 10]. Неразбухающий Mg-вермикулит обнаружен в составе магнезиальных пород на глубине 549 м. В нижней части профиля, на границе с интрузией, преобладают хлорит и тальк, в средней части, зоне метасоматитов, глинистые минералы представлены преимущественно серпентином, ВМСО, тальком и слюдой. Причем хлориты метасоматитов, как показывают рентгенометрические данные, относятся к Mg-Fe разностям, в то время как на контакте с интрузией (587 м) преобладают Fe-хлориты. Такое распределение связано с характерной для постмагматических преобразований кимберлитовых пород Накынского поля тенденцией выноса железа и повышения магнезиальности образующихся вторичных силикатов в верхних горизонтах профиля [6]. В АКБ увеличивается количество ВМСО при сохранении содержания серпентина и слюды. В карбонатизированных брекчиях (глубина до 200 м) глинистых минералов мало, в основном флогопит с примесью плохо окристаллизованных смектитов, являющихся продуктами преобразования вермикулита, хлорита и других минералов глин.

Спектральные методы показали, что серпентин, диагностируемый при петрографическом описании как антигорит, относится к септохлоритам [8, 12] или является смесью в разных пропорциях лизардита, хризотила и хлорита. Сочетание оптических и спектральных методов позволило повысить точность экспресс-анализа глинистых минералов и выявить их ассоциации, характерные для каждого типа кимберлитовых пород, при переходе от АКБ к метасоматитам (табл. 5).

Состав и петрофизические характеристики кимберлитов в трубке Нюрбинская по скважине Н – 16/138

Глубина, м	Зоны профиля	Разновидности пород	Литологический тип пород	Породообразующие минералы	Политип серпентина	Глинистые минералы	Породообразующие оксиды				Петрофизические параметры					Магнитная фракция	V _p м/с	Средний размер зерен, мм
							SiO ₂	ΣFe ₂ O ₃	MgO	CaO	σ, г/см ³	n _{эф} , %	W, %	χ 10 ⁻⁵ ед.СИ	ρ ₀ , Ом·м			
187	Кимберлитовые брекчии	Карбонатизированные брекчии	АКБ	Доломит, кальцит, слюда, кварц	—	Слюда	31,8	5,2	21,5	13,0	2,45	16,0	6,8	23	90	—	1255	0,12
227–329			Неизменные брекчии	АКБ	Доломит, серпентин, слюда	х	Серпентин, ВМСО-хлорит, слюда, тальк					2,44	13,3	5,8	26	36	—	1251
358–387		Измененные метасоматиты	Контактовые породы на границе между кимберлитами и траппами	АКБ	Серпентин, тальк, магнетит	х, л	Хлорит, серпентин, тальк	34,0	9,7	28,6	7,5	2,37	16,2	7,1	3250	76	+	1339
406	ПК (включение)			Серпентин, тальк, доломит, кальцит	с	Тальк серпентин	н.о	н.о	н.о	н.о	2,48	3,5	1,5	20	53	—	1482	н.о
423,8	Базальт (включение)			Серпентин, полевопшпатовая обманка, кварц слюда (серицит), ильменит	с, л	Слюда, серпентин	н.о	н.о	н.о	н.о	2,88	1,2	0,5	1300	4400	—	1572	н.о
437–480	Измененная порода			Серпентин, тальк, слюда, хлорит, кальцит, магнетит	х, л	Хлорит, тальк серпентин	33,5	7,0	28,8	8,7	2,44	14,3	6,3	1700	86	+	1285	0,20
507–522	Апокимберлитовые метасоматиты при контактах с вмещающими породами			Мраморизованная порода	Кальцит, слюда, хлорит, магнетит	х, л	ВМСО-хлорит, тальк, слюда, серпентин					2,60	6,0	2,5	3600	120	+	1276
535–566,5		Измененная порода	Серпентин, кальцит, слюда	х, л	Серпентин, слюда, хлорит	28,0	2,2	18,6	20,6	2,61	4,1	1,8	170	470	—	1569		
587		Контактовые метасоматиты с базитовой интрузией	То же	Хлорит, тальк, кальцит	н.о	Хлорит, тальк	н.о	н.о	н.о	н.о	2,32	16,4	7,6	2600	38	—	1500	0,08

Примечание. Политипы серпентина: л – лизардит, х – хризотил, с – септохлорит; для химического состава и петрофизических параметров приведены средние значения по интервалу; н.о – не определялось; прочерк – параметр отсутствует, + – присутствует.

Заключение

Таким образом, результатом комплексных исследований стало установление вертикальной зональности вторичной минерализации кимберлитов трубки Нюрбинская по разрезу скважины в интервале глубин 187–587 м, сопоставленной с распределением физических свойств, структурных и кристаллохимических особенностей по глубине (табл. 6). Ввиду отличий по большинству вышеперечисленных признаков пород на глубине 587 м от остальных метасоматитов, эти породы выделены в отдельную зону контакта с базитовой интрузией.

Проведенные исследования пород трубки Нюрбинская позволили на практике проверить эффективность объединения в единый лабораторно-аналитический комплекс методик фазового и структурного анализов, петрофизических измерений и оптических исследований с последующей обработкой и интерпретацией суммы полученных данных. Если выполненные ранее исследования пород трубки Нюрбинская [2, 3, 12] касались в основном изучения их химического состава или петрофизических свойств, то с помощью разработанного рентгеновскую дифрактометрию, оптическую микроскопию и физические измерения, удалось получить зависимости, связывающие минеральный и химический состав, а также степень метасоматических преобразований с электрическими, магнитными, физическими и акустическими характеристиками кимберлитов. Показано, что основные физические свойства кимберлитов на глубину до 587 м определяются составом вторичных минералов. В частности, увеличение содержания серпентина повышает плотность, пористость, удельное электрическое сопротивление и магнитную восприимчивость кимберлитов и т.д.

Целенаправленное проведение комплексного анализа кимберлитов по разрезу разведочных скважин в различных частях трубки позволит суммировать данные о распределении минерального состава

и физических свойств кимберлитовых пород в объеме продуктивных горизонтов рудного тела.

Разделение кимберлитовых пород по составу преобладающих вторичных минералов, а также степени гипергенного и метаморфического преобразований с выделением для каждой зоны типоморфного минерального парагенезиса, комплекса основных физических свойств, гранулометрического состава и структурно-текстурных особенностей и проведение на этой основе реконструкции распределения указанных характеристик по разрезу диатремы является основой научного подхода к созданию физико-геологической модели трубки. Под этим понимается система, способная отражать основные закономерности объекта так, чтобы по ограниченному числу параметров прогнозировать другие признаки системы. Применительно к практике разведки алмазных месторождений это позволит уточнить пространственное расположение кимберлитовых тел, решать вопросы, связанные с характером взаимодействия кимберлитов и вмещающих пород.

Имеется перспектива использования данных об особенностях состава и структуры глинистых минералов для поисков перетолженного материала кимберлитов при локальном районировании перспективных территорий [3, 6].

Внедрение (а в дальнейшем и стандартизация) комплексного анализа алмазоносных пород в практику ведения поисковых и горных работ создаст основу для системности формирования банка данных известных рудных тел и работы с большими выборками качественных и количественных параметров, требующих применения статистических методов обработки информации. Получаемая в результате совокупность данных может быть использована для проведения идентификации, типизации и паспортизации месторождений и кимберлитовых проявлений, а на следующих этапах освоения — для принятия обоснованных технологических решений по выбору систем вскрытия и отработки рудных тел и технологий обогащения алмазосодержащего сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров К.Н., Богданов Г.В., Лашкевич В.В., Медведева Т.И., Тихонова Г.А. Стадийность и физико-химические условия процесса серпентинизации кимберлитов // Зап. ВМО. 1991. № 6. С. 1–12.
2. Занкович Н.С., Зинчук Н.Н. Петрографо-минералогические характеристики кимберлитовых пород разных фаз внедрения трубок Накынского поля // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж, 2001. С. 54–72.
3. Зинчук Н.Н. Постмагматические минералы кимберлитов. М., 2000. 538 с.
4. Зинчук Н.Н., Бондаренко А.Т., Гарат М.Н. Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород. М.: Недра, 2002. 695 с.
5. Зинчук Н.Н., Подгаецкий А.В., Бондаренко А.Т. и др. Взаимосвязь химико-минералогического состава и петрофизических свойств кимберлитов в процессе их гипергенного изменения в трубке Ботубинская (Якутия) // Руды и металлы. 2002. № 2. С. 43–55.
6. Зинчук Н.Н., Стегницкий Ю.Б., Мельник Ю.М. Особенности профиля коры выветривания кимберлитовых пород Накынского поля // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI в. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. С. 74–78.
7. Копейкин Н.Н., Котов Н.В., Гойло Э.А., Франк-Каменецкий В.А. Преобразование диоктаэдрических монтмориллонитов в гидротермальных условиях в присутствии доломита // Рентгенография минерального сырья. М., 1977. С. 140–152.
8. Лисковая Л.В. Сравнительная характеристика серпентинов из основной массы кимберлитов трубок Заполярная, Иреляхская и Нюрбинская (по данным рентгенографического анализа) // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI в. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. С. 376–379.
9. Микоев И.И. Радиоволновые свойства кимберлитов Накынского поля по данным РВП // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж, 2001. С. 290–293.
10. Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов / Под ред. Г. Брауна. М.: Мир, 1965. 599 с.
11. Томшин М.Д., Фомин А.С., Корнилова В.П., Черный С.Д., Яныгин Ю.Т. Особенности магматических образований Накынского кимберлитового поля Якутской провинции // Изв. вузов. Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 12. С. 1693–1703.
12. Черный С.Д., Фомин А.С., Яныгин Ю.Т., Колесников Г.В. Геологическое строение и вещественный состав кимберлитовых трубок Накынского поля Якутской провинции // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. Мирный, 1998. С. 157–159.

ЯНИГП ЦНИГРИ
АК «АЛРОСА»

Рецензенты — С.В. Ежов, В.К. Гаранин