ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2010, том 434, № 4, с. 534–539

ГЕОХИМИЯ

УДК 550.42

Rb–Sr-ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МИНЕРАЛОВ, ВОЗРАСТ И ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕЖДАНИНСКОЕ (ЯКУТИЯ)

© 2010 г. А. В. Чугаев, член-корреспондент РАН И. В. Чернышев, Г. Н. Гамянин, академик Н. С. Бортников, А. Н. Баранова

Поступило 12.04.2010 г.

Проблема связи орогенных (мезотермальных) золоторудных месторождений с магматическими и метаморфическими процессами наиболее дискуссионна [1, 2]. Типичным и крупным объектом указанного типа является месторождение Нежданинское, поэтому возраст гидротермальной минерализации и источники металлов относятся к числу ключевых вопросов в изучении конкретно этого месторождения и в разработке указанной выше проблемы в целом. Наиболее актуальной сейчас является задача прямого датирования гидротермальных образований месторождения Нежданинское. Такие изотопно-геохронологические данные отсутствуют, что оставляет открытым вопрос о временно́й корреляции рудообразующих и магматических процессов, проявленных на этом месторождении.

Нежданинское золоторудное месторождение (рис. 1) с разведанными запасами 311 т Au [3], а включая оцененные резервы – 478 т Au, локализовано в Южно-Верхоянском синклинории в пределах Верхоянского складчатого подвижного пояса, активизированного при аккреции Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса [2]. Нежданинское рудное поле располагается на границе двух структурно-вещественных зон Южно-Верхоянского синклинория: Присеттедабанской и Центральной. Площадь рудного поля сложена нижне-, верхнепермскими песчано-сланцевыми отложениями, смятыми в антиклинальную флексурообразную складку, и имеет протяженность 15 км при ширине около 4 км (рис. 1). В его северо-восточной части обнажается Курумский гранит-гранодиоритовый массив (6.5 км^2), а в юг–юго-западной – Гельдинская группа штоков диоритового состава и Яманский гранитоидный шток. Определения изотопного возраста этих пород изменяются в пределах от 126 до 70 млн. лет. Рудное поле приурочено к пересечению четырех систем разломов – региональной глубокого заложения субмеридиональной ориентировки (Кидерикинской), широтной (Тыринской) и двух диагональных (Сунтарской и Халыинской) – разбивающих свод складки на ряд горстообразных блоков и контролирующих размещение золоторудной минерализации.

Для Rb–Sr-датирования жильной минерализации месторождения Нежданинское был применен нетрадиционный подход, который основывается на использовании гидротермального кварца в качестве Rb–Sr-геохронометра. Изучение Rb–Sr-изотопной системы этого минерала позволяет успешно решать как геохронологические, так и изотопно-геохимические задачи [4–8]. Rb–Sr-изотопная система кварца характеризуется рядом особенностей, которые препятствуют широкому использованию этого минерала в изотопной геологии. Это, во-первых, низкий уровень содержаний исследуемых элементов (<100 нг/г), требующий особого методического подхода к изучению этого минерала, и, во-вторых, многообразие форм нахождения Rb и Sr в кварце и, как следствие этого, сложное поведение Rb–Sr-изотопной системы под действием наложенных процессов. Rb–Sr-изучение кварца желательно сочетать с изучением вариаций изотопного отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в других гидротермальных минералах, характеризующихся низкими величинами отношения $^{87}Rb/^{86}Sr$ [9]. Нами были изучены шеелит и карбонаты.

Шеелит и карбонаты в силу своих кристаллохимических особенностей концентрируют преимущественно Sr по отношению к Rb. Как следствие этого, изотопный состав Sr в карбонатах после их кристаллизации со временем не меняется. Таким образом, данные Rb–Sr-изучения этих минералов позволяют непосредственно судить о величине отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ во флюиде, из которого происходила их кристаллизация.

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва

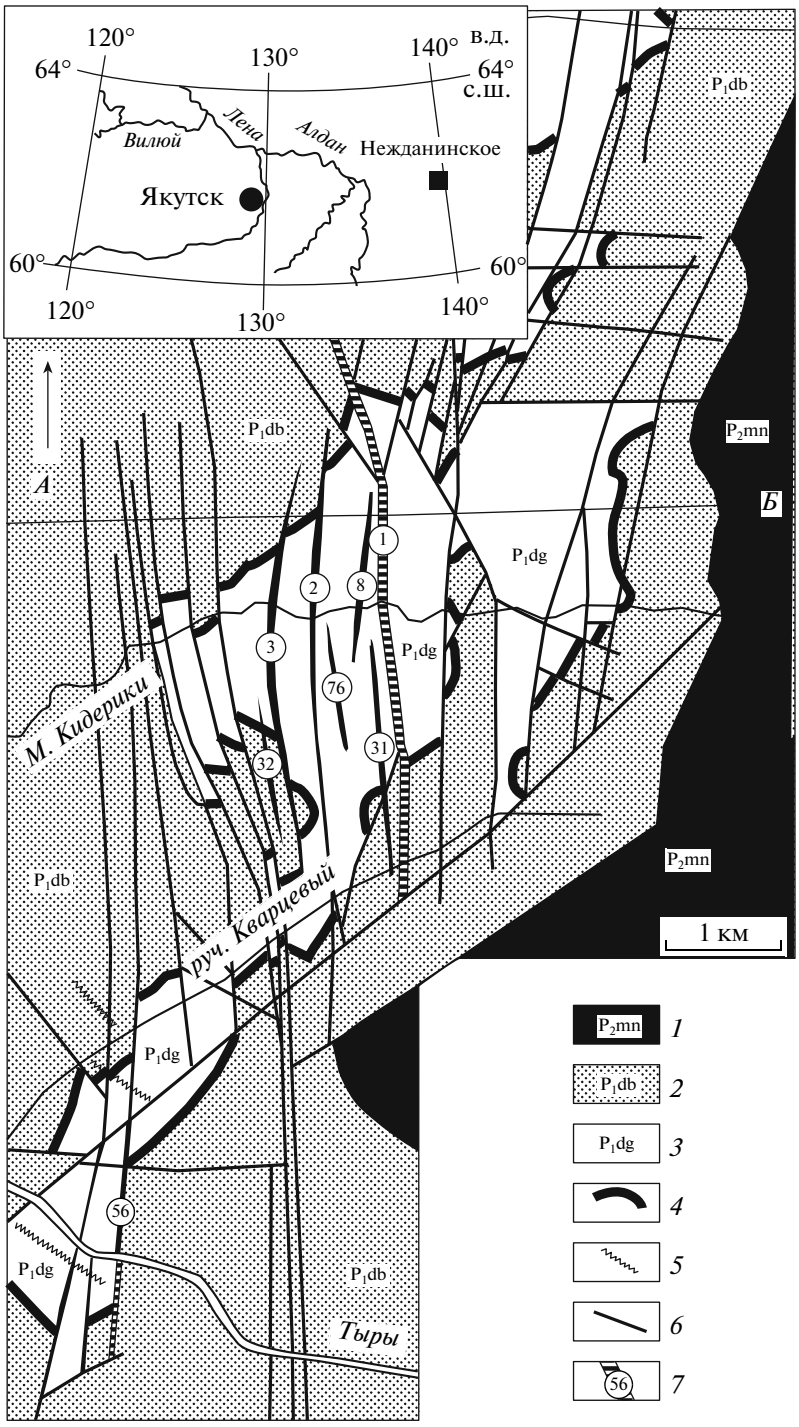

Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Нежданинское [2]. *1* – песчаники, алевролиты (P_2mn); *2* – песчаники, алевролиты, аргиллиты (P_1db); *3* – алевролиты, песчаники (P_1dg); *4* – маркирующий слой песчаников (P_1dg); *5* – дайки лампрофиров и диоритовых порфиритов; *6* – разрывные нарушения; *7* – рудные зоны и их номера.

Все измерения изотопного состава Sr и содержаний Rb и Sr методом изотопного разбавления проводили на 7-коллекторном масс-спектрометре Micromass Sector 54. Изучение Rb–Sr-изотопной системы кварца проведено с помощью специально разработанных методик [8], которые в комплексе обеспечили низкий уровень фона на всех стадиях анализа (суммарный уровень фона по Rb и Sr составляет 0.06 и 0.11 нг соответственно) и высокую чувствительность масс-спектрометрических измерений. Средняя погрешность измерения отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ при анализе квар-

Таблица 1. Результаты Rb–Sr-изучения шеелита и карбонатов из рудных зон месторождения Нежданинское

№	Образец	Место отбора	Rb, мкг/г	Sr, мкг/г	$^{87}Rb/^{86}Sr$, ±2σ	$^{87}Sr/^{86}Sr$, ±2σ
		Шеелит из рудной зоны № 1				
1	2/28-1	+800 м, юж. часть	0.1	5850	0.0001 ± 3	0.713578 ± 15
2	2/27	+1000 м, юж. часть	0.3	3865	0.0002 ± 3	0.713871 ± 15
3	149-Гр-78	+700 м, центр. часть	0.1	10600	0.0001 ± 3	0.712558 ± 15
4	189-Гр-78	+1200 м, центр. часть	0.4	8300	0.0001 ± 2	0.712345 ± 15
5	85/2	+800 м, сев. часть	0.5	7380	0.0002 ± 2	0.713052 ± 15
6	13-10	+1100 м, сев. часть	0.4	3970	0.0003 ± 4	0.713364 ± 15
		Метаморфогенный (дорудная стадия) карбонат				
7	5Л-Г-9		0.55	11740	0.0001 ± 2	0.711268 ± 15
8	392-8 ШТ		0.78	2400	0.0009 ± 1	0.708117 ± 15
		Метасоматический и гидротермальный (рудная стадия) карбонат				
9	13-709	рудная зона № 1	8.57	1700	0.015 ± 2	0.713168 ± 15
10	15-730	»	5.03	10126	0.0015 ± 6	0.713073 ± 15
11	42-Гр-78	»	2.1	14600	0.0004 ± 1	0.712875 ± 14
12	206-Гр-77	»	1.03	1430	0.003 ± 2	0.712810 ± 20
13	860-147	рудная зона № 2	1.1	53	0.061 ± 6	0.713276 ± 15
14	860-148	»	6.4	3600	0.006 ± 1	0.713412 ± 15
15	159-128	рудная зона № 32	1.2	1960	0.0018 ± 2	0.713046 ± 10
16	160-158	»	4.2	880	0.014 ± 1	0.713074 ± 10
17	560-307	рудная зона № 56	0.9	506	0.005 ± 8	0.712994 ± 30
18	296-135	рудная зона № 76	6.2	3870	0.005 ± 1	0.713259 ± 15
		Регенерированный (пострудная стадия) карбонат				
19	ШТ-27 рег. 3	рудная зона № 1	0.4	1810	0.001 ± 1	0.713668 ± 15
20	ШТ-8 рег. 6	рудная зона № 8	25	3100	0.023 ± 1	0.712818 ± 15
21	165-350	рудная зона № 32	0.03	17	0.01 ± 1	0.713537 ± 14
22	159-208	рудная зона № 56	3.6	271	0.038 ± 1	0.713023 ± 15
23	4/6-29-1	»	2.7	6610	0.001 ± 2	0.713616 ± 16
24	15/6-29	»	1.6	306	0.015 ± 2	0.713524 ± 15
25	ШТ-16	рудная зона № 76	0.05	2470	0.0001 ± 1	0.713278 ± 15

Примечание. Указанные погрешности относятся к последним значащим цифрам.

ца составляла ±0.003% (2σ). Правильность результатов контролировали систематическими анализами стандартного образца изотопного состава Sr SRM-987. Погрешности конечных результатов (т.е. величин изотопных отношений $^{87}Rb/^{86}Sr$ и $^{87}Sr/^{86}Sr$) анализов индивидуальных образцов приведены в табл. 1.

На месторождении Нежданинское в составе руд выделяется три генерации кварца [2]. Преобладающее значение имеет кварц II генерации, который слагает основную массу рудных тел и вмещает золотую минерализацию. Для анализа были отобраны восемь образцов кварца II генерации. Семь образцов представляли разные уровни глубин рудной зоны № 1, а один образец характеризовал рудную зону № 3. Микроскопическая структура кварца изученных образцов определяется изометричными или слабо вытянутыми зернами, размер которых изменяется от первых миллиметров до первых сантиметров. Во всех образцах наблюдается значительное количество преимущественно первичных двухфазных (газ–жидкость) и газовых флюидных включений. В кварце присутствуют редкие микровключения карбонатов и мусковита. Признаки поздней перекристаллизации жильного кварца не обнаружены, что служит главным минералогическим критерием ненарушенности Rb–Sr-изотопной системы отобранных образцов кварца, определяющим их пригодность для изотопного датирования.

Шеелит на месторождении представлен двумя генерациями: ранней и поздней. Шеелит ранней

генерации, изученный нами, широко распространен и присутствует в рудных телах в виде вкрапленности или гнезд [2]. Выделения этого минерала чаще всего наблюдаются в зальбандах кварцевых жил и прожилков, где шеелит тесно ассоциирует с сульфидами. Было подготовлено 6 мономинеральных фракций шеелита с различных гипсометрических уровней рудной зоны № 1. Вертикальный интервал опробования составил 500 метров.

Карбонаты в рудных телах месторождения Нежданинское по распространению уступают только кварцу. Отложение карбонатов происходило на разных стадиях развития гидротермального процесса. К дорудным карбонатам относится кальцит из метаморфогенно-гидротермальных кварц-карбонат-хлоритовых жил, а также доломит, анкерит и сидерит из ранних серицит-карбонатных метасоматитов. Карбонаты рудной стадии (магнезит-ферромагнезит и анкерит-доломит) присутствуют в рудных метасоматитах и жильных телах. Пострудные карбонаты сидерит-магнезитового ряда слагают вместе с кварцем поздние жилы. Изучено 19 образцов карбонатов. Из них два образца отобраны из метаморфогенных кварц-карбонатных жил, 10 образцов из метасоматитов и жильных образований различных рудных зон и 7 образцов представлены пострудным карбонатом.

Результаты Rb–Sr-изучения минералов представлены в табл. 1. Содержания Rb и Sr в кварце изменяются в относительно широких пределах от 0.025 до 1.17 мкг/г и от 0.12 до 1.28 мкг/г соответственно, но в целом являются достаточно обычными для кварца гидротермального происхождения. Изотопное отношение $^{87}Rb/^{86}Sr$ в кварце месторождения Нежданинское находится в диапазоне значений 0.4–2.4. Оно резко отличается от отношения $^{87}Rb/^{86}Sr$ в гидротермальном кварце, образованном флюидами магматического происхождения [4, 8], в котором это отношение может достигать величин порядка 40 и более, но сопоставимо с отношением $^{87}Rb/^{86}Sr$ кварца мезотермальных месторождений золота различного типа. Значения отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ изменяются в узких пределах от 0.714 до 0.717, что обусловлено низкими величинами отношения $^{87}Rb/^{86}Sr$ в изученных образцах и относительно молодым возрастом месторождения Нежданинское.

На Rb–Sr-диаграмме экспериментальные точки кварца не следуют единой линии регрессии (рис. 2). Наблюдаемый разброс может быть в принципе обусловлен двумя геохимическими причинами: с одной стороны, нарушением замкнутости Rb–Sr-изотопной системы кварца в процессе позднего его преобразования, а с другой – неоднородностью минералообразующего флюида в отношении величины $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$. Микроскопическое изучение кварца, показавшее отсутствие признаков его перекристаллизации, позволило исключить из рассмотрения влияние нарушения замкнутости Rb–Sr-изотопной системы. Наиболее вероятной причиной разброса точек, которая подтверждается обсуждаемыми ниже результатами Rb–Sr-изучения шеелита и карбонатов, является неоднородность величины $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$. Анализ распределения точек на Rb–Sr-диаграмме показывает, что они лежат на двух параллельных линиях с близким углом наклона. Верхняя на диаграмме линия регрессии образуется тремя точками, отвечающими образцам жильного кварца с наиболее глубоких горизонтов рудной зоны № 1 (–100 – +150 м). На нижнюю линию попадают точки образцов из рудных зон № 1 и № 3, отобранные в интервале глубин от +350 до +1450 м. Рассчитанные по этим двум совокупностям точек Rb–Sr-датировки совпадают в пределах погрешности и составляют соответственно 129 ± 2 млн. лет при $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0 = 0.71335 \pm 3$ и СКВО = 1 (три точки) и 132 ± ± 12 при $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0 = 0.7128 \pm 2$ и СКВО = 32 (пять точек).

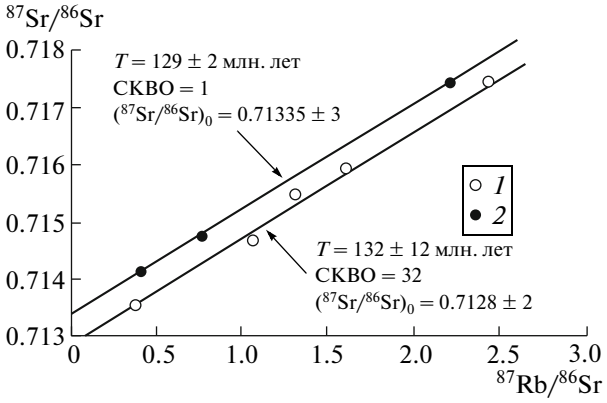

Рис. 2. Rb–Sr-изотопная диаграмма для жильного кварца рудных тел месторождения Нежданинское. Пробы кварца отобраны с верхних (*1*) и нижних (*2*) горизонтов месторождения.

Эти результаты не противоречат геологическим данным о раннемеловом возрасте месторождения. По Rb–Sr-системе кварца можно устанавливать только время кристаллизации минерала, причиной чего являются особенности форм нахождения Rb и Sr, которые определяют существенные различия в миграционной способности этих элементов в процессе вторичного преобразования [8]. Датирование процессов вторичных преобразований этого минерала невозможно, поскольку перекристаллизация кварца не сопровождается гомогенизацией изотопного состава Sr. Реальность полученных датировок также подтверждается согласованностью рассчитанных по линиям регрессии величин $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ (рис. 2) и значений $^{87}Sr/^{86}Sr$ в ассоциирующих с кварцем шеелите и карбонатах (табл. 1). Так, в образцах карбонатов № 11 и № 12, отобранных из того же

интервала глубин рудной зоны № 1, что и кварц, установлены значения $^{87}Sr/^{86}Sr$, равные соответственно 0.712875 ± 14 и 0.712810 ± 20 при рассчитанном значении $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0 = 0.7128 \pm 2$. Тем не менее некоторая неоднородность величины $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ в рудообразующем флюиде несомненно существовала, чем и объясняется повышенное значение СКВО = 32 для нижней изохроны и достаточно большая погрешность определяемого возраста (132 ± 12 млн. лет). Отметим также, что Rb–Sr-датировка кварца в пределах погрешности совпадает с K–Ar-возрастом (119 ± 4 млн. лет), полученным по серициту из метасоматитов месторождения (измерения проведены в СВКНИИ, г. Магадан по образцу из коллекции Г.Н. Гамянина).

Шеелит месторождения Нежданинское обладает в общем характерным для этого минерала очень высоким (тысячи мкг/г) содержанием Sr. Вариации отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ лежат в диапазоне от 0.7123 до 0.7139 (табл. 1). Наименьшие значения $^{87}Sr/^{86}Sr$ установлены в шеелите из центральной части рудной зоны № 1 (№ 3 и № 4), тогда как этот минерал из краевой части этой зоны обладает более высокими значениями. Эти вариации не могут быть объяснены переменной добавкой радиогенного ^{87}Sr ввиду крайне низкого отношения $^{87}Rb/^{86}Sr$ (<0.0003) и, таким образом, отражают неоднородность этого отношения в минералообразующем флюиде в зоне рудоотложения.

Особенность карбонатов месторождения Нежданинское – широкий диапазон содержания Sr от 17 до 14600 мкг/г. По-видимому, он обусловлен значительной изменчивостью химического состава этих минералов на месторождении. Значения отношения $^{87}Rb/^{86}Sr$ низкие, изменяются от 0.0001 до 0.061 и в целом типичны для карбонатов гидротермального генезиса. Изменение отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в карбонатах за счет радиогенной добавки изотопа ^{87}Sr при установленных значениях $^{87}Rb/^{86}Sr$ за 130 млн. лет заведомо меньше величины 0.00001, близкой к погрешности измерения отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$. Следовательно, измеренные значения отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в карбонатах могут быть приняты как начальные. Они меняются в широком диапазоне, при этом наименьшими значениями (0.708 и 0.711) характеризуются дорудные карбонаты из метаморфогенных кварц-карбонатных жил, тогда как карбонаты рудной и пострудной стадий имеют более высокие значения отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$. Диапазон изменения отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в карбонатах рудной стадии меньше (0.7128–0.7134), чем для пострудных карбонатов (0.7128–0.7137). Для карбонатов отсутствует корреляция между величиной $^{87}Sr/^{86}Sr$-отношения и содержанием Sr, а также глубиной отбора образца.

Приведенные Rb–Sr-изотопные данные позволяют сделать следующее заключение. Датировки гидротермального процесса на месторождении Нежданинское подтверждают временну́ю связь рудообразования и мелового магматизма в регионе. В силу изложенных выше причин полученные датировки отягощены значительной погрешностью, доходящей до 12 млн. лет, поэтому более детальная временная корреляция рудообразования и формирования конкретных интрузивных тел требует дальнейшего уточнения изотопных датировок. Совокупность Rb–Sr-данных, полученных для шеелита и карбоната, однозначно указывает на коровую природу источника Sr, поступавшего в зону рудоотложения. Потенциальными источниками Sr могли послужить магматические расплавы, с которыми связано становление в регионе в меловое время гранитоидных интрузий, и (или) вмещающие терригенно-осадочные породы пермского возраста. Величина начального отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в интрузивных породах Нежданинского рудного поля ~0.707 [10] существенно ниже значений 0.7123–0.7139, установленных в шеелите и в карбонатах рудной стадии и характеризующих минералообразующий флюид. Полученные данные позволяют ограничить роль магматического источника стронция, но исключить его поступление из магмы нельзя. Значительно более вероятно, что стронций извлекался флюидом из терригенно-осадочных пород. Изотопное отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ в этих породах на момент образования в них метаморфогенных карбонатов составляло 0.708–0.711. Это отношение при характерных для черных сланцев значениях $^{87}Rb/^{86}Sr$, составляющих первые единицы, могло за счет накопления радиогенного ^{87}Sr к моменту развития гидротермального рудообразования достигнуть величин 0.7123–0.7139, характерных для флюида.

Таким образом, согласно полученным данным, преимущественным источником Sr являлись подстилающие пермские терригенно-осадочные породы, а вскрытая неоднородность изотопного состава Sr во флюиде, очевидно, обусловлена первичной неоднородностью Rb–Sr-отношения в этих породах. Эти выводы в целом согласуются с имеющимися сведениями о том, что в орогенные золотообразующие системы Sr поступал из подстилающих пород, развитых в районах месторождений, а неоднородность отношений $^{87}Sr/^{86}Sr$ обусловлена смешением Sr, извлекавшегося из разных пород [11]. Как следует из опубликованных ранее данных об изотопном составе O, C, S, а также о распределении редких элементов в минералах метасоматических, интрузивных и терригенно-осадочных пород [1, 2], некоторые другие минералообразующие компоненты могли поступать в рудообразующую систему из магматического источника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Алпатов В.А. и др.* // Геология руд. месторожд. 1998. Т. 40. № 2. С. 137–156.
2. *Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьева О.В. и др.* // Геология руд. месторожд. 2007. Т. 49. № 2. С. 99–45.
3. *Goldfarb R.J., Baker T., Dubé B. et al.* // Econ. Geol. 2005. V. 100. P. 407–450.
4. *Shepherd T.J., Darbyshire D.P.F.* // Nature. 1981. V. 290. P. 578–579.
5. *Changkakoti A., Gray J., Kristic D., Cumming G.L.* // Geochim. et cosmochim. acta. 1988. V. 52. P. 961–967.
6. *Pettke Th., Diamond L.W.* // Geochim. et cosmochim. acta. 1995. V. 59. № 19. P. 4009–4027.
7. *Pettke Th., Diamond L.W.* // Econ. Geol. 1997. V. 92. P. 389–406.
8. *Чугаев А.В.* Rb–Sr-изотопная система гидротермального кварца, возраст и источники вещества золоторудных месторождений Сухой Лог (Россия) и Колар (Индия) / Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2007. 26 с.
9. *Лаверов Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В. и др.* // Докл. РАН. 2007. Т. 415. № 2. С. 236–241.
10. *Гамянин Г.Н., Бортников Н.С., Алпатов В.А.* Нежданинское золоторудное месторождение – уникальное месторождение Северо-Востока России. М.: Геос, 2000. 228 с.
11. *Ridley J.R., Diamond L.W.* // Revs. Econ. Geol. 2000. V. 13. P. 141–162.