

УДК 553.411:550.83.02

## ВАРИАЦИИ ФУГИТИВНОСТИ СЕРЫ В РУДООБРАЗУЮЩЕМ РАСТВОРЕ: ФАКТОР МАГНИТНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ ЗОЛОТОСУЛЬФИДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ю.В. Колмаков, А.М. Сазонов\*, В.В. Врублевский\*\*, Е.В. Потехина\*\*\*, Г.Ю. Боярко

Томский политехнический университет

\*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

\*\*Томский государственный университет

\*\*\*Филиал по Томской области ФГУ «ТФИ по Сибирскому федеральному округу», г. Томск

E-mail: kolmakovyv@tpu.ru

*Зональность магнитного поля золоторудного месторождения Благодатного в Енисейском крае, проявленная в последовательном снижении амплитуд его аномалий с 500 до 80 нТл, обусловлена распределением моноклинного пирротина – одного из главных рудных минералов. В ассоциирующем пирите изучалось стехиометрическое отношение S/Fe. Показано, что накопление золота преимущественно в слабомагнитных образованиях вызвано повышением в минералообразующей системе фугитивности серы. Усиление ее активности контролирует увеличение отношения S/Fe в пирите и его доминирование над пирротином в рудном парагенезисе.*

### Ключевые слова:

*Золотое оруденение, зональность магнитного поля, магнитная восприимчивость пород, распределение пирротина, фугитивность сульфидной серы, рудный парагенезис.*

### Key words:

*Gold mineralization, magnetic field zonality, magnetic susceptibility of rocks, pyrrhotite distribution, fugacity of sulphide sulfur, ore paragenesis.*

### Введение

Избирательная приуроченность золотой минерализации к магнитным образованиям является одной из главных предпосылок для магниторазведки золоторудных месторождений. Геологической обусловленностью аномального облика продуктивных участков выступает широко проявленный на них полистадийный метасоматизм, как один из факторов рудогенеза. В названный процесс вовлекаются рудные и петрогенные элементы, в том числе железо [1–3]. Результатом этого является их перераспределение и связывание в новообразованных формах, среди которых нередки и ферромагнитные минералы [3]. Появление зональной структуры магнитного поля, вызванной распределением ферромагнетиков в метасоматическом ореоле, считается важным геофизическим признаком выявления потенциальных золоторудных структур различных генетических типов: месторождения Цен-

тральное, Комсомольское, Берикольское (Кузнецкий Алатау), Дарасун, Апрельково, Дильмачик (Восточное Забайкалье), Олимпиада, Партизанский узел в Енисейском крае и др. [4–7].

В связи с этим актуальным является установление физико-химических факторов, контролирующих образование минеральных ассоциаций, содержащих ферромагнетики. На месторождении золотосульфидного типа Благодатном в Енисейском крае нами изучены магнитные свойства пород и руд и химический состав золотоносной сульфидной минерализации. На основании полученных данных впервые показана отчетливая взаимосвязь между количеством пирротина в рудных парагенезисах, их магнитной восприимчивостью ( $\chi$ , ед. СИ) и стехиометрическим отношением S/Fe в ассоциирующих пиритах. Кроме того, установлено, что для наиболее богатых золотом участков месторождения свойственны малоамплитудные магнитные аномалии.

### Магнитная неоднородность месторождения Благодатное

Месторождение Благодатное расположено в центральной части Енисейского кряжа в пределах Верхне-Енашиминского золоторудного узла. Оно приурочено к слюдяным кристаллосланцам кординской свиты нижнего рифея и представляет собой линейную зону рассеянной сульфидной минерализации с небольшим количеством кварцевых и кварц-карбонатных прожилков [8]. Обогащенные золотом участки представлены двумя кулисообразно расположенными линзовидными рудными телами. При этом 4/5 запасов металла сконцентрировано на южном фланге месторождения [9].

В породах и рудах месторождения не обнаружен магнетит, и единственным ферромагнетиком является пирротин. Его немагнитные гексагональные разновидности отмечаются только в единичных случаях. В отношении моноклинных пирротинов было принято допущение равенства их магнитной восприимчивости, а величина  $\chi$  оценивалась как характеристика содержания минерала в анализируемом образце. Магнитное поле месторождения

имеет зональное строение, что проявляется в последовательном снижении амплитуд его аномалий  $\Delta T$  с 500 до 80 нТл (рис. 1) на фоне немагнитных вмещающих пород. Зональность изменения  $\chi$  прослеживается и на глубинных горизонтах месторождения (рис. 2).

Изучение керна 28 разведочных скважин показало, что увеличение  $\chi$  и доли высокомагнитных образований наблюдается в направлении падения рудных тел. В их периферических частях происходит уменьшение этих параметров. На фоне выявленной неоднородности существуют практически немагнитные участки размером до первых метров, соответствующие развитию галенита, сфалерита и халькопирита.

### Особенности рудной минерализации и стехиометрии пиритов

Главными минералами золотоносной зоны являются пирротин, пирит и арсенопирит. В меньших количествах находятся леллингит, халькопирит, сфалерит, галенит [8]. Их среднее содержание в северном и южном рудных телах составляет 3,6 и

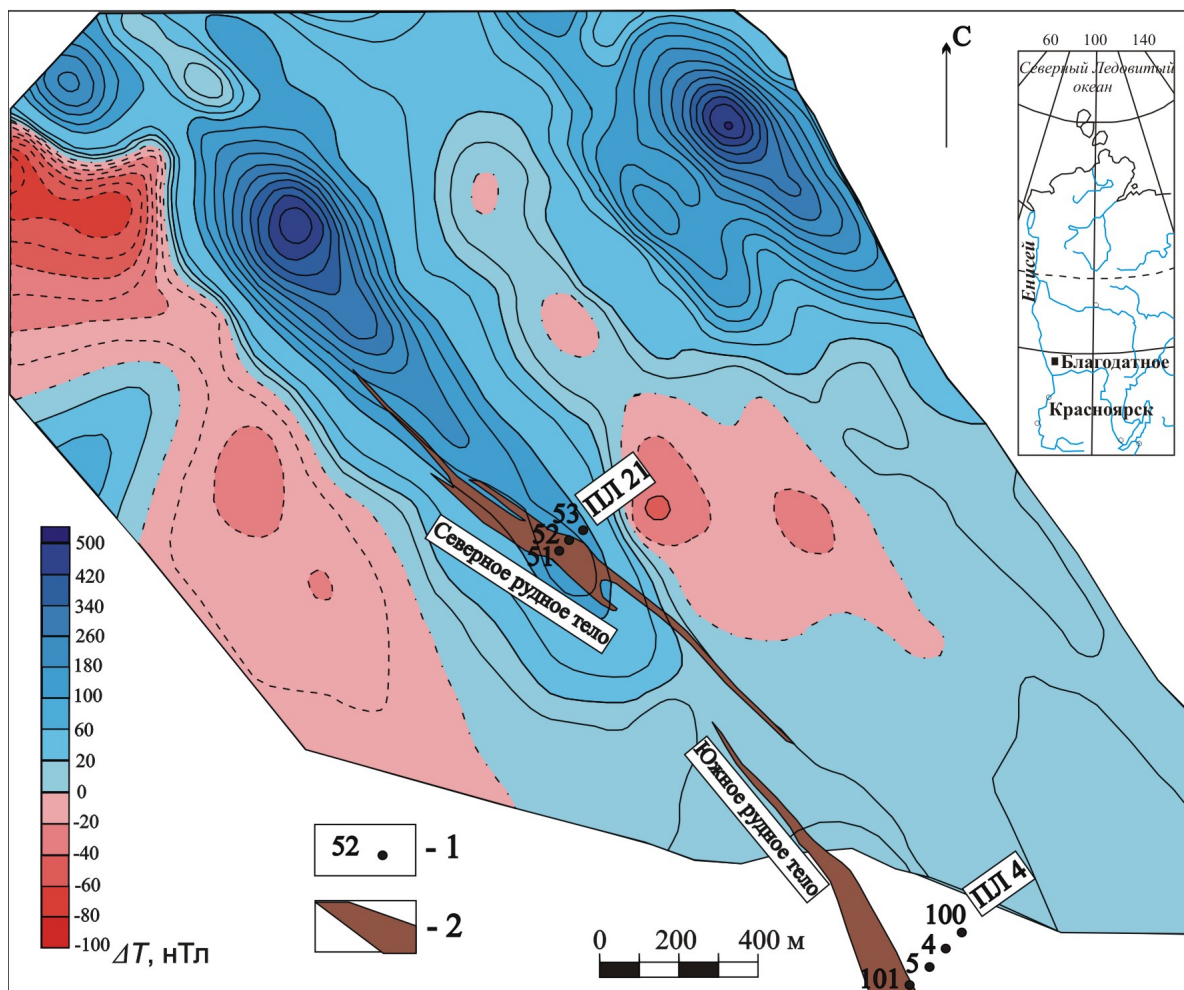


Рис. 1. Магнитное поле месторождения Благодатное: 1) положение скважин на поисковых линиях (ПЛ); 2) рудные тела

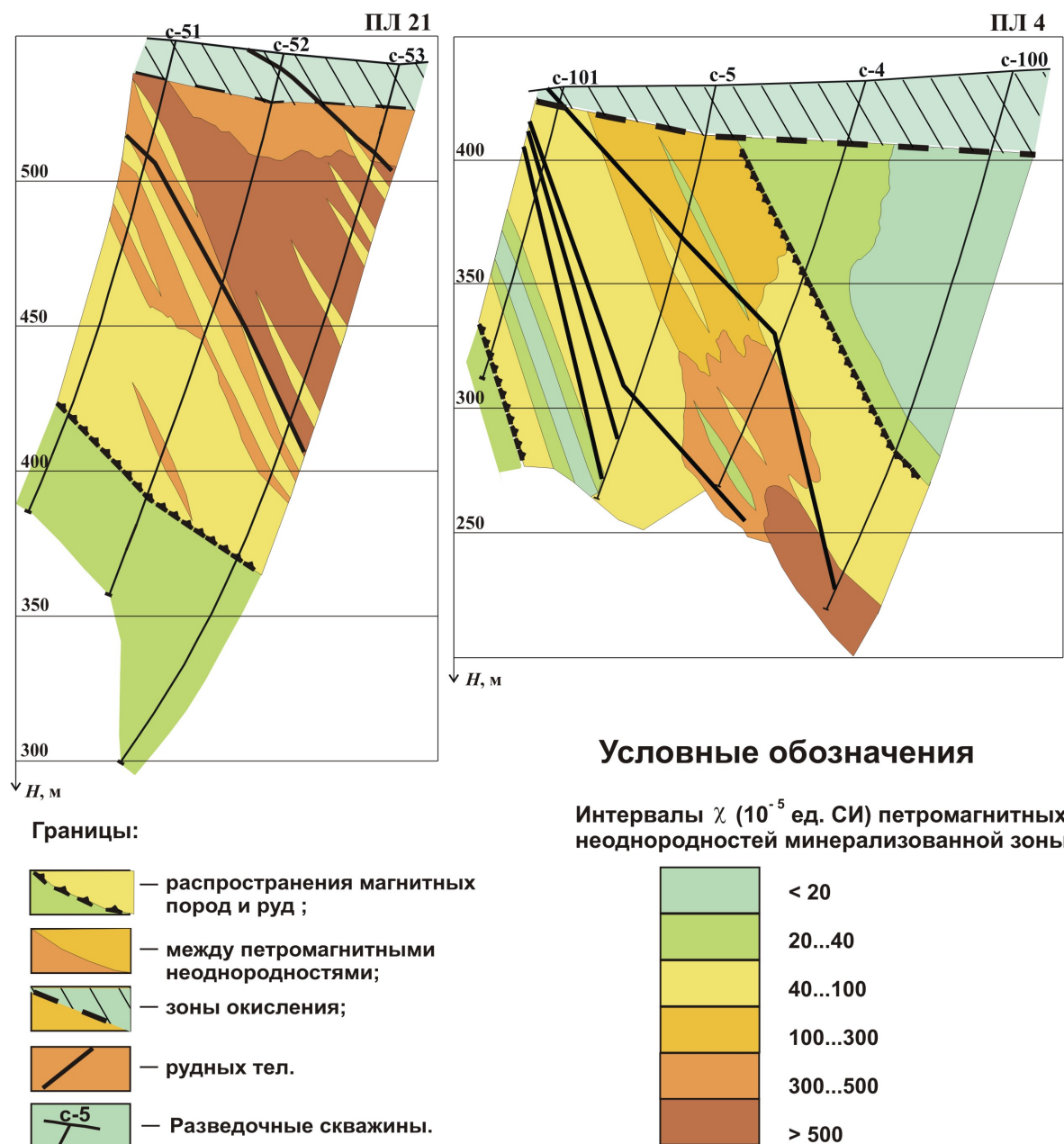


Рис. 2. Петромагнитные разрезы северного (ПЛ 21) и южного (ПЛ 4) рудных тел

6,6 об. % соответственно. Сульфидизация происходила в три последовательных стадии с образованием минеральных парагенезисов: пирит-пирротинового; пирит-пирротин-арсенопиритового (с леллингитом) и галенит-сфалерит-халькопиритового. Отличительной чертой последнего является резкое уменьшение количества пирротина. Данная ассоциация, как и участки скопления кварц-карбонатных прожилков, характеризуются минимальной магнитной восприимчивостью.

Раннее сульфидообразование на месторождении, как правило, завершалось выделением пирротина после пирита в первую стадию и после арсенопирита, леллингита и пирита — во вторую. Пирротин, развиваясь по пириту, может замещать его

либо полностью, либо частично. В последнем случае можно предполагать, что было достигнуто локальное фазовое равновесие [10, 11]. Пирит, вариации состава которого можно рассматривать в качестве показателя температуры гидротермальных растворов и фугитивности  $f$  серы [12], кристаллизовался на протяжении всего рудного процесса. Считается, что увеличение в нем S/Fe-отношения может происходить как на фоне снижения температуры, так и в результате роста фугитивности серы [13]. Согласно диаграммам фазовых равновесий  $\lg f$  — температура [14, 15] такое изменение указанных параметров минералообразующей среды приводит к смещению пирит-пирротинового равновесия и преимущественному выделению пирита. По-

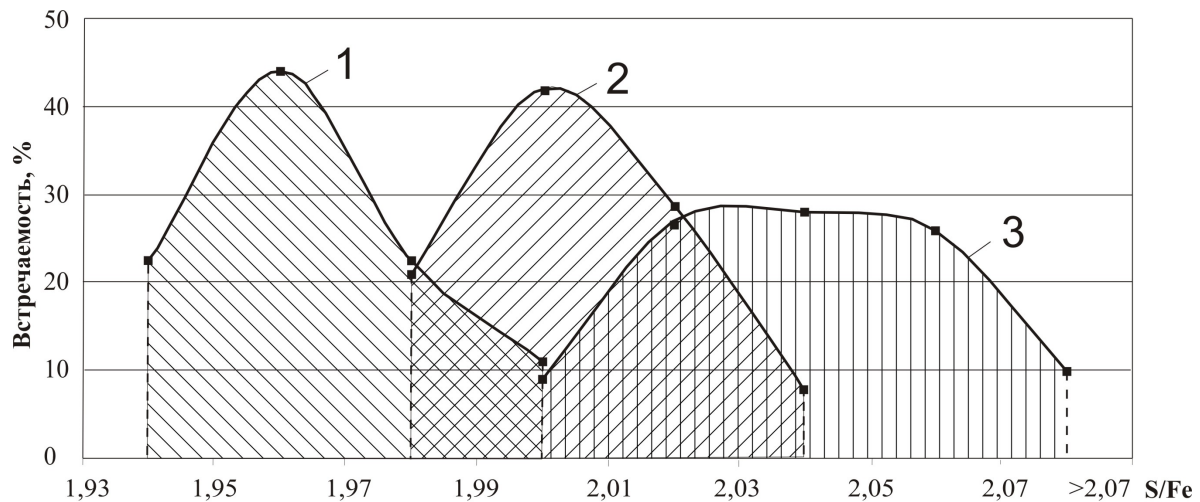


Рис. 3. Вариации стехиометрических отношений пиритов (количество измерений): 1) в северном (27) и 2) в южном рудном теле (19); 3) заключительной галенит-сфалерит-халькопиритовой стадии (20). 1, 2 – пириты ранних минеральных стадий

этому можно предполагать, что существует зависимость между величиной S/Fe-отношения в пирите, долей пирротина в минеральном агрегате и его магнитной восприимчивостью.

В ранних разновидностях пирита наиболее высокие значения S/Fe-отношения достигаются на южном фланге месторождения Благодатного, а максимальные величины – свойственны пириту завершающей галенит-сфалерит-халькопиритовой стадии образования сульфидов (рис. 3). При этом отчетливо проявляется тенденция снижения магнитной восприимчивости пород и руд по мере возрастания количества серы в пиритах ранних генераций (рис. 4). В конце рудного процесса величина S/Fe в пирите остается постоянной, независимо от

магнитных свойств субстрата, подвергавшегося пиритизации.

Таким образом, на примере золотосульфидного месторождения Благодатного устанавливается зональность магнитного поля, обусловленная уменьшением величины  $\chi$  со снижением количества пирротина в рудных ассоциациях. При этом повышенные концентрации золота приурочены к слабомагнитным участкам. Характер изменчивости химического состава пиритов и, в частности, S/Fe-отношения в них позволяет считать, что накопление золота преимущественно в слабомагнитных образованиях вызвано повышением фугитивности серы в рудоносном гидротермальном растворе. Усиление ее активности контролирует увеличе-

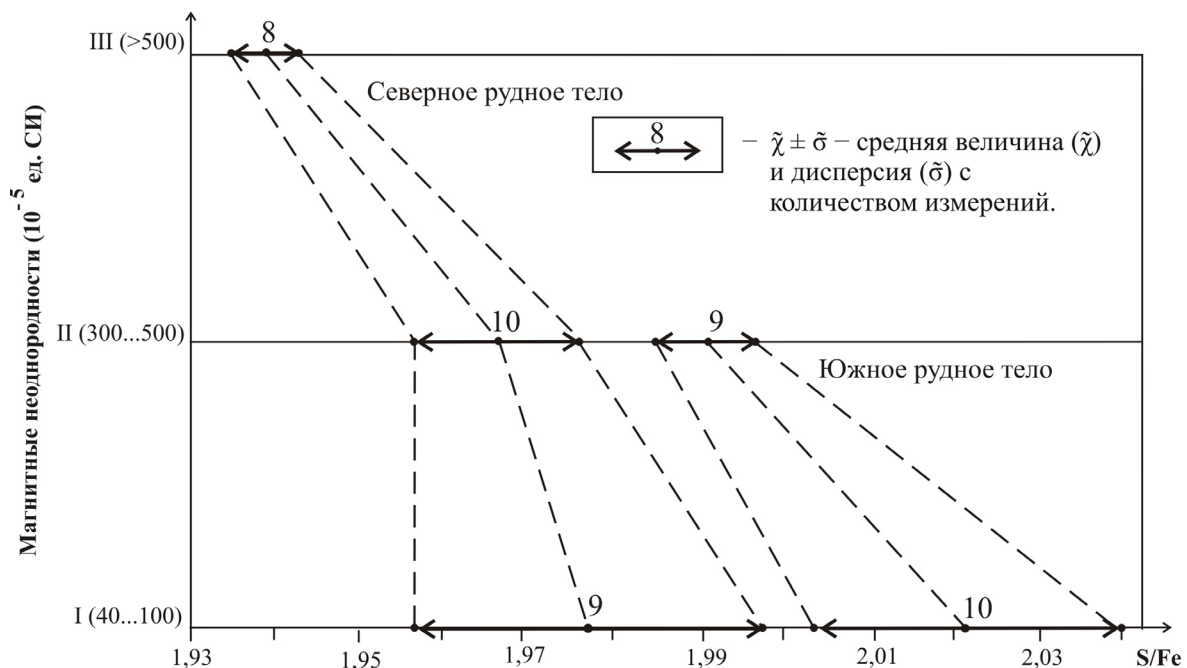


Рис. 4. Стехиометрия пиритов в магнитных неоднородностях ранних сульфидных парагенезисов

ние S/Fe-отношения в минералообразующей системе и доминирование пирита над пирротинном в рудном парагенезисе.

*Исследования проведены при поддержке РФФИ (грант № 08-05-00323), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Алпатов В.А., Наумов В.Б., Носик Л.П., Миронова О.Ф. Минералого-геохимические особенности и условия образования Нежданнинского месторождения золота (Саха-Якутия, Россия) // Геология рудных месторождений. — 1998. — Т. 40. — № 2. — С. 137–156.
2. Лобанов М.П., Синцов А.В., Сизых В.И., Коваленко С.Н. О генезисе продуктивных «углистых» сланцев Ленского золоторудного района // Доклады РАН. — 2004. — Т. 394. — № 3. — С. 360–363.
3. Русинова О.В., Русинов В.Л., Абрамов С.С., Кузнецова С.В., Васюта Ю.В. Околорудные изменения пород и физико-химические условия формирования золото-кварцевого месторождения Советское (Енисейский край, Россия) // Геология рудных месторождений. — 1999. — Т. 41. — № 4. — С. 308–328.
4. Ерофеев Л.Я. Магнитное поле и природа аномалий на месторождениях золота. — Томск: Изд-во ТПИ, 1989. — 158 с.
5. Ерофеев Л.Я., Номоконова Г.Г., Орехов А.Н. О петрофизической основе геофизической разведки золоторудных месторождений // Геофизика XXI века — прорыв в будущее: Труды Междунар. геофизической конф. — М.: ГЕРС, 2003. — С. 203–208.
6. Колмаков Ю.В. Физико-геологическая модель Партизанского золоторудного узла // Геология и полезные ископаемые Красноярского края / под ред. С.С. Сердюка. — Красноярск: КНИИГиМС, 1999. — С. 231–235.
7. Колмаков Ю.В., Сазонов А.М., Пинсон А.Ю., Потехина Е.В., Гертнер И.Ф., Тишин П.А. Петромагнитная и минералогическая неоднородности и золотоносность рудной зоны месторождения Благодатного // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309. — № 2. — С. 46–53.
8. Сазонов А.М., Звягина Е.А., Леонтьев С.И., Костененко Л.П., Свиридов Л.И., Полева Т.В., Тишин П.А. Генезис золоторудных руд горы Благодатной // Состояние и проблемы геологической изученности недр и минерально-сырьевой базы Красноярского края: Труды Всеросс. научной конф. — Красноярск, 2003. — С. 247–249.
9. Совмен В.К., Страгис Ю.М., Кровякова Л.П., Савушкина С.И. Золоторудное месторождение Благодатное — новое крупное разведанное месторождение в Красноярском крае // Разведка и охрана недр. — 2006. — № 8. — С. 28–32.
10. Винклер Г. Генезис метаморфических пород. — М.: Недра, 1979. — 327 с.
11. Метасоматизм и метасоматические породы / под ред. В.А. Жарикова, В.Л. Русинова. — М.: Научный мир, 1998. — 490 с.
12. Прохоров В.Г. Особенности развития сульфидного оруденения на Енисейском крае как следствие метаморфогенного преобразования пирита // Геология рудных месторождений Красноярского края / под ред. В.П. Филоненко, Л.Н. Россовского. — Новосибирск: СНИИГиМС, 1977. — С. 49–63.
13. Коробейников А.Ф., Нарсеев В.А., Пшеничкин А.Я., Арифурлов Ч.Х. Пириты золоторудных месторождений. — М.: ЦНИГРИ, 1993. — 213 с.
14. Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Раздолина Н.В. Генезис золото-кварцевого месторождения Чармитан (Узбекистан) // Геология рудных месторождений. — 1996. — Т. 38. — № 3. — С. 238–257.
15. Жариков В.А. Основы физической геохимии. — М.: Наука, 2005. — 654 с.

*Поступила 12.04.2010 г.*