

УДК 553.411.539.2(571.56)

ЗОНАЛЬНОСТЬ ЭНДОГЕННЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАК ОТРАЖЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2016 г. А.В. Кокин¹, В.В. Трощенко²

Аннотация. Проанализирована сравнительная распространенность химических элементов в условиях их накопления под влиянием различных физико-химических процессов звездно- и планетообразования, земной коры. Установлено, что последовательность накопления элементов на разном уровне организации вещества (в Солнечной системе, хондритах, земной коре, морской воде, рудах, минералах) находится в зависимости от их фундаментальных свойств: распространенности (кларков), стандартной энтропии, положения элемента в Периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева и периодичности нуклеосинтеза в условиях образования звезд разных поколений. Это подтверждается положительной и значимой корреляцией распространенности элементов в Солнечной системе, хондритах, земной коре, морской воде и обратной (значимой отрицательной) связью стандартной энтропии с распространенностью элементов в этих образованиях. Последовательность накопления элементов не нарушается в процессе глубокой дифференциации (фракционирования) вещества под влиянием различных процессов в геохимическом круговороте вещества земной коры, включая рудообразование.

Эмпирически рассчитанные общие и частные ряды эндогенной зональности золоторудных, золото-серебряных, золото-редкометалльных, серебро-олово-полиметаллических и марганцевых месторождений отражают фундаментальные свойства распространенности (кларков), стандартной энтропии и Периодического закона. Это может быть использовано не только для оценки уровня эрозионного среза рудных месторождений, конкретных рудных тел, но и для оценки условий рудообразования, которые в рамках этапов и стадий могут формироваться по правилу прогрессивной (прямой) или регрессивной (обратной) зональности, что позволит исключить ошибки в оценке уровня эрозионного среза рудных месторождений.

Ключевые слова: зональность рудно-геохимическая, золото, серебро, полиметаллы, олово, марганец, стандартная энтропия, кларки, ассоциации элементов, кластеры ассоциаций.

ZONING OF ENDOGENOUS ORE DEPOSITS AS A REFLECTION OF FUNDAMENTAL PROPERTIES OF CHEMICAL ELEMENTS

A.V. Kokin¹, V.V. Troshchenko²

Abstract. The comparative distribution of chemical elements in the course of their accumulation under the influence of various physical-chemical processes of stars, planets and Earth's crust formation was analyzed. It has been established that succession of accumulation of elements at various levels of the matter organization (in the Solar System, chondrites, Earth's crust, seawater, ores, minerals) is dependent on their fundamental properties: distribution (clarkes), standard entropy, the Mendeleev's Periodical Law and periodicity of nucleosynthesis under the conditions of formation of various generations of stars. This is supported by meaningful and positive correlation of distribution of elements in the Solar System, chondrites, Earth's crust, ores, minerals, seawater, and reverse (meaningful and negative) causation of the standard entropy with distribution of elements in these formations. Succession of accumulation of elements is not disturbed in the process of deep differentiation of the matter under the influence of various processes in the geochemical circulation of the Earth's crust matter, including ore formation.

¹ Южно-Российский институт управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (South-Russian Institute of Management, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, 70, e-mail: alex@avkokin.ru

² Институт аридных зон Южного научного центра Российской академии наук (Institute of Arid Zones, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: vtrosh@ssc-ras.ru

The empirically calculated common and particular rows of endogenous zoning of golden-ore, gold-silver, gold-rare metals, silver-tin-polymetallic, and manganese deposits reflect the fundamental properties of distribution (clarkes), standard entropy, and the Periodical Law. This can be used both for estimation of level of the erosion cut of the ore deposits, specific ore bodies, and for evaluation of the conditions of ore formation, which can be formed in the framework of stages and phases under the rule of progressive (direct) and regressive (reverse) zoning, what will permit to exclude errors in estimation of the erosion cut level of ore deposits.

Keywords: ore-geochemical zoning, gold, silver, polymetals, tin, manganese, standard entropy, clarkes, associations of elements, clusters of associations.

ВВЕДЕНИЕ

В современной практике оценки перспективности рудных объектов большое значение имеет исследование рудно-геохимической зональности, на основе которой становится возможным по ограниченному признаку оруденения на поверхности определить перспективы его глубинности. Таким образом будет достигнут наибольший экономический эффект при разведке месторождений.

Под зональным эндогенным рудообразованием авторы настоящей статьи понимают закономерности регулярного пространственно-временного распределения атомов химических элементов, минералов в составе руд месторождений.

Однако изучение закономерностей пространственно-временного распределения химических элементов в геологических телах разного уровня организации зачастую оторвано от фундаментальных представлений космохимии, геохимии об образовании самих ядер и атомов химических элементов, в которых проявлены их фундаментальные свойства. На чисто интуитивном уровне геолог пытается применить статистические методы выбора индикаторов эндогенного оруденения (в том числе первичных ореолов) и тем самым решить вопрос о глубинности распространения минерализации. Этим можно объяснить появление множества вариантов оценки зональности рудоотложения и первичных ореолов с использованием аддитивных и мультипликативных показателей, в число которых входили даже элементы, вообще не связанные с рудообразованием.

Целью настоящей работы являлось исследование фундаментальных свойств, влияющих на процесс зонального распределения химических элементов в условиях эндогенного рудообразования.

В задачи исследования входила оценка структуры общих и частных рядов рудно-геохимической зональности.

Объекты исследования: эндогенные золоторудные (разных минеральных типов), золото-серебряные, золото-сурьмяные, золото-редкометалльные, золото-ртутные, полиметаллические, олово-серебро-полиметаллические, марганцевые

месторождения, сформированные в разное время и в разной геолого-структурной обстановке.

Методы исследования включали: систематизацию, обобщение, соотнесение данных по распределению элементов в Солнечной системе, хондритах, земной коре, морской воде, рудах, минералах; анализ авторских эмпирических данных по распространенности элементов в составе рассчитанных рядов рудно-геохимической зональности эндогенных рудных месторождений различных минеральных типов, сформированных в разное время и в разной геолого-структурной обстановке. В рамках исследований была выдвинута гипотеза: *если на разных уровнях организации вещества сохраняется обратная зависимость между распространенностью элементов и их термодинамическими свойствами, то информация об этих свойствах должна отразиться в рядах геохимической зональности в эндогенных рудных месторождениях в соответствии с Периодическим законом Д.И. Менделеева.*

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проблемами зональности рудных месторождений занимались и занимаются многие геологи, поскольку это один из важнейших элементов не только прогноза, но и оценки перспективности рудных объектов [1]. Идеи зональности рудообразования известны с середины XIX в. благодаря работам зарубежных ученых Г.Т. де ла Бичи, А. Брейтгаупта, Л. де Лоне, Г. Шнейдерхёна, В. Эммонса. В России этими проблемами занимались С.С. Смирнов, В.Н. Овчинников, С.В. Григорян, Ю.Г. Щербаков и многие другие. Фундаментальной до сих пор является работа [2], в основе которой оригинальная идея о существовании прогрессивной и регрессивной рудной зональности, что впоследствии подтвердилось при изучении различных рудных месторождений [3], в том числе зональности на уровне микропримесей в минералах рудных стадий [4].

Универсальный ряд геохимической зональности первичных ореолов сульфидных месторождений Л.Н. Овчинникова и С.В. Григоряна с переменным успехом внедрялся в практику геолого-разведочных работ на уровне той вероятности, с которой

оценивалась его структура самими авторами. Как известно, он выглядит таким образом:

Ba(93) – Sb, As, Hg – Cd – Ag(80) – Pb(84) –
Zn(87) – Au(84) – Cu(86) – Bi(72) – Ni(50) –
Co(55) – Mo(48) – U(100) – Sn(66) – Be(66) – W(72).

Обратим внимание на сами значения вероятности положения элементов (показаны в скобках, %). Например, положение U не может отвечать значению вероятности 100 % в силу не только статистических погрешностей, которые сопровождают любые оценки и измерения, но и потому, что его закономерности в пространственном распределении концентраций должны быть «абсолютно привязаны» к рангам положения в ряду зональности соседних с ураном элементов, с которыми он вообще в процессе рудообразования может и не иметь никаких связей. Вероятности остальных элементов на уровне 48–66 % достаточно велики, чтобы их закрепить в ранг универсального ряда. Вероятности положения Sb, As, Hg не определены. И вообще само понятие универсальности в науке неприемлемо, поскольку законы имеют свою область действия и применимости на практике. При этом авторами «универсального ряда зональности» априори предполагалась прямая (положительная корреляционная) связь зональности первичных ореолов с зональностью самого рудоотложения. Хотя в случае многостадийных рудных месторождений состав первичных ореолов может отражать только заключительную стадию рудоотложения. К тому же наличие регрессивной и прогрессивной зональности при образовании полигенного оруденения может привести к инверсии зонального распределения химических элементов в рудных телах и месторождениях.

Для того чтобы обосновать невозможность существования единого «универсального» ряда зональности Л.Н. Овчинникова и С.В. Григоряна, проранжируем элементы в нем по величине стандартной энтропии [5] S^0_{298} (в скобках):

Ba(64,9) – Sb(42,44), As(41,9), Hg(77,4) –
Cd(51,76) – Ag(42,69) – Pb(64,9) –
Zn(41,66) – Au(47,45) – Cu(33,3) – Bi(56,9) –
Ni(28,86) – Co(28,4) – Mo(28,58) –

U(не рассчит.) – Sn(51,4) – Be(9,54) – W(32,76).

S^0_{298} отражает изменение фундаментальных энергетических свойств элементов [5] в Периодическом законе Д.И. Менделеева (табл. 1).

Как видим, элементы, ранжированные в ряду «универсальной» зональности, не группируются даже в ассоциации, которые располагаются закономерно в тех или иных месторождениях, периодах и группах Периодической системы. Например, положение в ряду ассоциации As(41,9) – Sb(42,44) – Bi(56,9) соответствует положению Bi, но не Hg.

Sn в ряду определяется положением ассоциации Pb(64,9) – Sn(51,4) – Ge(42,38) в Периодическом законе. Положение золота определяется ассоциацией Au(47,45) – Ag(42,69) – Cu(32,33), располагающейся в первом побочном ряду 4-го – 6-го больших периодов таблицы Д.И. Менделеева. Другими словами, «универсальный» статистический зональный ряд первичных ореолов сульфидных месторождений Л.Н. Овчинникова и С.В. Григоряна, его структура противоречит не только фундаментальному свойству изменению величины стандартной энтропии S^0_{298} в Периодическом законе, но и периодической распространенности элементов в Солнечной системе, хондритах, земной коре, горных породах [6]. В этом смысле нужны другие эмпирические и теоретические подходы к оценке уровня накопления элементов в геологических телах разного уровня организации. Впервые это сделано Ю.Г. Щербаковым на основе космогеохимических распределений элементов [7] и расчета относительных коэффициентов накопления элементов в золоторудных месторождениях [8].

Известно, что распространенность химических элементов подчиняется общим закономерностям в нашей Галактике, Солнечной системе и земной коре, что обусловлено единством происхождения и эволюции окружающего нас мира в рамках Стандартной модели Вселенной. Эта закономерность должна соблюдаться на разном уровне организации вещества, поскольку *распространенность элементов определяется их ядерными свойствами и подчиняется Периодическому закону Д.И. Менделеева, как следствие последовательности и периодичности нуклеосинтеза в условиях звезд разных поколений* [9].

Наиболее ярко эта закономерность проявлена во всех главных и побочных подгруппах 4-го – 6-го больших периодов периодической системы. Сравнительный анализ свойств атомов в периодической системе с величиной стандартной энтропии элементов (S^0_{298} , дж/моль·град) в главных и побочных подгруппах больших периодов выявляет обратную зависимость ее от атомной распространенности элементов. Эта закономерность соблюдается и при рудообразовании. Более тяжелые элементы в составе руд выделяются позднее, и на их образование требуется больше энергии (низкокарковые самородные металлы: золото, платина, серебро выделяются в составе сульфидных руд одними из последних).

В таблице 1 для 4-го – 6-го больших периодов периодической системы сведены данные распространенности (далее – кларки) химических элементов по А.П. Виноградову [10] в земной коре, значения величины стандартной энтропии S^0_{298} , атомные массы. В таблице 2 сведены те же данные, но в сравнении с кларками в составе морской воды [11].

В целом в таблицах 1 и 2 сохраняется периодичность фундаментальных свойств для всех без исключения элементов по величинам S^0_{298} и атомным массам. А вот по кларкам в земной коре не соблюдается закон периодичности для Ва и Hg во второй группе больших периодов. В третьей группе для главной подгруппы зависимость распространенности элементов в земной коре вообще обратная фундаментальным значениям S^0_{298} и массовым числам элементов для La, Y, Sc, а в побочной подгруппе периодичность не соблюдается для Tl. В четвертой группе закон периодичности не соблюдается только для Pb. В остальных группах и подгруппах закон периодичности распространенности элементов соблюдается для всех элементов, за исключением W. Для седьмой – десятой групп проследить соответствие периодичности распространенности атомов элементов нельзя из-за отсутствия данных по S^0_{298} и кларков.

Несоответствие кларков элементов периодическим свойствам может быть также связано с правилом Оддо – Гаркинса для четно-четных (масса и заряд) атомов ядер химических элементов.

Закон распространенности элементов не соблюдается только для шести элементов морской воды: Cs, Y, Tl, Pb, Bi, W. Для остальных элементов наблюдается полное соответствие закону обратной зависимости между S^0_{298} , кларками и атомными массами элементов.

Несоответствие кларков некоторых элементов их атомным массам и S^0_{298} может выражаться в том, что кларки для отдельных элементов рассчитаны неточно. В противном случае это несоответствие касалось бы большинства элементов и противоречило бы периодичности в изменении атомной массы и S^0_{298} . Но для всех атомов химических элементов периодический закон изменения S^0_{298} и атомных масс, величины зарядов ядер атомов соблюдается. Отсюда можно заключить, что *несоответствие кларков отдельных элементов свойствам периодичности их атомных масс, стандартной величине S^0_{298} , ядерным свойствам – явление случайное.*

Матрица корреляций для элементов больших периодов и побочных подгрупп семи групп периодической системы, для которых надежно установлены кларки и рассчитаны величины S^0_{298} по отношению к атомным массам (табл. 3), подтверждает общую тенденцию соответствия закона распространенности элементов в Солнечной системе, метеоритах (хондритах) кларкам элементов земной коры и морской воды на уровне значимой вероятности. Отрицательная и значимая корреляция S^0_{298} устанавливается для кларков этих же элементов в Солнечной системе, хондритах, земной коре и морской воде. Следовательно, несоответствие кларков отдельных элементов земной коры и морской воды фундаментальным свойствам периодической системы является случайным и может быть связано с неточностью оценки кларков отдельных элементов. На это обращали внимание многие авторы при исследовании распространенности элементов в разных геологических телах, в том числе автор работы [12].

Если сравнить суммарные кларки исследуемых нами элементов в четвертом – шестом больших периодах таблицы Д.И. Менделеева для хондритов (281983,219 г/т), земной коры (118122,6056 г/т) и морской воды (880,0 г/т), то их отношения: кларки хондритов / кларки земной коры = 2,387; кларки земной коры / кларки морской воды = 1342,2 – отражают степень дифференцированности (фракционирования) тяжелых элементов в разных средах. В составе морской воды из-за дифференциации, осуществлявшейся на протяжении около 3,9 млрд лет, отношение кларков земная кора / морская вода выше в 562,3 раза отношения хондриты / земная кора. Но это не отражается на фундаментальных свойствах периодической зависимости атомных масс, зарядов ядер, стандартной энтропии элементов в морской воде.

Теперь рассмотрим, соблюдается ли закон периодичности фундаментальных свойств в условиях эндогенного рудообразования на примере рудной зональности эндогенных месторождений.

Таблица 1. Зависимость распространенности (слева от элемента, г/т), атомной массы (внизу элемента), величины стандартной энтропии (S^0_{298} , Дж/моль·град, справа от элемента) химических элементов в земной коре от их положения в главных и побочных подгруппах больших периодов Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева

Table 1. Dependence of prevalence (to the left of the element, g/t), atom mass (below the element), value of the standard entropy (S^0_{298} , J/mol·grad, to the right of the element) of the chemical elements in the Earth's crust on their position in the main and side sub-groups of large periods of the D.I. Mendeleev's periodic system

| Ряды | Группы | | | | | | | | | |
|------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |
| 4 | 25000K ^{63,6} 39,1 | 39600Ca ^{41,4} 40,08 | 10Sc ^{34,6} 44,95 | 4500Ti ^{30,3} 47,88 | 90V ^{28,9} 50,9 | 83Cr ^{23,6} 52,0 | 1000Mn ^{32,0} 54,9 | 46500Fe ^{27,15} 55,85 | 18Co ^{28,4} 58,9 | 58Ni ^{29,86} 58,69 |
| | 47Cu ^{33,3} 63,5 | 83Zn ^{41,66} 65,4 | 19Ga ^{42,7} 69,7 | 1,4Ge ^{42,38} 72,61 | 1,7As ^{35,1} 74,9 | 0,05Se ^{41,9} 78,96 | 2, ¹ Br | | | |
| | | | | | | | | | | |

Окончение таблицы 1

| | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------|----|----|-------------------------|
| 5 | 150Rb ^{69,5} 85,5 | 340Sr ^{54,4} 87,62 | 20Y 88,9 | 170Zr ^{38,9} 91,2 | 20Nb 92,9 | 1,1Mo ^{28,58} 95,94 | Tc | Ru | Rh | 0,013Pd |
| | 0,07Ag ^{42,69} 107,9 | 0,013Cd ^{51,76} 112,4 | 0,25In ^{58,1} 114,82 | 2,5Sn ^{51,4} 118,7 | 0,5Sb ^{42,44} 121,7 | 0,001Te ^{49,71} 127,6 | 0,4I | | | |
| 6 | 3,7Cs ^{82,8} 132,9 | 650Ba ^{64,9} 137,3 | 29La 138,9 | 1,0Hf 178,5 | 2,5Ta 180,9 | 1,3W ^{32,76} 183,8 | 0,007Re | Os | Ir | 0,002Pt ^{41,9} |
| | 0,0045Au ^{47,45} 196,97 | 0,083Hg ^{77,44} 200,59 | 1,0Tl ^{64,5} 204,38 | 16Pb ^{64,9} 207,2 | 0,009Bi ^{56,9} 208,98 | | | | | |

Таблица 2. Зависимость распространенности (слева от элемента, г/т), атомной массы (внизу элемента), величины стандартной энтропии (S_{298}^0 , Дж/моль·град, справа элемента) химических элементов в морской воде (слева от элемента, эквивалентно г/т, млн⁻¹ (частей на миллион) при средней солености 34,887 ‰) в главных и побочных подгруппах больших периодов Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева

Table 2. Dependence of prevalence (to the left of the element, g/t), atom mass (below the element), value of the standard entropy (S_{298}^0 , j/mol·grad, to the right of the element) of the chemical elements in the seawater (to the left of the element, equivalent to g/t, mln⁻¹, ppm (parts per million) at the mean salinity of 34.887 ‰) in the main and side sub-groups of large periods of the D.I. Mendeleev's periodic system

| Ряды | Группы | | | | | | | | | |
|------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |
| 4 | 396K ^{63,6} 39,1 | 408Ca ^{41,4} 40,08 | 0,008Sc ^{34,6} 44,95 | 10Ti ^{30,3} 47,88 | 20V ^{28,9} 50,9 | 2,5Cr ^{23,6} 52,0 | 1Mn ^{32,0} 54,9 | 50Fe ^{27,15} 55,85 | 0,3Co ^{28,4} 58,9 | 5Ni ^{29,86} 58,69 |
| | 2,5Cu ^{33,3} 63,5 | 10Zn ^{41,66} 65,4 | 0,2Ga ^{42,7} 69,7 | 0,5Ge ^{42,38} 72,61 | 20As ^{35,1} 74,9 | 1Se ^{41,9} 78,96 | 67Br | | | |
| 5 | 0,12Rb ^{69,5} 85,5 | 7,9Sr ^{54,4} 87,62 | 0,13Y 88,9 | 0,26Zr ^{38,9} 91,2 | 0,5Nb 92,9 | 1,01Mo ^{28,58} 95,94 | Tc | 0,001Ru | Rh | Pd |
| | 1Ag ^{42,69} 107,9 | 0,7Cd ^{51,76} 112,4 | 0,01In ^{58,1} 114,82 | 0,1Sn ^{51,4} 118,7 | 0,03Sb ^{42,44} 121,7 | Te ^{49,71} 127,6 | 0,05I | | | |
| 6 | 3Cs ^{82,8} 132,9 | 0,018Ba ^{64,9} 137,3 | 0,03La 138,9 | Hf 178,5 | Ta 180,9 | 1W ^{32,76} 183,8 | 0,1Re | 0,01Os | Ir | Pt ^{41,9} |
| | 0,004Au ^{47,45} 196,97 | 0,3Hg ^{77,44} 200,59 | 0,1Tl ^{64,5} 204,38 | 0,3Pb ^{64,9} 207,2 | 0,3Bi ^{56,9} 208,98 | | | | | |

Таблица 3. Корреляционная матрица связей, рассчитанных для элементов I–VI групп больших (IV–VI) периодов Периодической системы Д.И. Менделеева (жирным шрифтом выделена вероятность корреляций)

Table 3. Correlation matrix of connections, calculated for the elements of I–VI groups of large (IV–VI) periods of the D.I. Mendeleev's periodic system (the probability of correlation is bold typed)

| 1 | 2 | Распространенность (кларки) элементов, г/т | | | |
|---|-------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | 0,82 | –0,74 | –0,60 | –0,59 | –0,58 |
| | 99,9 | –0,65 | –0,36 | –0,40 | –0,54 |
| | 99 | 99,9 | 0,87 | 0,76 | 0,66 |
| | 99,9 | 60 | 99 | 0,66 | 0,57 |
| | 99 | 99,9 | 70 | 98 | 0,41 |
| | 68 | 99 | 99 | 98 | 97 |

Примечание. 1 – атомная масса элементов/вероятность, % (для любого элемента); 2 – S_{298}^0 , Дж/моль·град; распространенность элементов: 3 – в Солнечной системе; 4 – в хондритах; 5 – в земной коре; 6 – в морской воде.

Note. 1 – atom mass of elements/probability, %; 2 – S_{298}^0 , j/mol·grad; prevalence of elements: 3 – in the Solar System; 4 – in chondrites; 5 – in the Earth's crust; 6 – in seawater.

Обобщенные ряды рудно-геохимической зональности исследуемых эндогенных месторождений приведены ниже. Ряды 1–7 рассчитаны по рудным сечениям месторождений, а 1.1–7.1 – соответственно по примесям сквозных минералов (пирита, арсенопирита) этих же сечений месторождений. Стрелкой обозначены векторы вертикальной зональности от нижних к верхним структурно-гипсометрическим уровням. Жирным шрифтом выделены главные рудогенные элементы месторождений: 1 – Нежданское золоторудное; 2 – золото-редкометалльное (Одержимый, Тырнауз); 3 – олово-серебро-полиметаллическое (Тройка – Высокогорный); 4 – серебро-полиметаллическое (Верхне-Менкеченское); 5 – полиметаллическое германий-свинцово-цинковое (Сардана, Уруй); 7 – марганцевое месторождение алабандиновых руд (Высокогорное); 6 – золото-серебряные месторождения Северного Приохотья, а зональность по примесям установлена для пирита месторождения Дальнего [13].

1 → (Bi)–**Au**–Sb–W–As–Co–Ni–Mn–Zn–Cu–Pb–Ag

1.1 → (Bi)–**Au**–Sb–As–Co–Ni–Mn–Zn–Cu–Pb–Ag

2 → (Mo)–W–(Sn)–**Au, Te, Bi**–As–Co–Ni

2.1 → **Bi**–**Au**–(Sb, Ag)–Co–Ni–Pb–Cu–Zn

3 → Bi–Sn–As–Co–Ni–Mn–Cu–**Zn**–**Pb**–**Sb**–**Ag**–**In**

3.1 → Bi–**Sn**–Co–Ni–Cu–Zn–Pb–**In**–**Ag**–Sb

4 → **Zn**–Cu–**Pb**–Sn–Ge–Sb–**Ag**

4.1 → (As, Co, Ni)–Mn–Cu–**Zn**–**Pb**–Sn–(Ge)–Sb–**Ag**

5 → Mn–Cu–**Zn**–**Pb**–**Ge**–Ag–(Cd)–(Hg)

5.1 → Mn–Cu–**Pb**–**Ge**–Ag–Cd–(Hg)

6 → Zn–Pb–**Au**–**Ag**–As–Sb–(Hg)

6.1 → As–Sb–**Ag**–**Au**

7 → As–Co–Ni–Cu–**Zn**–**Sn**–**Pb**–Mn–Sb–**Ag**–**In**

7.1 → As–Co–Ni–Cu–Ga–**Zn**–**Sn**–**Pb**–Sb–**Ag**–Cd, **In**

В эмпирически построенных рядах геохимической зональности скрыта информация о проявлении последовательных стадий минерало- и рудообразования. В рамках установленной обратной зависимости кларков элементов от величины S_{298}^0 и корреляции распространенности элементов с их атомными массами, а следовательно и зарядами ядер в Периодической системе, возникает возможность использовать эти фундаментальные свойства для выделения геохимических ассоциаций, зависящих от условий рудообразования.

В таблицах 4–6 элементы в эмпирических рядах зональности ранжированы относительно величины стандартной энтропии S_{298}^0 , кларков элементов в хондритах и земной коре с целью показать, что как на уровне руд, так и в составе примесей минералов такая закономерность соблюдается.

Рассмотрим эту процедуру на примере полистадийной и полигенной золоторудной минерализации на Нежданском месторождении, локализуем-

ся в черно-сланцевой верхоянской толще ранней перми. Оно, как и большинство рудных месторождений в черно-сланцевых толщах [14–17], формируется в течение нескольких этапов, включая региональный метаморфизм догранитоидного этапа, син- и постгранитоидный этапы. При этом каждая минеральная стадия характеризуется присущим ей примесным составом элементов.

Нежданское месторождение представляет собой минерализованные зоны дробления с золотокварцевыми жилами. Сформировалось среди обогащенной золотом (до 7 кларков), мышьяком (3–10 кларков), свинцом (2–5 кларков) рудовмещающей черносланцевой толщи ранней перми в ранний догранитоидный и поздний постгранитоидный (K_1 – K_2) этапы. С первым этапом [4; 14] связано образование ранней рассеянной золото-пирит-арсенопиритовой минерализации в минерализованных зонах дробления (МЗД). Золото в этой ассоциации находится в связанном состоянии с пиритом и арсенопиритом, концентрации которых варьируются от 25 до 370 г/т. Со следующим этапом связан процесс нового дробления и перекристаллизации в МЗД раннего пирита и арсенопирита с высвобождением большей части золота в свободном состоянии в кварцевые прожилки МЗД и жилы. Последующие стадии рудообразования наложены на предыдущие. Это халькопирит-галенит-сфалеритовая стадия, в которой золото чаще находится в сростании с галенитом и выделяется позже сульфидов стадии. Серебро концентрируется в этой стадии с галенитом и в меньшей степени со сфалеритом. В самородном виде золото и серебро выделяются среди сульфидов одними из последних. И, наконец, серебро-золото-сульфоантимонитовая стадия (с наличием в ассоциации преимущественно сульфосолей свинца, серебра, сурьмы). Ближе к корневым фациям оруденения (полностью месторождение по золоту еще не вскрыто) устанавливаются признаки антимонитовой, золото-сульфотеллуридной, шеелитовой минерализации с наличием примесей висмута в рудах при сохранении промышленных концентраций золота.

Таким образом, устанавливаются пять разных по составу стадий минералообразования, хотя и не исключено, что халькопирит-галенит-сфалеритовая и сульфоантимонитовая ассоциации представляют собой единую и заключительную золото-серебро-полисульфидную стадию [4; 14]. При этом эволюция источников золота во времени укладывается в схему, представленную в работе [18]: золото из вмещающих пород концентрируется вначале в МЗД в составе пирита и арсенопирита (ранняя догранитоидная стадия); в последующую стадию в процессе динамотермального метаморфизма (под влиянием складчатости) пириты и арсенопириты

испытывают перекристаллизацию с высвобождением большей части свободного золота в кварцевые прожилки и жилы МЗД; в гранитоидную стадию источником золота могли являться тепловые гидротермальные потоки, пространственно связанные с кислым магматизмом. Таким образом сформировалось полигенное и полихронное золоторудное месторождение.

Зная общую региональную закономерность пространственного распределения минеральных ассоциаций относительно плутонов в Верхоянской геохимической провинции [3], с переходом золото-сульфотеллуридной к антимонитовой, золото-пирит-арсенопиритовой, серебро-полисульфидной и серебро-сульфоантимонитовой, можно представить гипотетический ряд зональности, который

мог бы проявиться на Нежданнинском месторождении с учетом тех минеральных и геохимических ассоциаций, которые эмпирически установлены в составе руд от нижних к верхним гипсометрическим уровням и в направлении от рудогенерирующего плутона. А именно: W, Sb1, Au1, Bi (золото-сульфотеллуридная) – Au, As, Co, Ni, Mn (золото-пирит-арсенопиритовая) – Cu, Zn, Pb1, Ag1, Au2 (золото-серебро-полисульфидная) – Cu, Zn, Pb2, Sb2, Ag2, Au3, (золото-серебро-сульфоантимонитовая). Поскольку золото на месторождении установлено во всех минеральных типах (в соответствующей стадии оно выделено порядковым номером в геохимических ассоциациях, в том числе Sb, Ag, Pb), то совмещение стадий минералообразования и определило крупные запасы золота.

Таблица 4. Обобщенные и частные геохимические ряды зональности эндогенных рудных месторождений. Элементы в рядах ранжированы по величине (в скобках) стандартной энтропии S^0_{298} , Дж/моль·град [5]

Table 4. Generalized and particular geochemical zoning rows of endogenous ore deposits. The elements in rows are arranged by value (parenthesized) of the standard entropy S^0_{298} , J/mol·grad [5]

| Обобщенные ряды геохимической зональности | Частные ряды геохимической зональности |
|--|--|
| 1 → Bi(56,9)–Au(47,45)–Sb(42,44)–W(32,76)–As(35,1)–Co(30,4)–Ni(29,86)–Mn(29,33)–Zn(41,9)–Cu(33,3)–Pb(64,9)–Ag(42,69) | 1 → Bi– Au –Sb–W; → As–Co–Ni–Mn; ← Cu–Zn–Ag–Pb |
| 1.1 → Bi(56,9)–Au(47,45)–Sb(42,44)–As(35,1)–Co(30,4)–Ni(29,86)–Mn(29,33)–Zn(41,9)–Cu(33,3)–Pb(64,9)–Ag(42,69) | 1.1 → Bi– Au –Sb–As–Co–Ni–Mn; ← Cu–Zn–Ag–Pb |
| 2 → Mo(28,58)–W(32,76)–Sn(51,4)– Au (47,45)– Te (49,7)– Bi (56,9)–As(35,1)–Co(30,4)–Ni(29,86) | 2 → Mo–W–Sn; → Au–Te–Bi ; ← As–Co–Ni |
| 2.1 → Bi(56,9)–Au(47,45)–Sb(42,44)–Ag(42,69)–Co(30,4)–Ni(29,86)–Pb(64,9)–Cu(33,3)–Zn(41,9) | 2.1 → Bi– Au –Sb–Ag; ← Co–Ni; → Pb–Zn–Cu |
| 3 → Bi(56,9)–Sn(51,4)–As(35,1)–Co(30,4)–Ni(29,86)–Mn(29,33)–Cu(33,3)–Zn(41,9)–Pb(64,9)–Sb(42,44)–Ag(42,69)– In (58,1) | 3 → Bi– Sn –As–Co–Ni–Mn; ← Cu–Zn–Pb; ← Sb– Ag–In |
| 3.1 → Bi(56,9)– Sn (51,4)–Co(30,4)–Ni(29,86)–Cu(33,3)–Zn(41,9)–Pb(64,9)– In (58,1)– Ag (42,69)–Sb(42,44) | 3.1 → Bi– Sn –Co–Ni; ← Cu–Zn–Pb; ← Sb– Ag–In |
| 4 → Zn (41,9)–Cu(33,3)–Pb(64,9)–Sn(51,4)–Ge(42,38)–Sb(42,44)–Ag(42,69) | 4 → Cu– Zn–Pb ; ← Sn–Sb, Ge–Ag |
| 4.1 → As(35,1)–Co(30,4)–Ni(29,86)–Mn(29,33)–Cu(33,3)– Zn (41,9)– Pb (64,9)–Sn(51,4)–Ge(42,38)–Sb(42,44)– Ag (42,69) | 4.1 → As–Co–Ni; ← Mn–Cu– Zn–Pb ; ← Sn–Sb, Ge–Ag |
| 5 → Mn(29,33)–Cu(33,3)– Zn (41,9)– Pb (64,9)– Ge (42,38)–Ag(42,69)–Cd(51,76)–Hg(76,1) | 5 → Mn–Cu– Zn–Pb ; → Ge–Ag–Cd–Hg |
| 5.1 → Mn(29,33)–Cu(33,3)– Pb (64,9)– Ge (42,38)– Ag (42,69)–Cd(51,76)–Hg(76,1) | 5.1 → Mn–Cu– Pb ; → Ge–Ag–Cd–Hg |
| 6 → Zn(41,9)–Pb(64,9)– Au (47,45)– Ag (42,69)–As(35,1)–Sb(42,44)–Hg(76,1) | 6 → Zn–Pb–Hg; ← Au–Ag–Sb–As |
| 6.1 → As(35,1)–Sb(42,44)– Ag (42,69)– Au (47,45) | 6.1 → As–Sb– Ag–Au |
| 7 → As(35,1)–Co(30,4)–Ni(29,86)–Cu(33,3)– Zn (41,9)– Sn (51,4)– Pb (64,9)– Mn (29,33)–Sb(42,44)– Ag (42,69)– In (58,1) | 7 → As–Co–Ni; ← Cu– Zn–Sn–Pb ; ← Mn–Sb–Ag–In |
| 7.1 → As(35,1)–Co(30,4)–Ni(29,86)–Cu(33,3)–Ga(41,69)– Zn (41,9)– Sn (51,4)– Pb (64,9)–Sb(42,44)– Ag (42,69)–Cd(51,76), In (58,1) | 7.1 → As–Co–Ni; ← Cu–Ga– Zn–Sn–Pb ; ← Sb– Ag–Cd–In |

Таблица 5. Обобщенные и частные геохимические ряды зональности эндогенных рудных месторождений. Элементы ранжированы по распространенности элементов (в скобках) **в хондритах** [6], г/т (по А.П. Виноградову [10])

Table 5. Generalized and particular geochemical zoning rows of endogenous ore deposits. The elements in rows are arranged by prevalence of elements (parenthesized) **in chondrites** [6], g/t (by A.P. Vinogradov [10])

| Обобщенные ряды геохимической зональности | Частные ряды геохимической зональности |
|---|--|
| 1 → Bi(0,003)– Au (0,17)–Sb(0,10)–W(0,15)–As(0,3)–Co(800)–Ni(13500)–Mn(2000)–Zn(50)–Cu(100)–Pb(0,2)– Ag (0,094) | 1 → Bi– Au – Sb –W; → As –Co–Ni; ← Mn–Cu–Zn–Pb– Ag |
| 1.1 → (Bi(0,003)– Au (0,17)–Sb(0,1)–As(0,3)–Co(800)–Ni(13500)–Mn(2000)–Zn(50)–Cu(100)–Pb(0,2)– Ag (0,094) | 1.1 → Bi– Au , Sb; → As–Co–Ni; ← Mn–Cu–Zn–Pb– Ag |
| 2 → (Mo(0,6)–W(0,15)–Sn(1)–Au(0,17), Te(0,5), Bi(0,003)–As(0,3)–Co(800)–Ni(13500) | 2 → Mo–W–Sn; → Bi , Au , Te –As–Co–Ni |
| 2.1 → Bi(0,003)–Au(0,17)–(Sb(0,1))–Ag(0,094)–Co(800)–Ni(13500)–Pb(0,2)–Cu(100)–Zn(50) | 2.1 → Bi –Sb– Au ; → Ag–Co–Ni; → Pb–Zn–Cu |
| 3 → Bi(0,003)–Sn(1)–As(0,3)–Co(800)–Ni(13500)–Mn(2000)–Cu(100)– Zn (50)– Pb (0,2)–(In (0,001)–Ag(0,094)–Sb(0,1) | 3 → Bi–Sn–As–Co–Ni; ← Mn–Cu– Zn – Pb –Sb– Ag – In |
| 3.1 → Bi(0,003)– Sn (1)–Co(800)–Ni(13500)–Mn(2000)–Cu(100)–Zn(50)–(Ge(10)–Sb(0,1)–Pb(0,2)– Ag (0,094)–(In (0,001) | 3.1 → Bi– Sn –Co–Ni; ← Cu– Zn – Pb –Sb– Ag – In |
| 4 → Zn (50)–Cu(100)– Pb (0,2)– Sn (1)–Ge(10)–Sb(0,1)– Ag (0,094) | 4 → Cu– Zn – Pb ; → Ge–Sn–Sb– Ag |
| 4.1 → As(0,3)–Co(800)–Ni(13500)–Mn(2000)–Cu(100)– Zn (50)– Pb (0,2)–Sn(1)– Ge (10)–Sb(0,1)– Ag (0,094) | 4.1 → As–Co–Ni; ← Mn–Cu– Zn – Pb ; ← Ge –Sn–Sb– Ag |
| 5 → Mn(2000)–Cu(100)– Zn (50)–Pb(0,2)– Ge (10)– Ag (0,094)–(Cd(0,1)–Hg(3) | 5 → Mn–Cu– Zn –Pb; ← Ge –Hg–(Cd)– Ag |
| 5.1 → Mn(2000)–Cu(100)– Pb (0,2)– Ge (10)– Ag (0,094)–Cd(0,1)–Hg(3) | 5.1 → Mn–Cu– Pb ; Ge –Hg–Cd– Ag |
| 6 → Zn(50)–Pb(0,2)– Au (0,17)– Ag (0,094)–As(0,3)–Sb(0,1)–Hg(3) | 6 → Zn–Pb–Hg; Au – Ag –Sb–As |
| 6.1 → As(0,3)–Sb(0,1)–Ag(0,094)–Au(0,17) | 6.1 → As–Sb–Ag–Au |
| 7 → As(0,3)–Co(800)–Ni(13500)–Cu(100)– Zn (50)– Sn (1)– Pb (0,2)– Mn (2000)–Sb(0,1)– Ag (0,094)–(In (0,001) | 7 → As–Co–Ni; ← Cu– Zn – Sn – Pb ; ← Mn –Sb– Ag – In |
| 7.1 → As(0,3)–Co(800)–Ni(13500)–Cu(100)–Ga(3)–Zn(5)–Sn(0,1)–Pb(0,2)–Sb(0,1)–Ag(0,094)–Cd(0,1)–In(0,001) | 7.1 → As–Co–Ni; ← Cu– Zn –Ga– Sn –Cd– Pb ; ← Sb–Ag–In |

Таблица 6. Обобщенные и частные геохимические ряды зональности эндогенных рудных месторождений. Элементы ранжированы по распространенности элементов (в скобках) **в земной коре**, г/т [11]

Table 6. Generalized and particular geochemical zoning rows of endogenous ore deposits. The elements in rows are arranged by prevalence of elements (parenthesized) **in the Earth's crust**, g/t [11]

| Обобщенные ряды геохимической зональности | Частные ряды геохимической зональности |
|--|--|
| 1 → (Bi(0,009)– Au (0,0043)–Sb(0,5)–W(1,3)–As(1,7)–Co(18)–Ni(58)–Mn(1000)–Zn(83)–Cu(47)–Pb(16)– Ag (0,07) | 1 → Au –Bi–Sb–W; → As –Co–Ni; ← Mn–Zn–Cu–Pb– Ag |
| 1.1 → Au (0,0043)–Sb(0,5)–As(1,7)–Co(18)–Ni(58)–Mn(1000)–Zn(83)–Cu(47)–Pb(16)– Ag (0,07) | 1.1 → Au –Sb–As–Co–Ni; ← Mn–Zn–Cu–Pb– Ag |
| 2 → Mo(1,1)–W(1,3)–Sn(2,5)– Au (0,0043), Te (0,001), Bi (0,009)–As(1,7)–Co(18)–Ni(58) | 2 → Mo–W–Sn; → Te , Au , Bi –As–Co–Ni |
| 2.1 → Au (0,0043)– Bi (0,009)–(Sb(0,5)–Ag(0,07)–Co(18)–Ni(58)–Pb(16)–Cu(47)–Zn(83) | 2.1 → Au – Bi –Sb; → Ag–Co–Ni; → Pb–Cu–Zn |

| | |
|--|---|
| 3 → Bi(0,009)–Sn(2,5)–As(1,7)–Co(18)–Ni(58)–Mn(1000)–Cu(47)–Zn(83)–Pb(16)–Sb(0,5)–In(0,25)–Ag(0,07) | 3 → Bi–As–Sn–Co–Ni–Mn; ← Zn–Cu–Pb–Sb–In–Ag |
| 3.1 → Bi(0,009)–Sn(2,5)–Co(18)–Ni(58)–Mn(1000)–Zn(83)–Cu(47)–(Ge(1,4)–Sb(0,5)–Pb(16)–Ag(0,07)–In(0,25)) | 3.1 → Bi–Sn–Co–Ni; ← Zn–Cu–Pb–Sb–In–Ag |
| 4 → Zn(83)–Cu(47)–Pb(16)–Sn(2,5)–Ge(1,4)–Sb(0,5)–Ag(0,07) | 4 → Zn–Cu–Pb–Sn–Ge–Sb–Ag |
| 4.1 → As(1,7)–Co(18)–Ni(58)–Mn(1000)–Cu(47)–Zn(83)–Pb(16)–Sn(2,5)–Ge(1,4)–Sb(0,5)–Ag(0,07) | 4.1 → As–Co–Ni; ← Mn–Zn–Cu–Pb–Sn–Ge–Sb–Ag |
| 5 → Mn(1000)–Cu(47)–Zn(83)–Pb(16)–Ge(1,4)–Ag(0,07)–(Cd(0,13)–Hg(0,083)) | 5 → Mn–Zn–Cu–Pb; ← Ge–Cd–Hg–Ag |
| 5.1 → Mn(1000)–Cu(47)–Pb(16)–Ge(1,4)–Ag(0,07)–Cd(0,13)–Hg(0,083) | 5.1 → Mn–Cu–Pb; → Ge–Cd–Hg–Ag |
| 6 → Zn(83)–Pb(16)–Au(0,0043)–Ag(0,07)–As(1,7)–Sb(0,5)–Hg(0,083) | 6 → Zn–Pb–Hg; ← Au–Ag–Sb–As |
| 6.1 → As(1,7)–Sb(0,5)–Ag(0,07)–Au(0,0043) | 6.1 → As–Sb–Ag–Au |
| 7 → As(1,7)–Co(18)–Ni(58)–Cu(47)–Zn(83)–Sn(2,5)–Pb(16)–Mn(1000)–Sb(0,5)–Ag(0,07)–In(0,25) | 7 → As–Co–Ni; ← Zn–Cu–Pb–Sn; ← Mn–Sb–In–Ag |
| 7.1 → As(1,7)–Co(18)–Ni(58)–Cu(47)–Ga(19)–Zn(83)–Sn(2,5)–Pb(16)–Sb(0,5)–Ag(0,07)–Cd(0,13)–In(0,25) | 7.1 → As–Co–Ni; ← Zn–Cu–Ga–Pb–Sn; ← Sb–In–Cd–Ag |

Располагая данными о составе примесей в минералах рудных стадий [4; 14; 18], их можно поместить в ту часть ряда, где находятся их главные минералы-носители. В пирите и арсенопирите это Co, Ni, Au, Pb, Zn, Cu (редко Sb), незначительные концентрации Ag. В галенитах и сфалеритах тот же набор примесей, исключая Co, Ni, но с наличием Mn (он преимущественно входит в состав пирита, арсенопирита, а также сфалерита), в сульфоантимонидах – Au, Pb, Zn, Cu, Sb, Ag. Таким образом, исключив сквозные элементы в минеральных стадиях, кроме золота, серебра и сурьмы, обобщенный ряд пространственной зональности по ассоциациям элементов мог бы выглядеть так: W, Bi, Sb – Au₁, As, Co, Ni – Mn, Cu, Zn, Pb₁, Au₂, Ag₁ – Au₃, Sb₂, Ag₂. Ряд оказывается близким к обобщенным эмпирическим рядам (**1** и **1.1**), построенным по результатам опробования руд и примесей в пирите. Этот факт сам по себе является весьма любопытным. В специфических условиях развития рудно-магматических систем однотипность, направленность рудно-геохимической зональности может проявляться на разном уровне организации геологических тел в составе руд месторождения и в примесном составе минералов. Эту закономерность можно проследить на примере других месторождений (табл. 4–6).

Обобщенный ряд рудно-геохимической зональности (**1**) по восстанию рудной зоны №1 установлен по величине коэффициента накопления элементов в интервале 850 м. Стрелкой (здесь и в последующих рядах) показано направление вектора зональности.

Дальнейшая процедура связана с решением задачи построения частных геохимических рядов на основе эмпирически установленной обобщенной

зональности по руде (**1**) и примесям в пирите (**1.1**). Для этого элементы обобщенных рядов зональности **1** и **1.1** ранжируются по величине стандартной энтропии S^0_{298} (табл. 4). Смысл такого ранжирования заключается в определении направления вектора изменения стандартной энтропии элементов при формировании рудно-геохимической зональности, с учетом того, что непрерывность рудообразования сопровождается однонаправленным понижением или повышением энтропии элементов в зависимости от регрессивного или прогрессивного процесса, а при участии наложения разных стадий во времени эта однонаправленность может быть нарушена.

Сохраняя эмпирически установленные (снизу вверх рудной зоны) направления векторов зональности **1** и **1.1**, выделим те части рядов, которые подчиняются увеличению или уменьшению значения S^0_{298} элементов. Получаем частный ряд (правая часть табл. 4) ассоциации, согласующийся с эмпирически установленным вектором зональности: → Bi(56,9) – Au(47,45) – Sb(42,44) – W(32,76). В скобках значение S^0_{298} элементов. Далее последовательность изменения S^0_{298} в обобщенном ряду прерывается на мышьяке и начиная с него закономерно уменьшается в том же направлении вектора: → As(35,1) – Co(30,4) – Ni(29,86) – Mn(29,33). Продолжая подобную процедуру ранжирования остальной части обобщенного ряда по S^0_{298} , заметим, что следующая ассоциация в нем меняет свой вектор изменчивости S^0_{298} на противоположный: ← Cu(33,3) – Zn(41,9) – Ag(42,69) – Pb(64,9). Положение Ag в ряду более чем оправданно, поскольку оно устанавливается в примесях галенита, сфалерита и имеет собственные минералы в соста-

ве поздней сульфoантимонитовой ассоциации, которая в обобщенном ряду зональности просто не может быть выделена в силу того, что ряд зональности рассчитывался по коэффициенту валового накопления элементов в рудной зоне.

Частные ряды зональности, установленные по примесям в пиритах, отличаются от обобщенного ряда рудно-геохимической зональности только тем, что первый и второй ряды по примесям выстраиваются в единый непрерывный ряд изменения S^0_{298} , а третий выглядит обратным по отношению к первым.

В рамках принятой гипотезы и процедуры ранжирования обобщенного ряда по S^0_{298} попытаемся восстановить историю формирования геохимических ассоциаций элементов, строго следуя рангам S^0_{298} , с привязкой к составу примесей в установленных эмпирически стадиях минералообразования.

Ассоциацию геохимического ряда $\rightarrow \text{Bi}(56,9) - \text{Au1}(47,45) - \text{Sb1}(42,44) - \text{W}(32,76)$ оставим без изменения, поскольку ранги элементов соответствуют установленному обобщенному эмпирическому ряду зональности. Выделим Au1 и Sb1 порядковыми номерами по принадлежности к первой ассоциации. Тогда к следующей ассоциации необходимо добавить Au2, потому как As, Co, Ni, Mn в основном концентрируются в золото-пирит-арсенопиритовой ассоциации, содержащей эти элементы. Отсюда ряд этой ассоциации должен быть таким: $\rightarrow \text{Au2}(47,45) - \text{As}(35,1) - \text{Co}(30,4) - \text{Ni}(29,86) - \text{Mn}(29,33)$. Место золота в ряду по величине S^0_{298} может быть определено только перед As. Частный ряд имеет аналогичный по направлению вектор зональности, что можно интерпретировать как единоподобный, но *дискретный* процесс рудообразования [19], пространственно связанный с единым источником вещества, но с разной подвижностью элементов (чем выше значение S^0_{298} элемента, тем раньше и выше в ряду зональности он концентрируется: все нерудные элементы (Si, Ca, Na, K) как более распространенные в земной коре выделяются одними из первых). Продолжая подобную процедуру ранжирования остальной части обобщенного ряда по S^0_{298} , заметим, что следующая ассоциация в нем меняет свой вектор на противоположный относительно первого и второго частных рядов: $\leftarrow \text{Cu}(33,3) - \text{Zn}(41,9) - \text{Ag1}(42,69) - \text{Pb1}(64,9)$, что можно либо интерпретировать как инверсию направления рудоотложения под влиянием различных структурно-тектонических факторов, либо объяснить это влиянием другого источника рудообразования. Например, смешение эндогенного источника с надкларковыми количествами металлов (в том числе и золота) в составе вмещающих пород [20].

Золото-серебро-сульфоантимонитовая ассоциация, скрытая в обобщенном ряду эмпирической

зональности, формирует свой ряд, а по направлению вектора зональности является сходной с предыдущей. В ассоциации доминируют сульфосоли Ag, Pb, Sb. По минералогическим данным, Au и Ag в стадии чаще устанавливается в сростании с галенитом и сульфосолями свинца, что и определяет их положение в ряду, ранжированном по S^0_{298} : $\leftarrow \text{Pb2}(64,9) - \text{Au3}(47,45) - \text{Ag2}(42,69) - \text{Sb2}(42,44)$. Порядковыми номерами обозначим принадлежность элементов к этой стадии. Таким образом, в структуре обобщенного эмпирического ряда зональности не устанавливается участие в рудообразовании двухстадийных Pb, двухстадийного Ag, трехстадийного Au и двухстадийной сурьмы, если не воспользоваться процедурой дополнительного ранжирования эмпирически установленного ряда зональности элементов по величине S^0_{298} . Частные ряды зональности **1** и **1.1** в таблице 4 приведены без вышеприведенной процедуры оценки участия элементов в различных стадиях минералообразования, но и в них отражается подобная разнонаправленность векторов зональности во вскрытой сложной динамике рудообразования.

По данным исследований минералогии и геохимии на Нежданском месторождении были обнаружены промышленные блоки, сформированные по правилу прямой и обратной зональности именно в рамках полисульфидной и сульфо-антимонитовой стадий. Задолго до прецизионных изотопных исследований [21], указывающих на наличие в месторождении двух разновозрастных свинцов, был установлен факт привноса части золота из боковых терригенных пород, отличающихся высоким региональным кларком Au, As именно в догранитоидную стадию [22].

Зональность золото-серебряной минерализации (ряды **6** и **6.1**) рассмотрена на независимом примере изучения рудно-магматических систем Северного Приохотья и зональности, выявленной по примесям в пиритах месторождения Дальнего по материалам [13]. Эти ряды также достаточно хорошо согласуются с обобщенными и частными эмпирическими рядами, ранжированными по значениям S^0_{298} и распространенности их в составе Солнца, хондритах и земной коре. Однако есть нюанс, которой не согласуется с рядом установленной эмпирической зональности рудно-магматической системы. Зональность, установленная в работе [13] по примесям в пирите (**6.1**), дает основание усомниться в положении ртути в эмпирическом ряду **6** рудно-магматической системы. Если ее положение в ряду изменить (поскольку свойства ртути в ряду Zn – Cd – Hg близки в периодической системе Д.И. Менделеева) и представить его как Zn – Pb – **Hg** – Au – Ag – Sb – As, то верхняя часть ряда приобретает обратный вектор по отношению к ряду, рассчитанному по примесям пирита,

при этом меняются местами Sb и As в ряду 6. Кстати, Sb и As, обладающие близкими свойствами в таблице Д.И. Менделеева, также располагаются в одном ряду. Это полностью согласуется с рядом зональности, ранжированным по S^0_{298} и рассчитанным для месторождения, который в полной мере согласуется со свойствами элементов зонального ряда As и Sb, Ag и Au в Периодической системе Д.И. Менделеева.

Зональность полисульфидной индий-серебро-олово-свинец-цинк-марганцевой минерализации. Установлена А.В. Кокиным на примере уникальных массивных алабандиновых руд месторождения Высокогорного (Восточная Якутия), представленного многочисленными крутопадающими субмеридиональными секущими жилами, жильными зонами [22], которые локализованы среди позднепермских терригенных пород (обогащенных Mn до 3–5 кларков) и риодацитов K_1 – K_2 . Минерализация сформирована в течение нескольких стадий. Ранняя представлена пирит-пирротин-галенит-сфалеритовой с касситеритом и станнином минерализацией, средняя связана с формированием собственно марганцевой минерализации, на 92–98 % состоящей из моносульфида марганца (алабандина) с наличием в ней вкрапленной поздней ассоциации сульфоантимонидов, цинка, свинца, меди, олова, серебра, сурьмы и индия. Индий представлен более чем десятком индиевых минералов различной размерности. Концентрация марганца в составе руд от нижних к верхним уровням в жилах варьируется от 49 до 67 %, суммы свинца и цинка – до 2 %, кадмия – до 7 кг/т, индия – от 32 до 1204 г/т. Таким образом, по ценности руд это месторождение прежде всего индиевое. Вертикальный размах алабандиновой минерализации в рудном поле установлен в диапазоне 430 м. Минералогическая зональность (по восстанию жил) характеризуется сменой массивных, существенно пирит-пирротин-галенит-сфалеритовых руд, быстро переходящих в массивные руды с вкрапленной минерализацией алабандина, вплоть до формирования массивных алабандиновых руд в жилах и жильных зонах, прослеживающихся в рудном поле до 6,5 км.

Обобщенные ряды рудно-геохимической зональности установлены по рудным сечениям (7) и примесям в алабандине (7.1). В таблицах 4–6 те же ряды ранжированы по значениям S^0_{298} и распространенности элементов на Солнце, в хондритах и земной коре.

В частном ряду (7), ранжированном по S^0_{298} , проявлены все три стадии в составе основных примесей ранней ассоциации As, Co, Ni – средней стадии Cu, Zn, Sn, Pb и поздней – Mn, Sb, Ag, In. В ряду зональности, ранжированном по примесям в алабандине, ситуация не меняется, за исключением того, что в частные ряды вклиниваются примеси галлия и кадмия, которые невозможно было

выявить в результате расчета зональности по рудным сечениям. В рядах, ранжированных по кларку в земной коре, меняются местами Cu и Zn, что, очевидно, связано с неточной оценкой их кларков, поскольку ранжирование по величине стандартной энтропии и по распространенности в хондритах их положение не нарушает.

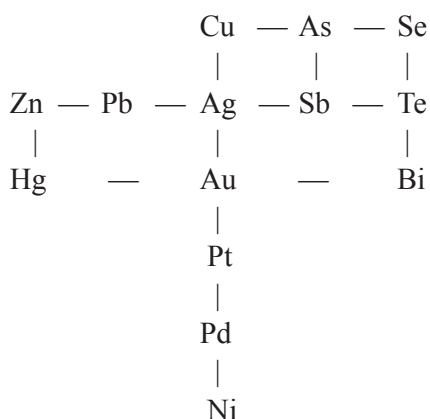
Отметим другую важную особенность структуры частного ряда 7.1. Элементы второй и третьей стадий минералообразования образуют ассоциацию элементов Zn, Cu, Ga, Cd, In, Ag, располагающихся в таблице Д.И. Менделеева в 5-м, 7-м рядах и I, II, III группах. Третья особенность состоит в том, что если ранняя ассоциация элементов As, Co, Ni (основным их концентратором является пирит, арсенопирит, пирротин) формирует ряд в направлении уменьшения энтропии элементов, то зональный ряд ассоциации элементов средней и поздней стадии, напротив, в направлении повышения их энтропии. Такое состояние формирования рядов прямой и обратной зональности может быть связано с влиянием как различных источников металлов при формировании руд, так и с влиянием разнонаправленных (прямых или обратных) многостадийных процессов, с изменением как термодинамических, так и физико-химических параметров рудоформирующих систем.

Анализ частных и обобщенных рядов рудно-геохимической зональности изученных месторождений и проявлений дает возможность выделить некоторые особенности их структуры. А именно, вне зависимости от типов месторождений, во многих из них выделяются ассоциации, образующие одинаковые или близкие кластеры [23]: Bi–Sb–As (обычно для золото-сульфотеллуридной минерализации); As–Co–Ni (в черносланцевых толщах с золото-пирит-арсенопиритовой ассоциацией); Mn–Cu–Zn–Pb (в полиметаллических месторождениях); Sb–As–Ag (в сурьмяных месторождениях); Au–Ag–Cu (в золоторудных месторождениях разных минеральных типов); Ge–Sn–Pb (в олово-полиметаллических месторождениях); Ga–In–Tl (в оловянных, олово-сульфидных месторождениях); Cu–Zn–Ga–Ge (в полиметаллических месторождениях); Fe–Co–Ni–Pt, Au – в золото-платиноидных месторождениях, пространственно связанных с ультраосновным магматизмом и др., которые могут быть вложены друг в друга (быть прямыми или обратными, в зависимости от условий образования) или образовывать синтетические структуры рядов [23], соотносясь с пространственно совмещенными или разобщенными стадиями рудного процесса, но в неперменном соответствии с фундаментальными свойствами элементов в Периодической системе Д.И. Менделеева.

Систематизация и обобщение данных по ассоциациям химических элементов, образующих струк-

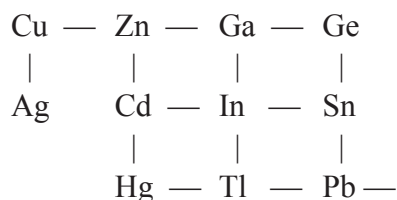
турную связь (ряд пространственно-временной зональности) в рамках соответствия фундаментальным свойствам элементов Периодической системы, позволили выделить наиболее часто встречаемые ассоциации для золоторудных месторождений:

1. Au–Ag–Cu. Золото-серебро-медная ассоциация (встречается в большинстве золоторудных месторождений).
2. Au–Hg. Золото-ртутная ассоциация.
3. Au–Bi–Sb–As. Золото-сульфоантимонитовая ассоциация.
4. Au–Te–Bi–Se. Золото-теллур-висмут-селеновая ассоциация.
5. Au–Te–Bi–W. Золото-вольфрамовая ассоциация.
6. Смешанные (синтетические) золотые ассоциации могут образовывать кластер. Элементы в кластере подчиняются фундаментальным свойствам элементов.



Такие ассоциации, как Au–Ag–Cu, Zn–Hg, Bi–Sb–As, Ni–Pd–Pt, соответствуют положению их в соответствующих подгруппах Периодической системы Д.И. Менделеева.

7. Серебро-олово-полиметаллические ассоциации могут образовывать следующий кластер:



Элементы кластера соответствуют главным или побочным подгруппам больших периодов Периодической системы Менделеева. А сами ассоциации элементов кластеров способны образовывать смешанные (синтетические) кластеры при участии в рудообразовании различных этапов и минеральных стадий (наложенных и разобщенных) рудообразования, характеризующихся специфической

ассоциацией. При этом каждый кластер может формировать синтетическую структуру только в соответствии с фундаментальными свойствами элементов в ассоциациях кластеров. Например, кластер ассоциаций элементов, образующих полиметаллы в условиях наложения золотой минерализации, будет включать кластеры полиметаллов и золотых ассоциаций. То есть в рудном процессе источники металлов не формируются по принципу случайности, а образуют сложные кластеры ассоциаций, которые в пространстве и времени (зональности) могут быть расположены по принципу соответствия положения как элементов в кластерах, так и самих кластеров в рудообразующей системе с неперменным соответствием их рангов распространенности (кларков) элементов, величины их стандартной энтропии, атомных масс и зарядов атомных ядер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При ранжировании элементов в эмпирически установленных рядах рудно-геохимической зональности сохраняется та же последовательность относительно их распространенности (кларков) как в хондритах, так и земной коре. Причина сохранения такой закономерности связана с фундаментальными термодинамическими свойствами элементов: стандартной энтропией и свойствами элементов в Периодической системе Д.И. Менделеева, то есть с периодичностью синтеза ядер химических элементов в звездах. Фундаментальные свойства элементов и их отношений не меняются в результате процессов фракционирования их на легкие и тяжелые в разных средах: хондритах, земной коре, морской воде, минералах. Концентрации элементов могут меняться в составе руд, минералов, воде, горных породах и т. д., но структура распределения их в геологических телах разного уровня организации сохраняется на уровне нуклеосинтеза. Вне звезд во времени и пространстве в последующих процессах химической, физико-химической дифференциации вещества относительная распространенность атомов химических элементов не может быть изменена, поскольку это изменение касается только свойств атомов, определяемых строением электронных оболочек атомов, но не самих ядер атомов, формирующих закон периодичности их в таблице Д.И. Менделеева. Эта распространенность может быть изменена только под влиянием ядерных процессов, например радиоактивности.

Таким образом, сформулированная гипотеза о сохранении фундаментальных свойств элементов на разном уровне организации вещества подтверждается при формировании зональности эндогенного рудообразования.

2. Обратная зависимость стандартной энтропии от распространенности (кларков) химических элементов может быть использована как для оценки структуры рядов обобщенной геохимической зональности месторождений, так и для анализа эмпирически рассчитанных частных рядов с надежным выявлением ассоциаций элементов, участвующих в различных стадиях рудо- и минералообразования. Ранжированием элементов в эмпирически полученных рядах относительно стандартной энтропии можно выделить геохимические ассоциации, формирующиеся по прогрессивному (прямому) или регрессивному (обратному) вектору зональности. Тем самым косвенно можно устанавливать условия рудообразования, поскольку прогрессивные ряды [2] формируются от высокотемпературных к низкотемпературным, а регрессивные, наоборот, от низкотемпературных к высокотемпературным. На этот процесс могут оказывать влияние литологические экраны перед фронтом рудообразования, которые способны провоцировать повышение температуры. Такие случаи, когда ранние минералы испытывают перекристаллизацию под влиянием поздних процессов, нередко выявляются при минералогическом исследовании руд.

Ряды рудно-геохимической зональности полигенных и полихронных эндогенных месторождений могут формироваться под влиянием однонаправленных (одностадийных) или разнонаправленных (прямых или обратных) многостадийных процессов с изменением физико-химических параметров рудоформирующихся систем. Это приводит к появлению рудных минеральных ассоциаций с разным примесным составом, которые могут быть пространственно (в рудных телах и месторождении в целом) разобщены или совмещены. Причины дискретно-волнового (прогрессивного или регрессивного) механизма формирования блоков с векторами прямой и обратной зональности в рудных телах могут быть разные: структурно-тектонические, изменение термодинамических усло-

вий в ходе рудообразования, структурно-текстурные особенности самой рудовмещающей среды, эволюция самих источников рудообразования [18] и др. То есть если ряд эмпирически установленной рудно-геохимической зональности элементов полностью согласуется с рядом, ранжированным по одному или нескольким фундаментальным свойствам элементов, то рудообразование происходило в рамках единого этапа и одной стадии рудообразования. Если не согласуется, то руды месторождения формировались во столько стадий, сколько разрывов рудогенных ассоциаций элементов обнаруживается в составе эмпирически установленного обобщенного ряда рудно-геохимической зональности на основе переранжирования его с использованием одного из указанных фундаментальных свойств элементов. При этом наиболее чувствительным методом выделения частных рядов в обобщенных рядах рудно-геохимической зональности является зональность, установленная по примесям сквозных минералов.

3. Наличие пространственно совмещенных стадий минералообразования накладывает ограничения на возможность оценки глубинного прогноза любого эндогенного оруденения с использованием обычного метода расчета рудно-геохимической зональности по относительной величине коэффициента накопления элементов с выбором индикаторных отношений уровня вскрытия месторождения, поскольку низ одной продуктивной стадии может совпадать с верхом другой и т. д., содержащей искомый элемент прогноза.

4. Химические элементы в рядах рудно-геохимической зональности могут группироваться в ассоциации (кластеры) с близкими свойствами. В этом смысле сам рудный процесс необходимо рассматривать как единый кластер самоорганизующейся системы, согласующейся с фундаментальными периодическими свойствами элементов, их стандартной энтропии и кларков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокин А.В. 2005. *Оценка перспективности рудных объектов*. Ростов н/Д, Ростиздат: 383 с.
2. Рундквист Д.В., Неженский И.А. 1975. *Зональность эндогенных месторождений*. М., Недра: 182 с.
3. Кокин А.В. 1999. Ряды минералогической зональности в структурах Южного Верхоянья (Якутии). *Записки Всесоюзного минералогического общества*. 128(2): 12–23.
4. Силичев М.К. 1981. Зональность распределения примесей в кварцах, арсенипиритах и галенитах золоторудного месторождения. *Геохимия*. (3): 379–385.
5. *Краткий справочник физико-химических величин*. 1974. Под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. Л., Химия: 200 с.
6. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. 1990. *Справочник по геохимии*. М., Недра: 480 с.
7. Щербаков Ю.Г. 1982. Периодическая система и космогеохимическое распределение элементов. *Геология и геофизика*. (1): 77–84.
8. Щербаков Ю.Г., Рослякова Н.В. 1979. Об индикаторном значении отношений металлов в золоторудных месторождениях. В кн.: *Основные параметры природных процессов эндогенного рудообразования*. Новосибирск, Наука: 129–135.

9. Бедняков В.А. 2002. *О происхождении химических элементов*. М., изд-во УФН.
10. Виноградов А.П. 1962. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. *Геохимия*. (7): 555–571.
11. Соловов А.П., Архипов А.Я., Бугров В.А. и др. 1990. *Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых*. М., Недра: 9–10.
12. Григорьев Н.А. 2002. О кларковом содержании химических элементов в верхних частях континентальной коры. *Литосфера*. (1): 61–71.
13. Кравцова Р.Г. 2005. *Геохимия и условия формирования золото-серебряных рудно-магматических систем Северного Приохотья*. Автореф. дис. ... д-ра геол.-минералог. наук. Иркутск: 23 с.
14. Белозерцева Н.В., Кокин А.В., Силичев М.К. 1987. Основные принципы прогнозирования и оценки золотого оруденения в терригенных толщах. В кн.: *Геология, методы поисков и разведки месторождений металлических полезных ископаемых*. Вып. 2. М., ВИЭМС: 7–12.
15. Гамянин Г.Н., Бортников Н.С., Алпатов В.В. 2000. *Нежданское золоторудное месторождение – уникальное месторождение Северо-Востока России*. М., ГЕОС: 227 с.
16. Парада С.Г., Рожков С.С. 2003. Метаморфогенная зональность золото-кварцевого оруденения малосульфидной формации. *Минералогический журнал*. (4): 119–125.
17. Парада С.Г., Маркин М.Ю., Столяров В.В., Шишкалов И.Ю. 2015. Геологические условия локализации золотоносных минерализаций и структура Муштинского рудного поля (Кабардино-Балкарская Республика). *Геология и геофизика Юга России*. (2): 51–65.
18. Кокин А.В. 1990. *Эволюция источников металлов при формировании эндогенных рудных месторождений (на примере рудной провинции Юго-Восточной Якутии)*. Дис. ... д-ра геол.-минералог. наук. Новосибирск: 300 с.
19. Гамянин Г.Н. 1972. О прерывистости процесса минералообразования в месторождениях золото-кварцевой формации. В кн.: *Рудообразование и его связь с магматизмом*. М., Наука: 203–214.
20. Кокин А.В. 1990. Новые данные по золотоносности осадочных пород Юго-Восточного обрамления Сибирской платформы. *ДАН СССР*. 313(3): 697–699.
21. Чернышов И.В., Бортников Н.С., Чугаев А.В. и др. 2011. Источники металлов крупного орогенного Нежданского золоторудного месторождения (Якутия, Россия): результаты высокоточного изучения изотопов свинца (МС – ICP-MS) и стронция. *Геология рудных месторождений*. 53(5): 395–418.
22. Silaev V.I., Piskunova N.N., Lutoev V.P., Kokin A.V., Kiseleva D.V. 2013. New potentially industrial type of indium sulfide-manganese ore. In: *Indium: Properties, Technological Applications and Health Issues*. N.-Y.: 261–284.
23. Кокин А.В., Батурич А.Л. 2006. Сохранение информации в распределении химических элементов на разных уровнях организации вещества в пространстве и времени. *Вестник Госкомгеологии*. 1(7). Якутск: 19–30.
2. Rundkvist D.V., Nezhenskiy I.A. 1975. *Zonal'nost' endogennykh mestorozhdeniy*. [Zonality of endogenous deposits]. М., Nedra: 182 p. (In Russian).
3. Kokin A.V. 1999. [Series of mineralogical zonality in the structures of the Southern Verkhoyany (Yakutia)]. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 128(2): 12–23. (In Russian).
4. Silichev M.K. 1981. [Zonality of distribution of admixtures in quartzes, arsenopyrites and galenites of a gold-ore deposit]. *Geokhimiya*. (3): 379–385. (In Russian).
5. *Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin*. [Brief handbook of the physical-chemical values]. 1974. K.P. Mishenko, A.A. Ravdel (Eds.). М., Khimiya: 200 p. (In Russian).
6. Voytkovich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.E., Prokhorov V.G. 1990. *Spravochnik po geokhimii*. [Handbook on geochemistry]. М., Nedra: 480 p. (In Russian).
7. Shcherbakov Yu.G. 1982. [Periodic system and spacegeochemical distribution of elements]. *Geologiya i geofizika*. (1): 77–84. (In Russian).
8. Shcherbakov Yu.G., Roslyakova N.V. 1979. [About indicative meaning of relations of metals in the golden-ore deposits]. In: *Osnovnye parametry prirodnykh protsessov endogenno rudoobrazovaniya*. [Main parameters of natural processes of endogenous ore formation]. Novosibirsk, Nauka: 129–135. (In Russian).
9. Bednyakov V.A. 2002. *O proiskhozhdenii khimicheskikh elementov*. [On the origin of chemical elements]. Moscow, UFN Publishers. (In Russian).
10. Vinogradov A.P. 1962. [Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks in the Earth's crust]. *Geokhimiya*. (7): 555–571. (In Russian).
11. Solovov A.P., Arkhipov A.Ya., Bugrov V.A. et al. 1990. *Spravochnik po geokhimicheskim poiskam poleznykh iskopaemykh*. [Handbook on geochemical searches for minerals]. Moscow, Nedra: 9 10. (In Russian).
12. Grigor'ev N.A. 2002. [About the abundance ratio of chemical elements in the upper parts of continental crust]. *Litosfera*. (1): 61–71. (In Russian).
13. Kravtsova R.G. 2005. *Geokhimiya i usloviya formirovaniya zoloto-serebryanykh rudno-magmatischeskikh sistem Severnogo Priokhot'ya*. Автореф. дис. ... д-ра геол.-минералог. наук. [Geochemistry and formation conditions of gold-silver ore-igneous systems of the Northern Priochot'ye. Doctor's Thesis Abstract]. Irkutsk: 23 p. (In Russian).
14. Belozertseva N.V., Kokin A.V., Silichev M.K. 1987. [Main principles of forecasting and estimation of golden mineralization in terrigenous series]. In: *Geologiya, metody poiskov i razvedki mestorozhdeniy metallicheskih poleznykh iskopaemykh*. [Geology, search and prospecting methods of metallic minerals' deposits]. Iss. 2. Moscow, VIEMS: 7–12. (In Russian).
15. Gamyani G.N., Bortnikov N.S., Alpatov V.V. 2000. *Nezhdaninskoe zolotorudnoe mestorozhdenie – unikal'noe mestorozhdenie Severo-Vostoka Rossii*. [Nezhdaninskoye golden-ore deposit – the unique deposit of the North-East of Russia]. Moscow, GEOS: 227 p. (In Russian).
16. Parada S.G., Rozhkov S.S. 2003. [Metamorphogenous zonality of the gold-quartz mineralization of low-sulphide formation]. *Mineralogicheskii zhurnal*. (4): 119–125. (In Russian).
1. Kokin A.V. 2005. *Otsenka perspektivnosti rudnykh ob'ektov*. [Evaluation of prospects of ore objects]. Rostov-on-Don, Rostizdat: 383 p. (In Russian).

REFERENCES

17. Parada S.G., Markin M.Yu., Stolyarov V.V., Shishkalov I.Yu. 2015. [Geological conditions of localization of gold-bearing mineralizations and structure of the Mushtinskoye ore field (Kabardino-Balkarian Republic)]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. (2): 51–65. (In Russian).
18. Kokin A.V. 1990. *Evolyutsiya istochnikov metallov pri formirovaniy endogennykh rudnykh mestorozhdeniy (na primere rudnoy provintsii Yugo-Vostochnoy Yakutii)*. Dis. ... d-ra geol.-mineralog. nauk. [Evolution of the metals sources at formation of endogenous ore deposits. Doctor's Thesis]. Novosibirsk: 300 p. (In Russian).
19. Gamyani G.N. 1972. [About the interrupted character of the process of minerals formation in the deposits of the gold-quartz formation]. In: *Rudobrazovanie i ego svyaz' s magmatizmom*. [Ore formation and its connection with magmatism]. Moscow, Nauka: 203–214. (In Russian).
20. Kokin A.V. 1990. [New data on gold capacity of sedimentary rocks of South-Eastern framework of the Siberian platform]. *DAN SSSR*. 313(3): 697–699. (In Russian).
21. Chernyshov I.V., Bortnikov N.S., Chugaev A.V. et al. 2011. [Sources of metals of large orogenous Nezhdaninskoye golden-ore deposit (Yakutia, Russia): results of precision study of lead (MS – ICP-MS) and strontium isotopes]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 53(5): 395–418. (In Russian).
22. Silaev V.I., Piskunova N.N., Lutoev V.P., Kokin A.V., Kiseleva D.V. 2013. New potentially industrial type of indium sulfide-manganese ore. In: *Indium: Properties, Technological Applications and Health Issues*. N.-Y.: 261–284.
23. Kokin A.V., Baturin A.L. 2006. [Conservation of information in the distribution of elements at various levels of the matter organization in space and time]. *Vestnik Goskomgeologii*. 1(7). Yakutsk: 19–30. (In Russian).

Поступила 04.03.2016