

С. В. СОКОЛОВ (ВСЕГЕИ), Е. Ф. ПРИХОДЬКО (Концерн «Наноиндустрия»),
А. Г. МАРЧЕНКО (ВСЕГЕИ), С. А. ВОЛОДЬКО (ЗАО «РЕГИОН»)

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ НАЛОЖЕННЫХ СОРБЦИОННО-СОЛЕВЫХ И НАНОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ

Рассмотрены механизмы образования, транспорта и отложения сорбционно-солевых и наномеханических форм рудного вещества в почвах и приземной атмосфере. Образование солевых форм обусловлено преимущественно химическим разрушением рудных тел, тогда как возникновение наночастиц происходит в основном механическим способом. Последующая эволюция проявляется в их перемещении к поверхностным горизонтам рыхлых отложений в процессе конвективного и квази-конвективного массопереноса. Закрепление солевых и наномеханических форм в приповерхностных условиях происходит благодаря явлениям транспирации и их сорбции различными компонентами почв. На анализе этих форм рудного вещества, сорбированных на поверхности микро- и наночастиц рыхлых отложений, основан разработанный во ВСЕГЕИ метод анализа сверхтонкой фракции (МАСФ). Часть наночастиц металлов из почв выносятся в приземную атмосферу с образованием нанохимических аномалий – системы из газов и аэрозолей, интенсивно насыщенных твердыми наночастицами. На их инструментальной фиксации основывается дистанционный метод геокосмического зондирования наноаномалий (ГЗНА).

Ключевые слова: *сорбционно-солевые формы, наночастица, конвективный массоперенос, наложенный сорбционно-солевой ореол, нанохимическая аномалия.*

This paper considers processes of formation, transportation and deposition of the sorption-and-salt and nano-mechanical forms of the ore substances in soils and near-ground air. Generation of the soluble forms is mainly determined by chemical weathering of ore bodies, whereas nanoparticles are principally formed in processes of their mechanical disintegration. Further evolution of these forms manifests as their upward movement to the ground surface as a result of the convective and quasi-convective mass transport. Immobilization of the soluble and nano-mechanical forms in the near-surface environment is caused by transpiration and their sorption by various soil components. It is the Method of Analysis of Superfine Fraction (MASF) developed in FGUP VSEGEI which is specifically based on studying the forms of ore substances adsorbed on the surfaces of micro- and nanoparticles of soils. A portion of the metallic nanoparticles comes in the near-ground air and forms nano-chemical anomalies which are the systems comprised of gases and aerosols saturated with solid nanoparticles. The instrumental determination of these nanoparticles is the basis of the Geocosmic Remote Sensing of Nano-Anomalies technique (GRSNA).

Keywords: *sorption-and-salt forms, nanoparticle, convective mass transport, superimposed sorption-and-salt dispersal pattern, nano-chemical anomaly.*

Концепция, лежащая в основе геохимических методов поисков рудных месторождений, рассматривает процесс образования месторождений как переход металлов от изначально рассеянного состояния в земной коре и мантии к концентрированному с многоступенчатой дифференциацией и обязательным образованием первичных геохимических ореолов [1]. С обратным процессом – переходом от концентрации вновь к рассеянию – связано возникновение как остаточных, так и наложенных сорбционно-солевых ореолов в рыхлых отложениях, перекрывающих рудный объект, а также аномальных концентраций наночастиц рудного вещества в почве и приземной атмосфере (нанопылевых аномалий).

Если образование сорбционно-солевых форм металлов обусловлено преимущественно химическим разрушением рудных тел и их первичных ореолов, то возникновение наночастиц происходит механическим способом в результате разрушения коренных рудных объектов [6, 8]. Процесс образования наночастиц начинается с сжатия или растяжения блока горной породы, в результате которых

образуются трещинные микроразрушения. Последующее развитие деформаций сдвига и скольжения по поверхностям образовавшихся микротрещин приводит к истиранию материала и разделению блоков породы, а затем и зерен на мелкие фрагменты. Поверхность сдвига будет представлять собой зону мелкозернистого дробления, в которой материал доводится до состояния порошка. Такое разрушение породы до самых малых структурных уровней служит природным источником ее микро- и наночастиц. Сама наночастица здесь ставит предел разрушению – ее сопротивляемость разрушению растет при уменьшении ее размеров. Теоретическим пределом разрушения можно считать 3 нм. Частицу вещества меньше 3 нм естественнее рассматривать уже как молекулу. Так или иначе, но для основной массы наночастиц, выносимых из массива горных пород в атмосферу, изначальная природа их происхождения обломочная (или механическая).

В природе известны и иные механизмы образования наночастиц, например, осаждение на активных поверхностях в различных средах, возникновение

наночастиц как результат электрохимических процессов, горения, электрическом разряде и др.

Эволюция сорбционно-солевых форм элементов и наночастиц, образовавшихся в результате химического и микромеханического разрушения рудного объекта и первичных ореолов, проявляется в их перемещении к поверхностным горизонтам рыхлых отложений и далее в приземную атмосферу. Существуют различные точки зрения на механизм такого восходящего массопереноса [3, 4, 9, 11–14, 19 и др.]:

- газовой-конвективная пузырьковая миграция – фильтрация газов в сухих средах и квазифильтрация в обводненных средах (всплывание газовых микропузырьков по микротрещинам и порам в обводненных породах);

- диффузия, фильтрация подземных вод, капиллярный подъем;

- электромиграция, т. е. ионная миграция под действием естественных электрических полей, связанных с залежами полезных ископаемых и их окислением;

- физико-химическая миграция элементов под действием изменения физико-химических параметров среды (Ph и Eh) и биогенных процессов над рудными, а также нефтегазовыми объектами.

Диффузия подвижных форм элементов протекает повсеместно, однако она не является ведущим процессом в формировании надрудных наложенных ореолов, распространяющихся от локальных рудных объектов (аномальных источников) на расстоянии, измеряемые десятками и сотнями метров (для нефтяных месторождений – километрами). Диффузионные процессы основные только при формировании фонового поля подвижных и вторично закрепленных форм элементов, связанного с геохимическим фоном крупных геологических блоков. Кроме того, на больших глубинах возрастает роль термо- и бародиффузии, а также перекрестной диффузии. По мере перехода к верхней части изучаемого геологического разреза все эти процессы отходят на второй план [5].

Считается, что ведущую роль в формировании надрудных наложенных сорбционно-солевых ореолов локальных рудных объектов, погребенных под рыхлыми отложениями, играет восходящий конвективный или квазиконвективный массоперенос (рисунок).

В зоне подземных вод ведущим, по современным представлениям, является процесс восходящей газовой-пузырьковой миграции подвижных форм элементов [9, 14] и наночастиц металлов [18].

Существующими атмогеохимическими методами NAMEG и «Геогаз» [15–17, 20] определяется перенос элементов газами, мигрирующими в земной коре. Агентами переноса в этих условиях являются растворенные в подземных водах газы, главные из них N_2 , H_2 , CH_4 , O_2 , CO_2 . Их образование связывается с дегазацией глубинных, коровых флюидов и химическим разрушением верхних частей рудных тел. Восходящее перемещение газа в водонасыщенной трещинно-пористой толще происходит в виде поршневого вытеснения пузырьков под давлением и в виде пузырьков, всплывающих под действием гравитационных сил. Газовый поток, обтекая рудные тела или проникая через них, захватывает по ходу движения элементы в виде растворимых соединений и твердых микро- и наночастиц, переносит их вверх и создает вблизи дневной поверхности

наложенные ореолы подвижных, вторично закрепленных (сорбционно-солевых) форм элементов и аномальные концентрации наночастиц рудного вещества (рисунок). В их захвате и переносе участвуют ионная флотация, сцепление поверхностно-активных частиц со стенкой пузырька, растворение и перенос летучих соединений [9, 14, 16].

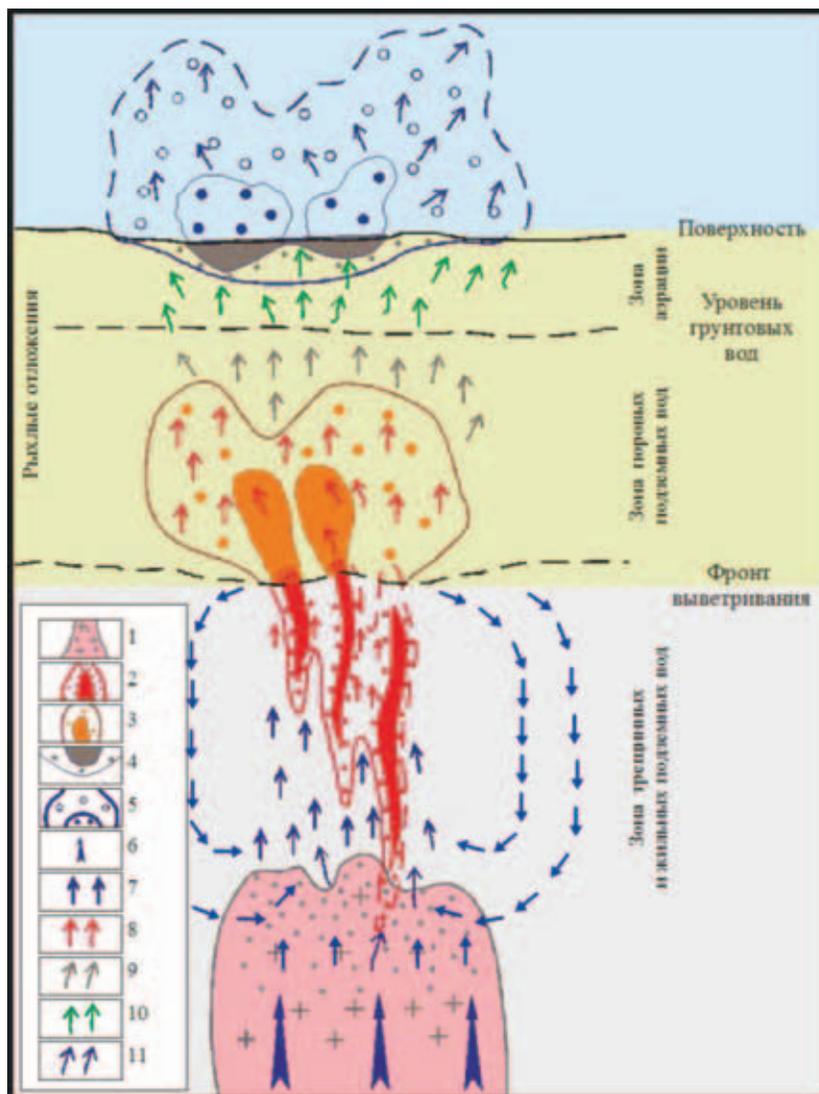
Новое подтверждение массопереноса элементов газовыми потоками получено китайскими геохимиками [18], которые наблюдали наноразмерные частицы металлов в почвах и почвенных газах над глубокозалегающим (400–700 м) медно-никелевым месторождением в Китае. Частицы размером 10–200 нм, наблюдавшиеся под электронным микроскопом, имеют тенденцию соединяться в гроздевые кластеры. Эти кластеры состоят из самородной меди, соединений Cu-Fe, Cu-Fe-Mn, Cu-Ag, Cu-Cr, Cu-Ni и металлов с Si, Al, Ca, O, P. Образование подобных кластеров интерпретируется авторами как результат миграции наночастиц металлов с газовыми пузырьками, движущимися из глубины к поверхности. В поверхностных горизонтах рыхлых отложений одна часть этих наночастиц остается в почвенных газах, а другая закрепляется в почвах на геохимических барьерах.

В зоне аэрации, при ее большой мощности в аридных сейсмически активных районах, наиболее значим восходящий массоперенос циклическими фильтрационными потоками напорных вод, возникающими при землетрясениях и сразу после них в результате дилатансионной накачки [11]. Кроме того, механизмами направленного вверх массопереноса могут быть восходящая фильтрация подземных вод за счет локальных аномалий градиентов температуры и давления, капиллярный подъем вод, восходящая фильтрация газов и биогенные процессы.

Фильтрация подземных вод и газов, капиллярный подъем являются важнейшими механизмами восходящего массопереноса солевых форм и наноразмерных частиц металлов, действующими в верхней части геологического разреза в зоне аэрации; они тоже могут рассматриваться как квазиконвективный механизм геохимической миграции. Процесс массопереноса состоит в том, что обломочные наночастицы из трещиноватостей горного массива и химические образования (молекулы, простые и комплексные ионы, молекулярные комплексы) захватываются растворами поровых и/или гравитационных вод. Происходит адсорбция наночастиц, ионов и молекул на границах жидкость – газ или жидкость – твердое вещество. Движущей силой сегрегации наночастиц и химических образований на поверхность жидкости является уменьшение свободной энергии системы. После захвата они движутся вместе с водной каплей и выносятся к дневной поверхности, где и закрепляются в различных компонентах приповерхностных рыхлых отложений. Такая фиксация подвижных (солевых) форм элементов происходит во многом благодаря транспирации и испарению влаги, а также сорбционным процессам на глинистых минералах, гидроксидов железа и марганца, карбонатах и в органическом веществе почв. В результате на закрытых территориях в верхней части чехла рыхлых отложений формируются наложенные сорбционно-солевые ореолы, которые при геохимических поисках становятся индикаторами погребенных под наносами рудных месторождений.

Концептуальная модель формирования наложенных сорбционно-солевых и нанопылевых ореолов рассеяния на примере плутоногенной рудно-магматической гидротермальной системы

1 – рудогенерирующий объект (магматический очаг, субвулканическая интрузия) с очагами концентрации летучих компонентов; 2, 3 – источники подвижных растворенных и наномеханических (нанопылевых) форм рудного вещества (2 – рудные тела и их первичные ореолы, 3 – вторичный остаточный ореол рассеяния); 4 – наложенный сорбционно-солевой и нанопылевой ореол в почвах; 5 – нанопылевой ореол в приземной атмосфере; 6 – мантийные и коровые глубинные флюидные потоки; 7 – рудоформирующие флюидные потоки; 8 – область захвата и транспорта пузырьками газа ионных и наномеханических форм рудного вещества; 9, 10 – область транзита ионных и наномеханических форм рудного вещества (9 – в зоне подземных вод преимущественно за счет газовой-пузырьковой миграции, 10 – в зоне аэрации за счет капиллярного подъема и восходящей фильтрации подземных вод и газов); 11 – перенос наночастиц конвекционными потоками в приземной атмосфере



Одновременно с солевыми формами вещества в почвах, в частности в горизонтах А, В, С, G рыхлого покрова, отлагается некоторая часть мигрирующих наночастиц рудного вещества в результате их седиментации, а также адсорбции на сверхтонких частицах глинистой составляющей. Именно на анализе сорбционно-солевой и наномеханической фаз рудного вещества, сорбированных на поверхности сверхтонких частиц (микро- и наночастиц) преимущественно глинистых минералов рыхлых отложений, основан разработанный во ВСЕГЕИ метод анализа сверхтонкой фракции (МАСФ) [2, 7, 10].

Другая же часть наноразмерных частиц металлов, переносимая почвенными газами, а также высвободившаяся в результате испарения водных растворов с агрегированными на его каплях наночастицами выносятся в приземную атмосферу. В дальнейшем наночастицы вещества в атмосфере распространяются конвекционными потоками. Поэтому приземная атмосфера над рудными телами должна рассматриваться не как газовая аномалия, а как более сложная атмогеохимическая система из газов и аэрозолей, интенсивно насыщенных твердыми микрочастицами. Наземный литогеохимический вторичный ореол рассеяния обязательно получает свое нанопылевое продолжение в прилегающей воздушной среде, обозначаемое нами как нанопылевая или нанохимическая аномалия [6, 8],

которая является атмогеохимическим ореолом рассеяния в расширенном понимании этого термина.

Долговременное присутствие наночастиц и нанохимических аномалий в атмосфере определяется их повышенной гидрофобностью и низким коэффициентом инерционного захвата. Однажды оказавшись в атмосфере, наночастицы практически не способны выпасть в турбулентных потоках или осесть на природных инерционных пылеотделителях, таких как травяной покров, деревья и скальные образования. В силу процессов современной геодинамики подобный нанопылевой диспергант постоянно возобновляется [6, 8].

Наночастицы несут на себе электрический заряд. Это свойство роднит наночастицы с ионизированными атомами и молекулами. Вынесенная в атмосферу заряженная наночастица обязательно вступает во взаимодействие с земным магнитным полем и, в соответствии с правилом Лоренца, начинает спирально навиваться на ближайшую силовую линию магнитного поля. Соседствующие наночастицы, навивающиеся на соседние силовые линии магнитного поля, электрически взаимодействуют друг с другом. По закону Кулона они начинают взаимно притягиваться и взаимно отталкиваться, возникает переменное электромеханическое поле, в котором колеблются сами наночастицы. Такое явление называют ленгмюровскими электроакусти-

чекскими автоколебаниями. Оно относится к классу автоколебательных процессов в холодной плазме. Все нанопылевые аномалии, с точки зрения физики, — это специфическая холодная плазма. Такие автоколебательные процессы в плазме синхронизируются и практически всегда становятся электрически и механически устойчивыми за счет потребления энергии магнитного поля Земли [8].

Следовательно, электромеханически вынесенные в атмосферу наночастицы обязательно связываются в локально устойчивые ленгмюровские ассоциации — нанопылевые аномалии, которым присущи внутренние электромагнитные механизмы самоподдержания. Поглощая кванты дневного света, нанопылевая аномалия переизлучает кванты энергии в определенных диапазонах видимого света, на инструментальной фиксации которых собственно и основывается дистанционный метод геокосмического зондирования наноаномалий (ГЗНА) [8]. Стабильно присутствующие электрически заряженные наночастицы, взаимодействующие с магнитным полем Земли, могут перемещаться только движущимися атмосферными потоками. Направление ветра в момент космосъемки определяет склонение нанохимических аномалий, морфологически близких к вторичным ореолам рассеяния в рыхлых отложениях. Геометризация на дневной поверхности проекции рудного источника может осуществляться по максимумам концентрации наночастиц в нанооблаке и по пересечению нанопылевых аномалий, выявленных путем совмещения космоснимков конкретной местности, сделанных на протяжении ряда лет. Практикой установлено, что выборка оказывается репрезентативной уже при 15–20 обрабатываемых первичных космоснимках. При этом отбраковываются космоснимки зимнего времени (когда испарение с поверхности Земли мало), космоснимки с облачностью > 5% и т. п.

Таким образом, благодаря рассмотренным выше процессам на закрытых территориях в верхней части чехла рыхлых отложений формируются наложенные сорбционно-солевые и наномеханические ореолы, а в приземной атмосфере — нанопылевые ореолы рассеяния, что лежит в основе новейших методов и технологий прогнозно-поисковых геохимических работ на закрытых территориях.

1. Барсуков В.Л., Григорян С.В., Овчинников Л.Н. Геохимические методы поисков рудных месторождений. — М.: Наука, 1981. — 318 с.

2. Временные методические указания по проведению геохимических поисков на закрытых и полузакрытых территориях / С.В. Соколов, А.Г. Марченко, С.С. Шевченко и др. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005. — 98 с.

3. Гольдберг И.С. Явление дальней миграции элементов и методы поисков глубокозалегающих месторождений // Методы разведочной геофизики. Использование геоэлектрхимических методов при поисках и разведке рудных месторождений. — Л.: НПО «Рудгеофизика», 1989. — С. 14–20.

4. Марченко А.Г. Физико-математические модели надрудных наложенных ореолов рассеяния // Прогнозно-

поисковая геохимия на рубеже XXI века. — М.: ИМГРЭ, 1998. — С. 83–86.

5. Механизмы формирования наложенных ореолов, фиксируемых геоэлектрхимическими и атмосферическими методами / М.Б. Штокаленко, С.Г. Алексеев, С.А. Вешев и др. // Российский геофизический журнал. 2009. № 47–48. — С. 33–50.

6. Морозов А.Ф., Приходько Е.Ф., Володько С.А. Поиск месторождений полезных ископаемых на основе выявления нанопылевых аномалий // Регион. геология и металлогения. 2011. № 48. — С. 70–78.

7. Патент РФ № 2330259 от 07.08.2006. Геохимический способ поисков месторождений полезных ископаемых / О.В. Петров, С.С. Шевченко, С.В. Соколов, А.Г. Марченко и др.

8. Приходько Е.Ф., Морозов А.Ф., Володько С.А. Эволюция наночастиц в литосфере // Регион. геология и металлогения. 2013. № 55. — С. 67–76.

9. Путиков О.Ф. Основы теории нелинейных геоэлектрхимических методов поисков и разведки. — СПб.: Изд-во СПГИ, 2009. — 534 с.

10. Соколов С.В., Марченко А.Г., Макарова Ю.В. Геологическая эффективность геохимических поисков методом анализа сверхтонкой фракции // Разведка и охрана недр. 2008. № 4–5. — С. 87–92.

11. Cameron E.M., Hamilton S.M., Leybourne M.I. et al. Finding deeply buried deposits using geochemistry // Geochem.: Exploration, Environment, Analysis. 2004. Vol. 4. — P. 7–32.

12. Hamilton S.M. Electrochemical mass transport in overburden: a new model to account for the formation of selective leach geochemical anomalies in glacial terrain // J. of Geochem. Explor. 1998. Vol. 63. — P. 155–172.

13. Mann A.W., Birrell R.D., Fedikow M.A.F., Souza H.A.F. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration // Geochem.: Exploration, Environment, Analysis. 2005. Vol. 7. — P. 201–210.

14. Putikov O.F., Wen B. Geoelectrochemistry and stream dispersion // Geochemical Remote Sensing of the Subsurface / Ed. by M. Hale. Handbook of Explor. Geochem. Vol. 7. Elsevier Sci. B.V. 2000. — P. 17–79.

15. Wang Xueqiu. Delineation of geochemical blocks for undiscovered large ore deposits using deep-penetrating methods in alluvial terrains of Eastern China // J. of Geochem. Explor. 2003. Vol. 77. — P. 15–24.

16. Wang Xueqiu, Cheng Zhizhong, Lu Yinxiu et al. Nanoscale metals in earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant ore deposits in overburden terrains // J. of Geochem. Explor. 1997. Vol. 58. — P. 63–72.

17. Xie Xuejing, Wang Xueqiu, Xu Li et al. Orientation study of strategic deep penetration geochemical methods in the Central Kyzylkum desert terrain, Uzbekistan // J. of Geochem. Explor. 1999. Vol. 66. — P. 135–143.

18. Xueqiu Wang, Rong Ye. Findings of nanoscale metal particles: direct evidence for deep penetrating geochemistry // 25th Intern. Applied Geochem. Symp. 2011. Program and abstracts. Rovaniemi (Finland). 2011. — P. 80–81.

19. Xueqiu Wang, Xueqin Wen, Ye Rong, Zhanyuan Liu et al. Vertical variations and dispersion of elements in arid desert regolith: a case study from the Jinwozi gold deposit, Northwestern China // Geochem.: Exploration, Environment, Analysis, 2007. Vol. 7. — P. 163–171.

20. Yuyan Gao, Mingqi Wang, De-en Zhang. Application of 'metals-in-soil-gas' techniques to mineral exploration in exotic overburden // Geochem.: Exploration, Environment, Analysis. 2011. Vol. 11. — P. 63–70.

Соколов Сергей Валерьевич — доктор геол.-минер. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ. <sergey_sokolov@vsegei.ru>.

Приходько Евгений Филиппович — ген. директор, концерн «Наноиндустрия». <gantimureu@gmail.com>.

Марченко Алексей Григорьевич — доктор геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <a-marchenko@yandex.ru>.

Володько Сергей Алексеевич — ген. директор, ЗАО «Регион». <volodko1947@yandex.ru>.