

ГЛАВНЕЙШИЕ ТИПЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ И МИНЕРАГЕНИЧЕСКИХ РЯДОВ В ОБЩЕЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ДОКЕМБРИЙСКОЙ ЛИТОСФЕРЫ (НА ПРИМЕРЕ ВКМ)

Н. М. Чернышов, В. М. Ненахов

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 13 октября 2010 г.

Аннотация. Длительный возрастной интервал (более 3 млрд лет) формирования ВКМ рассматривается в качестве объекта, на примере которого: а) разработаны модели многоэтапного становления докембрийской коры континентального типа; б) выявлена тесная взаимосвязь механизмов проявления геодинамических и рудообразующих процессов и образования специфических рядов этих двух взаимосвязанных систем в общей эволюции литосферы; в) установлены время и место в этом эволюционном ряду появления разномасштабных, в том числе крупных и сверхкрупных, комплексных, полиэлементных месторождений.

Ключевые слова: геодинамика, минерагения, ВКМ, эволюция литосферы, рудообразующие системы.
Abstract. A long-age range (more than 3 billion years) of the formation of VCM is regarded as an example for : a) development of models for a multi-stage formation of the Precambrian continental crust, b) revealing a close correlation mechanisms of the geodynamic and ore-forming processes and the formation of specific series of these two interrelated systems in the general evolution of the lithosphere, and c) determination of the time and place in this evolution of the emergence of different scale, including large and superlarge, complex, multielement deposits.

Key words: geodynamics, minerageny, VCM, lithosphere evolution, ore-forming systems

Широкий возрастной интервал, охватывающий более 3 млрд лет, делает Воронежский кристаллический массив (ВКМ) – крупный (1000 × × 600 км) сегмент Восточно-Европейской платформы (ВЕП) – в определенной степени эталонным объектом для установления основных закономерностей геодинамических режимов эволюции литосферы и связанных с ними рудообразующих систем, формирующих в совокупности специфические ряды. По механизмам геодинамических и сопровождающих их рудообразующих процессов в пределах ВКМ выделяется ряд разнотипных структур, относящихся к раннеархейским гранит-зеленокаменным областям (ГЗО), позднеархейским (неоархейским) зеленокаменным поясам (ЗП), сформировавшимся в условиях раннего рифтогенеза, специфическим структурам палеопротерозоя, развитие которых происходило по различным сценариям в Хоперском и Курском мегаблоках ВКМ и разделяющей их Лосевской шовной зоны (ЛШЗ), сохраняющей сложный характер взаимодействия двух важнейших компонентов – Сарматии и Волго-Уралии – основных элементов древнего основания ВЕП.

© Чернышов Н. М., Ненахов В. М., 2010

Следует особо отметить, что разнотипные по компонентному составу и степени продуктивности рудообразующие системы являются по существу лишь составными частями определенных структурно-вещественных комплексов (СВК), объединяющих сопряженные во времени и пространстве стратифицированные метаморфические и вулканогенно-интрузивные породные ассоциации, которые в совокупности наиболее полно отражают специфику геодинамических и эндогенных режимов формирования коры континентального типа.

Ниже, на основе авторских данных [1–5] и работ других исследователей [6–9] приводится обобщенная характеристика и модели главных типов геодинамических и рудообразующих процессов в длительной многоэтапной эволюции становления докембрийской литосферы ВКМ.

Геодинамика и минерагения раннего архея

Раннеархейская эпоха становления литосферы связана с механизмом формирования своеобразных доменов межплюмового торшения и последующего многоэтапного их амальгамирования с образованием континентальных разномасштабных нуклеократонов с кружевным характер-

ным для ранних зеленокаменных поясов (ЗП-1) рисунком и высокой изменчивостью состава пород (рис. 1). Результаты предложенного геодинамического механизма отчетливо проявляются в Курской ГЗО и особенно в Курско-Бесединском (рис. 2) и других подобных блоках с известными типами породных ассоциаций (брянской, росошанской) в составе обоянского СВК [1; 11; 13; 14]. Специфика нуклеарного этапа развития в таких геоблоках отчетливо прослеживается в исключительно высокой степени насыщенности и сложном мозаичном характере распределения ультрамафит-мафитовых вулcano-плутонических породных групп, отождествляемых с «нижними» раннеархейскими зеленокаменными поясами [3; 5; 7; 10; 12; 14–16].

Относительно слабая дифференцированность раннеархейской земной коры, преобладающий ареальный характер изотермических и изобарических условий проявления регионального метаморфизма и ультраметаморфизма, сравнительно небольшое разнообразие формационных типов магматогенных пород, являющихся в основном вулcano-интрузивными дифференциатами примитивной коматиит-базальтовой магмы, преобладающее развитие в составе СВК плагиогранито-гнейсовых образований, которые совместно с вулcano-интрузивными магматитами принадлежат по существу к единому геодинамическому континиуму, определяют в совокупности малую металлогеническую продуктивность (см. рис. 1) СВК нуклеарного этапа [3; 5; 14; 17; 18].

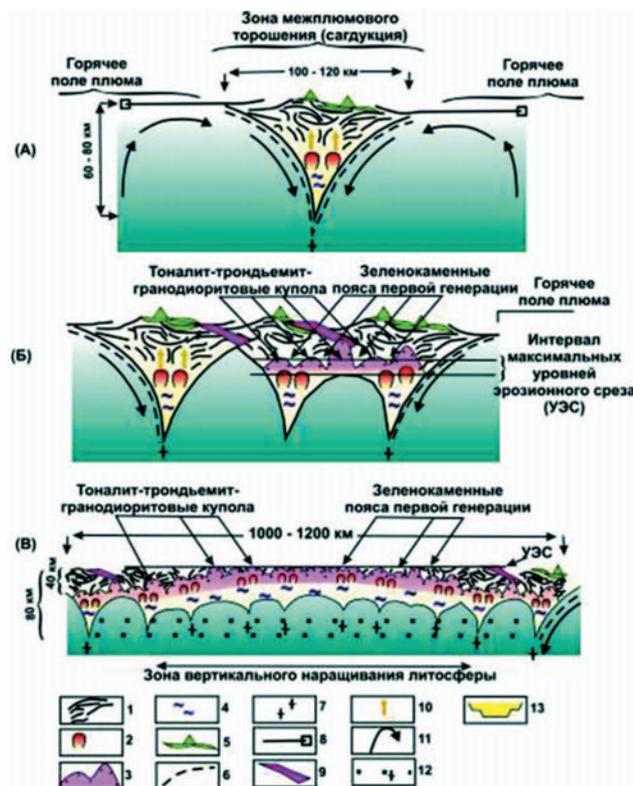


Рис. 1. Геодинамика и минерогения раннеархейского этапа. Модель возникновения и развития континентальной протокоры и эволюции гранит-зеленокаменных областей: а – стадия формирования межплюмовых протодоменов; б – стадия слияния протодоменов и формирования континентальных доменов; в – стадия изостатического выравнивания протоконтинентов. 1 – коматиит-базитовая кора и ее деформированные фрагменты в зонах торожения; 2, 3 – тоналит-трондьемит-грано-диоритовые купола: 2 – ранней генерации (низкокальциевые эндербиты), 3 – поздних генераций (калийевые эндербиты); 4 – «базитовый» континентальный слой реститового происхождения; 5 – известково-щелочные магматические серии зеленокаменных поясов первого типа; 6 – фрагменты базитовой коры, затащенные на глубину нисходящими ветвями плюмов; 7 – эклогитизированные фрагменты базитовой протокоры; 8 – площадные спрединг-зоны надплюмового пространства; 9 – зоны протосутур; 10 – пути подъема известково-щелочных магматических диапиров; 11 – направление адвективного перемещения вещества в плюмах; 12 – литосферная мантия; 13 – бимодальные магматиты зеленокаменных поясов второго типа

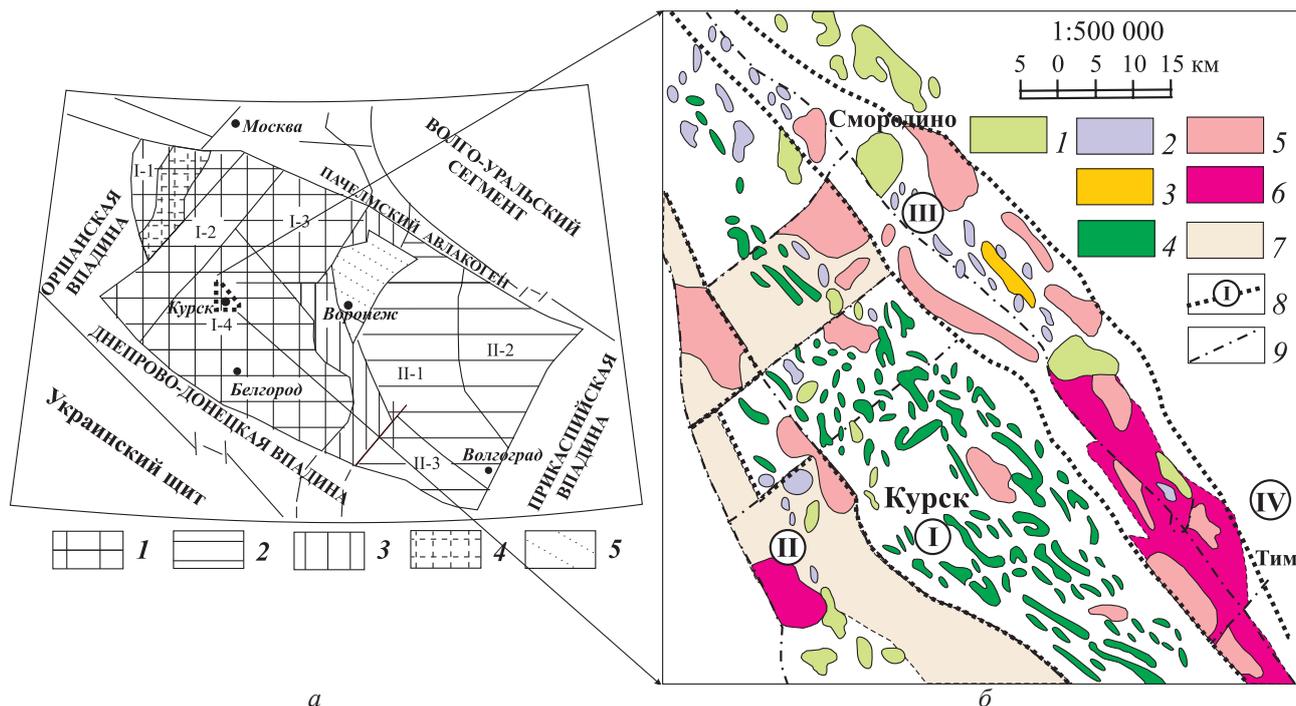


Рис. 2. Положение в структуре ВКМ (а) раннеархейского Курско-Бесединского блока (б) и особенности размещения в его пределах высокожелезистой ультрамафит-мафитовой породной ассоциации: а) 1 – мегаблок КМА (макроблоки: I-1 – Красногорско-Рославльский, I-2 – Брянский, I-3 – Ливенско-Ефремовский, I-4 – Курско-Белгородский); 2 – Хоперский мегаблок (макроблоки: II-1 – Калач-Эртильский, II-2 – Камышинский, II-3 – Варваринский); 3 – Лосевская шовная зона; 4 – Волыньско-Двинский вулканоплутонический пояс; 5 – Ольховско-Шукавская грабенсинклиналиальная структура;

б) на врезке (по [10]): 1 – габбродолериты трапповой формации (смородинский комплекс); 2 – ультрамафит-мафитовые тела дунит-перидотит-габброноритовой формации (золотухинский комплекс); 3 – габбро-диорит-гранодиоритовые интрузивы стойло-николаевского комплекса; 4 – перидотит-пироксенит-габброноритовые тела бесединского комплекса в ассоциации с высокожелезистыми коматиит-базальтовыми вулканитами, метаморфизованными в условиях гранулитовой фации [11; 12]; 5 – пироксеновые и плагиоклаз-микроклиновые граниты; 6 – микроклин-плагиоклазовые и биотит-микроклиновые граниты; 7 – плагиограниты; 8 – границы раннеархейского Курско-Бесединского блока (I) и раннекарельских зон – Михайловской (II), Зинovieвско-Мануковской (III) и Тим-Ястребовской (IV); 9 – тектонические нарушения

Геодинамика и минерагения позднеархейского этапа становления литосферы

Возрастание степени дифференцированности и латеральной неоднородности в процессе энсиалического рифтогенеза и последующей коллизии и сопряженных с ним термодинамических обстановок глубинного петрогенезиса обусловили появление в позднем архее значительного разнообразия СВК, усложнение состава и структуры слагающих их формационных рядов магматических и метаморфических породных ассоциаций, существенное расширение спектра рудных формаций (рис. 3) и их продуктивности [2; 3; 5; 14; 18].

СВК позднего архея включают типичные для раннедокембрийских («верхних») зеленокаменных поясов [3; 5; 7; 10; 12; 13; 15; 16; 19] вулканогенно-осадочные и метаморфизованные в условиях зеленосланцевой и амфиболитовой фации

различной сериальной принадлежности вулканические и вулканоплутонические ассоциации – коматиит-базальтовую, риолит-дацит-базальтовую, риолитовую формации в объеме михайловской серии и комагматичные им сергиевский (железногорский [3; 12]) дунит-перидотитовый, тарасовский габбро-диабазовый дайковый, салтыковский мигматит-плагиогранитный (3013 ± 80 млн лет) и атамановский (микроклиновых гранитов и мигматитов) комплексы. Состав СВК, наиболее полно сохранившихся в пределах КМА, отражает мощный энергетический импульс и возникновение новой системы мантийной конвекции вследствие деструкции сравнительно маломощной раннеархейской протокры и заложение в условиях

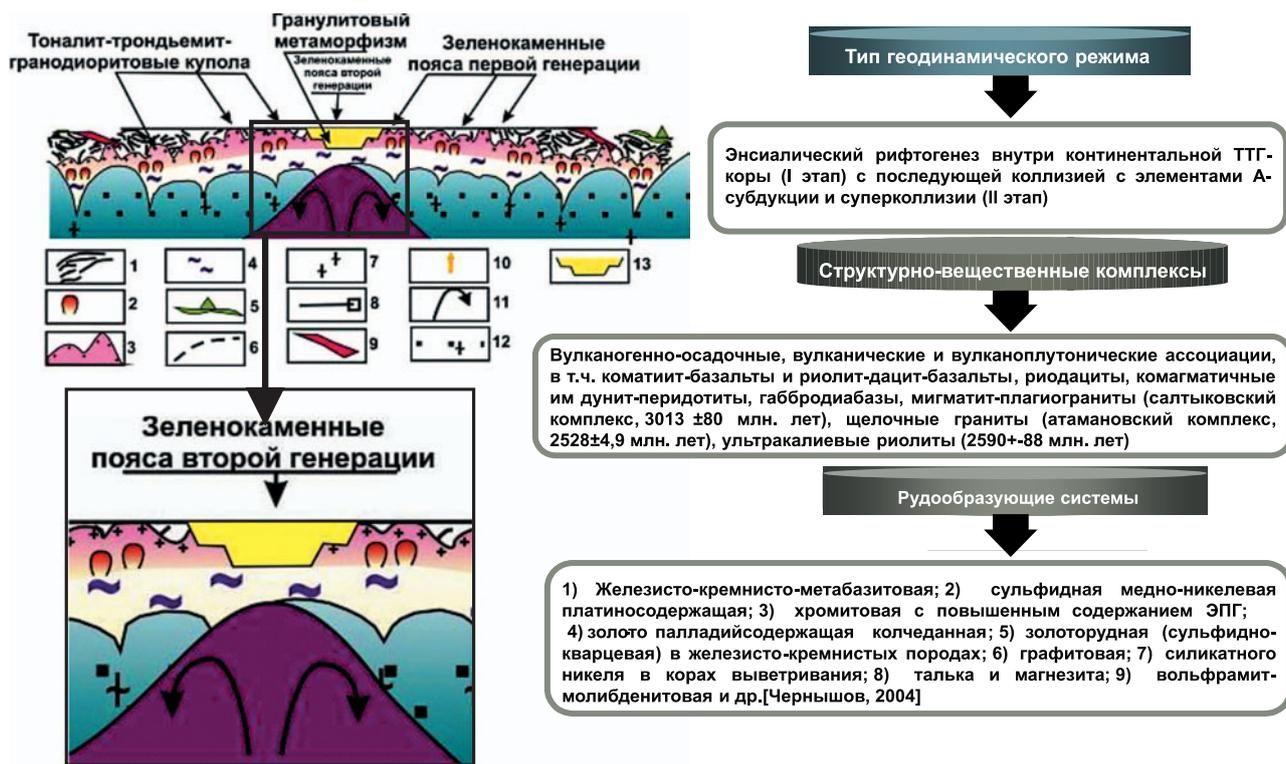


Рис. 3. Геодинамика и минерагения позднеархейского этапа: 1 – коматиит-базитовая кора и ее деформированные фрагменты в зонах торожения; 2, 3 – тоналит-грандьемит-гранодиоритовые купола: 2 – ранней генерации (низкокальциевые эндрбиты), 3 – поздних генераций (кальциевые эндрбиты); 4 – «базитовый» континентальный слой реститового происхождения; 5 – известково-щелочные магматические серии зеленокаменных поясов первого типа; 6 – фрагменты базитовой коры, затащенные на глубину нисходящими ветвями плюмов; 7 – эклогитизированные фрагменты базитовой протокры; 8 – площадные спрединговые зоны надплюмового пространства; 9 – зоны протосутур; 10 – пути подъема известково-щелочных магматических диапиров; 11 – направление адвективного перемещения вещества в плюмах; 12 – литосферная мантия; 13 – бимодальные магматиты зеленокаменных поясов второго типа

спрединговых процессов ряда достаточно протяженных (около 500 км) и сложных (извилистых и прерывистых) по морфологии рифтов – Крупецко-Криворожского и Белгородско-Михайловского с проявлениями типичного бимодального вулканизма (коматиит-базальтовая и риолит-дацит-базальтовая формации) и Орловско-Тимского, в котором формировались также бимодальная (риолит-дацит-базальтоидная) формация, но с ограниченным развитием высокомагнезиальных коматиитов [5; 10; 16; 17; 19].

В примыкающих к рифтам блоках в связи с нарастанием энергии и увеличением интенсивности теплового потока за счет окисления восстановленных мантийных флюидных систем и их экранирования коровым слоем происходило формирование внутрикоровых очагов плавления с образованием мигматит-плаггиогранитной ассоциации (салтыковский комплекс). Последние обычно трассируют борта рифтогенных зон («верхних» зелено-

каменных поясов) и рассматриваются в качестве продуктов ремобилизации фундамента в процессе рифтогенеза [2; 5; 13; 19]. С высоким тепловым потоком связано, вероятно, формирование на протоколлизионном этапе субщелочных гранитоидов атамановского комплекса (2528 ± 4,9 млн лет), а также проявление (на последующем постколлизионном этапе) по наиболее глубинным проницаемым зонам калиевого массопереноса (формация ультракальциевых риолитов; 2590 ± 88 млн лет) в пределах Орловско-Тимского рифта, где высококальциевые риолитовые вулканы перекрывают метаморфизованную кору выветривания, образовавшуюся за счет пород михайловской серии.

С различными по составу СВК обнаруживаются устойчивую пространственно-генетическую связь ряд рудных формаций: 1) железисто-кремнисто-метабазитовая (джеспилит-толеитовая) и гидротермально-метасоматическая магнетитовая [3; 14–17], ассоциированные с основными и сред-

ними метавулканитами и вулканогенно-терригенными отложениями михайловской серии, метаморфизованными в условиях амфиболитовой, местами эпидот-амфиболитовой фаций с локально наложенным поздним метасоматическим перераспределением рудного вещества; 2) сульфидная медно-никелевая (син- и эпигенетического типов), ассоциированная с коматиитами михайловской серии и комагматичными им интрузивными ультрамафитами сергиевского (железногорского) комплекса [5; 10; 12; 17; 19–22], представляющими собой по существу лишь отдельные члены единой сульфидно-никелевой рудномагматической системы; 3) золото- и палладийсодержащая колчеданная (пирит-пирротиновая и пиритовая ± халькопирит) среди вулканитов михайловской серии; 4) золоторудная, преимущественно сульфидно-кварцевая (арсенопирит-пиритовый минеральный тип [3; 5; 12; 16; 18]) в средних и кислых натриевых вулканитах и железисто-кремнистых породах; 5) графитовых гнейсов; 6) силикатного никеля и др.

Геодинамика и минерагения раннепротерозойского этапа

Геодинамика и минерагения в общей модели эволюции литосферы в раннем протерозое во многом определялись разноранговыми по своей тектонической природе структурами КМА, Хоперского мегаблока и Лосевской шовной зоны.

В формировании литосферы структуры КМА в раннем протерозое отчетливо выделяется четыре этапа – протоплатформенный, континентальный рифтогенез с рядом стадий, коллизионный и заключительный раннеплатформенный (рис. 4), каждый из которых отличается составом СВК и ассоциирующихся с ними свыше 20 разнотипных рудообразующих систем. Среди них особый интерес представляет класс полигенных по своей природе месторождений и рудопроявлений, представленных группой новых нетрадиционных источников золото-платинометалльного оруденения, ассоциирующего с железистыми кварцитами месторождений-гигантов КМА [3; 22–27] и разновозрастными черносланцевыми толщами

Структура КМА

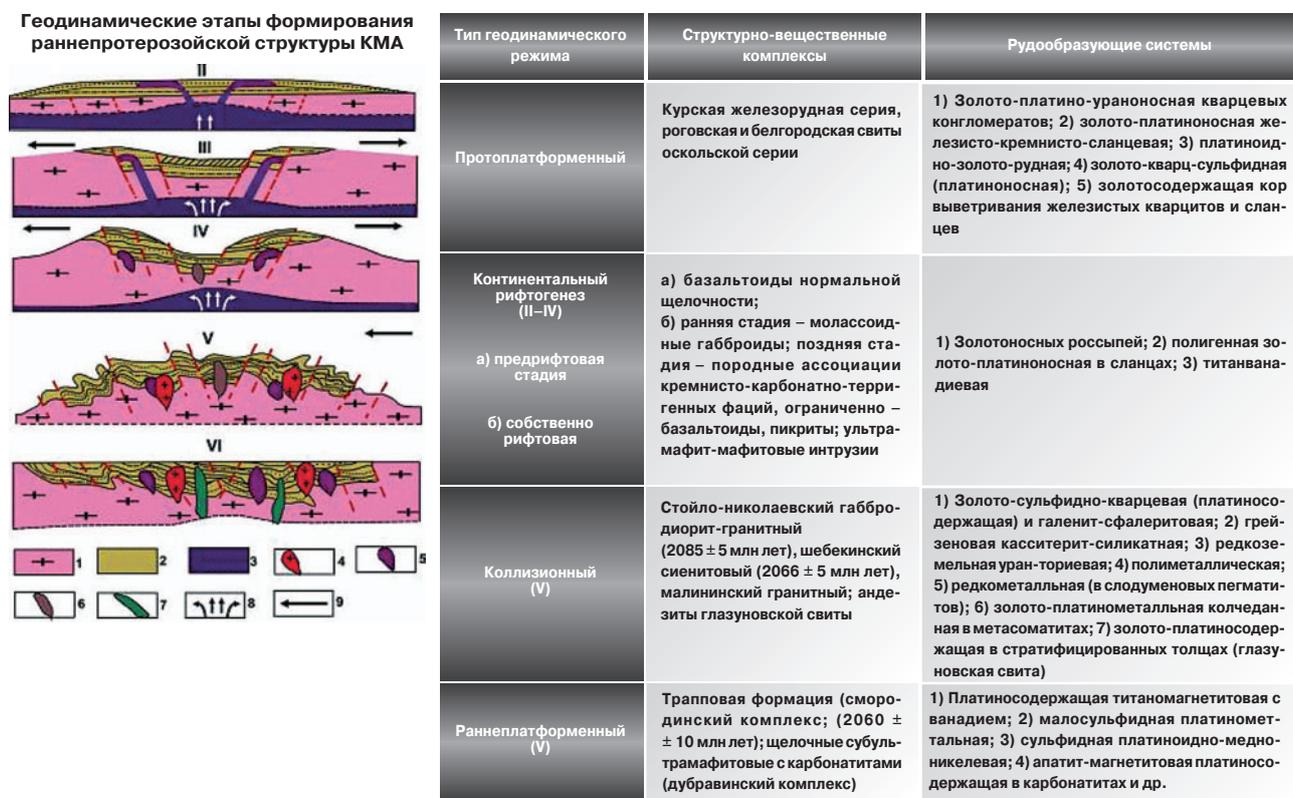


Рис. 4. Геодинамика и минерагения раннепротерозойского этапа [9]: 1 – протоко́ра серогнейсового состава; 2 – ассоциация пород стадии рифтогенеза; 3 – подкорový слой верхней мантии; 4 – коллизионные гранитоиды; 5 – базальты повышенной щелочности; 6 – базальтоиды нормальной щелочности; 7 – траппы; 8 – векторы теплопереноса; 9 – векторы тектонического напряжения

(комплексные платиноидно-золоторудные) и их метасоматитами.

К характерным структурно-вещественным признакам, определяющим условия локализации платинометалльных месторождений и проявлений этих типов [3–5; 18; 27; 28], относятся: 1) приуроченность стратифицированных рудовмещающих комплексов и их метасоматитов к рифтогенным поясам и сложным дискордантным складчато-глыбовым структурам (эпикратонные прогибы, цепочки надразломных впадин, мелкие веерообразные изолированные складки), которые в пределах докембрийских щитов нередко пространственно совпадают с архейскими зеленокаменными поясами; 2) полицикличность и многостадийность развития таких структур с резким преобладанием терригенно-осадочных, в том числе мощных, железорудных отложений (курская серия) на ранних стадиях и с возрастающей ролью вулканогенных и вулканогенно-осадочных углеродистых образований (оскольская серия) на поздних стадиях их формирования; 3) приуроченность повышенных концентраций ЭПГ и Au к зонам фациальных переходов и несогласий; 4) широкое развитие в подобных структурах вулканоплутонических ассоциаций с неоднократным повторением в разрезе пикрит-толеит-базальтовых и базальт-риодацитовых вулканитов и их интрузивных и дайковых комагматов – продуктов мантийных и мантийно-коровых расплавов; 5) высокая степень интенсивности проявления складчатости и взбросо-надвиговых нарушений, зон межформационных несогласий и объемного катаклаза, выступающих в качестве контролирующих элементов рудообразующих систем; 6) преимущественно низкоградиентный тип метаморфизма в условиях зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фаций и широкое проявление разнотипных флюидно-метасоматических, постмагматических процессов, способствовавших формированию различных по минеральным парагенезисам метасоматитов.

В этом ряду разномасштабных по ресурсам проявлений золото- и золото-платинометалльного оруденения в настоящее время особое значение представляют высокие концентрации Au и ЭПГ в сверхкрупных и крупных, в том числе обрабатываемых (Михайловское, Лебединское, Стойленское), месторождениях, в пределах которых выделены шесть генетически различных (включая техногенные) типов благороднометалльного оруденения [3; 18; 27; 29]. Каждый из этих типов характеризуется специфическими условиями ло-

кализации, морфологией и масштабами рудных залежей, особенностями минерализации, содержаниями благородных металлов и практической значимостью: 1) осадочно-метаморфогенный расчлененный (обширные площади развития железистых кварцитов в пределах месторождений) с низкими содержаниями Au (0,02–0,12 г/т) и ЭПГ (до 0,05 г/т); 2) один из наиболее крупных по ресурсам ЭПГ и Au (первые тысячи тонн) стратиформный метаморфогенно-метасоматический сульфидизированных контактовых зон (мощностью 40–90 м и протяженностью до 70 км) железистых кварцитов с подстилающими сланцами (Au = 0,54–6,18 г/т, Pt = 0,12–0,30 г/т, Pd = 0,58–0,77 г/т) и внутрирудных углеродсодержащих толщ (Au = 2,6–36,6 г/т, Ag = 91–540 г/т, Pt = 0,14–0,28 г/т, Pd до 0,57 г/т); 3) гидротермально-метасоматический (линзы и жилы метасоматитов протяженностью первые сотни метров при мощности до 3–5 м; Au = 0,6–6,2 г/т иногда до 35,8 г/т, ЭПГ = 0,3–0,5 г/т); 4) гипергенно-метасоматический в зонах развития линейных кор выветривания (богатые маритовые руды; Au = 0,64–4,30 г/т, иногда до 41,7 г/т, Pd до 1,5 г/т); 5) осадочный (базальные горизонты зон несогласий: докембрий, фанерозой и фосфоритовые плиты девона; Au = 0,53 г/т, Pt = 0,15 г/т, Pd = 1,70 г/т, PЗЭ = 556,3 г/т, U = 12,2–23,6 г/т); 6) техногенный (промпродукты-хвостоотвалы действующих ГОКов с высокими концентрациями ЭПГ до 1,6 г/т, Au = 25,0–43,5 г/т в песках гидроциклона и Pd = 0,4 г/т, Pt = 0,2 г/т и Au = 15,0 г/т в немагнитной фракции). Одним из наиболее крупных по ресурсам ЭПГ и Au является стратиформный тип, наиболее полно проявившийся в пределах Михайловского железорудного узла [3; 4; 27].

Золото-платинометалльное оруденение железорудных месторождений КМА характеризуется сложным полиминеральным (более 60 минералов) и многокомпонентным составом [3; 4; 26; 27; 30]. Определяющими особенностями благороднометалльного оруденения являются следующие: а) многообразие форм концентрирования и широкое развитие (около 30) собственных минеральных фаз ЭПГ, Au и сопутствующих им элементов (Ag, Te, Bi) в виде самородных металлов (Au, Os, Ru, Ir, Bi), металлических твердых растворов и интерметаллических соединений (рутениридо-смин, платрутеносмиридий, иридрутеносмид, электрум, кюстеллит, сплавы Pd-Ag-Cu, Bi-Te-Pd, Au-Cu-Ag, минералы ряда Ru, Ir, Os, Pt, Pd), сульфидов (прассоит, маккинстриит), сульфоарсенидов, теллуридов, висмутидов (мончеит, сперри-

лит, петцит, гессит, креннерит, цуманит, сильванит, вольтинскит, мутманнит, мальдонит и др.); б) ведущая (85–90 об.%) роль в рудном парагенезисе сульфидов и их аналогов при резком преобладании среди них обогащенного Au и отчасти ЭПГ пирита и пирротина.

Высокие концентрации благородных металлов сосредоточены в пирите (Pd = 0,01–0,10 %, Pt = 0,02–0,38 %; Au = 0,02–0,62 %), пирротине (Pd = 0,01–0,12 % Pt = 0,01–0,44 %; Au = 0,09–0,51 %), халькопирите (Pd = 0,01–0,11 % Pt = 0,07–0,39 %; Au = 0,02–0,27 %), галените (Pd до 0,43 %, Pt = 0,31–0,37 %; Au = 0,06–0,22 %; Ag = 0,06–0,42 %), теллуриде висмута (Pt = 1,28 %; Au = 0,27 %), а также в борните (Pd до 0,14 %), теннантите (Pd = 0,08 %, арсенопирите (Pt = 0,18 %) и кобальтине (Pd до 2,3 %).

Наиболее высокие концентрации благородных металлов в структуре КМА связаны с высокоуглеродистыми терригенно-осадочными и вулканогенно-осадочными породными ассоциациями и метасоматитами оскольской серии (**тимский и кшенский типы** [4; 14; 24; 27; 29–31]). Золото-платинометалльное оруденение в раннепротерозойских стратифицированных черносланцевых структурно-вещественных комплексах, наиболее полно проявившееся в крупной (протяженность 130 км при ширине 30–50 км) Тим-Ястребовской структуре КМА, характеризуется: а) локализацией в нижней углеродистой терригенно-осадочной части разреза тимской свиты оскольской серии (тимский тип); б) многоуровневым (5–7 горизонтов мощностью от первых метров до 25–30 м) размещением, высокими концентрациями Au (до 2,2–3,5 г/т), ЭПГ (до 2 г/т), РЗЭ; в) отчетливой корреляционной связью ЭПГ и Au с С, S и рядом петрогенных и малых (Ni, Cu, Co, Cr, Zn, Ti, V, P и др.) элементов, преимущественно базальтоидным типом распределения ЭПГ (Pd(?) > Pt > Rh > Ru > Ir(?) > Os(?)); г) высокой степенью концентрирования благородных металлов в наиболее тонкозернистой (< 0,06 мм) сульфидно-углеродистой фракции, в которой их концентрации в 5–16 раз превышают содержания в исходных (рудовмещающих) породах. К этой структуре приурочен кшенский тип золото-платиносодержащего оруденения, сосредоточенный в протяженной (более 100 км при ширине 2–8 км) Воскресеновской рудоносной зоне рассланцованных, катаклазированных, миланитизированных и различных по степени интенсивности метаморфически и метасоматически преобразованных основных и ультраосновных вулканитов

и углеродсодержащих вулканогенно-осадочных пород верхней части разреза тимской свиты. Характерными особенностями кшенского типа оруденения являются следующие [3; 4; 18; 30]: а) отчетливая пространственно-временная связь золото-платиносодержащих руд с зонами повышенной сульфидной минерализации, определяющая принадлежность оруденения к сульфидно-вкрапленному типу с ведущей ролью пирит-пирротинного и арсенопирит-пиритового минеральных парагенезисов при крайне ограниченном проявлении жильного сульфидно(пирит)-кварцевого типа; б) резкое преобладание Au (0,23–6,5 г/т, иногда до 20,1 г/т) над Pt (до 0,68 г/т, в редких случаях до 18 г/т) и Pd (до 0,1 г/т, иногда до 0,4 г/т); в) значительная аналогия по геолого-структурному положению, характеру рудовмещающих пород, условиям локализации бескварцевого сульфидно-вкрапленного типа оруденения с рядом известных крупных месторождений (Калгури в Австралии, Гейта в Танзании, Вендерер в Южной Родезии [14]).

Золото-платинометалльное оруденение черносланцевого типа характеризуется сложным многокомпонентным, полиминеральным составом (свыше 60 рудных минералов, в том числе более 20 собственных минеральных фаз ЭПГ и Au) и многообразием форм распределения благородных металлов в виде [3; 4; 30]: а) самородных элементов (золото, палладий, платина, осмий, серебро); б) металлических твердых растворов и интерметаллических соединений – палладий платиносодержащий, платина железосодержащая, золото–платина–палладий, осмистый иридий, рутениридосмин, платиридосмин, платосмиридий, золото ртуть–теллур–серебросодержащее, амальгама золота–серебра, аркверит, станнид палладия (неназванный минерал), платина–палладий–золото–серебро–олово; в) сульфоарсенидов, теллуридов антимонидов, селенидов и сульфосолей ЭПГ, Au и Ag – сперрилит, ирарсит, гессит, селенид палладия и платины (неназванный минерал), тестибиопалладинит, антимонид палладия и золота (неназванный минерал) и др.; г) примесей в основных платино-палладий-золотосодержащих рудообразующих сульфидах (мас.%) – пирротине (Au до 0,27, Pt до 0,27 и Pd до 0,13), пирите (Pt до 0,18, Au до 0,17 и Pd до 0,03), халькопирите (Pt до 0,60, Au до 0,16 и Pd до 0,08), сфалерите (Pd до 0,06) и других спорадически развитых сульфидах, сульфоарсенидах, сульфоантимонидах и теллуридах – арсенопирите (Au до 0,32, Pt до 0,18), пентландите (Au = 0,13, Pt до 0,07, Pd до 0,04),

галените (Pt до 0,15, Au до 0,10), молибдените (Pd до 0,14, Au до 0,07), теллурувисмутите (Pt до 0,95, Au до 0,35, Pd до 0,08), ульманите (Pt до 0,17, Au до 0,11, Pd до 0,08), алабандине (Pd до 0,13, Pt до 0,10, Au до 0,10), герсдорфите (Pt до 0,22, Au до 0,31, Pd до 0,02), кобальтине (Pd до 0,03), которые в совокупности с нахождением благородных металлов в углеродистом веществе (в том числе и в фуллеренах) определяют необходимость разработки принципиально новых экологически безопасных технологий извлечения всего комплекса металлов.

В эволюции литосферы ВКМ особая роль принадлежит Лосевской шовной зоне (ЛШЗ), которая сформировалась в результате коллизии Сарматии и Волго-Уралии. Ее структура и вещественное наполнение свидетельствуют о проявлении различных геодинамических обстановок (рис. 5, б), отвечающих деструкции Сарматии (лосевская серия, стрелицкий тип и рождественский комплекс габброидов), субдукции под ее восточную в современных координатах границу (лосевская серия, подгоренский тип в ассоциации с усманским плагиогранитным комплексом, а также донская серия в ассоциации с павловским комплексом субщелочных гранитов) и коллизии Сарматии и Волго-Уралии (бобровский, лискинский гранитоидные комплексы, воронежская свита в ассоциации с Байгоровской вулканоплутонической структурой – БВПС и ольховским монзонит-габбронорит-гранитным комплексом).

В секторе Волго-Уралии, участвующей в коллизии, бассейн седиментации (воронцовская серия) формировался на ее пассивной окраине в возрастном интервале 2220–2100 млн лет с проявлением внутриплитного периконтинентального магматизма на уровне 2080–2060 млн лет (мамонский и еланский мафит-ультрамафитовые комплексы), в связи с автономно развивающимся суперплюмом в условиях растяжения по механизму рассеянного спрединга, сопровождавшего процесс субдукции Хоперского и Курского геоблоков. На коллизионном этапе достаточно четко проявлены кульминационная стадия коллизии (~2050 млн лет), которой отвечают коллизионные гранитоиды бобровского комплекса, и ее завершающая стадия (~2040 млн лет) в объеме воронежской свиты и БВПС.

Многообразие геодинамических обстановок (реактивизация позднеархейских рифтогенных структур, сложные процессы субдукции, сопровождаемые рассеянным спредингом, коллизии и завершающего раннеплатформенного этапа с ак-

тивным внутриплитным режимом) длительного формирования коры континентального типа и ее структурно-вещественной эволюции определили широкий спектр рудных формаций и высокую степень их продуктивности (рис. 5).

Среди них наиболее важными в промышленном отношении являются два типа сульфидного платиноидно-медно-никелевого оруденения: а) **мамонский** (Нижнемамонское, Подколдновское, Юбилейное месторождения и свыше 30 разномасштабных проявлений), ассоциирующий с дунит-перидотит-пироксенит-габброноритовой формацией (возраст $2100\text{--}2080 \pm 14$ млн лет); б) **еланский** (Еланское, Елкинское месторождения и около 20 рудопоявлений), генетически связанный с субвулканической ортопироксенит-норит-диоритовой ($2065\text{--}2050 \pm 14$ млн лет) формациями рассеянного спрединга и реактивизированных структур Хоперского мегаблока ВКМ [3; 5; 10; 18; 20–23].

Ведущая роль в интрузивных ультрамафитовых дифференциатах мамонской группы месторождений принадлежит вкрапленным рудам с содержанием Ni до 0,5 %, Cu = 0,71 %, Co = 0,04 %, ЭПГ = 0,54 г/т, при ограниченном развитии богатых густовкрапленных, массивных и брекчиевидных (Ni = 1,67–5,93 %, Cu до 4,01 %, Co = 0,08–0,19 %, ЭПГ до 1,5 г/т). В составе РМС мамонского типа богатые (Ni = 1,25–14,50 %, Cu = 0,44–10,0 %, Co = 0,13–2,2 %, Au до 0,9 г/т, ЭПГ = 0,6–2,7 г/т) платиноидно-медно-никелевые и никель-кобальтовые руды ассоциируют с широко развитым (до 10–12 % объема формации) разновозрастным дайковым комплексом. В целом, руды мамонского типа характеризуются невысокими содержаниями ЭПГ, среди которых на долю Pd, Pt и отчасти Rh и Ru приходится до 90–95 % от всей суммы платиноидов. Установлены следующие характеристики: а) повышенные концентрации ЭПГ в богатых по содержанию Ni, Cu, Co рудах; б) заметное преобладание Pt над Pd ($Pd/Pt < 0,9$) в ликвационных рудах и более чем двух-восьмикратное возрастание Pd (до 2,5 г/т) относительно Pt (до 0,30 г/т) в инъекционных; в) значительное увеличение концентраций ЭПГ в халькопирит-пентландит-пирротиновых рудах, содержащих обогащенные Pd (0,20–0,25 мас.%) и Pt (0,12–0,15 мас.%) минералы более позднего, пневматолит-гидротермального по своей природе арсенид-сульфоарсенидного парагенезиса.

Специфические условия формирования пород и руд из гибридного кремнисто-магнезиального (бонинитоподобного) сульфидоносного расплава, возникшего в результате контаминации исходных

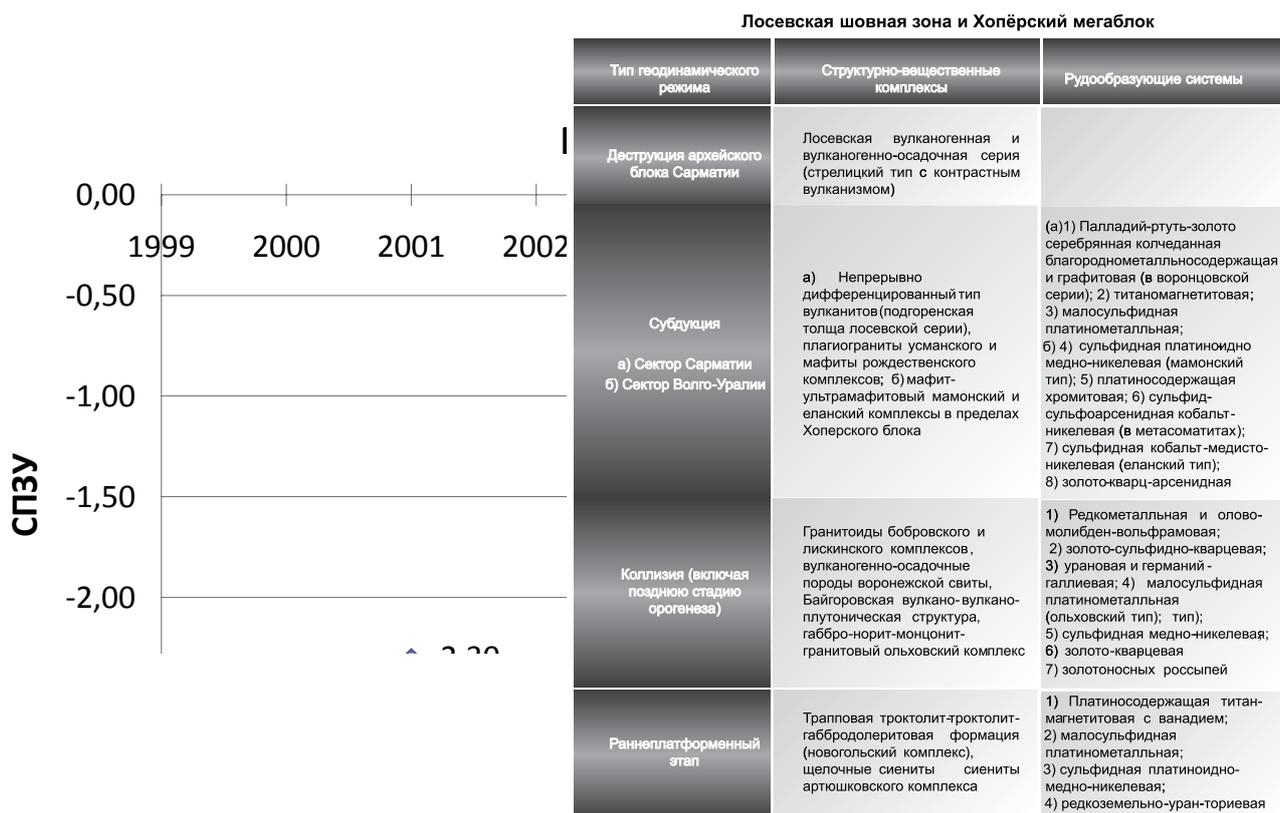


Рис. 5. Геодинамика и минерагения раннепротерозойского этапа: 1 – континентальная кора; 2 – стрелицкая толща лосевской серии; 3 – океаническая кора; 4 – подгоренская толща лосевской серии; 5 – усманский комплекс; 6 – рождественский комплекс; 7 – павловский комплекс; 8 – воронежская свита; 9 – Байгоровская вулканоплутоническая структура; 10 – шукавский комплекс; 11 – ольховский комплекс; 12 – магматический очаг; 13 – мантийный субстрат; 14 – восходящий поток; 15 – воронцовская серия; 16 – мамонский комплекс; 17 – надвиг

мантийных (коматиитовых) магм коровым материалом, определяют уникальность структурно-вещественных, петролого-геохимических и рудно-формационных граничных признаков крупного по запасам и ресурсам еланского типа платиноидно-медно-кобальт-никелевых месторождений [3; 25; 32]: а) присущий коматиит-ассоциированным сульфидно-никеленосным РМС маломедистый высоконикелистый (с повышенным содержанием кобальта) состав руд с возрастающей концентрацией ЭПГ по мере перехода от вкрапленных ($Ni = 0,87-1,45 \%$ $Cu = 0,11 \%$ $Co = 0,04-0,42 \%$ ЭПГ = 0,30 г/т) к более медистым вкрапленно-прожилковым ($Ni = 6,66 \%$, $Cu = 0,23 \%$, $Pt = 0,68$ г/т, $Pd = 1,3$ г/т) и ограниченно развитым брекчиевидным и массивным ($Ni = 8,01-14,35 \%$, $Cu = 0,28-1,17 \%$, $Co = 0,25-0,32 \%$, ЭПГ от 0,510 до 1,43 г/т, в отдельных случаях ЭПГ до 12,5 г/т, Au до 2,5 г/т); б) ведущая роль в сульфидном парагенезисе палладийсодержащего (Pd до 300 г/т) пентландита (до 30–50 %) и палладий-родийсодержащего пирротина (Pd до 100 г/т, Rh до 200 г/т) и крайне

низкие содержания халькопирита (2,5 %, иногда до 10–15 %), постоянное присутствие высокохромистых цинк- и рутенийсодержащих хромшпинелидов, самородного золота, а также в разной мере обогащенных Pt (от 100 до 1100 г/т), Pd (200–3100 г/т), Rh (100–1900 г/т) и Au (100–2000 г/т) сульфоарсенидов при максимальных концентрациях ЭПГ (Pt, Pd, Rh, Ir до 19,0 кг/т) и Au (до 4,5 кг/т) в палладий-иридий-платиновой разновидности брейтгауптита; в) высокий уровень извлечения ЭПГ (64,3 %, в том числе Pd до 94,3 %) при содержании в концентрате Pt и Pd = 2,13 г/т, Au = 1,58 г/т, Ag = 24,9 г/т.

Исключительно широкое развитие в докембрийском фундаменте ВКМ дифференцированных плутонов ультрамафит-мафитового и мафитового состава с горизонтами тонкоритмичного чередования контрастных по составу пород с малосульфидной платинометалльной минерализацией определяет вероятность открытия в регионе крупных по запасам благородных металлов месторождений стиллуотерского и верхнеталнахского типов [3; 29].

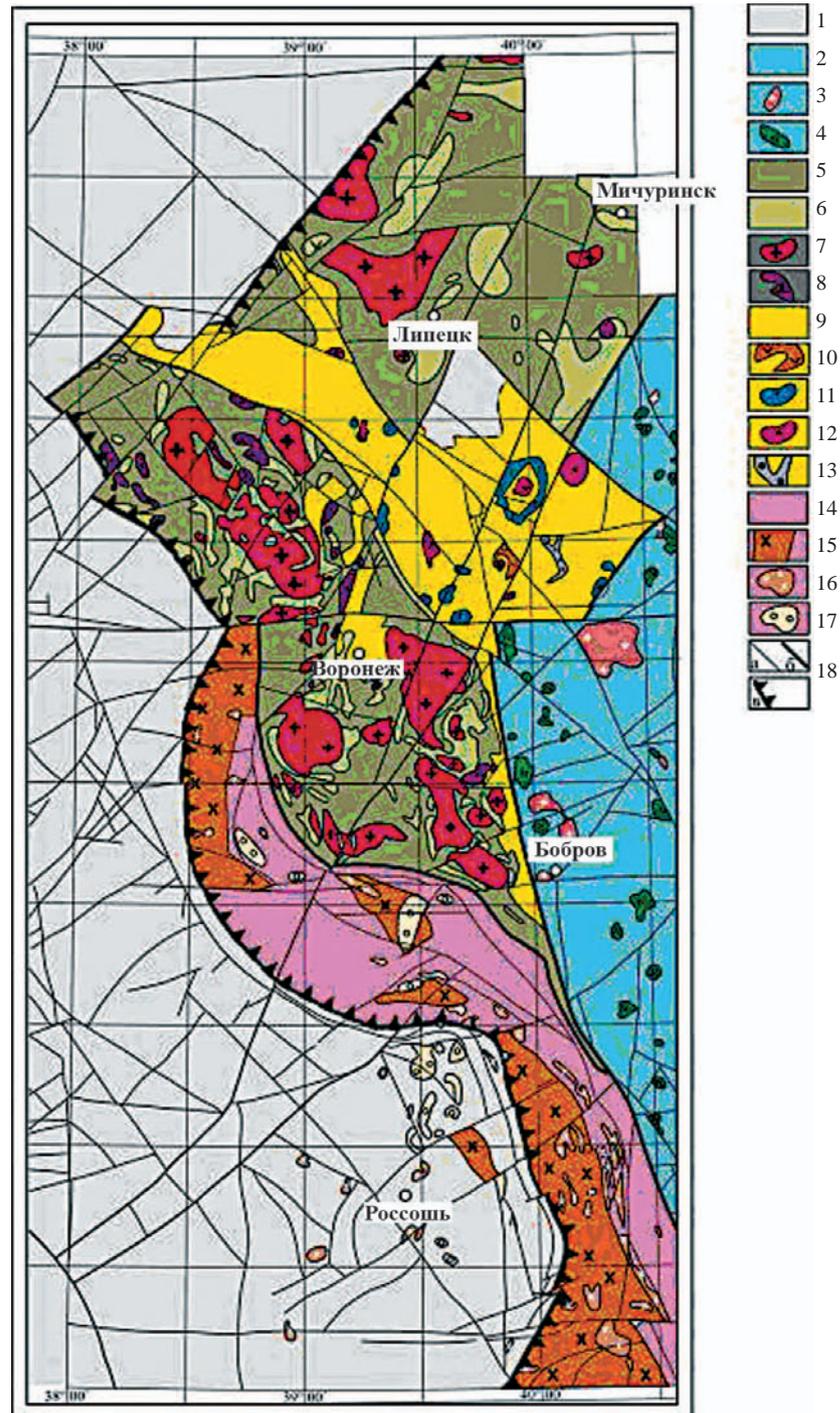


Рис. 6. Схема геологического строения Лосевской шовной зоны (по [2]): 1 – структурно-вещественные комплексы мегаблока КМА; 2–4 – структурно-вещественные комплексы Хоперского мегаблока: 2 – воронцовская серия; 3 – бобровский гранитовый комплекс; 4 – мамонский перидотит-габброноритовый и еланский норит-перидотитовый комплексы; 5–17 – структурно-вещественные комплексы лосевской шовной зоны: 5 – лосевская серия, стрелицкий тип; 6 – лосевская серия, подгоренский тип; 7 – усманский плагиогранитный комплекс; 8 – рождественский габбровый комплекс; 9 – воронежская свита; 10 – Байгоровская вулканоплутоническая структура; 11, 12 – ольховский монзонит-габбронорит-гранитный комплекс (1, 2 фазы); 13 – шукавский верлит-габбровый комплекс; 14 – обоянский комплекс (донской тип); 15, 16 – павловский мигматит-гранит-граносиенитовый комплекс (1, 2 фазы); 17 – лискинский гранитный комплекс; 18 – разрывные нарушения (а – постколлизийные; б – синколлизийные; в – позднеколлизийные (ретрошарьяж))

Таким образом, смена геодинамических и эндогенных режимов в процессе длительного (AR_1 - PR_1^2) формирования докембрийской континентальной коры ВКМ сопровождалось: 1) изменением типов СВК, составов и формационной принадлежности входящих в них различных по составу магматических и метаморфических образований; 2) возрастающим разнообразием магматических формаций и серий при снижении в составе СВК объема ультрамафитовых и увеличении мафитовых породных ассоциаций и роли мантийно-корового взаимодействия и ассимиляционных процессов (с появлением специфических кремнистых высокомагнезиальных серий) при формировании исходных магматических расплавов, внутрикамерной дифференциации и флюидно-магматического расслоения, сопровождавшихся образованием полиэлементных рудномагматических систем; 3) сменой мигматит-гранитных (с унаследованной геохимической специализацией) формаций собственными интрузивными нормальными, субщелочными и щелочными гранитоидами с более ярко выраженной металлогенической специализацией; 4) возрастанием спектра рудных формаций и степени их продуктивности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-05-00158а), Гранта Президента РФ «Ведущие научные школы» (НШ-2211.2008.5), РФФИ и Госконтракта Роснаука № 02.740.11.021

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ненахов В. М.* Геодинамические особенности раннего архея / В. М. Ненахов // Геотектоника. – 2001. – № 1. – С. 3–15.
2. *Ненахов В. М.* Минерагенические исследования территорий с двухъярусным строением на примере Воронежского кристаллического массива / В. М. Ненахов [и др.]. – М. : ГЕОКАРТ. ГЕОС, 2007. – 284 с.
3. *Чернышов Н. М.* Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2004. – 448 с.
4. *Чернышов Н. М.* Золото-платинометалльное оруденение черносланцевого типа Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2007. – 177 с.
5. *Чернышов Н. М.* Геодинамические и минерагенические ряды в общей модели эволюции докембрийской литосферы (на примере ВКМ) / Н. М. Чернышов, В. М. Ненахов // Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы : мат-лы XVI Междунар. конф., 20–24 сентября 2010 г. / под ред. Н. М. Чернышова, А. А. Моловичко. – Воронеж : Научная книга, 2010. – Т. II. – С. 314–319.
6. *Борукаев Ч. Б.* Тектоника литосферных плит в архее / Ч. Б. Борукаев // Тр. НИЦ ОИГГМ СО РАН. – Новосибирск : Наука, 1996. – Вып. 825. – 59 с.
7. *Бочаров В. Л.* Эндогенные реликты раннего докембрия Воронежского кристаллического массива / В. Л. Бочаров, Н. М. Чернышов // Эндогенные реликты формирования земной коры и рудообразования в раннем докембрии. – Л. : Наука, 1985. – С. 192–205.
8. *Хаин В. Е.* Проблемы тектоники раннего докембрия / В. Е. Хаин // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4: Геология. – 2000. – № 4. – С. 13–24.
9. *Холин В. М.* Геология, геодинамика и металлогения раннепротерозойских структур КМА : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / В. М. Холин. – Воронеж, 2001. – 24 с.
10. *Чернышов Н. М.* Металлогеническое районирование Воронежского кристаллического массива в связи с его никеленосностью / Н. М. Чернышов // Геология рудных месторождений. – 1990. – № 3. – С. 3–16.
11. *Савко К. А.* Гранулиты Воронежского кристаллического массива: петрология и эволюция метаморфизма / К. А. Савко. – Воронеж, 1999. – 130 с.
12. *Чернышов Н. М.* Гипербазиты КМА / Н. М. Чернышов, В. Л. Бочаров, С. М. Фролов. – Воронеж, 1981. – 252 с.
13. *Чернышов Н. М.* Модель геодинамического развития Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии / Н. М. Чернышов [и др.] // Геотектоника. – 1997. – № 3. – С. 21–30.
14. *Чернышов Н. М.* Основные черты геодинамики и минерагении Воронежского кристаллического массива / Н. М. Чернышов // Проблемы геодинамики и минерагении Восточно-Европейской платформы : материалы Международной конференции. – Воронеж, 2002. – С. 144–150.
15. Зеленокаменные пояса фундамента Восточно-Европейской платформы (геология и петрология вулканитов) / под ред. Б. Лобач-Жученко [и др.]. – Л., 1988. – 215 с.
16. *Ножкин А. Д.* Радиоактивные элементы в породах раннего докембрия (на примере КМА) / А. Д. Ножкин, Е. М. Крестин. – М. : Наука, 1984. – 126 с.
17. *Чернышов Н. М.* Металлогения раннего докембрия Воронежского кристаллического массива / Н. М. Чернышов // Вестн. Воронеж. ун-та. Серия: Геология. – 1996. – № 1. – С. 5–20.
18. *Чернышов Н. М.* Золото-платинометалльные рудообразующие системы и их эволюция в процессе формирования докембрийской литосферы (Центральная Россия) / Н. М. Чернышев // Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы : мат-лы XVI Междунар. конф., 20–24 сентября 2010 г. / под ред. Н. М. Чернышова, А. А. Моловичко. – Воронеж : Научная книга, 2010. – Т. II. – С. 314–319.

19. Рундквист Д. В. Металлогения рядов геодинамических обстановок раннего докембрия / Д. В. Рундквист [и др.]. – М. : ВСЕГЕИ, 1999. – 399 с.

20. Чернышов Н. М. Сульфидно-никелевые рудно-магматические системы (типизация и эволюция) / Н. М. Чернышов // Изв. АН СССР. Серия: Геология. – 1990. – № 11. – С. 94–106.

21. Чернышов Н. М. Структурно-вещественная эволюция сульфидно-никелевых рудномагматических систем докембрия / Н. М. Чернышов // Геология и геофизика. – 1991. – № 6. – С. 11–19.

22. Чернышов Н. М. Промышленно-генетические типы сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений новой никеленосной провинции России и проблема их освоения / Н. М. Чернышов // Вест. Воронеж. ун-та. Серия 2: Естеств. науки. – 1993. – Вып. 1. – С. 188–215.

23. Додин Д. А. Платинометалльные месторождения России / Д. А. Додин, Н. М. Чернышов, Б. А. Яцкевич. – СПб. : Наука, 2000. – 755 с.

24. Додин Д. А. Платина России: состояние и перспективы / Д. А. Додин [и др.] // Литосфера. – 2010. – № 1. – С. 3–36.

25. Чернышов Н. М. Еланский тип сульфидных медно-никелевых месторождений и геолого-генетическая модель их формирования (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов // Геология рудных месторождений. – 1995. – Т. 37, № 3. – С. 220–236.

26. Чернышов Н. М. Новые минеральные формы платиноидов и золота в железистых кварцитах Лебединского месторождения КМА (Центральная Россия) /

Н. М. Чернышов, С. В. Петров // Докл. РАН. – 2006. – Т. 408, № 4. – С. 586–589.

27. Чернышов Н. М. Типы и минеральный состав золото-платинометалльного оруденения железорудных месторождений-гигантов КМА (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов // Докл. РАН. – 2010. – Т. 430, № 3. – С. 395–399.

28. Чернышов Н. М. Формационно-генетическая типизация месторождений металлов платиновой группы для целей прогноза и металлогенического анализа / Н. М. Чернышов, Д. А. Додин // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36, № 1. – С. 65–70.

29. Платина России. Т. VI. Новые нетрадиционные типы платиносодержащих месторождений. Результаты и направление работ по программе «Платина России». – М. : Геоинформмарк, 2005. – 320 с.

30. Чернышов Н. М. Минералы благородных металлов в рудах черносланцевого типа Воронежского кристаллического массива (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов // Зап. РМО. – 2009. – СXXXVI. – № 1. – С. 36–51.

31. Додин Д. А. Углеродсодержащие формации – новый крупный источник платиновых металлов XXI века / Д. А. Додин [и др.]. – М. : Геоинформмарк, 2007. – 130 с.

32. Маракушев А. А. Положение платиновых металлов в системе экстермальных состояний химических элементов и формационные типы их месторождений / А. А. Маракушев // Платина России: проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов. – М. : Геоинформмарк, 1994. – С. 206–227.

Воронежский государственный университет

*Н. М. Чернышов, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой минералогии и петрологии, руководитель НОЦ «Геология рудных месторождений Центральной России» ВГУ–ИГЕМ РАН
petrology@list.ru*

Voronezh State University

*N. M. Chernyshov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Honored Researcher of RF, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of Department of Mineralogy and Petrology, Head of Centre for Research and Education “Geology of ore deposits of Central Russia” at VSU–IGEM RAS
petrology@list.ru*

В. М. Ненахов, декан геологического факультета, доктор геолого-минералогических наук, профессор deanery@geol.vsu.ru

V. M. Nenahov, Dean of the Faculty of Geology, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor deanery@geol.vsu.ru