

**ТИПЫ СУЛЬФИДНЫХ ПЛАТИНОИДНО-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ
И ПЛАТИНОВЫХ РУДНОМАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И ИХ СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ
В ОБЩЕЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИТОСФЕРЫ**

**Статья 3. Сульфидные платиноидно-медно-никелевые и платиновые
рудобразующие системы расслоенных ультрамафит-мафитовых
комплексов неоархея и раннего протерозоя. Природа магматических
расплавов, условия и механизм формирования платиноносных
рудномагматических систем расслоенных комплексов**

Н. М. Чернышов

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 9 ноября 2016 г.

Аннотация: в рамках общей темы ("Сульфидные платиноидно-медно-никелевые и платиновые рудообразующие системы расслоенных комплексов") рассматриваются две взаимосвязанные проблемы, обобщенные в виде самостоятельных статей. Ранее опубликованная статья посвящена геологии, внутреннему строению расслоенных комплексов, общим закономерностям размещения платиносодержащих минералого-геохимических типов оруденения, сформировавшихся в условиях неоархейского и раннепротерозойского внутриконтинентального рифтогенеза. Приведена детальная характеристика внутренней структуры расслоенных комплексов, многоуровневый характер размещения и многообразие рудонесущих горизонтов и рифов с различными концентрациями и меняющимися взаимоотношениями в ряду платиновых металлов, а также форм их распределения. Предлагаемая статья посвящена условиям и механизмам формирования, природе магматических расплавов РМС. Системный анализ внутреннего строения, состав пород, комплекс петрохимических, минералогических, геохимических и изотопно-геохимических признаков, свидетельствуют о многокомпонентной с отчетливо выраженным проявлением процессов контаминации природе магматических расплавов и сложных механизмов формирования платиносодержащих РМС расслоенных комплексов бушвельдского типа. По комплексу индивидуальных признаков, особенностям распределения петрогенных, рудообразующих, редких и редкоземельных элементов, характерному для типовых контаминированных (Бушвельд, Стиллуотер) и неконтаминированных (Скергаард, Киглапейт) интрузивов, подтверждена принадлежность Елань-Вязовского плутона к бушвельдско-стиллуотерскому типу, а также выполнена оценка вероятной степени контаминированности и потенциальной продуктивности на платинометалльное оруденение.

Ключевые слова: расслоенные комплексы, внутренняя структура, минералогия, геохимия, платиносодержащие месторождения, хромитовые, сульфидные медно-никелевые, собственно платинометалльные, контаминация, природа расплавов, механизм формирования.

**TYPES OF SULFIDE PGE-COPPER-NICKEL AND PLATINUM ORE-MAGMATIC SYSTEMS
AND THEIR STRUCTURAL-MATERIAL EVOLUTION IN THE GENERAL MODEL OF THE
FORMATION OF THE LITHOSPHERE. Article 2. Sulphide PGE-copper-nickel and platinum
ore-forming systems of the layered ultramafic-mafic complexes of the Neoproterozoic and early
Proterozoic. Nature of the magmatic melts, conditions and mechanics of the formation
of the PGE-bearing ore-magmatic systems of the layered complexes**

Abstract: in this and following articles two linked problems are considered as parts of the common theme ("Sulphide PGE-copper-nickel and platinum ore-magmatic systems of the layered complexes"). Previously published article was dedicated to the geology and inner structure of the layered complexes, placing patterns of the platinum mineralogical-geochemical types of the ores, that formed in conditions of

the early Proterozoic intracontinental rifting. Detailed characteristics of the inner structure of the layered complexes, multi-level placing patterns and the diversity of the ore horizons and reefs with variable concentrations and mutual relations of the PGE and form of their concentration as many of the own mineral phases, isomorphic compounds and additions in the sulphides, sulphoarsenides and their analogues are given. This article is dedicated to the forming constrains, mechanisms and nature of magmatic melts of the ore-magmatic systems. System analysis of the inner structure, composition of rocks, complex of the petrochemical, mineralogical, geochemical and isotope-geochemical features indicate multicomponent, with distinct expression of contamination, nature of the magmatic melts and complex mechanisms of the formation of the PGE-bearing ore-magmatic systems of the Bushveld-type layered complexes. By the complex of the individual attributes, features of distribution of the petrogenic, ore-forming, rare and rare earth elements that are specific for the generic contaminated and non-contaminated intrusives, the belonging of the Elan-Vyazovski intrusives to the Bushveld-Stillwater type are determined. Level of contamination and potential productivity for PGE ores are evaluated.

Keywords: layered complexes, inner structure, mineralogy, geochemistry, platinum deposits, chromite, sulphide copper-nickel, platinum, contamination, the nature of melts, forming mechanism.

Условия и механизм формирования крупнейших РМС ультрамафит-мафитовых расслоенных комплексов с уникальными по масштабам рудами Ni, Cu, Co, Cr, ЭПГ и других металлов детально освещены в многочисленных публикациях, в том числе в авторских статьях и коллективных монографиях. Вместе с тем, проблема генезиса этого типа РМС до сих пор не может считаться решенной. В этой статье приводится комплекс минералогических, петрохимических, геохимических (включая изотопно-геохимические) признаков, положенных в основу рассмотрения некоторых модельных построений РМС расслоенных комплексов и природы магматических расплавов.

Образование расслоенных магматических комплексов и ассоциирующих с ними различных платиносодержащих (хромитовых, сульфидных медно-никелевых собственно платиновых, титаномагнетитовых) стратиформных по морфологии месторождений бушвелдского типа связано с особым этапом развития земной коры докембрия, определенным как "протоактивизация" [1]. Проявившийся на границе неoarхей-протерозой и в нижнем протерозое этап протоактивизации совпадает со становлением протоконтинентальной коры и ее деструкцией в процессе рифтинга с малой степенью раскрытия подводящих каналов [2]. В большинстве регионов положение подобных систем рифтогенеза, контролирующего размещение РМС расслоенных комплексов, пространственно совмещены с архейскими зеленокаменными поясами, отражая пространственно-временную последовательность смены архейской высокомагнезиальной формации, соответствующей модели неистощенной мантии, расслоенными интрузиями умеренномагнезиальной перидотит-пироксенит-габбро-(анортозит)-норитовой формации с отчетливыми признаками обогащения расплава коровым компонентом, близким к среднему модельному составу мафитов Земли. В целом, этап протоактивизации рассматривается как часть общей эволюции древних областей Земли.

При общих геолого-динамических предпосылках образования платиносодержащей РМС расслоенных

комплексов, обсуждение генетических аспектов невозможно без анализа процессов становления интрузивов в целом.

В настоящее время нет единого подхода к оценке характера (специфики) таких процессов. В их решении определяющая роль принадлежит трем конкурирующим концепциям: а) базирующаяся на известном представлении Н. А. Боуэна, модель кристаллизации и дифференциации базальтовой магмы в камере в процессе охлаждения плутона в условиях конвекционных явлений [3]; б) периодические поступления (инъекции) новых порций расплавов в интрузивную камеру в условиях протекающей кристаллизационной дифференциации, осложняемой смешением различных по составу магм [4–7]; в) ликвационная концепция флюидномагматического расслоения, как главного механизма образования ритмично расслоенных плутонов [8–10].

Ведущая роль кристаллизационной дифференциации, в известной мере, прослеживается в представлениях А. П. Лихачева, базирующихся на обширном материале авторских полевых и экспериментальных исследований [11]. Формирование расслоенных комплексов осуществляется (в отличие от известной концепции Н.А. Боуэна) от маломagneзиальных ($MgO < 0,3$ мас. %) до высокомагнезиальных ($MgO > 27-30$ мас. %) разностей пород с присущими им ассоциациями рудных компонентов в процессе постадийно воспламеняющихся в мантии и последовательно внедряющихся магм в очередности от легкоплавких к более тугоплавким в условиях "флюидного" плавления мантийного вещества в результате погружения в мантию океанической плиты и привноса ею воды и других летучих компонентов (вариант "горячей точки"). Расслоенность и рудность связываются со специфическим сейсмогравитационным фактором [11].

Необходимо отметить, что по ряду петрогеохимических признаков (сравнительно высокие содержания MgO , Cr , Ni при повышенной роли SiO_2 , высокие отношения Al_2O_3/TiO_2 , преобладание никеля над медью и кобальтом и широкие вариации Pt/Pd отношений и изотопов серы, постоянное присутствие

в халькопирит-пентландит-пирротиновых рудах цинк-содержащих хромшпинелидов, концентрации редких и редкоземельных элементов с характерным минимумом ниобия) породная ассоциация расслоенных комплексов обнаруживает определенные черты сходства с так называемыми "континентальными" бонинитами [12]. Вместе с тем, породы расслоенных плутонов характеризуются более высокими концентрациями Ва, Th, Zr, Pb, Cs, Hf, Р, что в совокупности с другими геологическими данными (прежде всего, принадлежность бонинитов исключительно к островным дугам) исключает прямое сопоставление магм, являющихся родоначальными для бонинит-марианитовой серии и расслоенных комплексов, и допускает вероятность формирования "континентальных бонинитов" с позиции модели ассимиляционно-кристаллизационной дифференциации [12]. Согласно этой модели, ассимиляция корового материала частично фракционированным расплавом, соответствующим по составу перидотитовому коматииту, приводит в конечном итоге к образованию рудоносных магм, сходных по петрогеохимическим параметрам с сульфидно-никелевым РМС бушвельдского типа. Альтернативой является модель [12], объясняющая петрогеохимические особенности расплавов родоначальных для ультрамафит-мафитовых плутонов существованием первичных мантийных выплавов аналогичного состава.

При всем многообразии концептуальных подходов, в совокупности, они отражают, по-существу, сложную генетически многокомпонентную природу исходных магнезиальных расплавов, условий и механизмов формирования платиноносных РМС расслоенных комплексов.

В рамках рассматриваемой проблемы — установление природы магматического расплава, условий и механизма формирования платиноносных РМС расслоенных комплексов бушвельдского типа — особое значение представляет ряд петролого-геохимических моделей в общей концепции перио-

дического ("пульсационного") поступления расплава в интрузивную камеру Бушвельда двух самостоятельных, двухстадийного плавления, магм "U-типа" с высокими, близкими к бонинитовым, содержаниями MgO, SiO₂, ЭПГ и толеитового состава [13]. По характеру распределения петрогенных, рудообразующих и рассеянных элементов, изотопным соотношениям Sr, Nd (⁸⁶Sr/⁸⁷Sr = 0,7032–0,7057; εNd² от –0,49 до –6,31) и Th/Hf, состав высокомагнезиальной магмы, испытавшей значительную контаминацию в верхней коре, отвечает магнезиальному андезиобазальту (MgO = 12,65 мас. %, SiO₂ = 55,87 мас. %, Cr = 952 ppm, Ni = 257 ppm, повышенные содержания ЭПГ при преобладании Pt над Pd), кристаллизация которого, в пределах Нижней зоны и Верхней критической зоны, происходила по схеме OI → OI+Orx, затем P1+Orx. Кристаллизация присущей Главной зоне второй (толеитовой) магмы, подвергнутой контаминации (⁸⁶Sr/⁸⁷Sr = 0,7059–0,7077; εNd² от –4,92 до –6,74) материалом нижней коры, начиналась с P1, затем Crx(±OI, Orx) (рис. 1, 2).

Важно подчеркнуть, что эти петролого-геохимические особенности отчетливо проявляются в комплексе Стиллиуотер [14]. Изменение кумулатных фаз оливина через Orx+OI до плагиоклаза (±Crx), наблюдающееся в циклических телах выше рифа J-M, требует, чтобы к кристаллизующейся (резидентной) магме, находящейся в интрузивной камере, была доставлена новая порция магмы (расплава), более богатой глиноземом. На основе анализа ряда изотопных систем (Sm/Nd, Re/Os) установлено, что значительная часть (до 30 %) платиноносного рифа J-M ("слои" троктолитов, анортозитов, перидотитов, норитов, оливиновых пегматоидных пород) имела коровое происхождение и что, подобно комплексу Бушвельд, обе магмы взаимодействовали с коровым материалом. Породы Верхней Критической зоны и, прежде всего, вблизи платиноносных пород кристаллизовались из смеси двух магм с увеличением объемов толеитовой магмы снизу вверх по разрезу.

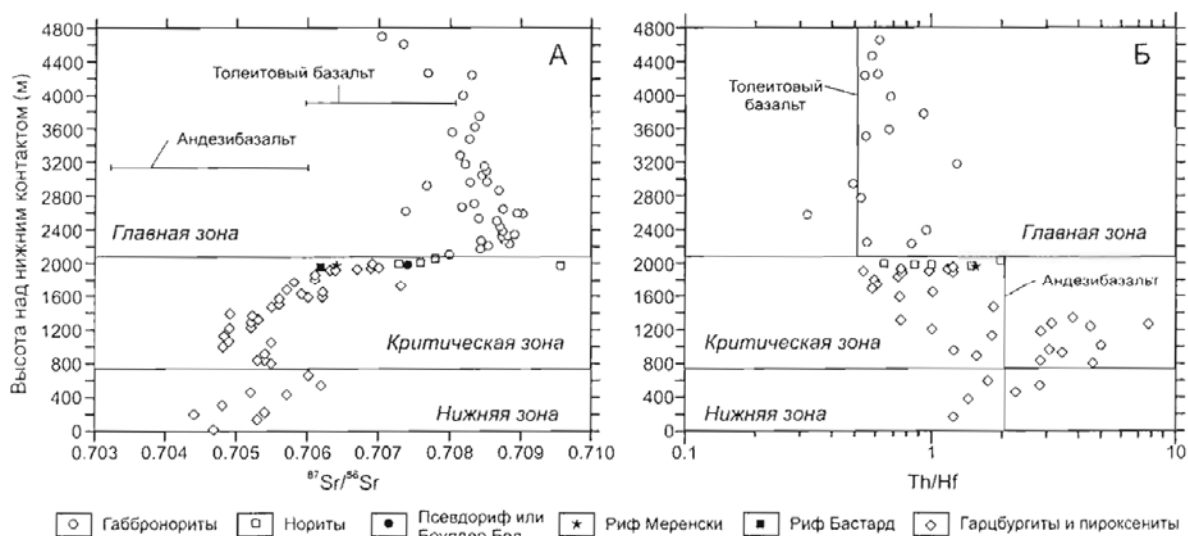


Рис. 1. Вариации изотопных соотношений Sr (А) и отношений Th/Hf (Б) по разрезу Бушвельдского комплекса (по [6, 7])

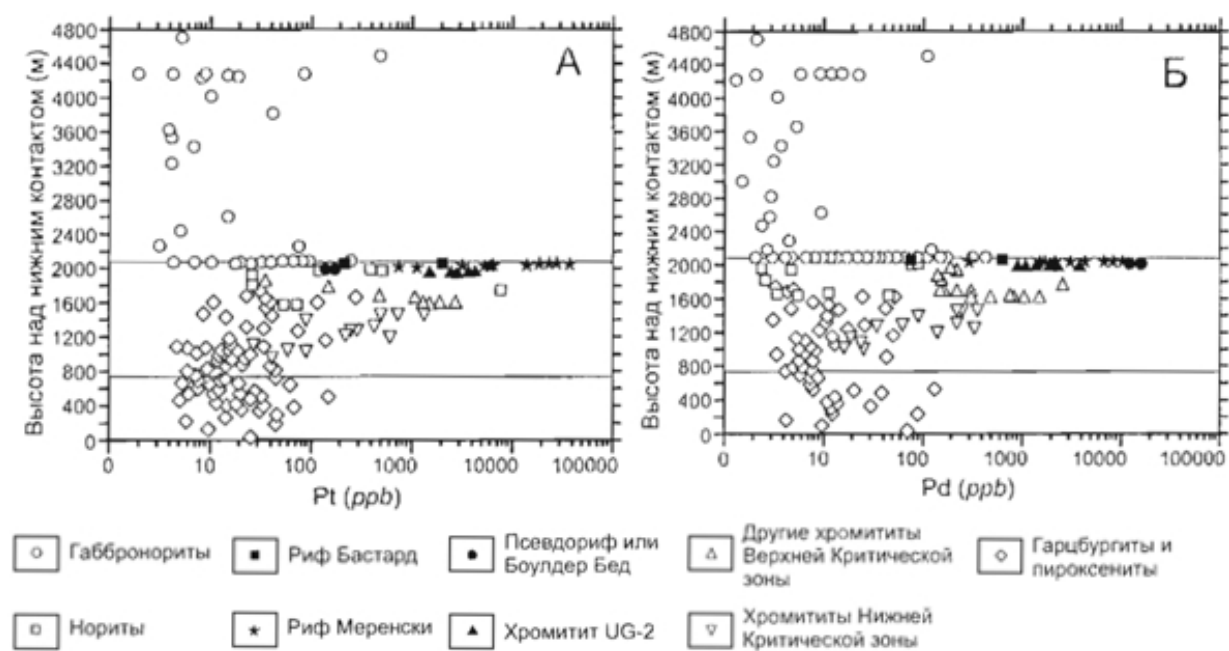


Рис. 2. Вариации содержаний Pt (А) и Pd (Б) по разрезу Бушвельдского комплекса (по [6, 7])

Подобная модель формирования магматического расплава, в известной мере, отчетливо просматривается в ряде расслоенных интрузий Финляндии и крупнейших платиноносных регионов России — Карельского и Кольского, располагающихся в Восточно-Европейском поясе [2, 15, 16] крупнейшей в мире Балтийской изверженной провинции высокомагнезиальной (бонинитоподобной) серии [16].

По наиболее важным характеристикам состава магматических расплавов, которые определяют условия формирования и внутреннюю структуру известных платиноносных интрузий Пеникат и интрузивных комплексов Портимо и Койлисмаа (Западная и Центральная Финляндия), обнаруживают значительную аналогию с бушвельдским типом РМС [6, 17]. В этих интрузивах ранняя высокомагнезиальная, неоднократно поступающая в камеру, магма (подобно «первой» магме Бушвельда) характеризуется относительно высоким содержанием (вес. %) SiO_2 (52,0), MgO (14,4), низким Al_2O_3 (13,7), TiO_2 (0,3–0,4) и обогащением Cr (1500–2000 ppm). Как следствие, при ее кристаллизации сначала выделяется оливин. Первым пироксеном, появившимся на ликвидусе, был ортопироксен. Поздняя (толеитовая) магма отличается меньшим содержанием SiO_2 (<52,0), MgO (10,0), Cr (350–400 ppm) и более высоким Al_2O_3 (17,8) и TiO_2 (0,4–0,5). Кристаллизация этого расплава осуществлялась с последовательной сменой кумулатов (Орх → Орх+Pl → Pl+Aug). Наиболее важные месторождения ЭПГ (в виде рифов) формировались в переходной зоне, где происходило смешение магм (между мегациклическими телами III–IV в интрузивах Пеникат и II–III района Портимо) [17, 18].

К числу РМС бушвельдского типа относится один из крупнейших в Карело-Кольском регионе Мончегорский ультрамафит-мафитовый плутон, включаю-

щий ряд интрузивов, которые интерпретируются как самостоятельные камеры в общей модели его формирования. Все эти интрузивы по внутреннему строению, набору пород обнаруживают значительное сходство с классическими платиноносными Бушвельдским и Стиллутерским.

Основными признаками, определяющими петролого-генетическую модель формирования Мончегорского плутона выступают: специфическая для расслоенных комплексов внутренняя структура — смена Базальной существенно контаминированной зоны с сульфидным платиноидно-медно-никелевым оруденением Главной существенно ультрамафитовой с хромититами, сульфидными платиноидно-медно-никелевыми рудами, а также микроритмами платиноносного Критического горизонта и, в целом, отчетливо выраженным чередованием кумулатов (Ol+Chr → чередование Орх, Орх+Ol+Chr → Орх → Орх+Pl±Crх). Завершающая стадия представлена, как и в других расслоенных интрузивах, существенно мафитовой породной ассоциацией [19, 20]. При сходной внутренней структуре, интрузивы, входящие в Мончегорский плутон, вместе с тем, имеют индивидуализированные особенности и отличаются по составу и масштабам рудной специализации [21, 22].

Построенная на основе ранее разработанных геохимических методов [2, 20], серия петро-рудногенетических многокомпонентных модельных диаграмм, применительно расслоенных платиноталльных комплексов, позволила выявить несколько ведущих трендов, отражающих особенности взаимосвязи всей совокупности породо- и рудообразующих элементов РМС [2, 10, 20]. Подобная взаимосвязь особенно отчетливо прослеживается в сформировавшихся в раннем протерозое платиноносных дифференцированных интрузивах Печенгско-Имандра-

Варзугской зоны, как части предполагаемого и сопоставимого с Бушвельдским, Балтийского плутона [2, 20, 23, 24]. На приводимых петро-рудогенетических моделях Печенго-Имандро-Варзугской ветви (рис. 3), ее составных частей, а также Бушвельдского, Стиллиуотерского и Скаергаардского массивов, выделяется три тренда расслоенности, дифференциации и оруденения — щелочно-основной (боуэновский, оливин-анортозитовый, рудно-анортозитовый), рудно-анортозитовый комплексный (тренд II на рис. 3) и анортозитовый платинометалльный (тренд III). Специфический анортозитовый тренд ($Mg\ Mn\ Fe^{2+}\ Fe^{3+} \leftrightarrow Na\ Al\ Ca\ Si$) расслоенной критической серии Федорово-Панского массива аналогичен таковому типичных платиноносных стратиформных плутонов — Бушвельдского и Стиллиуотерского.

Следует отметить, что на ранних стадиях изучения Мончегорского комплекса основная концепция базировалась на том, что кристаллизация расплава проходила одновременно во всем объеме магмати-

ческой камеры, при этом ритмичная расслоенность являлась следствием гравитационной дифференциации. Однако последующее исследование интрузивов показало [22], что их формирование происходило за счет периодического поступления новых порций свежего расплава в затвердевающие интрузивные камеры, о чем свидетельствует неустойчивость кумулятивной стратификации, несимметричность изменения разрезов, появление в ряде случаев высокотемпературных кумулатов среди более низкотемпературных, включая платиноносные рифы. Обогащенность таких расплавов платиноидами определялась наличием этих металлов в коровых породах, задействованных в процессе контаминации [25] внутри крупных промежуточных магматических очагов, т. е., такие магмы имели корово-мантийное происхождение. При этом, формирование платиноносной РМС Мончегорского плутона не исключает связи с «флюидным» плавлением вещества мантии.

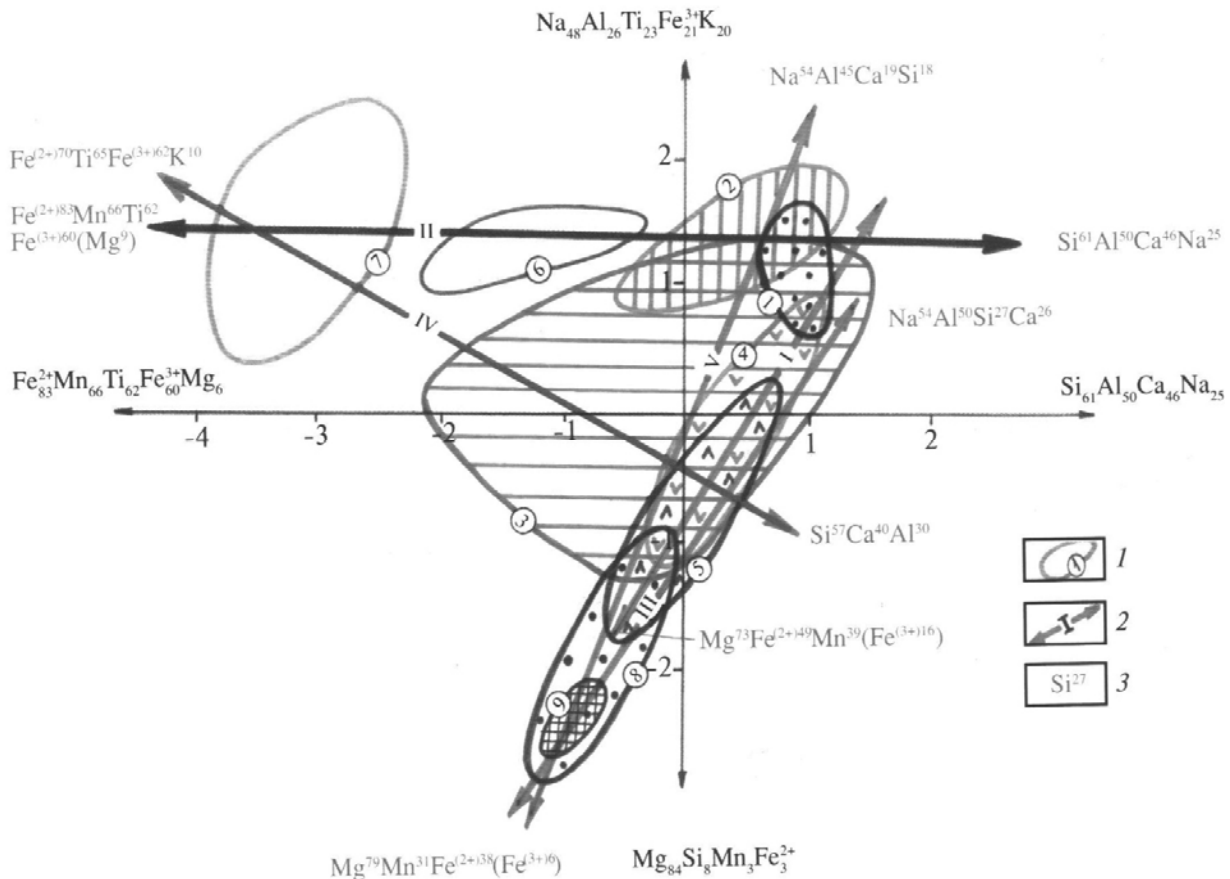


Рис. 3. Петрогенетическая модель восточной части Печенго-Имандро-Варзугской ветви гипотетического расслоенного плутона ($n = 860$, $m = 10$): 1 — фигуративные поля составов пород и проявленные в них тренды (цифры в кружках на контурах полей): 1 — граниты, гранодиориты и кварцевые диориты, иногда субщелочные и щелочные, 2 — диориты, габбро-диориты, габбро-анортозиты, иногда субщелочные и щелочные, 3 — габбро, 4 — габбронориты, 5 — нориты, 6 — феррогаббро и ферродиориты Цагинского и Имандровского массивов, 7 — титаносные троктолиты Цагинского и ферроперидотиты Скаергаардского массивов, 8—10 — пироксениты и перидотиты Федорово-Панского (8), Стиллиуотерского (9) и Бушвельдского (10) массивов; 2 — ведущие тренды дифференциации массивов: I — Федорово-Панского, II — Цагинского и Скважинного, III — Стиллиуотерского, IV — Скаергаардского, Цагинского и Имандровского, V — Бушвельдского; 3 — фигуративные точки составов пород.

Несомненно, флюиды, прежде всего, трансмагматической природы, являлись одним из определяющих факторов образования гигантских разнотипных платиноносных РМС. Теоретические и экспериментальные основы исследования этой фундаментальной проблемы, ее практического приложения, разработаны акад. Д. С. Коржинским и его учениками [26–30].

Важно отметить, что содержания флюидов определяются не только их растворимостью в магме, но и тем, сколько просачивалось через нее в виде трансмагматических флюидопотоков. Участие в формировании РМС восстановительных трансмагматических флюидов в условиях контаминации вмещающими породами порождает в интрузивах градиент окислительного потенциала и замедляет процесс консолидации магм, что способствует их кристаллизационно-гравитационному расслоению.

Необходимо отметить характерную для процесса формирования многих крупных платиноносных (хромитовых, сульфидных медно-никелевых, собственно платиновых) РМС расслоенных комплексов (Бушвельд, Стиллуотер, Великая Дайка, Норильско-Талнахский рудный район [2, 7, 20, 31–32]), отчетливую связь между значительными потоками глубинных флюидов и тектоническими структурами (рифтогенные, глубинные разломы) с длительным сохранением транслитосферной проницаемости в зонах платино-металльного оруденения.

Ведущая роль при формировании платинометалльных РМС расслоенных комплексов принадлежит эволюционирующим по составу углекислым (CO , CO_2 , CH_4) и более тяжелым сероводородным (H_2S , SO , SO_2 , S_2), а также высокобарическим галогеноводородным (HF , HCl) флюидам. Присутствие углерода (в виде графита разнообразных модификаций) отмечается во многих платиноносных интрузивах [31]. Для Восточно-Африканского рифта, где расположены Бушвельд и Великая Дайка, характерна углеродная специализация (выбросы углекислого состава в глубинных разломах). Повышенной галогенной составляющей флюидных потоков отмечается Норильско-Талнахский рудный район [31].

В пределах ВКМ, к числу расслоенных комплексов относится крупный Елань-Вязовский плутон, включающий два самостоятельных интрузива — Елань-Коленовский (площадь 120 км^2) и Вязовский (80 км^2), которые, подобно Мончегорскому плутону, представляли собой самостоятельные магматические камеры с единым глубинным источником, а сам процесс формирования магматического расплава осуществлялся в условиях значительного проявления контаминации мантийных высокомагнезиальных магм коровым материалом. В качестве определяющих параметров его формирования, как продукта мантийно-корового процесса, использован комплекс критериев (петрохимические, минералогические, геохимические) выделения контаминированных магматических образований [33–43].

Петролого-геохимический облик ультрамафит-

мафитовых камернодифференцированных (фазных) плутонов елань-вязовского типа определяется [44–46]: 1) значительным преобладанием мафитовых дифференциатов (до 70–80 % объема) над ультрамафитовыми и преимущественным развитием среди последних плагиоклазовых разновидностей с кумулятивными структурами, высокомагнезиальным составом оливина (Fa_{15-20}) и ортопироксена (Fs_{20-30}) при значительных вариациях основности плагиоклаза (An_{40-70}), умеренной магнезиальностью ($20 < \text{MgO} < 27 \%$) и повышенной железистостью ($\sum \text{FeO}$ до 13 %) и отчасти кремнеземистостью и щелочностью ($0,8-2,2 \%$, $\text{Na}_2\text{O} \geq \text{K}_2\text{O}$); 2) последовательным обогащением конечных продуктов дифференциации ранней оливинсодержащей ассоциации SiO_2 (41,5–55,0 %) и щелочами (0,8–8,1 %; с преобладанием в конечных продуктах K_2O над Na_2O ; табл. 1), возрастанием титана ($\text{TiO}_2 = 0,2-0,8 \%$), относительной железистости с понижением содержания магния ($\text{MgO} = 27,0-6,8 \%$) и хрома (0,2–0,05 %), уменьшением концентрации Ni (0,2–0,1 %), Co (0,02–0,002 %), Cu (0,1–0,03 %); 3) увеличением железистости фемических минералов и содержания ортоклаза в ряду от меланократовых к мезо- и лейкократовым разновидностям габброноритов; 4) невысокой в целом магнезиальностью ($8 < \text{MgO} < 20 \%$), последовательно возрастающей ролью щелочей и особенно калия (1,8–5,3 %, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$), P_2O_5 (0,3–0,8 %), пониженными содержаниями рудообразующих элементов ($\text{Ni} = 0,2-0,1 \%$, $\text{Cu} = 0,06-0,02 \%$, $\text{Co} = 0,012-0,004 \%$, $\text{SO}_3 = 0,15-0,06 \%$) и повышенными хрома (0,3–0,1 %) пород поздней существенно роговообманковой ассоциации (табл. 1).

В оценке общих перспектив платиноносности Елань-Вязовского плутона и определения положения наиболее продуктивных в отношении малосульфидного платинометалльного оруденения горизонтов особое значение приобретает, прежде всего, выявление тех индикаторных нелинейных петрологических признаков, присущих петрорудогенетическим процессам, сопровождающих формирование контаминированных интрузивов с промышленным собственно платинометалльным оруденением бушвельдско-стиллиуотерского типа. Как отмечалось, к числу таких индикаторных критериев распознавания ассимиляционных процессов при формировании контаминированных основных-ультраосновных расплавов, опробированных на известных платиноносных природных объектах (Бушвельд, Стиллуотер и др.), относятся [47]: а) высокомагнезиальный состав фемических минералов, широкое развитие ортопироксена, наличие щелочных полевых шпатов, кварца, высокохромистых хромшпинелидов; б) петрохимические (несоответствие между высокими содержаниями MgO и повышенными концентрациями SiO_2 и K_2O ; высокие величины отношений MgO/CaO , SiO_2/CaO , MgO/FeO и др.); в) геохимические (обогащенность пород как Sr и Ni , так и крупноионными литофильными элементами — K , Rb , Ba , легкими РЗЭ, высокие величины отношений — Ce/Yb , Ce/Nb , Ba/Zr и пониженные — Zr/Rb , Ti/Cr , Ti/Rb и др.).

Средний химический состав сингенетических пород на ранней стадии консолидации Елань-Вязовского плутона (по [44])

Состав	Породы						
	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	41,50	43,91	45,18	46,48	49,48	52,58	55,05
TiO ₂	0,27	0,35	0,32	0,43	0,48	0,76	0,80
Al ₂ O ₃	4,08	9,13	9,02	8,43	11,05	15,40	15,35
Cr ₂ O ₃	0,23	0,16	0,16	0,15	0,15	0,05	0,03
Fe ₂ O ₃	4,60	2,59	2,32	2,85	1,13	2,62	2,31
FeO	9,44	8,03	6,23	3,67	8,73	4,65	4,65
MnO	0,20	0,20	0,13	0,13	0,18	0,07	0,04
MgO	26,72	22,91	22,78	17,70	15,15	8,25	6,84
CaO	6,18	6,81	6,51	8,85	7,92	6,57	5,80
Na ₂ O	0,40	1,54	1,19	1,19	1,82	3,35	3,80
K ₂ O	0,41	0,51	1,06	0,87	1,19	3,80	4,30
P ₂ O ₅	0,23	0,30	0,27	0,37	0,48	0,53	0,45
SO ₃	0,53	0,40	0,17	0,09	0,04	0,12	0,12
П.п.п	5,50	4,06	4,94	3,85	1,97	1,31	0,60
Сумма	100,27	100,54	100,28	100,06	99,76	100,06	100,15
Петрохимические коэффициенты, экв. форм. ед. по А.А. Маракушеву							
Na + K	0,42	0,41	1,15	1,22	1,51	3,39	3,80
ΔZ H ₂ O 298	4,08	3,70	3,84	3,58	3,22	3,01	2,87
Рудогенные элементы, мас. %							
Ni	0,205	0,075	0,125	0,055	0,034	0,022	0,012
Co	0,015	0,007	0,011	0,005	0,004	0,004	0,002
Cu	0,114	0,034	0,044	0,032	0,065	0,042	0,034

Примечание: 1 — плагиоклазовые перидотиты (n = 7), 2 — троктолиты (n = 3), 3 — меланократовые оливиновые габбро-нориты (n = 3), 4 — мезократовые оливиновые габбро-нориты (n = 8), 5 — лейкократовые оливинсодержащие габбро-нориты (n = 8), 7 — безоливиновые ортоклазовые габбро-нориты (габбро-монзониты, n = 3), n — количество анализов.

Минералогические критерии. Наиболее характерными минералогическими особенностями пород Елань-Вязовского плутона являются [44, 45]: а) присущая контаминированным интрузивам высокая степень структурно-текстурной (неравномернозернистые, крупно-мелкокристаллические, такситовые с пани гипидиоморфнозернистой, пойкилитовой, габбро-вой, офитовой, сидеронитовой и другими типами структур) и кристалломорфологической неоднородности (сочетание крупных, иногда с блоковым погасанием, неупорядоченной зональностью и обратным порядком последовательности кристаллизации кумулюсных кристаллов с мелкокристаллическими минералами интеркумулуса, наличие пластинчатой структуры стиллуотерского типа, обусловленной грубыми пластинчатыми вросками авгита, параллельными (001) кристалла-хозяина (ортопироксена); б) отсутствие строго выраженной линейной зависимости и существенный разрыв в распределении железистости сосуществующих оливина (Fa = 17–18,3, x = 17,0) и более широко развитого пироксена (Fs = 18–35, x = 27) в ультрамафитах и оливиновых габбро-норитах (Fa = 18–34, x = 26,5; Fs = 16–21, x = 19,5) и особенно в ортоклазсодержащих разновидностях (Fa = 19–34, x = 26,5; Fs = 16–21, x = 18,3) при общей сравнительно повышенной их магнезиальности (xFa = 23,5; xFs = 20,5); б) сравнительно широкое развитие (от 5 до 25 %, иногда до 35 %) в ранней оливинсодержащей породной ассоциации ортоклаза, который совместно с

биотитом, кварцем и апатитом слагает неправильные выделения или крупные (до 5–7 мм) микропертитовые сростки в лейкократовых такситовых мафитах, характеризующихся наличием относительно железистого оливина (Fa = 30–40) в ассоциации с магнезиальным ортопироксеном (Fs = 20–30; [44]).

Петрохимические критерии. При несколько различающемся петрохимическом облике ранней и поздней породных ассоциаций по некоторым петрогенным компонентам (см. табл. 1) анализ достаточно представительной выборки химических составов главных дифференциатов Елань-Вязовского плутона выявляет ряд характерных для контаминированных платиноносных интрузивов признаков. К их числу относятся: 1) в целом несколько повышенная кремнекислотность при повышенной и умеренной роли MgO; повышенная (по сравнению с кларковыми величинами) концентрация Cr в мафитах и обогащенность их калием; 2) повышенные содержания Al₂O₃ и CaO при обычном для известково-щелочного тренда дифференциации последовательным обогащением SiO₂, Al₂O₃, CaO и щелочами и особенно калием по мере перехода от ранних к поздним членам сингенетически родственных рядов пород, как в пределах серий (зон), так и плутона в целом; 3) характерная для флюидонасыщенных магм и интеркумулюсных расплавов повышенная роль калия и фосфора в дифференциатах поздней породной ассоциации; 4) близкий к ряду платиноносных

ритмично расслоенных комплексов исходный (в эквивалентных формульных единицах) расплав ($Si_{15,2}Ti_{0,17}Al_{4,26}Cr_{0,05}Fe_{2,50}Mg_{6,45}Ca_{2,34}Na_{1,21}K_{0,67}S_{0,67}O_{49,0}$ — Елань-Вязовский плутон; $Si_{15,10}Ti_{0,20}Cr_{0,05}Al_{4,44}Fe_{2,75}Mg_{6,02}Ca_{2,50}Na_{1,20}K_{0,45}O_{50}$ — Стиллиуотер; $Si_{15,20}Ti_{0,19}Al_{4,58}Cr_{0,05}Fe_{2,45}Mg_{6,15}Ca_{2,54}Na_{1,05}K_{0,30}O_{49,0}$ — Монча; [44]) при более высокой (для Елань-Вязовского плутона) степени обогащенности его калием и несколько повышенной магнезиальности и кремнекислотности; 5) сходный со Стиллиуотерским плутоном петрохимический тренд дифференциации (рис. 4) и характерные для контаминированных основных-ультраосновных расплавов величины отношений главных петрогенных компонентов (MgO/CaO ; SiO_2/CaO ; MgO/FeO).

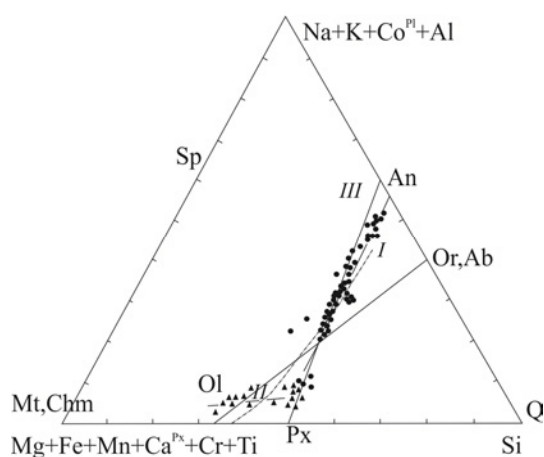


Рис. 4. Петрохимическое сопоставление (по трендам дифференциации) породных групп Елань-Вязовского плутона (ВКМ): I — первичный тренд скрытого расслоения; II — перидотит-пироксенитовый тренд; III — пироксенит-ортозитовый.

Геохимические критерии. В распознавании ассимиляционных процессов при формировании контаминированных ультрамафит-мафитовых расплавов особое значение, несомненно, принадлежит редким и редкоземельным элементам (табл. 2, 3; рис. 5). Породы Елань-Вязовского плутона характеризуются типичными для контаминированных интрузивов индикаторными величинами редких элементов, значительным обогащением легкими РЗЭ относительно тяжелых ($Ce_N/Yb_N > 8$) при субхондритовом профиле последних ($Yb \sim 8$), четко выраженным W-образным профилем распределения элементов-примесей (рис. 6а), обусловленным обогащением крупноионными литофильными (Rb, Ba, K, La, Ce) и высококогерентными (Cr, Ni) элементами, а также наличием отрицательных аномалий Nb, Ta, Ti, Y, Yb.

Значительные черты сходства породных ассоциаций Елань-Вязовского плутона с контаминированными петротипами (Бушвельд, Стиллиуотер) выявил и сравнительный анализ распределения петрогенных и элементов-примесей (табл. 4), нормированных по отношению к базальтам N-MORB (рис. 6а). Уместно отметить, что интрузивы с незначительной степенью ассимиляции и малопродуктивные в отношении

платинометалльного оруденения (Скергаард, Киглапейт) отличаются иным трендом распределения элементов-примесей (рис. 6б).

Таблица 2
Содержание рассеянных элементов в породах Елань-Коленовского интрузива

скв. №	м.	Ba	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
7646	238,0	125	16	56	15	81	4
7646	288,0	115	13	37	14	39	4
7646	300,0	117	11	36	13	36	3
7658	278,5	213	16	124	16	62	6
7658	279,5	234	29	106	17	62	4
7658	280,0	231	26	381	17	64	3
7694	420,0	478	17	234	17	30	2
7694	573,5	143	9	89	17	30	3

Примечание: малые элементы (Ba, Rb, Sr, Y, Zr, Nb) определялись с помощью флуоресцентного рентгено-радиометрического метода (аналитик Марченко Т.М., лаборатория ИГЕМ) на установках VRA-20 и VRA-30.

Таблица 3
Содержание РЗЭ в породах Елань-Коленовского интрузива

	7646	7646	7658	7694	7694
	238,0	300,0	279,5	573,5	420,0
La	11,3	4,3	12,9	11,3	9,2
Ce	20,4	3,4	27,9	27,6	21,8
Pr	2,35	1,10	3,63	4,15	3,13
Nd	8,6	4,3	14,3	18,4	13,5
Sm	1,74	1,01	2,85	4,10	2,79
Eu	0,23	0,15	0,50	0,63	1,16
Gd	1,38	0,75	2,40	3,45	2,07
Tb	0,21	0,11	0,34	0,45	0,27
Dy	1,23	0,69	1,99	2,6	1,47
Ho	0,25	0,15	0,37	0,53	0,28
Er	0,73	0,43	1,19	1,42	0,73
Tm	0,11	0,06	0,16	0,20	0,10
Yb	0,70	0,39	1,07	1,18	0,61
Lu	0,11	0,06	0,18	0,17	0,08

Примечание: элементы определены методом инструментального нейтронно-активационного анализа. Названия пород приведены на рис. 5.

Таблица 4
Геохимическая характеристика исходных расплавов различных магматических комплексов

	1	2	3	4
MgO/CaO	<0,82	>0,88	2,11	1,02
SiO ₂ /CaO	<5,2	>7,8	9,24	8,50
K ₂ O (%)	<0,45	>0,80	1,48	1,58
MgO/FeO	<0,75	>0,87	1,60	1,46
(Ce/Yb) _N	<3,8	>5,7	5,68	8,72
Ce/Nb	<5,8	>6,1	6,14	6,28
Ba/Zr	<0,6	>3,7	3,70	3,82
Zr/Rb	>8,0	<2,5	1,70	1,93
Ti/Cr	>40	<14	1,56	24
Ti/Rb	>100	<100	45	320

Примечание: Родоначальные магмы: 1 — неконтаминированных интрузий (Скергаард, Киглапейт); 2 — контаминированных интрузий (Бушвельд, Садбери); 3 — еланский комплекс; 4 — елань-вязовский тип интрузий мамонского комплекса

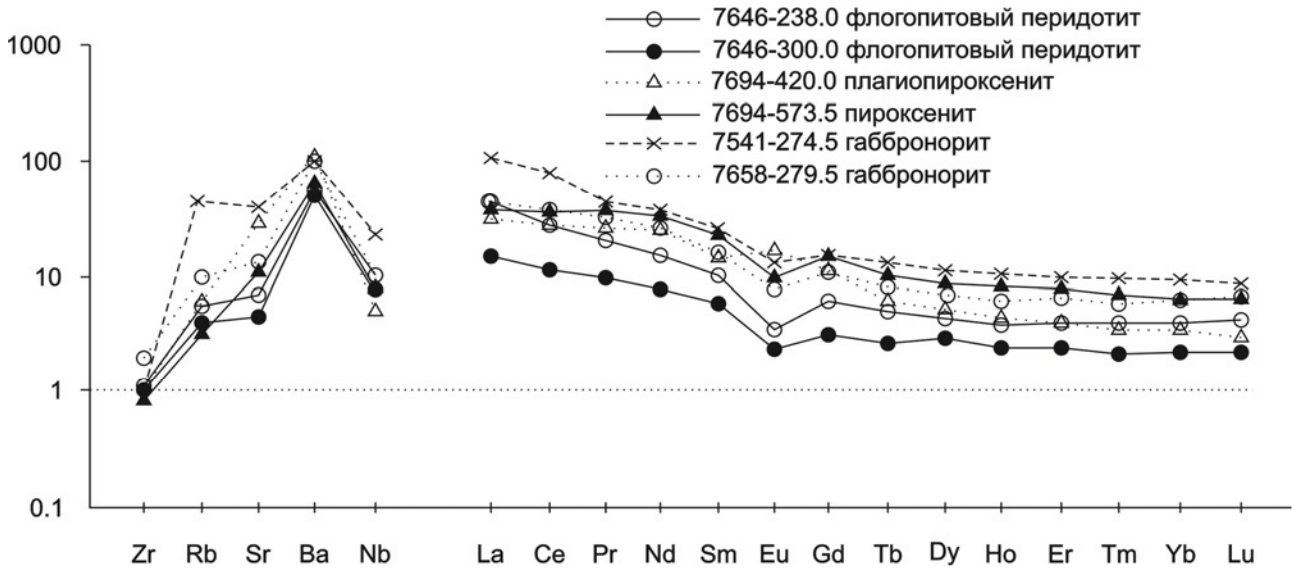


Рис. 5. Нормированное по хондриту распределение РЗЭ и малых элементов в породной ассоциации Елань-Коленовского интрузива (по [24]).

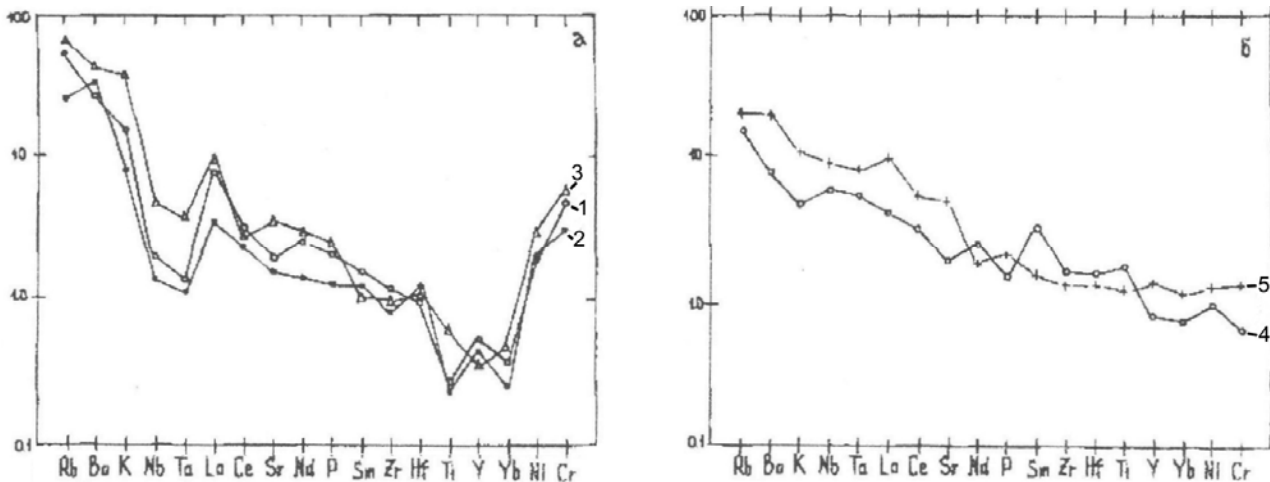


Рис. 6. Нормированные к базальтам N-MORB типа концентрации редких элементов в предполагаемых исходных расплавах контаминированных (а) и неконтаминированных (б) интрузий: 1 — еланский комплекс ВКМ, 2 — Бушвельд, 3 — елань-вязовский тип мамонского комплекса ВКМ, 4 — Скергаард, 5 — Киглапей.

Для них характерно отсутствие отрицательных аномалий Nb, Ta, Ti, Y, Yb, гораздо слабее выражено накопление крупноионных литофильных элементов, не происходит обогащение их Sr и Ni.

Характер распределения РЗЭ в породах Елань-Вязовского плутона позволяет оценить вероятную степень плавления исходного мантийного расплава с использованием известной методики К. Чавела и Б. Джана [48]. На диаграмме $(La_N/Yb_N)-Yb_N$ показаны (рис. 7) области составов, характерные для примитивной (квадрат I) и контаминированной (квадрат II) магмы, и линии, рассчитанные для соответствующих расплавов с разной степенью плавления и составом остатка. Фигуративные точки составов пород Елань-Коленовского интрузива на этой диаграмме находятся в области высоких степеней плавления (порядка 30 %) метасоматически обогащенной крупноионными литофильными элементами мантии [24].

Наиболее вероятными для локализации малосульфидного платинометалльного оруденения стиллуотерского типа в пределах Елань-Вязовского плутона являются горизонты (слои) тонкоритмичного чередования и контрастной смены кумулюсных минеральных парагенезисов нижней расслоенной и в большей мере промежуточной, являющейся своеобразным рубежом между центральной и верхней, обогащенной флюидонасыщенными минералами, зонами. Об этом свидетельствуют упоминавшиеся ранее единичные анализы, показавшие существенное обогащение платиноидами (платиной и палладием в сумме до 0,41 г/т) и золотом (до 0,57 г/т) ортопироксенитов промежуточной зоны, которую в целом следует рассматривать в качестве своеобразного “критического” горизонта локализации благородных металлов нового весьма перспективного типа малосульфидного платинометалльного оруденения. Вероятными гори-

зонтами локализации малосульфидного платинометалльного оруденения являются так же структурно-текстурно неоднородные такситовые крупнокристаллические габбронориты и роговообманковые габбронориты и габбро со сложными по морфологии выделениями (прожилки, гнезда и др.) кумулюсного плагиоклаза верхней зоны, характеризующиеся повышенным (на 1 порядок по сравнению с породами других зон) обогащением ЭПГ (Pt = 0,06–0,12 г/т, Pd = 0,05–0,08 г/т, Rh = 0,005–0,007 г/т, Ir = 0,002 г/т, Ru = 0,014–0,032 г/т, Os = 0,004 г/т; сумма ЭПГ > 0,15 г/т) и отчасти Au (0,21–0,42 г/т).

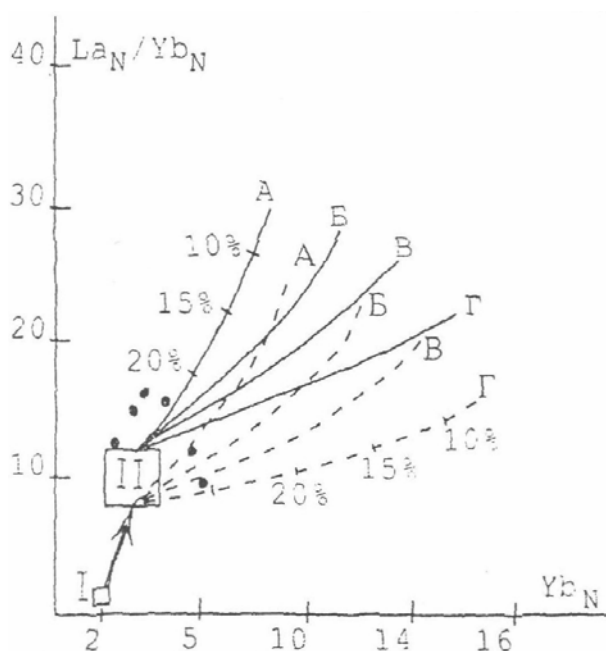


Рис. 7. Отношение $(La_N/Yb_N) - Yb_N$ в породах Елань-Колоновского интрузива. Состав остатка (в %): А- $Ol_{65}Orx_{20}Cpx_{10}Gt_5$; В- $Ol_{65}Orx_{20}Cpx_{12}Gt_3$; В- $Ol_{55}Orx_{20}Cpx_{12}Gt_3$; Г- $Ol_{65}Orx_{20}Cpx_{14}Gt_1$. В процентах на диаграмме указаны степени плавления исходного мантийного материала.

Выводы

Таким образом, анализ всей совокупности признаков — геодинамические и эндогенные режимы формирования расслоенных комплексов, их место в общей эволюции становления докембрийской литосферы, особенности внутреннего строения плутонов, сингенетические ряды породных ассоциаций, многоуровневый характер размещения и многообразие рудонесущих горизонтов и рифов, сопровождающихся платиносодержащим хромитовым, сульфидным медно-никелевым, собственно платиновым оруденением, при сменяющихся взаимоотношениях в ряду ЭПГ, минерально-геохимических форм нахождения со специфическими особенностями накопления Петрогенных, рудообразующих, редких и редкоземельных элементов — в целом, отражают сложную геолого-генетическую многокомпонентную природу исходных магматических расплавов, условия и механизмы формирования платиноносных РМС расслоенных

комплексов докембрийского этапа протоактивизации, как части общей эволюции литосферы. Эти признаки, опробированные на примере Елань-Вязовского плутона, выступают в качестве критериев выделения расслоенных интрузивов и оценки их потенциальной рудоносности на цветные и благородные металлы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ланда, Э. А. О контактах рудных пироксенитов Тулинского массива с дунитами и о происхождении рудных пироксенитов // Зап. ВМО. — 1991. — Вып. 6. — С. 13–22.
2. Додин, Д. А. Платинометалльные месторождения России / Д. А. Додин, Н. М. Чернышов, Б. А. Яцкевич. — СПб: Наука. — 2000. — 755 с.
3. Уэйджер, Л. Расслоенные изверженные породы / Л. Уэйджер, Г. Браун. — М.: Мир. — 1970. — 552 с.
4. Sharpe, M. R. Melting relations of two Bushveld chilled margin rocks and implications for the origin of chromitite / M. R. Sharpe, T. N. Irvine // Carnegie Institute Washington, Yearb. — 1983. — V. 82. — P. 295–300.
5. Harmer, R. E. Field relations and strontium isotope systematics of the marginal rocks of the eastern Bushveld Complex / R. E. Harmer, M. R. Sharpe // Econ. Geol., 1985. — V. 80. — P. 813–837.
6. Barnes, S. J. Platinum-group element distributions in the Rustenberg Layered Suite of the Bushveld Complex, South Africa / S. J. Barnes, W. D. Maier // In the Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements. Edited by L. J. Cabri. — Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. — 2002. — Special Volume 54. — P. 431–458.
7. Налдретт, А. Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд / А. Дж. Налдретт. — Санкт-Петербург: СПбГУ. — 2003. — 487 с.
8. Маракушев, А. А. Происхождение месторождений платиновых металлов и их экспериментальное моделирование / А. А. Маракушев // Платина России. — 1995. — Т. II. — Кн. I. — С. 49–63.
9. Маракушев, А. А. Флюидный режим обновления коры Земли и других планет солнечной системы / А. А. Маракушев // В кн. «Планета Земля». — 2004. — С. 268–282.
10. Додин, Д. А. Платинометалльные месторождения мира. Т. II. Платиносодержащие хромитовые и титаномагнетитовые месторождения / Д. А. Додин, Э. А. Ланда, В. Г. Лазаренков. — М.: Геоинформмарк. — 2003. — 409 с.
11. Лихачёв, А. П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения / А. П. Лихачёв. — М.: Эслан. — 2006. — 496 с.
12. Sparks, R. S. J. The role of crystal contamination through geological time / R. S. J. Sparks // Earth Planet. Sci. Letters., 1986. — V. 78. — № 2/3. — P. 211–223.
13. Irvine, T. N. Magma mixing and the origin of stratiform oxide ore zones in the Bushveld and Stillwater Complexes / T. N. Irvine, M. R. Sharpe // In: Gallagher, M. J., Ixer, R. A., Neary, C. R. and Pritchard, H. M. (Eds). Metallogeny of Basic and Ultrabasic Rocks. Instit. Mining Metallurgy, London. — 1986. — P. 183–198.
14. Todd, S. G. The J-M platinum-palladium reef of the Stillwater Complex, Montana: I. Stratigraphy and petrology / S. G. Todd, D. W. Keith, L. W. Le Roy, D. J. Schissel, E. L. Mann, T. N. Irvine // Econ. Geol., 1982. — V. 77. — P. 1454–1480.

15. Шарков, Е. В. Раннепротерозойская магматическая провинция высокомагнезиальных бонинитоподобных пород в восточной части Балтийского щита / Е. В. Шарков, В. Ф. Смолькин, И. С. Красивская // Петрология, 1997. — Т. 5. — № 5. — С. 503–522.
16. Шарков, Е. В. Роль мантийных плюмов в тектонике раннего докембрия восточной части Балтийского щита / Е. В. Шарков, О. А. Богатилов, И. С. Красивская // Геотектоника, 2000. — № 2. — С. 3–25
17. Iijina, M. The Portimo Layered Igneous Complex — With Emphasis on Diverse Sulphide and Platinum-Group Element Deposits / M. Iijina // Department of Geology, University of Oulu, Finland, Ph.D. thesises, University of Oulu, Finland, Acta Universitatis Ouluensis, Series A, Scientiac Rerum Naturalium. — 1994. — 258. — 158 p.
18. Alapieti, T. T. Stratigraphy petrology and platinin-group element mineralization of the early Proterozoic Penikat layered intrusion, Northern Finland / T. T. Alapieti, J. J. Lahtinen // Economic Geology., 1986. — V. 81. — № 5. — P. 1126–1136.
19. Шарков, Е. В. Петрология расслоенных интрузий / Е. В. Шарков. — Л.: Наука. — 1980. — 320 с.
20. Додин, Д. А. Платинометалльные месторождения мира / Д. А. Додин, Н. М. Чернышов, Д. В. Полферов, Л. Л. Тарновецкий // Платинометалльные малосульфидные месторождения в ритмично расслоенных комплексах. — М.: АО "Геоинформмарк". — 1994. — Т. 1. — Кн. 1. — 272 с.
21. Горбунов, Г. И. Условия формирования крупных и уникальных платино-медно-никелевых месторождений / Г. И. Горбунов, О. А. Дюжиков, Е. В. Шарков // Платина России. Сб. Научных трудов. — Т. VII. — Красноярск. — 2011. — С. 64–73.
22. Шарков, Е. В. Платиноиды в расслоенных мафит-ультрамафитовых интрузивах Карело-Кольского региона / Е. В. Шарков // Платина России. Сб. Научных трудов. — Т. VII. — Красноярск. — 2011. — С. 290–296.
23. Чернышов, Н. М. Проявления нелинейных петрорудогенетических процессов при формировании некоторых типов ультрамафит-мафитовых интрузий мамонского никель-платиноносного комплекса докембрия ВКМ (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. — 1997. — № 4. — С. 43–55.
24. Чернышов, Н. М. Качественная оценка образования первичного магматического расплава Елань-Вязовского плутона / Н. М. Чернышов, Ю. Д. Синюков // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. — 1998. — № 6. — С. 106–117.
25. Смолькин, В. Ф. Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение. В 2-х частях / В. Ф. Смолькин, Ж. А. Федотов, Ю. Н. Нерадовский. — Апатиты: Кольский научный центр РАН. — 2004. — 177 с.
26. Горбачев, Н. Е. Флюидно-магматическое взаимодействие в сульфидно-силикатных системах / Н. Е. Горбачев. — М.: Наука. — 1989. — 128 с.
27. Коржинский, Д. Е. Очерк метасоматических процессов / Д. Е. Коржинский // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. — М.: Изд-во АН СССР. — 1953. — С. 335–456.
28. Коржинский, Д. Е. Метамагматические процессы / Д. Е. Коржинский // Изв. АН СССР. Сер. геол. — 1973. — № 12. — С. 3–6.
29. Маракушев, А. А. Петрологическая модель формирования Норильских медно-никелевых сульфидных месторождений / А. А. Маракушев, Н. А. Панях, И. А. Зотов // Петрология, 2003. — № 5. — С. 524–544
30. Маракушев, А. А. Кислотно-щелочные свойства металлов группы платины и их геохимическое и металлогеническое значение / А. А. Маракушев, Н. А. Панях, И. А. Зотов, Н. М. Гаврилов // Сб. «Экспериментальная минералогия». — М.: Наука. — 2004. — Т. 1. — С. 234–262
31. Гурская, Л. И. Перспективные направления исследования платиновых металлов: флюидный режим и рудогенез / Л. И. Гурская // Платина России. Сб. Научных трудов. — Т. VII. — Красноярск. — 2011. — С. 98–105.
32. Barnes, S-J. Role of late magmatic fluids in Merensky-type platinum deposits / S-J. Barnes, J. H. Campbell // Geology, 1988. — V. 16. — № 6. — P. 488–492.
33. Чернышов, Н. М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов. — Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. — 2004. — 448 с.
34. Переславцев, А. В. Петрология норит-диоритовых интрузий докембрия Воронежского кристаллического массива в связи с проблемой их никеленосности: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук / А. В. Переславцев. — Воронеж. — 1993. — 23 с.
35. 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.
36. Чернышов, Н. М. Роль ассимиляции при формировании платиноносных ультрамафит-мафитовых рудномагматических систем кратонной стадии / Н. М. Чернышов, А. В. Переславцев // Магматизм и геодинамика: мат-лы 1-го Всерос. петрограф. совещ. — Уфа. — 1995. — Кн. 4: Петрология и рудообразование. — С. 150–152.
37. Чернышов, Н. М. Модель геодинамического развития Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии / Н. М. Чернышов, В. М. Ненахов, И. П. Лебедев // Геотектоника, 1997. — № 3. — С. 21–30.
38. Чернышов, Н. М. Проявления нелинейных петрорудогенетических процессов при формировании некоторых типов платинометалльных рудообразующих систем и их аналитические выражения / Н. М. Чернышов // Проблемы магматической и метаморфической петрологии. Тез. докл. — М. — 1997. — С. 59–60.
39. Чернышов, Н. М. Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения еланского типа (геология, закономерности размещения, минералого-геохимические особенности руд, геолого-генетическая модель формирования) / Н. М. Чернышов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. — 1998. — № 5. — С. 120–151.
40. De Paolo, D. J. Trace element and isotopic effects of combined wall rock assimilation and fractional crystallization / D. J. De Paolo // Earth Planet. Sci. Letters., 1981. — V. 53. — № 2. — P. 189–202.
41. Campbell, I. H. The difference between oceanic and continental tholeiites: a fluid dynamic explanation / I. H. Campbell // Contrib. Miner. Petrol., 1985. — V. 91. — № 1. — P. 37–43.
42. Huppert, H. E. Cooling and contamination of mafic and ultramafic magmas during ascent through continental crust / H. E. Huppert, R. S. J. Sparks // Earth Planet. Sci. Letters., 1985. — V. 74. — № 4. — P. 371–386.
43. Sparks, R. S. J. The role of crystal contamination through geological time / R. S. J. Sparks // Earth Planet. Sci. Letters., 1986. — V. 78. — № 2/3. — P. 211–223.
44. Бочаров, В. Л. Строение и состав Еланского никеленосного плутона в краевой части Воронежского кристаллического массива / В. Л. Бочаров, С. М. Фролов, Н. М. Чернышов // Изв. вузов. Геология и разведка, 1986. — № 4. — С. 10–20; — № 5. — С. 42–49.

45. Чернышов, Н. М. Породообразующие минералы никеленосных интрузий ВКМ / Н. М. Чернышов, Г. Г. Дмитренко // Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. — 1979. — 248 с.
46. Чернышов, Н. М. Типы никеленосных интрузий и медно-никелевого оруденения Воронежского массива / Н. М. Чернышов // Сов. геология, 1986. — № 12. — С. 42–54.
47. Chernyshov, N. M. The role assimilation in forming the nickeli-ferrous norite-diorite intrusions of the Voronezh crystalline massif / N. M. Chernyshov, A.V. Pereslavl'tsev // Int. Geol. Rev. — 1994. — V. 36. — P. 587–604.
48. Chauvel, C. Nd—Sr isotope and REE geochemistry of alkali basalts from the Massif Central, France / C. Chauvel, B.-M. Jahn // Geochim. Cosmochim, 1984. — Act 48. — P. 93—110.

Воронежский государственный университет

*Чернышов Николай Михайлович, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой минералогии, петрографии и геохимии), руководитель НОЦ «Геология рудных месторождений Центральной России» ВГУ-ИГЕМ РАН
E-mail: petrology@list.ru
Тел.: +7(473) 220-86-81*

Voronezh State University

*Chernyshov N. M., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Honored Researcher of RF, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of Department of Mineralogy, Petrography and Geochemistry, Head of Centre for Research and Education "Geology of ore deposits of Central Russia" at VSU-IGEM RAS
E-mail: petrology@list.ru
Tel.: +7(473) 220-86-81*