

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

**Статья 2. Сульфидные платиноидно-медно-никелевые и платиновые
рудообразующие системы расслоенных ультрамафит-мафитовых
комплексов неархей и раннего протерозоя. Геология, внутреннее строение
расслоенных комплексов и общие закономерности размещения
платиносодержащих типов оруденения**

Н. М. Чернышов

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 15 августа 2016 г.

Аннотация: в рамках предлагаемой публикации рассматриваются две взаимосвязанные проблемы, обобщенные в виде самостоятельных статей. Первая из них посвящена геологии, внутреннему строению расслоенных комплексов, общим закономерностям размещения платиносодержащих минералого-геохимических типов оруденения, сформировавшихся в условиях неархейского 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 в виде многочисленных (свыше 100) собственных минеральных фаз, изоморфных смесей и примесей в сульфидах, сульфоарсенидах и их аналогах. Последующая статья посвящена изучению условий и механизма формирования, природы магматических расплавов РМС расслоенных комплексов, на основе анализа всего комплекса петрогенных, рудообразующих, редких и редкоземельных элементов, а также сделаны выводы по предмету двух статей.

Ключевые слова: расслоенные комплексы, внутренняя структура, минералогия, геохимия, платиносодержащие месторождения, хромитовые, сульфидные медно-никелевые, собственно платинометалльные, титаномагнетитовые.

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 Neoarchaeon and early Proterozoic. Geology, inner structure of the layered complexes and common placing patterns of the PGE-type ores

Abstract: in this and following articles two linked problems are considered. First article is 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, isomorphous compounds and additions in the sulphides, sulphoarsenides and their analogues are given. Second article will be dedicated to the forming constrains, mechanisms and nature of magmatic melts of the ore-magmatic systems of the layered complexes on the basis of the full complex of petrogenic, ore-forming, rare and TR-elements. Conclusions on the object of this two articles will also be given.

Keywords: layered complexes, inner structure, mineralogy, geochemistry, platinum deposits, chromite, sulphide copper-nickel, platinum, titan-magnetitic.

В общей эволюции докембрийского сульфидного платиноидно-медно-никелевого и малосульфидного собственно платинометалльного рудообразования особый интерес представляют расслоенные ультрамафит-мафитовые комплексы, связанные, преимущественно, с раннепротерозойской протоактивизацией кратонизированной архейской континентальной коры и прогрессивно стабилизирующихся платформ. Пространственно они контролируются структурами двух типов [1]: а) зонами повышенной проницаемости с ограниченным латеральным растяжением (мончегорский и стиллуотерский комплексы с комагматичными вулканитами); б) зонами глубинных разломов с практически полным отсутствием латерального растяжения (комплекс Бушвельд, Великая Дайка и др.). Последние, как правило, не сопровождаются вулканическими образованиями, т. е. ультрамафит-мафитовые рудномагматические системы (РМС) этого типа формировались в интрузивном варианте в условиях, наиболее благоприятных для проявления полной дифференциации вещества и неоднократного поступления магматического расплава в камеру.

Особенностью РМС расслоенных ультрамафит-мафитовых комплексов, сформировавшихся в условиях внутриконтинентального рифтинга, является наличие в одной и той же интрузии (плутоне) нескольких различных по морфологии и вещественному составу рудных тел разнотипных месторождений. Последние контролируются в целом расслоенностью (стратиформный тип) при ограниченной роли не связанных с их структурой залежей и секущих "дайковых тел". По составу стратифицированные месторождения представлены сульфидными платиноидно-медно-никелевыми, малосульфидными платинометалльными, хромитовыми и титаномагнетитовыми с характерными для каждого из них минеральными парагенезисами.

Ярким примером таких полиминеральных и полиэлементных рудообразующих систем являются Бушвельд (ЮАР), Стиллуотер (США), Великая Дайка (Зимбабве), с которыми связаны крупные месторождения ЭПГ, а также Мончегорский, Федорово-Панский и Олангская группа (Россия), Пенникат, Портимо (Финляндия) и ряд других расслоенных комплексов [2].

Методологической и методической основой рассматриваемых РМС является петролого-генетическая связь между составом рудных компонентов и магматическими породами, как продуктами плавления мантийного вещества, образовавшимися в определенных геодинамических режимах длительной эволюции формирования литосферы.

1. Геология и внутреннее строение расслоенных комплексов и общие закономерности размещения платиносодержащих типов оруденения и их минеральный состав

Своеобразным геолого-петрологическим и рудногеохимическим эталоном платиноносных ультрамафит-

мафитовых расслоенных РМС является один из крупнейших в мире (450 x 200 км) комплекс Бушвельд (возраст 2060 млн лет; рис. 1; [2, 3]), располагающийся среди архейских гранитоидов и пород протерозойского зеленокаменного пояса (серия Претория в системе Трансвааль). В нем присутствуют, по-существу, все перечисленные выше типы месторождений, в которых сосредоточено около 95 % мировых ресурсов металлов платиновой группы [2].

Определяющим фактором размещения разнотипных месторождений и РМС в целом выступает прежде всего ультрамафит-мафитовая расслоенная серия, которая включает пять различных по мощности и составу породных ассоциаций зон (рис. 2) [4–10]: 1) Закалки (норитовая маргинальная по [2, 11]); 2) Базальная (нижняя, ультрамафитовая); 3) Критическая с двумя подзонами второго порядка: нижней пироксенитовой (бронзититы, хромититы) и верхней норитовой, включающей платиносодержащие хромитовые UG-1, UG-2 и платиноносный риф Меренского и Бастард-риф; 4) Главная норит-габбро-анортозитовая; 5) Верхняя норит(±троктолит)-габбро(±анортозит)-феррогаббро-диоритовая с многочисленными горизонтами ванадистых титаномагнетитовых руд.

В пределах Бушвельдского комплекса содержится несколько минералого-геохимических типов платинового, медно-никелевого оруденения, связанных, преимущественно, с рифом Меренского, Платрифом, хромитовыми залежами и, в меньшей мере, ультрамафитовыми и высокожелезистыми пегматоидными, кварцевыми жилами и минерализованными трубками Влакфонтен. При значительном многообразии платиносодержащих минералого-геохимических типов, наиболее высокие концентрации ЭПГ сосредоточены в рифе Меренского и хромите UG (табл. 1) [2, 3].

Подобное внутреннее строение и состав характерны и для достаточно крупного (48 x 2–8 км) расслоенного ультрамафит-мафитового комплекса Стиллуотер (возраст 2705±4 млн лет; рис. 3) [2, 12], включающего 3 разномасштабные по мощности серии: 1) Базальную бронзитит-норитовую с бедным сульфидным платиноидно-медно-никелевым оруденением; 2) Ультрамафитовую (чередование "слоев" гарцбургитов, бронзититов, хромититов [2]); 3) Полосчато-слоистую с тремя зонами (нижняя, средняя, верхняя): на границе первых двух, среди анортозитовой зоны располагается риф J-M, а также несколько горизонтов сульфидного медно-никелевого оруденения; завершают разрез верхней серии ферронориты. Обобщенные вертикальные разрезы (с выделенными зонами) интрузивов Бушвельд и Стиллуотер, отражающие, вместе с тем, смену составов ведущих породообразующих минералов – кумулатов – оливина, ортопироксена, плагиоклаза выделенных зон и серий приведены на рис. 4.

Платинометалльное оруденение сульфидной ассоциации подразделяется в комплексе Стиллуотер на 4

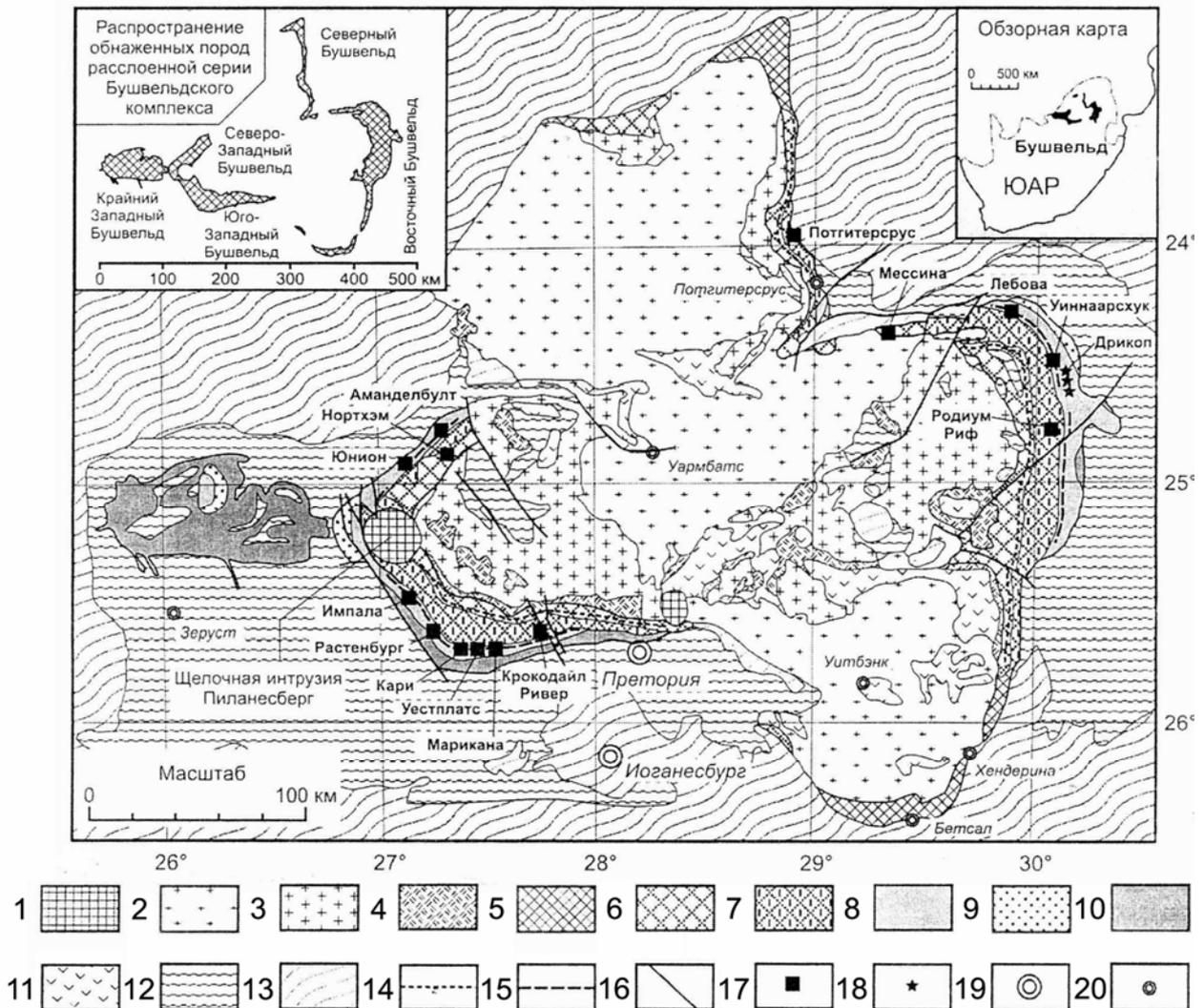


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Бушвельдского комплекса (по [2]): 1 – щелочные интрузии, 2 – кислые породы нерасчлененные, перекрытые молодыми осадочными образованиями, 3 – граниты Лебова (Бушвельд), 4 – Гранофиры Расхуп, 5 – породы расчлененной серии Бушвельдского комплекса, перекрытые молодыми осадочными образованиями, 6-10 – зоны расчлененной серии: 6 – Верхняя, 7 – Главная, 8 – Критическая, 9 – Нижняя, 10 – Маргинальная; 11 – фельзиты Руиберг, 12 – Раннепротерозойская супергруппа Трансвааль (серия Претория), кварциты, аргиллиты, железистые кварциты, доломиты, 13 – архейские гранитоиды и зеленокаменные породы, 14 – Главный Магнетитовый слой в Верхней зоне расчлененной серии, 15 – риф Меренски в Критической зоне расчлененной серии, 16 – разрывные нарушения, 17 – Рудники, обрабатывающие риф Меренски, хромитит UG-2 и Платриф, 18 – рудники, обрабатывающие дунитовые трубки (с севера на юг: Дрикоп, Моихук, Онвервакт), 19 – крупнейшие города, 20 – другие города.

типа [13]: 1) Стратиформное платинометалльное оруденение, где рудные минералы представлены вкрапленными сульфидами, богатыми ЭПГ (риф J-M); 2) Сульфидное оруденение, умеренно обогащенное ЭПГ, находящееся в слоях тонкозернистых пород или ниже их (рудопроявление Пикет Пин); 3) Пегматоидные линзы, трубки и другие секущие оруденелые тела (аналоги дунитовых трубок Бушвельда); 4) Сульфидная минерализация, сконцентрированная вблизи основания интрузий. Содержание Pt и Pd для всего рифа J-M оценивается от 14,7 до 22,3 г/т при среднем содержании Ni+Cu = 0,15 %; Pt/Pd = 1:3.

По особенностям внутреннего строения, составу и рудно-формационным признакам с Бушвельдским и Стиллуотерским комплексами обнаруживает несомненные черты сходства расчлененный линейный

(протяженность более 550 км при ширине 11 км) интрузив Великая Дайка Зимбабве (возраст 2579 ± 4 млн лет [14]), который включает несколько своеобразных камер и субкамер. Определяющим признаком их внутренней структуры, наиболее полно проявившимся в субкамере Дарвендэлл, является наличие двух расчлененных серий с отчетливо выраженной последовательностью кристаллизации минералов: $Ol + Orx \rightarrow Orx \rightarrow Orx + Crx \rightarrow (Ol) + Orx + Pl \rightarrow (Orx) + Crx + Pl$: 1) нижняя ультрамафитовая (дуниты, гарцбургиты, вебстериты, бронзититы с прослоями хромитов), мощностью до 2000 м с приграничной (базальной) маргинальной породной ассоциацией (нориты, габбро, пироксениты); 2) верхняя преимущественно мафитовая (мощность до 1120 м). К верхней части расчлененной серии

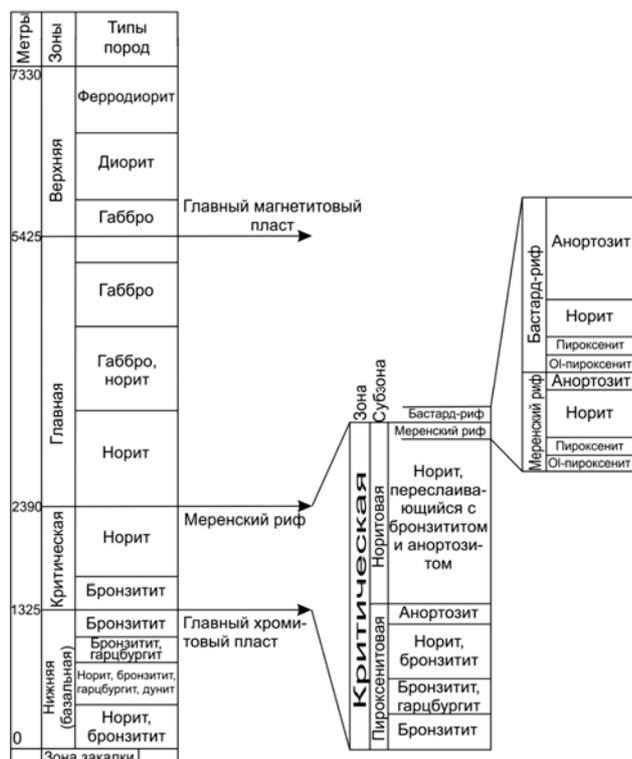


Рис. 2. Схематизированный разрез расслоенной серии Бушвельдского комплекса (по [7, 10]).

вблизи границы с мафитовой с появлением в рудообразующей системе кумулатов плагиоклаза приурочены Нижняя и Главная зоны малосульфидного платинометалльного оруденения интерстиционного типа, ассоциирующего, преимущественно, с бронзититами [2, 7, 15]. Содержания в 100 %-ном сульфидном концентрате Главной зоны составляют (краевая (ДН-4)/осевая (ДН-1) зоны) [2]: Pt=94,9/194,1 г/т; Pd=97,6/255,5 г/т; Rh=8,9/22,2 г/т; Ru=6,4/21,2 г/т; Ir=3,36/8,8 г/т; Os=0,99/2,59 г/т; Au = 14,2/15,4 г/т. В разрезе интрузив имеет форму раструба с погружением слоев по направлению оси тела (рис. 5).

Основной чертой геологии Великой Дайки является характерная для рассматриваемого типа РМС циклическая расслоенность с хорошо выраженной структурой, обусловленной поступлением в интрузивные камеры высокомагнезиального расплава, при этом, каждая из субкамер имела автономную питающую систему [15, 16]. Многочисленные расслоенные ультрамафит-мафитовые интрузивы, сформировавшиеся в условиях внутриконтинентальных рифтогенных структур на рубеже 2505-2437±5 млн лет [2, 17-19] и сопровождающиеся разномасштабными типами платиносодержащих (сульфидные медно-никелевые, хромитовые, собственно платиновые, титаномагнетитовые) месторождений (Пеникат, Парtimo (Финляндия); Мончегорский,

Таблица 1

Средние содержания ЭПГ в рифе Меренски и хромитите UG-2 в рудниках Бушвельдского комплекса (по [3])

	Содержание ∑ЭПГ (г/т)		Содержание отдельных ЭПГ (г/т)					
	На всю отработываемую мощность	В наиболее богатом интервале	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os
Риф Меренски								
Западный Бушвельд								
Аманделбулт	6,7	7,9	3,89	1,88	0,27	0,47	0,10	0,07
Юнион	7,4	9,2	4,37	1,78	0,37	0,59	0,13	0,07
Нортхэм	6,1		3,72	1,59	0,18	0,43	0,08	0,12
Импала	4,9		2,89	1,32	0,25	0,34	0,08	0,07
Растенбург	6,9	8,5	4,07	1,86	0,28	0,55	0,09	0,06
Уестплатс	5,6		3,47	1,57	0,17	0,34	0,06	0,02
Восточный Бушвельд								
Мессина	4,9		2,35	2,01	0,15	0,25	0,10	
Лобова	4,4	6,8	2,68	1,10	0,18	0,35	0,06	0,04
Уиннаарсхук	5,9		3,19	1,77	0,18	0,35	0,08	
Хромитит UG-2								
Западный Бушвельд								
Аманделбулт	5,1		3,26	1,48	0,31			
Юнион	4,8		2,98	1,44	0,43			
Нортхэм	6,1		3,29	1,28	0,61	0,61	0,12	1,83
Импала	5,2		3,07	1,40	0,26	0,36	0,09	0,07
Растенбург	6,1		4,03	1,77	0,31			
Крунда	5,8							
Марикана	4,6							
Уестплатс	6,1							

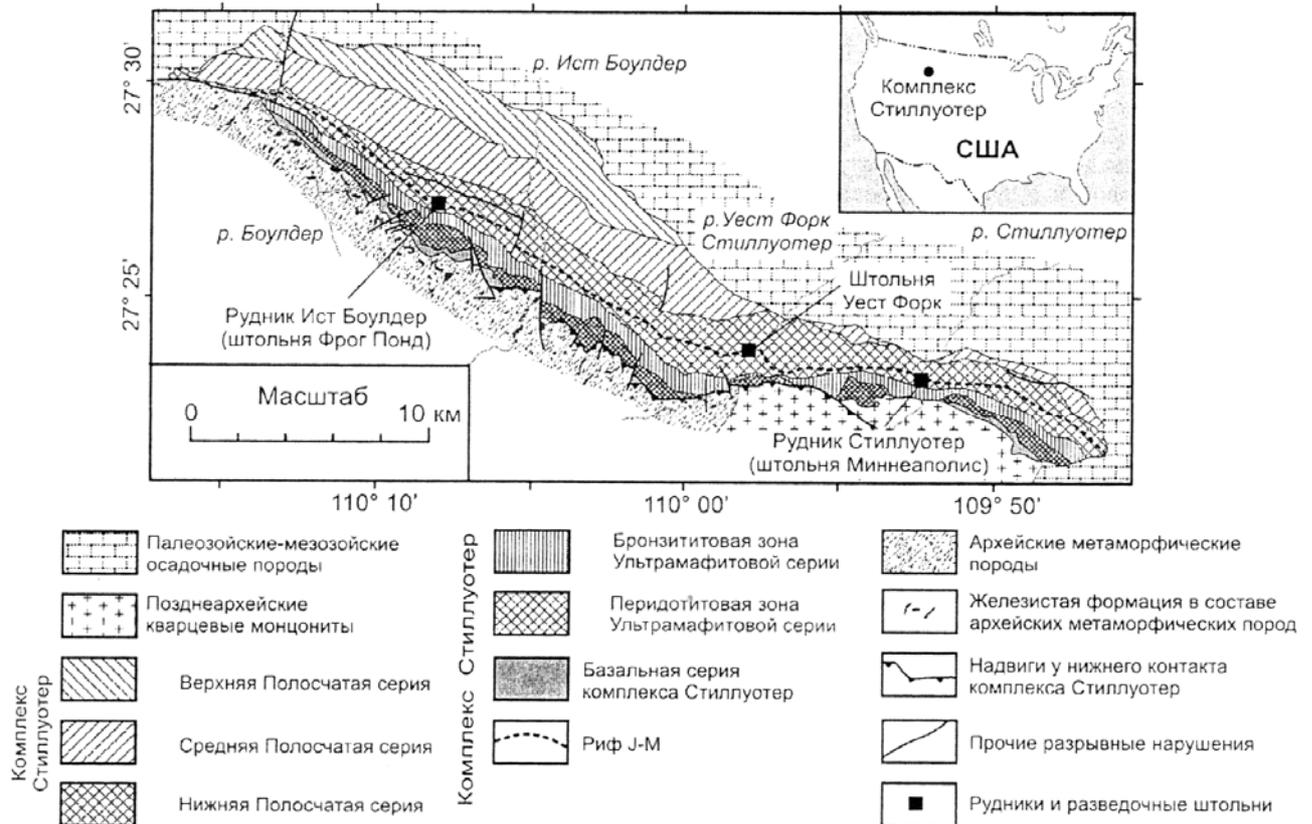


Рис. 3. Схематическая геологическая карта комплекса Стиллаутер (по [13]).

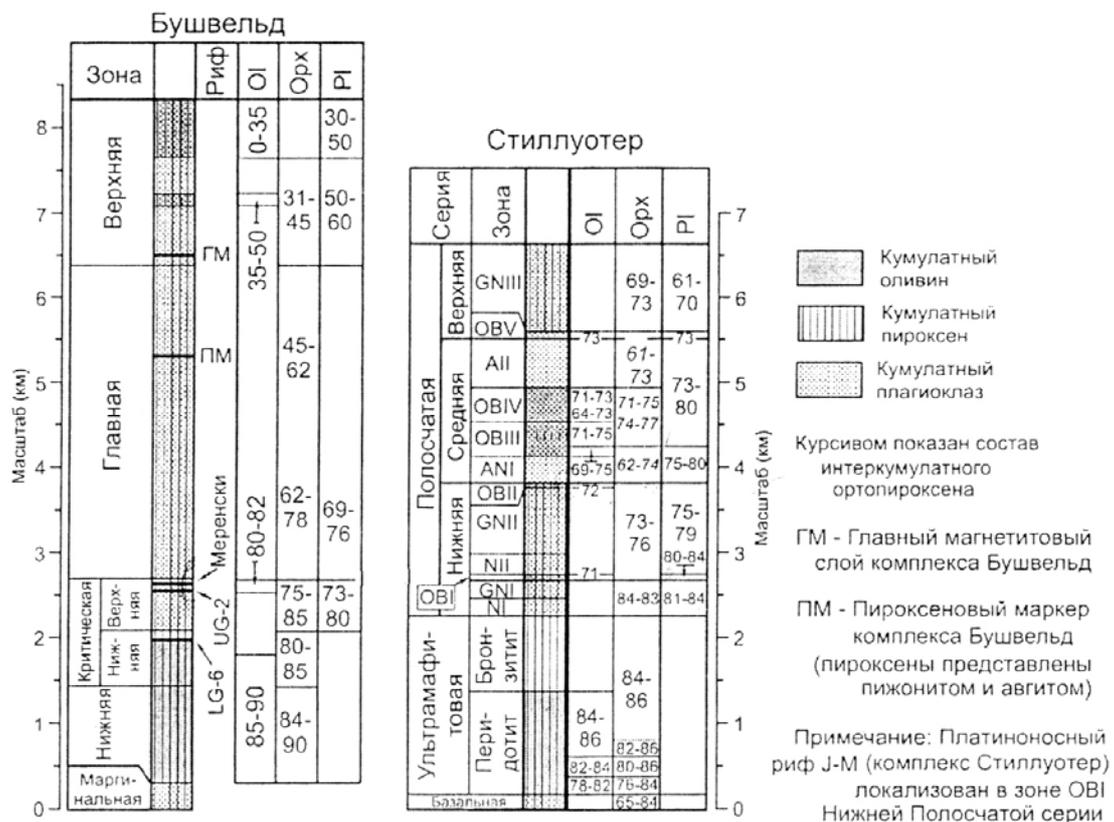


Рис. 4. Обобщенные вертикальные разрезы интрузивных комплексов Бушвельд и Стиллаутер с указанием изменения состава оливина (вариации Fo), ортопироксена (MgNo) и плагиоклаза (An) (по [2]): *OBx* – оливинсодержащие зоны, *Nx* – нориты, *GNx* – габбро-нориты, *ANx* – анортозиты. Пачки циклических зон обозначаются снизу вверх (OBI, OBI и т.д.).

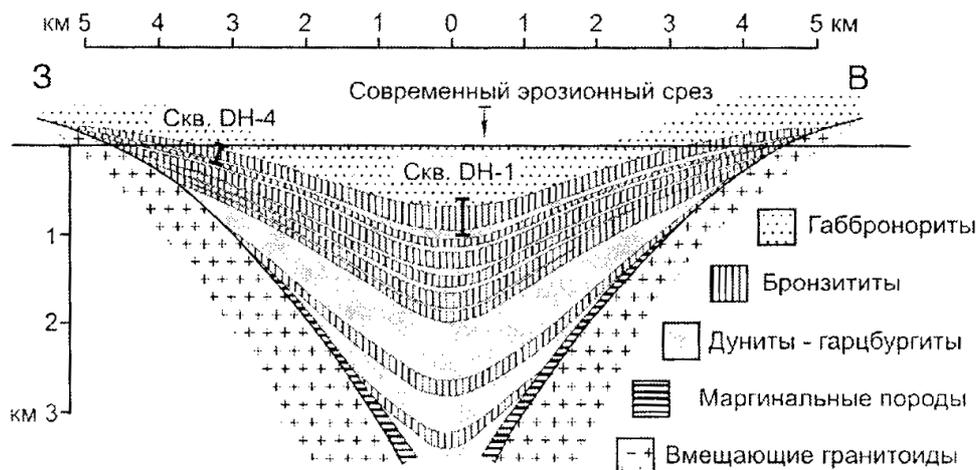


Рис. 5. Обобщённый поперечный геологический разрез Великой Дайки в южной части субкамеры Дарвендэл.

Федорово-Панский (Кольский п-ов); Олангская группа (Карелия)), в пределах Карело-Кольского региона крупнейшей Балтийской раннепротерозойской платиноносной изверженной провинции Фенноскандинавского щита [20].

Мончегорский комплекс включает в себя две интрузивные ветви – Нитис-Кумужья Травяная (НКТ) и Сопчи-Нюд-Паз, которые, по существу, являются самостоятельными камерами и интерпретируются как части некогда единого плутона [7]. В совокупности с массивами Главного хребта – Мончетундровским габбро-норитовым и Чума-Волчьих Тундр габбро-анортозитовым сложного строения, образуют крупный (около 500 км²) единый сложно построенный расслоенный комплекс [18, 22]. Обе ветви Мончегорского плутона характеризуются дифференцированным расслоенным строением и включают три рудонесущие зоны [18, 22]: 1) базальная – зона закалки (нориты, габбронориты, плагиогарцбургиты с сульфидным платиноидно-медно-никелевым оруденением, ассоциирующим с контаминированной подстилающими породами магмой); 2) существенно ультрамафитовая с двумя субзонами: а) нижней, мощностью 700–1000 м (чередование гарцбургитов и бронзититов) и б) верхней, мощностью 700 м (оливиниты, включая "дунитовый блок" с хромититами в составе НКТ с известным платиносодержащим сульфидным медно-никелевым пластом "330" и "Сопчи", бронзититы, плагиобронзититы, оливиновые нориты, нориты, габбронориты (Блок Нюд и Паз), включая микроритмы критического горизонта и неоднократно повторяющиеся пластообразные и субвертикальные жильные пегматоидные образования с платиновыми и сульфидными платиноидно-медно-никелевыми рудами – продуктами остаточного, обогащенного сульфидами, расплава, заполняющего контракционные трещины [10, 18, 20]); 3) завершающая стадия представлена, преимущественно, мафитовой породной ассоциацией. Обобщенная модель распределения оруденения по разрезу приводится на рис. 6.

Расслоенные интрузии северной Финляндии (интрузия Пеникат, района Поргимто, Копллимсаа) нередко представляют тектонически обособленные блоки и характеризуются в целом общими для северо-востока Фенноскандинавского щита признаками: 1) пространственной приуроченностью к неогархейским зеленокаменным поясам; 2) общностью геодинамического режима образования в условиях активного раннепротерозойского (2,4–2,5 млрд лет) рифтинга; 3) принадлежностью к умеренномагнезиальной (MgO = 10–25 мас. %) дунит-перидотит-пироксенит-габбронорит-анортозит-габбровой формации; 4) однотипной внутренней ритмично-расслоенной структурой с

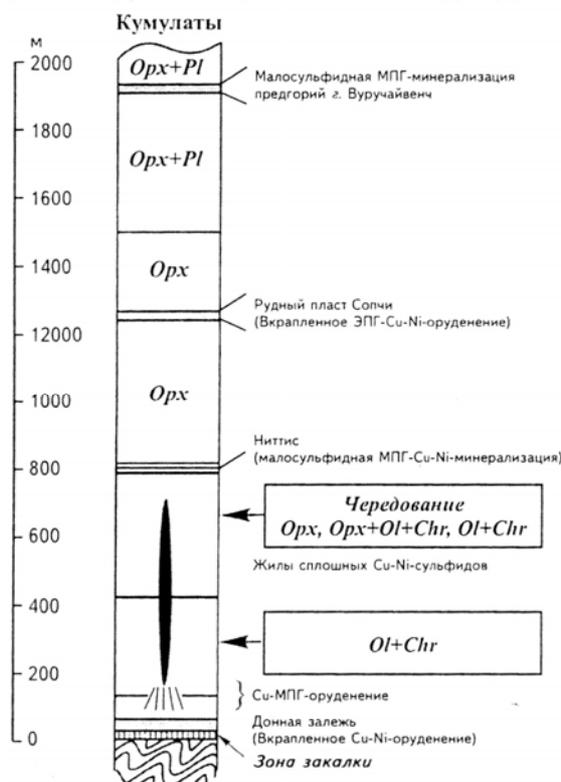


Рис. 6. Распределение рудной минерализации в Мончегорском расслоенном плутоне (по [20]).

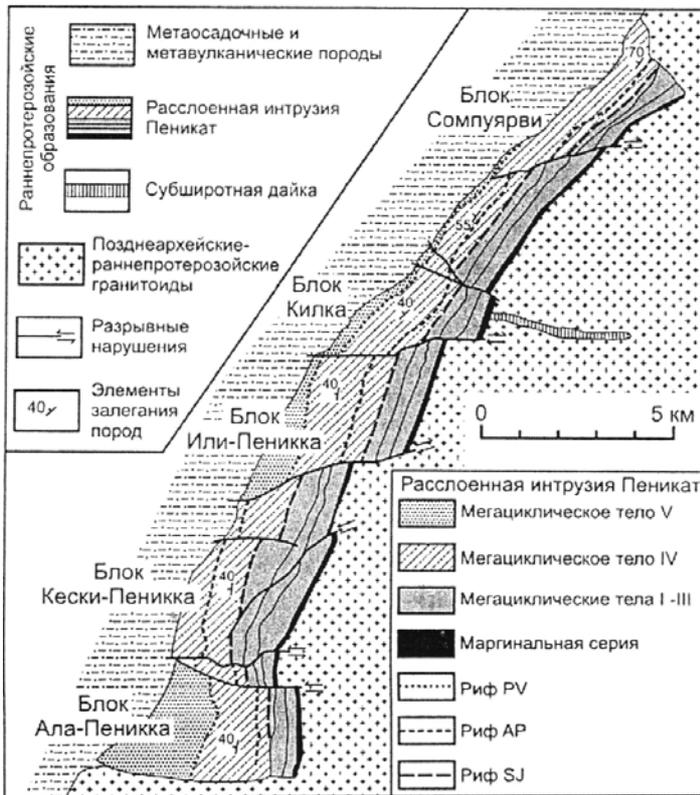


Рис. 7. Схематическая геологическая карта интрузии Пенникат (по [2, 23]).

последовательной сменой различных по мощности зон: а) нижней контактовой маргинальной (преимущественно контаминированной) с жильными массивными сульфидными медно-никелевыми рудами при ограниченной роли ультрамафитов с богатейшими концентрациями ЭПГ (до 100 г/т, при резком преобладании Pd над Pt); б) расслоенной ультрамафит-мафитовой серии с рядом мегациклических горизонтов (перидотиты, гарцбургиты, ортопироксениты, пегматоиды габбрового состава), в разной мере обогащенных платиносодержащими сульфидными медно-никелевыми и

богатыми собственно платинометалльными рудами, сконцентрированными в нескольких (от 2 до 4) рифах (рис. 6) среди ультрамафитов и перекрывающих габбро-норитов; в) верхней с существенно габбровыми горизонтами, отличающимися платиносодержащим магнетит-титаномagnetитовым оруденением. Средние содержания металлов в рифах AP II и PV, соответственно, составляют [2]: Pd= 11,37/2,32 г/т; Pt= 3,4/3,91 г/т; Rh=0,22/0,09 г/т; Ru=0,04/0,11 г/т; Ir=0,06/0,08 г/т; Os=0,03/0,05 г/т; Au=0,61/0,27 г/т, при содержании никеля – 0,06/0,24 мас. % и меди – 0,20/0,25 мас. %.

С расслоенными платиноносными рудонесущими комплексами Финляндии, в строении которых определяющая роль принадлежит мафитам, значительные черты сходства имеет расположенный в северном контакте Имандро-Варзугской зоны Федорово-Панский массив, включающий ряд блоков (рис. 7). Его внутреннее строение определяется последовательной сменой в разрезе (снизу вверх) краевой габбро-норитовой рядом мегаритмов (с тонкоритмичным чередованием) в подошве которых присутствуют плагиопироксениты и/или оливинсодержащие мафиты, переходящие в верхних частях мегаритмов в мезо- и лейкократовые нориты, габбро-нориты и габбро-анортозиты с характерным для Стиллуотерского комплекса преимущественным накоплением платиноидов в подошвенных или кровельных частях, структурно-вещественной однородности пород [7, 17, 20]. В пределах Федорово-Панского массива установлено до семи уровней платинометалльного оруденения (рифов) в составе трех продуктивных горизонтов (рис. 8).

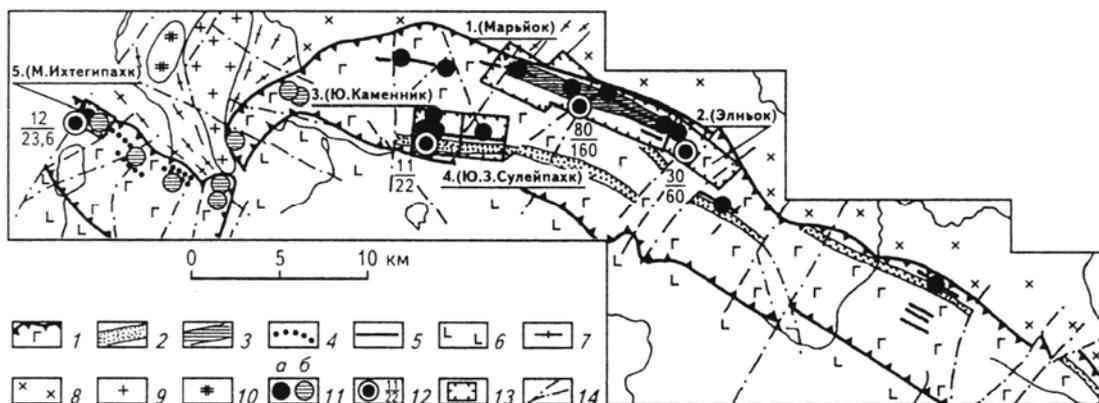


Рис. 8. Схема перспектив платиноносности Федорово-Панского массива (по [21]): 1 – граница массива по геолого-геофизическим данным; 2-4 – платиноносные расслоенные горизонты ("рифовые пачки"): 2 – верхний, 3 – магнетитсодержащие габбро и габбро-нориты, 4 – нижний; 5 – платиноносные "рифы" анортозитового состава; 6 – вмещающие массив метавулканитов и метаосадочные породы; 7 – амфиболиты, гнейсы; 8, 9 – граниты; 8 – щелочные, 9 – плагиомиокриновые; 10 – субщелочные и оливиновые габбро и мегагаббро Олекчя-вирского массива; 11 – месторождения и рудопроявления: а – малосульфидные платинометалльные с оцененными ресурсами (в т) до глубины 150 (числитель) и 300 м (знаменатель); б – сульфидные медно-никелевые с МПГ; 12 – участки поисковых работ; 13 – тектонические нарушения.

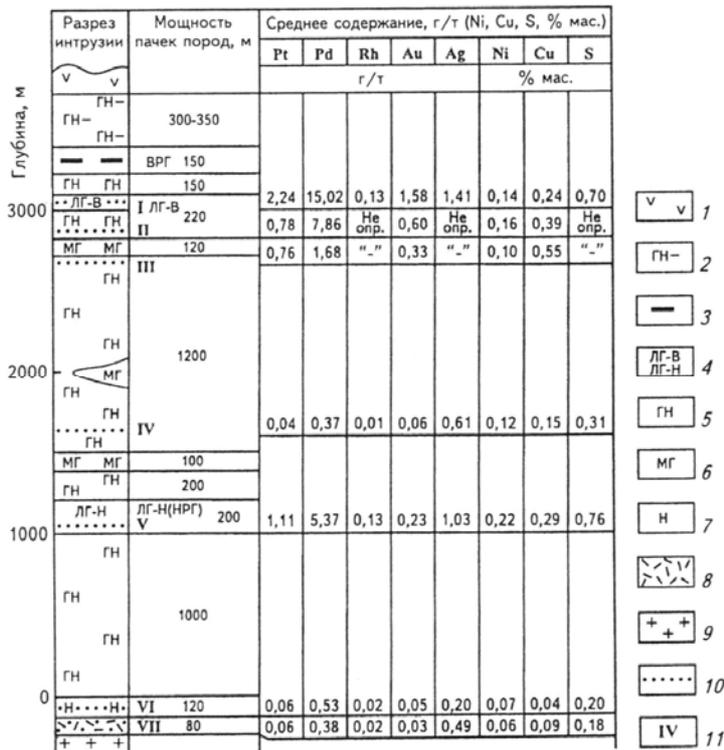


Рис. 9. Платинометалльные горизонты Федорово-Панского месторождения (по [21]): 1 – метавулканы PR; 2 – трахитоидные габбронориты; 3 – чередование оливиновых габброноритов, габброноритов, анортозитов; 4 – лейкогаббро-анортозиты верхнего и нижнего платиноносных горизонтов; 5 – нерасчлененные габбронориты центральной части массива; 6 – магнетитсодержащие габбро; 7 – нориты и плагиопироксениты; 8 – такситовые нориты и габбронориты краевой зоны; 9 – щелочные граниты; 10 – малосульфидные платинометалльные рудопоявления в разрезе; 11 – номера рудных горизонтов.

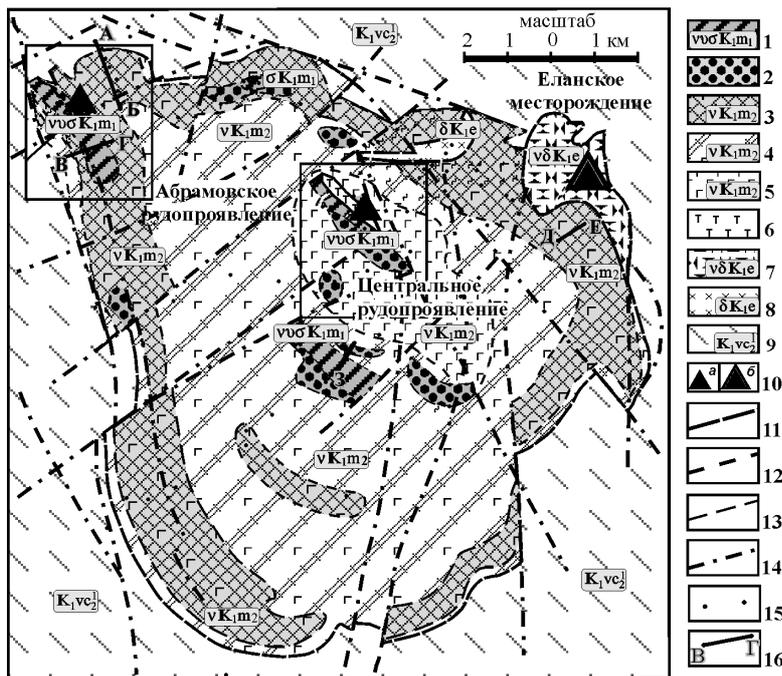


Рис. 10. Схема геологического строения Елань-Коленовского интрузива (по [8, 24, 25]): 1 – ультрамафит-мафитовые породы ритмично-расслоенной серии I интрузивной фазы (перидотит – пироксенит – меланократовый габбронорит (троктолит) – габбронорит); 2 – ксенолиты ультрамафитов (флогопитовый плагиоферидит и тремолитизированный пироксенит); 3-5 – мафитовые породы дифференцированной серии габброноритов II интрузивной фазы: 3 – оливиновые и оливин-ортоклазовые габбронориты, 4 – биотит-амфиболовые габбронориты, 5 – биотит-амфиболовые габбронориты и амфиболовое габбро; 6 – ортопироксениты; 7 – нориты; 8 – диориты еланского комплекса; 9 – метапесчаники воронцовской серии; 10 – рудопоявления (а) и месторождения (б); 11-13 – контакты интрузивных пород; 11 – интрузивные контакты с вмещающими метапесчаниками воронцовской серии, 12 – межфазовые интрузивные контакты, 13 – постепенные петрографические границы; 14 – тектонические разрывные нарушения; 15 – разведочные скважины; 16 – линии разрезов.

В пределах ВКМ, в составе никеленосной дунит-перидотит-пироксенит-габбронорит-габбровой формации (мамонский комплекс, возраст 2100–2070±14 млн лет), Хоперского мегаблока, выделяется несколько расслоенных крупных (до 200 км²) интрузий, к числу которых относится ритмично-расслоенный, сложнодифференцированный Елань-Вязовский плутон, характеризующийся рядом сходных черт с платиноносными интрузивами (Стиллоутер, Пеникат, Федорово-Панские тундры и

др.). Этот плутон в срезе представлен двумя самостоятельными интрузивами – Вязовским (71 км²) и более крупным Елань-Коленовским (120 км²) (рис. 10), которые, вероятно, представляют собой отдельные магматические камеры с общим глубинно-магматическим источником.

В строении Елань-Вязовского плутона выделяется ряд зон [8, 24, 25]: 1) нижняя, включающая контактовую маргинальную и расслоенную ультрамафит-мафитовую; 2) средняя существенно мафитовая; 3)

промежуточная, являющаяся контрастным рубежом между центральной и верхней зонами с многократно ритмично переслаивающимися породами ультраосновного и основного состава; 4) верхняя, несущая специфические признаки, определяющиеся преимущественным развитием в ее составе водо-флюидо-содержащих минералов. С тонкоритмичными расслоенными мелко- и крупнозернистыми пироксенитами связано малосульфидное платинометалльное оруденение.

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 единичные анализы, показавшие существенное обогащение платиноидами (платиной и палладием в сумме до 410 мг/т) и золотом (до 570 мг/т) пироксенитов промежуточной зоны, которую в целом следует рассматривать в качестве своеобразного «критического» горизонта локализации благородных металлов. Вероятными горизонтами локализации малосульфидного платинометалльного оруденения являются так же структурно-текстурно неоднородные такситовые крупнокристаллические габбронориты и биотит-роговообманковые габбронориты и габбро со сложными по морфологии выделениями (прожилки, гнезда и т.п.) кумулюсного плагиоклаза верхней зоны. Концентрация ЭПГ в породах этих горизонтов на порядок выше по сравнению с плагиоперидотитами, оливиновыми пироксенитами, троктолитами и оливиновыми габброноритами ранней фазы [8, 23, 24].

Внутренняя структура каждого из этих интрузивов определяется масштабами проявления и характером распределения породных ассоциаций двух, последовательно сменяющихся во времени фаз [8]: а) ранней ультрамафит-мафитовой (см. рис. 10) и б) поздней мафитовой. Сингенетический ряд пород ранней стадии консолидации Елань-Вязовского плутона включает плагиоперидотиты (оливиниты) плагиоклаз- и пироксенсодержащие, оливин-плагиоклазовые вебстериты, троктолиты и количественно преобладающие в разной мере обогащенные оливином и ортоклазом габбронориты, и иногда безпироксеновые оливинсодержащие монцогаббронориты. В ряде случаев в пределах развития этой породной ассоциации встречаются аподунитовые и апоперидотитовые серпентиниты, которые по некоторым минералогическим особенностям обнаруживают значительные черты сходства с бесполовошпатовыми ультрамафитами мамонского типа интрузий, несколько предшествующими во времени становлению дифференцированных ультрамафит-мафитовых плутонов.

Строго закономерное положение петрографичес-

ких разновидностей в вертикальном разрезе расслоенной серии ранней фазы (перидотит ± оливинит – оливиновый вебстерит – оливиновый габбронорит (троктолит) – габбронорит или перидотит (±оливинит) – оливиновый пироксенит – пироксенит – габбронорит) и характер ритмичности определяется процессами кристаллизационного фракционирования кумулятивных минеральных фаз (оливин + пироксен и/или оливин + плагиоклаз, пироксен + плагиоклаз). В целом для ритмичнорасслоенной серии этой фазы становления плутона характерна последовательная сменяемость в вертикальном разрезе ассоциаций кумулятов с постепенным уменьшением доли оливина и пироксенов и увеличением плагиоклаза.

Отчетливо дифференцированная мафитовая породная ассоциация второй фазы представлена оливиновыми и оливин-ортоклазовыми габброноритами, оливинсодержащими и безоливиновыми биотит-амфиболовыми габброноритами, амфиболовыми и биотит-амфиболовыми габбро, а также роговообманковыми пироксенитами-вебстеритами и пироксеновыми горнблендитами. Более позднее формирование этой ассоциации подтверждается присутствием среди них ксенолитов и разномасштабных «реликтовых» участков пород ранней фазы плагиоперидотитов, вебстеритов, оливиновых и оливин-ортоклазовых габброноритов), наличием реакционных зон оталькования. Серия дифференцированных габброноритов – оливиновый габбронорит (оливин-ортоклазовый габбронорит) – биотит-амфиболовый габбронорит – роговообманковые и биотит-роговообманковые габбро) характеризуются концентрически-зональным размещением в структуре Елань-Коленовского интрузива, при этом обогащение биотитом и роговой обманкой габбро центральной его части является закономерным результатом завершающей стадии кристаллизации фронта затвердевания от периферии к центру с накоплением в остаточном расплаве флюидного компонента.

На основе разработанной теоретической модели ассимиляции мантийными магмами корового материала и ряда индикаторных петрохимических, минералогических, геохимических, изотопно-геохимических и других признаков, отражающих проявления нелинейных петрорудогенетических процессов при формировании рудномагматических систем бушвельдско-стиллуотерского типов, выполнена оценка степени контаминированности и потенциальной продуктивности платинометалльного оруденения Елань-Вязовского плутона [8, 23].

Определяющими признаками этого типа РМС, сформировавшегося в условиях неорархейско-раннепротерозойского внутриконтинентального рифтинга, являются: 1) принадлежность к умеренномагнезильной ($MgO=10-25$ мас. %, варьируется от 1,5 до 40 мас. %) перидотит(±дунит)-пироксенит-габбронорит-норит(±анортзит)-габбровой формации; 2) присущая многоциклическая (расслоенная) внутренняя структура интрузивов; 3) значительная продол-

жительность (до 40 млн лет, применительно Федорово-Панского плутона [17]) становления РМС; 4) многоуровневый (до 5–7 горизонтов, включая рифы) характер и многообразие уникальных по содержанию ЭПГ, запасам и ресурсам минералогеохимических типов платиноносных месторождений (сульфидные медно-никелевые, малосульфидные платиновые, магнетит-титаномagnetитовые) с различным уровнем концентрации и меняющимися взаимоотношениями в ряду Pt, Pd, Ru, Rh, Ir, Os; 5) локализация руд в верхних и нижних уровнях мегациклических тел при смене кумулатов ($\pm\text{O}l \rightarrow \text{O}l + \text{O}r_x \rightarrow \text{O}r_x \rightarrow \text{O}r_x + \text{P}l \rightarrow \text{P}l \pm \text{O}r_x \rightarrow \text{O}r_x + \text{M}r_x + \text{P}l \rightarrow \text{C}r_x + \text{P}l$) с четко выраженным анортозитовым платиноносным трендом.

Совместное проявление нескольких минералогеохимических типов и подтипов платиносодержащих руд (хромитовых, сульфидных медно-никелевых, собственно платиновых и магнетит-титаномagnetитовых) определяет многокомпонентный, полиминеральный состав и многообразие форм распределения минеральных фаз благородных металлов (более 10 минеральных фаз ЭПГ [7]) в виде: а) самородных элементов (Au, Pt, Pd, Ru, Rh, Ir, Os); б) широко развитых металлических твердых растворов и интерметаллических соединений (Pd,Ru; Ir,Pt; Pt,Ir; Pt,Os,Ir; Os,Ir; Pt,Fe; Ir,Os; Ir,Ni; Pt,Sn; Pt,Cu и др.); в) количественно преобладающих сульфидов (брэггит, висоцкит, кондерит, куперит, лаурит и др.); г) сульфоарсенидов, теллуридов, антимонидов, висмутидов, селенидов и сульфосолей ЭПГ, Au и Ag (сперрилит, ирарсит, гессит, селениды Pd и Pt, котульскит, меренскит, маякит, мончеит, омсит, осарсит, платарсит, арсенопалладинит, пларсит, палларстанид, руарсит, рутенарсинит, садберит, сопчеит, стиллуотерит и др.); д) примесей в рудообразующих сульфидах (пирротин, халькопирит, пентландит, халькопирит). Определяющая роль в минеральном платинометалльном парагенезисе принадлежит Pt-Fe, Pt и Pd, сперрилиту, лауриту, Pt, Pd и Rh сульфидам, Pt-Pd теллуридам.

Важной минералогеохимической особенностью РМС расслоенных комплексов, представляющей, помимо прочего, значительный промышленный интерес, является значительное отличие малосульфидных платиновых и сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд не столько по содержанию и составу сульфидного парагенезиса, сколько по уровню концентрирования ЭПГ. В 100-процентном сульфидном концентрате собственно платиновых руд содержание ЭПГ в несколько десятков раз превосходит подобные концентрации в сульфидных платиноидно-медно-никелевых рудах [26].

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышов, Н. М. Сульфидно-никелевые рудно-магматические системы (типизация и эволюция) / Н. М. Чернышов // Изв. АН СССР. Сер.: Геол. – 1990. – № 11. – С. 94–106.

2. *Naldrett, A. Дж.* Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд / А. Дж. Налдретт. – Санкт-Петербург: СПбГУ. – 2003. – 487 с.

3. *Cawthorn, R. G.* Platinum-Group Elements Deposits in the Bushveld Complex, South Africa / R. G. Cawthorn, R. K. Merkle, M. J. Viljoen // The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements (ed. L.J. Cabri). – Ottawa, Ontario. Canadian Institute of Mining and Metallurgy. – 2002. – Special Vol. 54. – P. 389–429.

4. *Cameron, E. N.* The Upper Critical Zone of the eastern Bushveld Complex – precursor to the Merensky Reef. / E. N. Cameron // Economic Geology, 1982. – Vol. 77. – P. 1307–1327.

5. *Naldrett, A. J.* The formation of stratiform PGE deposits in layered intrusions / A. J. Naldrett, G. Cameron, G. von Gruenewaldt, M. R. Sharpe // Origins of Igneous Layering (ed. Ian Parsons), NATO Advanced Sc. Institute Series, Series C. – 1987. – Vol. 196. – P. 313–397, Reidel, Dordrecht.

6. *Кривцов, А. И.* Месторождения платиноидов (геология, генезис, закономерности размещения) / А. И. Кривцов // Итоги науки и техники. Рудные месторождения. – М. – 1988. – Т. 18. – 131 с.

7. *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.

8. *Чернышов, Н. М.* Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. – 2004. – 448 с.

9. *Чернышов, Н. М.* Типы сульфидных платиноидно-медно-никелевых и платиновых рудномагматических систем и их структурно-вещественная эволюция в общей модели формирования литосферы. Статья 1. Типы сульфидных платиноидно-медно-никелевых высокомагнезиальных (коматитовых) рудообразующих систем архея и раннего протерозоя / Н. М. Чернышов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – Воронеж. – 2016. – № 2. – С. 71–76.

10. *Лихачёв, А. П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения / А. П. Лихачёв. – М.: Эслан. – 2006. – 496 с.

11. *Campbell, I. H.* A model for the origin of platinum-rich sulfide horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes / I. H. Campbell, A. J. Naldrett, S. J. Barnes // Journal of Petrology, 1983. – Vol. 24. – P. 133–165.

12. *Premo, W. R.* U-Pb and Sm-Nd ages for the Stillwater Complex and its associated sills and dikes, Beartooth Mountains, Montana. Identification of a parent magma / W. R. Premo, R. T. Heiz, M. L. Zientek, R. B. Langston // Geology, 1990. – Vol. 18. – P. 1065–1068.

13. *Zientek, M. L.* Platinum-Group Element Mineralization in the Stillwater Complex, Montana / M. L. Zientek, R. W. Cooper, S. R. Corson and E. P. Geraghty // The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements (ed. L.J. Cabri). – Ottawa, Ontario. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 2002. – Special Vol. 54. – P. 459–481.

14. *Armstrong, R.* A SHRIMP U-Pb study of zircons from the layered sequence in the Great Dyke, Zimbabwe and a granitoid anatectic dyke / R. Armstrong, A. H. Wilson // Earth and Planetary Science Letters, 2000. – Vol. 180. – P. 1–12.

15. *Wilson, A. H.* Distribution and controls of platinum group element and base element mineralization in the Darwendale subchamber of the Great Dyke, Zimbabwe / A. H. Wilson, A. J. Naldrett, M. Tredoux // Geology, 1989. – Vol. 17. – P. 649–652.

16. *Wilson, A. H.* Platinum-group element mineralization in the Great Dyke, Zimbabwe, and its relationship to magma evolution and magma chamber structure / A. H. Wilson, M. H. Prendergast // South African Journal of Geology, 2001. – Vol. 104. – P. 319–342.

17. Митрофанов, Ф. П. Основные результаты исследований платинометалльной рудоносности расслоенного ультрамафит-мафитового интрузива Федорово-Панских тундр / Ф. П. Митрофанов, А. У. Корчагин, Н. Л. Балабонин, Ю. В. Гончаров, С. М. Карпов, В. В. Субботин, П. В. Припачкин // Российская Арктика. Геол. Развитие, минерагения, геоэкология. – СПб.: ВНИИОкеангеология. – 2002. – 412 с.
18. 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.
19. 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.
20. Шарков, Е. В. Платиноносность раннепалеопротерозойской крупной Балтийской изверженной провинции (Карело-Кольский регион) / Е. В. Шарков, О. А. Богатиков // Платина России. Сб. Научных трудов. – Т. V. – М.: ООО “Геоинформмарк”, 2004. – С. 350–358.
21. Додин, Д. А. Платина России / Д. А. Додин, Н. М. Чернышов, Т. С. Додина, К. К. Золоев, Г. В. Поляков // Платина России. Сб. Научных трудов. – Т. VI. – М.: ООО “Геоинформмарк”, 2004. – С. 245–310.
22. Шарков, Е. В. Петрология расслоенных интрузий / Е. В. Шарков. – Л.: Наука. – 1980. – 320 с.
23. Alapieti, T. T. Stratigraphy, petrology, and platinum-group element mineralization of the early Proterozoic Penikat layered intrusion, northern Finland / T. T. Alapieti, J. J. Lahtinen // Economic Geology, 1986. – Vol. 81. – No. 5. – P. 1126–1136.
24. Чернышов, Н. М. Проявления нелинейных петрогенетических процессов при формировании некоторых типов ультрамафит-мафитовых интрузий мамонского никель-платиноносного комплекса докембрия ВКМ (Центральная Россия). // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 1997. – № 4. – С. 43–55.
25. 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.
26. Cawthorn, R. G. Experimental data at 3 kbars pressure on parental magma to the Bushveld Complex / R. G. Cawthorn, G. Davies // Contrib. Mineral. Petrol. – 1983. – Vol. 83. – № 1/2. – P. 128–135.

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 ВГУ, руководитель НОЦ «Геология рудных месторождений Центральной России» ВГУ-ИГЕМ РАН
E-mail: petrology@list.ru
Тел.: 8(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
Phone: 8(473) 220-86-81