

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации *Зеленского М. Е.*
«Редокс-условия как фактор рудоносности, метасоматоза и
фракционирования элементов в мантии и надсубдукционных
магмах» на соискание ученой степени доктора геолого-
минералогических наук по специальности 1.6.4 — Минералогия,
кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков
полезных ископаемых

Диссертантом обобщены результаты оригинальных исследований роли редокс-фактора (окислительно-восстановительного потенциала) при метасоматозе мантийных пород, миграции, и перегруппировки халькофильных и сидерофильных элементов мантийного вещества под воздействием субдукционных расплавов и флюидов с последующим концентрированием золота и ЭПГ в продуктах надсубдукционного вулканизма. Фактически обосновывается новая геохимическая теория фракционирования мантийного вещества в зонах субдукции с перспективой образования медно-никелевых месторождений и потенциально продуктивных золото-платиноидных минерализаций, примеры которых уже известны, но природа теоретически все еще не растолкована (например, на Приполярном Урале).

Цель исследования:

Установление механизма редокс-преобразований мантийных перидотитов и закономерностей перераспределения S, Ni, Cu, Au и ЭПГ в условиях надсубдукционной мантии с перспективой рудообразования в связи с островодужными магматическими системами.

Предпосылки.

1. Полевой материал, собранный в ходе исследований восьми вулканов на территории Восточно-Камчатского вулканического пояса (Шивелуч, Харчинский, Заречный, Ключевской, Безымянный, Толбачик, Бакенинг, Авачинский) и одного вулкана на Северо-Курильской гряде (Чиринкотан). Продукты извержений этих вулканов с мантийно-перидотитовыми ксенолитами рассмотрены диссертантом в качестве репрезентативных образований для зон субдукции. Следует отметить, что три из этих вулканов (Авачинский, Ключевской, Толбачик) – алмазопродуктивные, что тоже является частью истории «надсубдукционной мантии».

2. Результаты более 100 модельно-петрологических экспериментов по синтезу в условиях высоких РТ-условий (500—600 МПа и 900—1250°C) и вариаций редокс-потенциала.

3. Применение широкого комплекса аналитических методов: оптических, рентгеновских, спектроскопических, электронно-микроскопических, масс-спектрометрических, масс-спектрометрических, включая изотопную масс-спектрометрию. При этом анализы осуществлялись в 6 отечественных и 4 зарубежных лабораториях.

Полученные данные достаточно полно опубликованы. Однако при этом вызывает удивление, что в приведенном в автореферате списке указаны только публикации в зарубежных изданиях. Получается, что диссертант изучал отечественные объекты, анализировал их материал в основном в отечественных лабораториях, получал зарплату и финансовую поддержку тоже в России, а полученные результаты публиковал за рубежом

(Нидерланды, Германия, Швейцария, США). Странный пример маргинальности, особенно от сотрудника научного института имени академика Д. С. Коржинского.

На защиту диссертантом выдвинуто пять научных положений.

1. Взаимодействие мантийного перидотита с водным флюидом при температуре выше области устойчивости серпентина ($> 650^{\circ}\text{C}$) сопровождается окислением ионов железа до Fe^{3+} с образованием высокомагнезиального оливина-форстерита, магнезиального магнетита и генерацией H_2 , что представляет собой редокс-механизм мантийного метасоматоза, определяющий поведение соединений серы и состав шпинелидов в надсубдукционной мантии.

По гипотезе автора в условиях субдукции в породах верхней мантии и нижней коры вода окисляет Fe^{2+} в оливине с образованием серпентина, брусита, Mg-шпинелида и H_2 . Последний удаляется из зоны реакции, локализуясь в виде газовых включений в минералах измененных перидотитов. Все это и является регулятором редокс-потенциала среды, включая расплав и флюид. В качестве шпинелида предполагается магнезиальный магнетит с примесью Al, Ti и Cr, который, по мнению диссертанта, отличается по составу от «ранее описанных земных шпинелей». Оливин в ходе таких превращений становится аномально магнезиальным — до форстерита. Выдвинутая гипотеза обосновывается данными петролого-минералогических исследований камчатских вулканитов и результатами высоко-РТ экспериментов, в ходе которых действительно были получены парагенезисы новообразованного сильно магнезиального оливина и магнезиального магнетита. В ходе упомянутых экспериментов в условиях высокого окислительного потенциала первоначальный оливин преобразуется вплоть до форстерита с новообразованными пироксенами. Эти реакции и превращения сопровождаются диффузией водорода. Образованный в таких процессах форстерит становится сильным восстановителем для окисленной серы, что создает условия для последующего сульфидного минералообразования.

Защищаемое положение обосновано.

2. Взаимодействие окисленного H-O-S флюида субдукционного происхождения с мантийным оливином состава $(\text{Mg},\text{Fe},\text{Ni})_2[\text{SiO}_4]$ приводит к образованию Fe-Ni-сульфидов и H_2S -содержащих метасоматических флюидов. Процесс обеспечивает перенос никеля из тугоплавкого оливина в легкоплавкую сульфидную фазу и формирование флюидных систем, потенциально связанных с надсубдукционным гидротермальным рудообразованием.

Результаты исследований продуктов вулканических извержений показали, что даже в условиях земной коры окисленная сера активно реагирует с магнезиальным оливином, восстанавливаясь и образуя с мобилизованными из оливина металлами Fe-Ni-Cu-сульфиды в парагенезисе с некоторыми сульфатами. Проведены эксперименты по метасоматическому преобразованию природных оливинов H-O-S флюидами, близкими по составу включениям в магматических минералах и в близких к мантийным РТ-условиях. Опыты в системе «оливин- H_2O - SO_3 », моделирующей инфильтрационное преобразование мантийных перидотитов, привели к получению ортопироксена, шпинелида, Mg-Fe-Ni-сульфата, пентландита, пирита, пирротина, моносльфидного твердого раствора (MSS), самородной серы и сернистого газа. В высоко восстановительных условиях в присутствии

редокс-буфера сначала оливин растворялся во флюиде, а затем сера в сернистом газе восстанавливалась с образованием (FeS+NiS)-твердых растворов. Позже из флюида кристаллизовался новообразованный сильно магниевый оливин без примесей сидерофильных металлов. В умеренно восстановительных условиях на первое место вышло образование сульфатов Mg, Fe, Ni. Полученные экспериментальные результаты подтверждены термодинамическими расчетами.

Защищаемое положение обосновано.

3. *Взаимодействие мантийного оливина с надсубдукционными расплавами, богатыми SiO₂ и S, приводит к метасоматическому формированию гарцбургитов с волокнистым и радиально-лучистым ортопироксеном и сопровождается мобилизацией никеля из оливина в сульфидные фазы. Метасоматизированные перидотиты такого типа могут служить источником надсубдукционных магм, обогащенных никелем и серой.*

На примере никеля диссертант рассмотрел возможный механизм формирования сульфидных руд за счет деплетированной мантии. Предполагается, что под воздействием на мантийные породы H-O-S-флюидов никель высвобождается из первичного оливина с образованием собственных минералов. Последующее плавление преобразованных таким образом мантийных субстратов с образованием надсубдукционных магм ведет к образованию магматогенных, метасоматических и гидротермальных Fe-Ni--сульфидных месторождений.

Защищаемое положение обосновано.

4. *При высокой (до 1.2 %) концентрации общей серы примитивные надсубдукционные магмы способны достигать сульфидного насыщения и инициировать сульфидную ликвацию даже в окислительных условиях. Низкая степень пересыщения расплава по FeS обеспечивает диффузионное равновесие между силикатным и сульфидным расплавами и эффективное концентрирование никеля и меди уже в ранних сульфидных жидкостях.*

На примере мантийных ксенолитов в продуктах извержения вулкана Шивелуч изучен механизм образования рудообразующих Ni-Fe-сульфидов путем замещения мантийного Ni-содержащего оливина ортопироксеном при участии сероводорода. В результате образуется сульфатно-сульфидная ассоциация, в которой сульфиды представлены (FeS+NiS)-твердыми растворами, пентландитом, сульфидами ряда халькозин-ковеллин. Средний изотопный состав серы в этих фазах оценивается в 4.5 ‰, что действительно соответствует сульфидам именно из магматогенных и плутоно-гидротермальных рудных месторождений.

Защищаемое положение обосновано

5. *Фракционирование элементов-платиноидов и золота в мантийных перидотитах и надсубдукционных магмах контролируется фугитивностью кислорода и серы в системе (fO₂, fS₂). В окислительных условиях Ir, Os, Ru, Rh концентрируются преимущественно в хромипинелидах, тогда как Pt и Pd на поздних стадиях эволюции магмы способны отделяться от силикатного расплава в виде многокомпонентных Fe-Cu-Au-S-Se-Te-содержащих жидкостей, а также собственных минеральных фаз.*

Выявлен факт сильного (435 г/т) обогащения сульфидов в вулканитах Толбачика рудообразующими металлами — Au, ЭПГ, Zn, Cd, Pb, Bi. Формы обогащения —

элементы-примеси и микровключения самородно-металлических фаз субмикронного размера. Это объяснено ассимиляцией металлов сульфидами из силикатных расплавов или обогащением остаточных сульфидных фракций после частичного их растворения при транспортировке расплавами к земной поверхности. Факторами формирования таких минералого-геохимических аномалий диссертант определяет: 1) содержание металлов в мантийных породах и первичных расплавах; 2) масштаб ликвации этих расплавов на силикатную и сульфидную фракции; 3) продолжительность взаимодействия силикатного и сульфидного расплавов; 4) степень пересыщения силикатного расплава по FeS. Отмечаются так же существенные различия в подвижности ЭПГ в процессах мобилизации и перераспределения – более тугоплавкие (Ir, Os, Ru) дольше сохраняются в ранних кумулатах (включая хромшпинелиды), а менее тугоплавкие (Rh, Pt, Pd) больше мигрируют с расплавами (включая сульфидные) и флюидами. В качестве (Pt-Pd-Rh)-фаз в продуктах такой дифференциации отмечены изоферроплатина, арсениды палладия-родия (арсенопалладинит, родарсенид), сульфиды и теллуриды палладия, самородные платина и золото. В качестве спутников отмечены барит, ангидрит, клинопироксены, титаномагнетит.

Защищаемое положение обосновано.

Принципиальных замечаний к материалу автореферата не имеется. В качестве рекомендации можно выдвинуть следующее.

Диссертант многое в диссертации строит на минералогических данных, но в автореферате не приводится ни одной эмпирической формулы минералов. В частности, это относится к шпинелидам — поликомпонентным изоморфным смесям, которым автор придает большое генетическое значение. Было бы весьма полезно строить в соответствующей части свои генетические построения на основе не приблизительных оценок («магнезиальный магнетит» и т. п.), а рассчитанных минеральных формул, изменение которых послужило бы замечательной иллюстрацией редокс-превращений мантийного вещества в ходе надсубдукционного вулканизма. Это же относится и к оливину, который поставлен диссертантом в базис обсуждаемых превращений.

В качестве геохимических индикаторов фракционирования мантийного вещества в зонах субдукции диссертант использует вариации содержаний некоторых благородных, сидерофильных и халькофильных элементов. Полученный результат, конечно, впечатляет. Однако было бы еще полезнее, если бы диссертант при своем анализе использовал геохимическую классификацию Ю. Г. Щербакова, которая до настоящего времени является наилучшим инструментом для выявления закономерностей глобальной геохимической эволюции, пример которой диссертант и продемонстрировал результатами своих исследований.

В целом, судя по автореферату, представленная к защите диссертация вполне отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям по заявленной специальности, а ее автор — **Зеленский Михаил Евгеньевич** — заслуживает присвоения ученой степени доктора геолого-минералогических наук.

Силаев Валерий Иванович
Доктор геолого-минералогических наук

Старший научный сотрудник
Главный научный сотрудник лаборатории петрографии
Институт геологии Коми НЦ УрО РАН
167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54
silaev@geo.komisc.ru
89121517451

Я, Силаев Валерий Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

«2» октября 2026 г.

