

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
экспериментальной минералогии имени
академика Д.С. Коржинского Российской
академии наук, д.г.-м.н. Олег Геннадьевич
Сафонов



«23» июня 2025

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
экспериментальной минералогии имени академика Д.С.
Коржинского Российской академии наук (ИЭМ РАН)**

На основании решения Ученого совета ИЭМ РАН.
Председатель Ученого совета – О.Г. Сафонов, д.г.-м.н.
Ученый секретарь ИЭМ РАН – Т.Н. Ковальская, к.г.-м.н.

Диссертация «Редокс-условия как фактор рудоносности, метасоматоза и фракционирования элементов в мантии и надсубдукционных магмах» выполнена в Лаборатории физико-химических проблем магматизма Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук (ИЭМ РАН).

Зеленский Михаил Евгеньевич, 1961 года рождения, гражданство РФ, окончил Новосибирский государственный университет в 1983 году по специальности «геохимия». В 2003 г. на диссертационном совете Объединенного института геологии, геофизики и минералогии им. А.А. Трофимука СО РАН защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 «Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых» на тему «Транспорт элементов и условия минералообразования в зонах разгрузки высокотемпературных фумарол на вулкане Мутновский (Камчатка)».

С 2006 года по настоящее время соискатель Зеленский Михаил Евгеньевич работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук (ИЭМ РАН) в должности и.о. старшего научного сотрудника (2006–2008 гг.), старшего научного сотрудника (2008–2019 гг.), ведущего научного сотрудника (с 2019 г.).

Текст диссертации проверен в системе «Антиплагиат» и не содержит заимствованного материала без ссылки на авторов.

С диссертацией ознакомились специалисты д.г.-м.н. А.Л. Перчук, д.г.-м.н. Э.С. Персигов, д.г.-м.н. А.Г. Симакин, д.г.-м.н. Н.С. Горбачев. Специалисты дали положительную оценку диссертационной работе М.Е. Зеленского.

По итогам обсуждения диссертации «Редокс-условия как фактор рудоносности, метасоматоза и фракционирования элементов в мантии и надсубдукционных магмах», представленной на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по

специальности 1.6.4. «Минералогия. Кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых», принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертационная работа выполнена на высоком научно-методическом уровне, является полноценным комплексным исследованием, имеющим новизну, теоретическую и практическую значимость. Выводы аргументированы и соответствуют поставленным задачам.

Актуальность темы диссертационного исследования

Мантийные перидотиты являются основным источником вещества для базальтовых и ультраосновных магм. В зонах субдукции мантия взаимодействует с субдуцирующей плитой и корой, а дегидратация и плавление слэба формируют флюиды и расплавы, вызывающие метасоматоз и частичное плавление перидотитов, что способствует образованию магм и приросту континентальной коры. В этих процессах важную роль играют металлы — Cu, Ni и элементы платиновой группы — концентрация которых в минералах и магмах определяет генезис магматических и гидротермальных руд.

Флюиды контролируют редокс-условия пород и расплавов, влияя на перераспределение халькофильных и сидерофильных элементов и их участие в рудообразовании. Поведение серы, халькофильных и сидерофильных элементов зависит от fO_2 среды, определяет их растворимость и концентрацию. Исследование метасоматических процессов, поведения рудных элементов в мантийных и магматических условиях, а также анализ ксенолитов, базальтов и включений позволяет понять механизмы формирования магматических и гидротермальных месторождений.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации

Диссертационная работа основана на материалах полевых исследований, проводимых автором на Камчатке в период с 2014 по 2025 годы, и на материалах экспериментальных исследований в ИЭМ РАН в этот же период. Все полевые и экспериментальные исследования проводились под руководством и при непосредственном участии М.Е. Зеленского. Данные были получены в рамках тем НИР ИЭМ РАН, а также при финансовой поддержке грантов РНФ № 16-17-10145 (М.Е. Зеленский — ответственный исполнитель), РНФ №16-17-10145 (продление) (М.Е. Зеленский — ответственный исполнитель) и РНФ № 21-17-00122 (М.Е. Зеленский — руководитель).

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных научных результатов подтверждается: значительным объемом фактического материала, отобранного во время полевых работ и исследованного с использованием современного высокоточного оборудования в сертифицированных аналитических лабораториях, многократным повторением экспериментов при высоких P-T параметрах, использованием комплексного подхода (природный материал + лабораторный эксперимент + численное моделирование для одного и того же объекта исследования), успешной публикацией основных положений диссертации в признанных международных высокорейтинговых научных журналах с независимым рецензированием.

Научная новизна результатов проведенных исследований

Экспериментально, термодинамически и на природных образцах показано, что Fe^{2+} в оливине способно восстанавливать воду до молекулярного водорода при P-T условиях вне области стабильности серпентина.

Установлено, что в верхней мантии никель может переходить из тугоплавкого оливина в легкоплавкие сульфиды, становясь доступным для последующего вовлечения в расплавы. Перераспределение Ni происходит при воздействии SiO_2 -обогащенных расплавов или H-O-S

флюидов, формирующих тальк-ортопироксеновый агрегат с Fe–Ni сульфидами и одновременным восстановлением флюида.

Впервые выявлено значительное содержание (около 1%) сульфатных минералов в мантийных ксенолитах; их образование связано с метасоматозом, вызванным флюидами и расплавами субдуцирующей плиты.

Впервые исследована несмешиваемость силикатных и сульфидных жидкостей в примитивных надсубдукционных магмах и её роль в концентрации металлов. Определены условия концентрирования и формы присутствия элементов платиновой группы и золота в несмешиваемых сульфидных расплавах, отделяющихся от примитивных надсубдукционных магм.

Выполнено комплексное исследование содержания ЭПГ и Au в перидотитах и базальтах Камчатки. Определены минералы-концентраторы благородных металлов, включая хромшпинель, сульфиды и собственные фазы ЭПГ, а также многокомпонентные Pt-Pd-Cu-Au-S-Se-Te расплавы.

Теоретическая и практическая значимость работы

Данные о концентрировании ЭПГ в сульфидных расплавах, условиях их кристаллизации и составе минералов платиновой группы важны для совершенствования методов обогащения руд. Зависимость содержания этих элементов в хромистой шпинели от окислительно-восстановительных условий может служить основой для поисковых критериев платинометального оруденения в хромититах. Присутствие продуктов взаимодействия системы «вода – оливин» (магнезиальный оливин с магнезиальным магнетитом) в ультраосновных породах, особенно в дунитовых кумюлятах расслоенных интрузий, может рассматриваться как индикатор сульфидной минерализации.

Ценность научных работ соискателя ученой степени

Научные работы М.Е. Зеленского решают актуальные научные проблемы геохимических процессов в зоне субдукции, включая процессы в мантийных перидотитах и надсубдукционных магмах (метасоматоз, сульфидная ликвидация, перераспределение элементов).

Научная специальность, которой соответствует диссертация

Результаты работы соответствуют паспорту научной специальности 1.6.4. «Минералогия. Кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых» по геолого-минералогическим наукам по следующим пунктам:

13. Изучение химического состава природного вещества в геологических и связанных с ними системах (земной коре, глубинных геосферах Земли, гидросфере, атмосфере, техносфере, внеземных объектах, живом веществе) и процессах, исследование состояния, форм нахождения, закономерностей распространенности и поведения (распределения, концентрирования, фракционирования) химических элементов и их изотопов.

14. Теория и методы оценки количеств, состояния и форм нахождения химических элементов и их изотопов в природе; разработка принципов и методов физико-химического моделирования геохимических систем и процессов, методов математической обработки геохимических данных и математического моделирования геохимических процессов.

18. Выявление, изучение и геологическая интерпретация ассоциаций химических элементов, характерных для продуктов различных геологических процессов, включая месторождения полезных ископаемых.

21. Теория и практика геохимических методов прогноза, поисков и оценки месторождений полезных ископаемых; геохимические исследования, сопровождающие разведку, разработку, обогащение и переработку полезных ископаемых.

22. Экологическая геохимия, геохимический мониторинг окружающей среды.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные научные результаты и материалы диссертации полно изложены в научных публикациях соискателя М.Е. Зеленского.

По результатам исследования автором опубликовано 16 работ, в том числе 16 статей, в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, из них 16 статей в зарубежных научных изданиях, индексируемых базами Scopus и WoS.

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (не менее 10):

1. M. Zelenski, V.S. Kamenetsky, N. Nekrylov, I.F. Chayka, V.D. Shcherbakov, A. Kontonikas-Charos, B.G. Pokrovsky, A.A. Korneeva (2024) Sulfide-sulfate metasomatism and nickel release in the suprasubduction mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 626, 118500.
2. A. Korneeva, V.S. Kamenetsky, N. Nekrylov, A. Kontonikas-Charos, M. Kamenetsky, D. Savelyev, M. Zelenski, S. Krasheninnikov (2023) A melt inclusion approach to reconstructing sulfur contents and sulfide saturation of primitive basaltic melts. *Lithos*, 436–437, 106956.
3. I.F. Chayka, V.S. Kamenetsky, K.N. Malitch, Y.R. Vasil'ev, M.E. Zelenski, A.B. Abersteiner, I.A. Kuzmin (2023) Behavior of critical metals in cumulates of alkaline ultramafic magmas in the Siberian large igneous province: Insights from melt inclusions in minerals. *Ore Geology Reviews*, 160, 105577.
4. M. Zelenski, A.V. Plyasunov, V.S. Kamenetsky, N. Nekrylov, A. Korneeva (2022) High-temperature water–olivine interaction and hydrogen liberation in the subarc mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 177, 47.
5. N. Nekrylov, V.S. Kamenetsky, D.P. Savelyev, N.V. Gorbach, A. Kontonikas-Charos, S.V. Paleskii, V.D. Shcherbakov, A.V. Kutyrev, O.L. Savelyeva, A.A. Korneeva, O.A. Kozmenko, M. Zelenski (2022) Platinum-group elements in Late Quaternary high-Mg basalts of eastern Kamchatka: Evidence for minor cryptic sulfide fractionation in primitive arc magmas. *Lithos*, 412, 106608.
6. M. Zelenski, V.S. Kamenetsky, N. Nekrylov, A. Kontonikas-Charos (2021) High Sulfur in Primitive Arc Magmas, Its Origin and Implications. *Minerals*, 12, 37.
7. M. Zelenski, A. Simakin, Yu. Taran, V.S. Kamenetsky, N. Malik (2021) Partitioning of elements between high-temperature, low-density aqueous fluid and silicate melt as derived from volcanic gas geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 295, 112–134.
8. A. Kutyrev, M. Zelenski, N. Nekrylov, D. Savelyev, A. Kontonikas-Charos, V.S. Kamenetsky (2021) Noble Metals in Arc Basaltic Magmas Worldwide: A Case Study of Modern and Pre-Historic Lavas of the Tolbachik Volcano, Kamchatka. *Frontiers in Earth Science*, 9, 1–16.
9. A.A. Korneeva, N. Nekrylov, V.S. Kamenetsky, M.V. Portnyagin, D.P. Savelyev, S.P. Krasheninnikov, A. Abersteiner, M.B. Kamenetsky, M.E. Zelenski, V.D. Shcherbakov, R.E. Botcharnikov (2020) Composition, crystallization conditions and genesis of sulfide-saturated parental melts of olivine-phyric rocks from Kamchatsky Mys (Kamchatka, Russia). *Lithos*, 370, 105657.
10. V.S. Kamenetsky, M. Zelenski (2020) Origin of noble-metal nuggets in sulfide-saturated arc magmas: A case study of olivine-hosted sulfide melt inclusions from the Tolbachik volcano (Kamchatka, Russia). *Geology*, 48, 620–624.
11. D.P. Savelyev, V.S. Kamenetsky, L.V. Danyushevsky, R.E. Botcharnikov, M.B. Kamenetsky, J.-W. Park, M.V. Portnyagin, P. Olin, S.P. Krasheninnikov, F. Haufl, M.E. Zelenski (2018) Immiscible sulfide melts in primitive oceanic magmas: Evidence and implications from picrite lavas (Eastern Kamchatka, Russia). *American Mineralogist*, 103, 886–898.

12. M. Zelenski, V.S. Kamenetsky, J.A. Mavrogenes, A.A. Gurenko, L.V. Danyushevsky (2018) Silicate-sulfide liquid immiscibility in modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka): Part I. Occurrence and compositions of sulfide melts. *Chemical Geology*, 478, 102-111.

13. V.S. Kamenetsky, M. Zelenski, A. Gurenko, M. Portnyagin, K. Ehrig, M. Kamenetsky, T. Churikova, S. Feig (2018) Reprint of Silicate-sulfide liquid immiscibility in modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka): Part II. Composition, liquidus assemblage and fractionation of the silicate melt. *Chemical Geology*, 478, 112-130.

14. M. Zelenski, V.S. Kamenetsky, N. Nekrylov, A. Abersteiner, K. Ehrig, D. Khanin (2018) Textural, morphological and compositional varieties of modern arc sulfides: A case study of the Tolbachik volcano, Kamchatka. *Lithos*, 318–319, 14-29.

15. M. Zelenski, V.S. Kamenetsky, J.A. Mavrogenes, L.V. Danyushevsky, D. Matveev, A.A. Gurenko (2017) Platinum-group elements and gold in sulfide melts from modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka). *Lithos*, 290–291, 172-188.

16. M. Zelenski, V.S. Kamenetsky, J. Hedenquist (2016) Gold recycling and enrichment beneath volcanoes: A case study of Tolbachik, Kamchatka. *Earth and Planetary Science Letters*, 437, 35-46.

Диссертация соответствует требованиям п.п. 9-14 раздела II Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. от 25.01.2024) и не содержит заимствованного материала без ссылки на авторов.

Первичная документация проверена и соответствует материалам, включенным в диссертацию.

Диссертационная работа Зеленского Михаила Евгеньевича «Редокс-условия как фактор рудоносности, метасоматоза и фракционирования элементов в мантии и надсубдукционных магмах» рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4. «Минералогия. Кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых».

Заключение принято на заседании Ученого совета Института экспериментальной минералогии Российской академии наук.

Присутствовало на заседании 13 чел. Результаты открытого голосования по вопросу о принятии заключения по диссертации М.Е. Зеленского: «за» - 13 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол №5 от 23 июня 2025 года.

Заключение подготовлено:

/  ученый секретарь ИЭМ РАН,
к.г.-м.н.



Т.Н. Ковальская