

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Зеленского Михаила Евгеньевича «Редокс-условия как фактор рудоносности, метасоматоза и фракционирования элементов в мантии и надсубдукционных магмах», представленной на соискание учёной степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4. – «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых»

Автореферат диссертации М.Е. Зеленского посвящён актуальной проблеме реконструкции магматических и метасоматических процессов в породах мантийного клина, а также изучению механизмов перераспределения и концентрирования халькофильных и сидерофильных элементов (включая ЭПГ) при участии серосодержащих флюидов. Актуальность темы диссертации не вызывает сомнения. Научную новизну этой работы определило то, что для обоснования важных петрологических закономерностей был использован комплекс данных экспериментального моделирования при высоких Р-Т параметрах, результаты термодинамических расчетов и данные изучения природных образцов. Среди наиболее значимых научных результатов, полученных соискателем, следует отметить следующие. (1) Показано, что при наличии редокс градиента между окисленной внешней средой и водосодержащем флюидным включением в Fe^{2+} -содержащем оливине вещество включения вступает в окислительно-восстановительную реакцию с оливином, с образованием и магнезиального магнетита и выносом водорода во вне. (2) Установлено, что под воздействием как богатых SiO_2 расплавов, так и Н-О-S флюидов никель способен перераспределяться из оливина в сульфидные фазы. (3) Изучена сульфатная минерализация гарцбургитовых ксенолитов, захваченных магмой вулкана Шивелуч, которая свидетельствует о метасоматической переработке пород мантийного клина субдукционными серосодержащими подвижными фазами. (4) Показана ключевая роль жидкостной несмесимости, возникающей в окисленных примитивных надсубдукционных магмах, в ранней (на этапе зарождения сульфидных капель) концентрации Cu, Ni, ЭПГ и Au. (5) Систематически исследованы формы нахождения и условия концентрирования ЭПГ и Au в сульфидных расплавах и силикатных магмах зоны субдукции. (6) Установлено, что хромшпинель в окисленных метасоматизированных мантийных породах является важным концентратором платиноидов Ir-группы.

Замечания касаются прежде всего интерпретации полученного материала. В автореферате неоднократно высказывается положение о том, что вода может выступать окислителем Fe^{2+} оливина до Fe^{3+} . Например, «...окислением Fe^{2+} оливина до Fe^{3+} с

образованием высокомагнезиального оливина, магнезиального магнетита и генерацией H_2 , что представляет собой важный редокс-механизм мантийного метасоматоза, определяющий поведение соединений серы и состав шпинелидов в надсубдукционной мантии...», «...вода способна выступать окислителем Fe^{2+} в оливине до Fe^{3+} -содержащих шпинелидов и генерации водорода...». Не могу согласиться с такой интерпретацией процесса редокс взаимодействия. Чтобы аргументировать свою точку зрения использую аналогию с механизмом контроля $f\text{O}_2$ в образце с использованием методики «двойной ампулы». В первом (природном) случае оливин проницаем для водорода, а во втором (экспериментальном) проницаема Pt ампула. Таким образом, фугитивность кислорода во включении может быть выражена как:

$$f(\text{O}_2)_{\text{вкл}} = f(\text{O}_2)_{\text{магма}} \times [f(\text{H}_2\text{O})_{\text{вкл}}/f(\text{H}_2\text{O})_{\text{магма}}]^2$$

где, вкл – включение; магма – среда окружающая оливин (магма, расплав, флюид и пр.). Из этой формулы следует, что способность водного флюида работать «окислителем» либо «восстановителем» (как и в буферной методике) будет определяться фугитивностью кислорода в среде, окружающей кристалл, а также соотношением фугитивностей воды во включении и в окружающей среде. Например, если $f(\text{H}_2\text{O})_{\text{вкл}} \ll f(\text{H}_2\text{O})_{\text{магмы}}$, то равновесная $f\text{O}_{2\text{вкл}} < f\text{O}_{2\text{магмы}}$. Это может создать условия для восстановления CO_2 во включении до CH_4 и графита. В отношении ремарки о том, что этот процесс «...представляет собой важный редокс-механизм мантийного метасоматоза, определяющий поведение соединений серы и состав шпинелидов в надсубдукционной мантии...», то вынужден привести классический аргумент из работы Frost и Ballhaus (1998). При $f\text{O}_2$ около FMQ равновесное отношение $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ во флюиде составляет 10^{-2} – 10^{-3} . Чтобы заметно поднять отношение $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ в перидотите, необходимо сначала прокачать через породу, а затем удалить из нее огромные объёмы H_2 .

Второе замечание касается заключения автора о том, что «...происхождение сульфидно-сульфатной ассоциации можно объяснить двумя гипотезами: (1) поступлением как окисленной, так и восстановленной серы со слэб-расплавом и/или флюидом; (2) *in situ* диспропорционированием S^{4+} (SO_2), при котором S^{6+} фиксируется в ангидрите, а S^{2-} – в сульфидах...», «...наблюдаемые фазовые ассоциации свидетельствуют в пользу первой гипотезы...».

Традиционно считается, что область эффективного осуществления реакции диспропорционирования $4\text{S}^{4+} \rightarrow 3\text{S}^{6+} + \text{S}^{2-}$ ограничена $T < 500^\circ\text{C}$ и низким давлением, следовательно, осуществляется в магматических газах и гидротермальных флюидах (Holland, 1965; Kusakabe et al., 2000; Rye, 2005; Farsang and Zajacz, 2025). При давлениях 2–

5 ГПа во флюидах с околонеutralным или щелочным pH равновесие в этой реакции сдвинуто вправо, а S^{4+} присутствует лишь в малых количествах. В кислых и богатых серой флюидах соединения S^{4+} стабильны до 2 ГПа (Liu and Ni, 2026). При 2–5 ГПа подвижность сульфатной серы в субдукционных флюидах высокая, а сульфидной очень низкая (концентрации H_2S , HS^- во флюиде малы). Таким образом, в мантийный клин должна в основном транспортироваться сульфатная сера, а *in situ* диспропорционирование S^{4+} в условиях мантийного клина становится практически невозможным, поскольку эта реакция полностью завершилась уже в слэбе.

Сделанные замечания носят дискуссионный характер и не ставят под сомнение высокое качество диссертационной работы в целом. Структура автореферата соответствует требованиям, предъявляемым к работам данного уровня. В целом, диссертационная работа М.Е. Зеленского соответствует критериям, установленным в пп. 9-11, 13 и 14 Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842 «Положение о присуждении ученых степеней...», а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора наук по специальности 1.6.4 «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых».

5 октября 2026 года



А.Г. Сокол

Сокол Александр Григорьевич
Доктор геолого-минералогических наук,
Главный научный сотрудник

Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева
630090 г. Новосибирск -90, пр. академика Коптюга, 3, ИГМ СО РАН

<https://www.igm.nsc.ru>

e-mail: sokola@igm.nsc.ru

Телефон: +7-913-959-59-74



ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ
НЕПОПРОИЗВОДИТЕЛЬ
ТУРКО К.В.
05.10 2026

Я, Сокол Александр Григорьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

5 октября 2026 года



(подпись)

Подпись Сокола А.Г. заверяю (указывается должность и ФИО лица, заверившего отзыв и ставится печать организации).