#### МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта (ИФЗ РАН) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН) Петрофизическая комиссия Межведомственного Петрографического комитета при Отделении Наук о Земле РАН

# ДВАДЦАТЬ ТРЕТЬЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ

Москва, 26 - 28 сентября, Борок, 30 сентября 2022 г.

# МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Москва 2022

#### УДК 550.3:550.4:550.8:552:11 ББК26.0 Ф50

Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Двадцать третья международная конференция. Москва, 26 – 28 сентября, Борок, 30 сентября 2022 г. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2022. – 328 с.

ISBN 978-5-88918-069-2 / ISSN 2686-8938

Представлены материалы докладов, оглашенных на заседаниях тематических секций:

Физико-химические свойства пород и расплавов при высоких давлениях и температурах;

Современные методы экспериментальных исследований; Петрофизика и ее роль в интерпретации геофизических данных и поиске месторождений полезных ископаемых;

Региональные геолого-геофизические, петрофизические и геоэкологические исследования, исследования в целях освоения Арктики;

Петролого-геофизические подходы построения моделей состава и строения планетарных тел и космохимия;

Петрофизические и геодинамические исследования в интересах экологии.

Материалы докладов опубликованы в авторской редакции.

ISBN 978-5-88918-069-2 ISSN 2686-8938

© ИГЕМ РАН, 2022

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytic Chemistry of RAS Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of RAS Petrophysical Commission of Petrographical Committee of RAS

# THE TWENTY- THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE PHYSICAL-CHEMICAL AND PETROPHYSICAL RESEARCHES IN THE EARTH'S SCIENCES

Moscow, September 26 – 28, Borok, September 30, 2022

# **PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE**

Moscow 2022

#### УДК 550.3:550.4:550.8:552:11 ББК26.0 Ф50

Physical-chemical and petrophysical researches in the Earth's sciences. Twenty-third international conference. Moscow, September 26 - 28, Borok, September 30, 2022. Proceeding of the conference. M.: IGEM RAS, 2022. - 328 p.

ISBN 978-5-88918-069-2 / ISSN 2686-8938

The book contains the proceedings of the reports presented at the thematic sessions of the conference:

Physical-chemical properties of rocks and melts under high pressures and temperatures;

Modern techniques of experimental studies;

Petrophysics and its role in interpretation of geophysical data and prospecting of mineral deposits;

Regional geological-geophysical, petrophysical and geoecological studies, research for the Arctic exploration;

Petrological-geophysical approaches to modelling of the composition and structure of planetary objects and cosmochemistry; Petrophysical and geodynamic studies for ecology.

Proceedings of the reports are published in author's edition.

ISBN 978-5-88918-069-2 ISSN 2686-8938

© ИГЕМ РАН, 2022

# ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ И ПРОГРАМНЫЙ КОМИТЕТ

#### Председатели комитета

Лебедев Евгений Борисович (ГЕОХИ РАН) Анисимов Сергей Васильевич (ГО Борок ИФЗ РАН) Баюк Ирина Олеговна (ИФЗ РАН) Жариков Андрей Виленович (ИГЕМ РАН) Персиков Эдуард Сергеевич (ИЭМ РАН)

#### Члены комитета

Дмитриев Эльдар Михайлович (ГО Борок, ИФЗ РАН) Краснова Мария Александровна (ИФЗ РАН) Кронрод Виктор Александрович (ГЕОХИ РАН) Кронрод Екатерина Викторовна (ГЕОХИ РАН) Кусков Олег Львович (ГЕОХИ РАН) Ладыгин Владимир Михайлович (МГУ) Лобанов Константин Валентинович (ИГЕМ РАН) Минаев Василий Александрович (ИГЕМ РАН) Михайлова Алла Владимировна (ГЕОХИ РАН) Редькин Александр Федорович (ИЭМ РАН) Чижова Ирина Александровна (ИГЕМ РАН) Цельмович Владимир Анатольевич (ГО Борок, ИФЗ РАН)

#### Консультативный комитет

Горбацевич Феликс Феликсович (ГИ КФ РАН) Литвин Юрий Андреевич (ИЭМ РАН) Павленкова Нинель Ивановна (ИФЗ РАН) Пэк Александр Арнольдович (ИГЕМ РАН) Керн Хартмут (Кильский университет, Германия)

# СОДЕРЖАНИЕ

Агаркова М.А., Глазнев В.Н., Жаворонкин В.И.	
ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АРХЕЙСКИХ И РИФЕЙСКИХ	
ПОРОД В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА И	
БАРЕНЦЕВОМОРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (П-ОВ СРЕДНИЙ)	13
Алферьева Я.О., Граменицкий Е.Н., Микшин А.В., Щекина Т.И.	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФТОРСОДЕРЖАЩЕГО ГРАНИТНОГО	
РАСПЛАВА И КАЛЬЦИТА ПРИ 750 <sup>0</sup> С И 1 КБАР	17
Баренбаум А.А. ОБЪЯСНЕНИЕ МЕХАНИЗМА	
СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ	
ГАЛАКТИЧЕСКОИ МОДЕЛИ	20
Батугин А.С., Кобылкин А.С., Мусина В.Р., Шерматова С.С.,	
Хотченков Е.В., Емельянов С.В., Диваков Д.В. ЭФФЕКТ	
	26
	20
ЮРЯХСКОГО ГОРИЗОНТА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ	28
Боева Н.М., Мельников Ф.П., Лучнева Н.В. КАРТИРОВАНИЕ	
АСКАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЕНТОНИТОВЫХ ГЛИН ПО	
РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА	32
Борисов А.А., Борисовский С.Е. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТИТАНА	
МЕЖДУ ЦИРКОНОМ И РАСПЛАВОМ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	36
Борисов М.В., Бычков Д.А., Шваров Ю.В., Лубкова Т.Н.	
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЕРЕОТЛОЖЕНИЯ	
КОМПОНЕНТОВ Pb-Zn РУДНЫХ ЖИЛ НА КАРБОНАТНОМ	
БАРЬЕРЕ В ПОСТГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ	39
Бурмистров А.А., Земскова М.И. О ВОЗМОЖНОСТИ	
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ	
	40
	43
изатуллин д.м., Егоров п.А., Леонова А.М. шарычев и.В. Фильтрационно Емиостные сройства	
	17
	47
ΡΕЙЛИΤΑ И ΕΓΟ ΜΟΡΦΟΠΟΓИЯ Β ИΜΠΑΚΤИΤΑΧ	<i>1</i> 9
Григорьева Е. И., Апферьева Я. О. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ	75
МОЛЕПИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ОТНОШЕНИЙ В	
ΓΑΠΠΟΓΡΑΗΝΤΗΟЙ ΓΠΥΚΟΚΟ ΠΙΦΦΕΡΕΗΙ ΙΝΡΟΒΔΗΗΟЙ	
CHOTEMETIA CONCELITATION OF DIMINICION OF MACCUBA	

(ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)	53
Гуляева У.А., Кузьмина Т.Г., Ромашова Т.В., Ермаков В.В.,	
Данилова В.Н., Тютиков С.Ф., Дегтярев А.П. ОПРЕДЕЛЕНИЕ	
КАЛЬЦИЯ И СТРОНЦИЯ В ПОЧВАХ	57
Гусев А.В., Хасанов Р.Р., Мен Чжиго, Пин Цзиньсонг РЕГОЛИТ.	
ВОЗРАСТ ГРУНТА И ВОЛА В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ НА	
ВИЛИМОЙ СТОРОНЕ ЛУНЫ	61
<b>Дорофеева В.А., Базилевский А.Т.</b> ТЕРМОЛИНАМИЧЕСКАЯ	•
МОЛЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ГЕМАТИТА В УСЛОВИЯХ	
	65
Лунаева А.Н., Кронрод В.А., Кусков О.П. ВЛИЯНИЕ	00
ΠΙΦΦΕΡΕΗΙ ΙΙΙΡΟΒΑΗΗΟΓΟ ΤΙΙΤΑΗΑ	69
	00
$\Pi_{\text{сонова}} \Delta M$ Белоболодов Л Е Еголов H $\Delta$ Селгеев Л С	
	71
	14
двяур п.и., Пономарев А.В., Фокин И.В., Леонова А.М., пеформирование сранитоилов зонныхойна варна	
	=0
	78
Егоров н.А., Гизатуллин Д.М., Леонова А.М., Шарычев И.В.,	
ПИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ЛЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТНЫХ	
СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ЛАБОРАТОРНЫМ	
РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ	82
Ермаков. В.В., Тютиков С.Ф., Данилова В.Н., Дегтярев А.П.,	
Голубев Ф.В., Сафонов В.А., Гуляева У.А. РАЗВИТИЕ	
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ БИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ	
ИНДИКАЦИИ МИКРОЭЛЕМЕНТОЗОВ	83
Жаркова Е.В., Луканин О.А. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ ЛЕТУЧЕСТИ КИСЛОРОДА	
СТЕКОЛ БАЗАЛЬТОВЫХ ЛАВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНОВ	
(ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ)	87
Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ	-
ТРЕЩИННОЙ ПОРИСТОСТИ НА ПЕРЕХОД ОТ УПРУГИХ	
ДЕФОРМАЦИЙ К РАЗРУШЕНИЮ	92
Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. СОПОСТАВЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО	
И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОДХОДОВ ПРИ ОЦЕНКЕ	
СЖИМАЕМОСТИ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА	96
Иванкина Т.И. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИЙ	
ТЕКСТУРНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ МЕТЕОРИТОВ	101
Ипатов С.И. ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ ТЕЛ.	
ВЫБРОШЕННЫХ С ЗЕМЛИ И ЛУНЫ, С ПЛАНЕТАМИ ЗЕМНОЙ	

ГРУППЫ И ЛУНОЙ	104
Ипатов С.И.МИГРАЦИЯ ЛЕДЯНЫХ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЕЙ К	
ВНУТРЕННИМ ПЛАНЕТАМ В СИСТЕМЕ ПРОКСИМА ЦЕНТАВРА	108
Казначеев П.А., Кох В.В., Краюшкин Д.В., Майбук ЗЮ.Я.,	
Пономарев А.В. НОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ С ДАТЧИКОВ	
АКУСТИЧЕСКОИ ЭМИССИИ	112
Казначеев П.А., Майбук ЗЮ.Я., Пономарев А.В.,	
	116
	110
	110
	113
ЛИНАМИЧЕСКОМ ВОЗЛЕЙСТВИИ	123
Красилова В.А., Эпштейн С.А., Козырев М.М., Андреева Ю.Е.	120
	107
	121
	131
	101
НА ТЕПЛОПЕРЕНОС В КАМЕННО-ЛЕЛЯНОЙ МАНТИИ ТИТАНА	135
Кронрод Е.В., Кронрод В.А., Кусков О.Л. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ	
МОДЕЛЬ ЛУНЫ, СОГЛАСОВАННАЯ С НАЛИЧИЕМ ЗОНЫ	
ПОНИЖЕННОЙ ВЯЗКОСТИ НА ГРАНИЦЕ МАНТИЯ-ЯДРО	139
Кузнецов И.А., Захаров А.В., Дольников Г.Г., Ляш А.Н,	
Шашкова И.А., Морозова Т.И., Карташева А.А., Шеховцова А.,	
Абделаал М.Э. ДИНАМИКА И МЕТОДЫ ИСЛЕДОВАНИЯ ЛУННЫХ	
ЭКЗОСФЕРНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ	143
Куюнко Н.С. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАМОРФИЗМА УГЛИСТЫХ	
ХОНДРИТОВ МЕТОДОМ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ	146
<b>Лаврентьева З.А., Люль А.Ю.</b> РАСПРЕДЕЛЕНИЕ	
МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА СРЕДИ РАЗМЕРНЫХ	
ФРАКЦИИ В ЭНСТАТИТОВОМ ХОНДРИТЕ ПИЛИСТВЕРЕ EL6	150
Лобанов К.В., Чичеров М.В., Шаров Н.В. ИСТОРИЯ	
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ РУССКОГО СЕВЕРА	154
макеев А.Б., Крупская В.В., Морозов И.А., Новикова А.С.	
	100
	160

Макеев А.Б., Ларионова Ю.О. НОВЫЕ Rb-Sr ИЗОТОПНЫЕ	
ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ ПИЖЕМСКОГО ТИТАН-ЦИРКОНИЕВОГО	
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТИМАНА	164
Мальковский В.И. ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ НОВЫХ	
ΤΕΚΤΟΗΝΥΕCΚΝΧ ΡΑ3ΠΟΜΟΒ ΗΑ ΜΝΓΡΑΙΙΝΙΟ	
ΡΑΛΙΟΗΥΚΠΙΛΟΒ ΙΑ ΠΟΛ3ΕΜΗΟΓΟ ΧΡΑΗΙΠΙΑ	
ВЫСОКОРАЛИОАКТИВНЫХ ОТХОЛОВ	168
	100
	172
ОТРАБОТКА МЕТОЛИКИ ПРОВЕЛЕНИЯ ИССПЕЛОВАНИЙ	172
	470
	176
муналоаева м.н., Фокин и.в., Баюк и.О., Гордеев н.А.,	
Багдасарян Т.Э. АНАЛИЗ УПРУГИХ МОДУЛЕИ И	
МИКРОСТРУКТУРЫ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД ЗАПАДНОЙ	470
	178
муравина О.М., Овечкина А.С., Сотников А.А. ОЦЕНКА	
	404
	181
Никитин С.М., Скрипник А.Я. РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОЦЕССОВ	
РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ОБЫКНОВЕННЫХ ХОНДРИТОВ ПО	
МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИМ ДАННЫМ	184
Николаев Г.С. ВЛИЯНИЕ СУЛЬФИДНОЙ СЕРЫ НА	
КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ХРОМШПИНЕЛИДА В БАЗАЛЬТАХ	
НОРМАЛЬНОИ ЩЕЛОЧНОСТИ	188
Никулин И.И. АТОМАРНЫЙ АНАЛИЗ ОЛИВИН-СОДЕРЖАЩИХ	
ГАББРО-ДОЛЕРИТОВ ЮЖНО-НОРИЛЬСКОГО ИНТРУЗИВА ПО	
ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ 3D-ТОМОГРАФИИ	192
Новиков Е.А., Клементьев Е.А. ВЛИЯНИЕ СОЧЕТАНИЯ	
ЦИКЛИЧЕСКОГО И СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЙ	
ДОСТОВЕРНОСТЬ ОЦЕНКИ ЕГО УСТОЙЧИВОСТИ	
МЕТОДОМ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ	
ЭМИССИИ	196
Патонин А.В, Шихова Н.М., Смирнов В.Б., Пономарёв А.В.	
ОЦЕНКА АМПЛИТУДНОГО ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛОВ	
УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ	
ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	200
Пономарев А.В., Смирнов В.Б., Фокин И.В., Патонин А.В.,	
Шаталина Е.И., Строганова С.М., Шихова Н.М.,Сергеев Д.С.,	

Леонова А.М., Егоров Н.А. ИЗМЕНЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОДГОТОВКЕ РАЗРУШЕНИЯ	204
Пономарева Т.А., Кушманова Е.В. ИСТОЧНИКИ	
ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ СЕВЕРО-	
ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ НЕРКАЮСКОГО КОМПЛЕКСА	
(ПРИПОЛЯНЫЙ УРАЛ)	210
Пономаренко И.А., Муравина О.М. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА	
КАЧЕСТВА ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХМОДЕЛЕЙ. ПОЛУЧЕННЫХ	
ΜΕΤΟΔΟΜ ΓΡΥΠΠΟΒΟΓΟ ΥΥΕΤΑ ΑΡΓΥΜΕΗΤΟΒ	212
Прокофьев В.Ю., Бэнкс Д.А., Лобанов К.В., Селектор С.Л.,	
Миличко В.А., Боровиков А.А., Чичеров М.В. ПЕРВАЯ	
НАХОДКА Au-Ag НАНОЧАСТИЦ В ПЛОТНОМ УГЛЕКИСЛОТНОМ	
ФЛЮИДЕ СРЕДНЕЙ КОРЫ	216
Редькин А.Ф., Котова Н.П. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И	
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТВОРЕНИЯ	
ШЕЕЛИТА В НАДКРИТИЧЕСКИХ ВОДНЫХ ХЛОРИДНЫХ	
PACTBOPAX	220
Родкин М.В., Пунанова С.А., Прохорова Т.В.,	
Рукавишникова Т.А. СВИДЕТЕЛЬСТВА СКВОЗЬКОРОВЫХ	
ФЛЮИДНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ	
МАТЕРИАЛОВ И БАЗЫ ДАННЫХ МИКРОЭЛЕМЕТНОГО	
СОСТАВА ФЛЮИДОВ	224
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В.,	
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б.,	
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ	
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ	
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК;	
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ	228
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ	228
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO-	228
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ЛАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ	228
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Шекина Т.И., Зиновьева Н.Г., Алферьева Я.О.,	228 233
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Щекина Т.И., Зиновьева Н.Г., Алферьева Я.О., Хвостиков В.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ	228 233
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Щекина Т.И., Зиновьева Н.Г., Алферьева Я.О., Хвостиков В.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ ДВУМЯ	228 233
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Щекина Т.И., Зиновьева Н.Г., Алферьева Я.О., Хвостиков В.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕСМЕШИВАЮЩИМИСЯ РАСПЛАВАМИ ПРИ ВЫСОКИХ	228 233
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Щекина Т.И., Зиновьева Н.Г., Алферьева Я.О., Хвостиков В.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕСМЕШИВАЮЩИМИСЯ РАСПЛАВАМИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ) Сафрамар А.Н. НОРАЯ ТЕОРИЯ 2КСПЕРИВНЫХ И	228 233 235
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Щекина Т.И., Зиновьева Н.Г., Алферьева Я.О., Хвостиков В.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕСМЕШИВАЮЩИМИСЯ РАСПЛАВАМИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ) Сафронов А.Н. НОВАЯ ТЕОРИЯ ЭКСПЛОЗИВНЫХ И ЭФФУЗИВНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ	228 233 235 238
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Щекина Т.И., Зиновьева Н.Г., Алферьева Я.О., Хвостиков В.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕСМЕШИВАЮЩИМИСЯ РАСПЛАВАМИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ) Сафронов А.Н. НОВАЯ ТЕОРИЯ ЭКСПЛОЗИВНЫХ И ЭФФУЗИВНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ Симакин А.Г. Биндеман И.Н. КОНТАКТ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ	228 233 235 238
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Щекина Т.И., Зиновьева Н.Г., Алферьева Я.О., Хвостиков В.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕСМЕШИВАЮЩИМИСЯ РАСПЛАВАМИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ) Сафронов А.Н. НОВАЯ ТЕОРИЯ ЭКСПЛОЗИВНЫХ И ЭФФУЗИВНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ Симакин А.Г., Биндеман И.Н. КОНТАКТ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И РИОПИТОВОЙ МАГМЫ НА ВУЛКАНЕ КРАФЛА	228 233 235 238
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Щекина Т.И., Зиновьева Н.Г., Алферьева Я.О., Хвостиков В.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕСМЕШИВАЮЩИМИСЯ РАСПЛАВАМИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ) Сафронов А.Н. НОВАЯ ТЕОРИЯ ЭКСПЛОЗИВНЫХ И ЭФФУЗИВНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ СИСТЕМЫ И РИОЛИТОВОЙ МАГМЫ НА ВУЛКАНЕ КРАФЛА (ИСПАНЛИЯ) ПО ЛАННЫМ БУРЕНИЯ IDDP-1. ЧИСЛЕННОГО	228 233 235 238
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Щекина Т.И., Зиновьева Н.Г., Алферьева Я.О., Хвостиков В.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕСМЕШИВАЮЩИМИСЯ РАСПЛАВАМИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ) Сафронов А.Н. НОВАЯ ТЕОРИЯ ЭКСПЛОЗИВНЫХ И ЭФФУЗИВНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ СИСТЕМЫ И РИОЛИТОВОЙ МАГМЫ НА ВУЛКАНЕ КРАФЛА (ИСЛАНДИЯ) ПО ДАННЫМ БУРЕНИЯ IDDP-1, ЧИСЛЕННОГО	228 233 235 238
Романько А.Е., Имамвердиев Н.А., Викентьев И.В., Дубенский А.С., Ермолаев Б.В, Хейдари М., Рашиди Б., Киселев А.А., Савичев А.Т., Полещук А.В. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ Русак А.А., Луканин О.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO <sub>2</sub> -MGO- FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Щекина Т.И., Зиновьева Н.Г., Алферьева Я.О., Хвостиков В.А. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕСМЕШИВАЮЩИМИСЯ РАСПЛАВАМИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ) Сафронов А.Н. НОВАЯ ТЕОРИЯ ЭКСПЛОЗИВНЫХ И ЭФФУЗИВНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ СИМАКИН А.Г., БИНДЕМАН И.Н. КОНТАКТ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И РИОЛИТОВОЙ МАГМЫ НА ВУЛКАНЕ КРАФЛА (ИСЛАНДИЯ) ПО ДАННЫМ БУРЕНИЯ $\delta$ D Симакин А.Г. Левятова В.Н. Бондаренко Г.В. ЭФФЕКТ СВЕРХ	228 233 235 238 240

НИЗКОЙ ЛЕТУЧЕСТИ ВОДОРОДА	243
Славина Л.Б., Кучай М.С. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ	
ПАРАМЕТРА Vp/Vs В ОБЛАСТИ СЕВЕРО-ЗАПАЛНОЙ ГРАНИЦЫ	
ПОГРУЖАЮЩЕЙСЯ ПОД КАМЧАТКУ ТИХООКЕАНСКОЙ ПЛИТЫ	
(Р-Н СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ)	246
Слукин А.Д., Боева Н.М., Жегалло Е.А., Зайцева́ Л.В,	
Шипилова Е.С., Макарова М.А., Мельников Ф.П. ФОРМЫ	
РАСТВОРЕНИЯ КВАРЦА И КАОЛИНИТА, КАК ТИПОМОРФНЫЕ	
ПРИЗНАКИ ПРОДОЛЖЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛАТЕРИТИЗАЦИИ В	
	250
	250
ΝΟΕΠΟΙΙΝΙ ΟΒ, ΡΑΟΙ ΙΙΑΟΟΒ Η ΨΙΙΟΝΙΔΟΒ Β ΟΙΙΝΒΗΠΕ ΥΠΙ ΤΡΑΜΑΦΙΙΤΟΡ ΚΑΚ ΟΡΙΑΠΕΤΕΠΙ ΟΤΡΟ ΚΟΡΟΡΟΪΑ	
	0E 4
$\mathbf{C}_{\mathbf{D}} = \mathbf{C}_{\mathbf{D}} = $	254
ЮЖНОГО УРАЛА: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ МИНЕРАЛОГО-	
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ	259
Софронова С.М.,Богуславский А.Е. МЕТОД ОЧИСТКИ	
УРАНСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД	262
Стрельцова Н.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ МЕТЕОРНОГО	
ФЛЮИДА; СОСТАВ МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИИ	266
Суетнова Е.И. ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА	
ЭВОЛЮЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОСАДКОВ ПРИ ЭРРОЗИИ	
МОРСКОГО ДНА НА ИЗМЕНЕНИЯ ПОДДОННЫХ ГИДРАТНЫХ	
СКОПЛЕНИИ	268
Титков С.В., Смирнов А.А. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОРИЧНЕВО-ЖЕЛТЫХ АЛМАЗОВ	271
Федькин В.В. ПРОЦЕССЫ РАЗВИТИЯ КОНТРАСТНЫХ	
ЭКЛОГИТОВЫХ АССОЦИАЦИИ В МАКСЮТОВСКОМ ЭКЛОГИТ-	
	275
Федяева М. А., Каримова О. В., Чареев Д.А.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ	
	279
ΠΕΡΕΡΔΕΛΤΚΙΛ ΥΓΠΕΙΆ ΗΔ ΟΚΡΥΧΔΙΟΠΙΙΥΙΟ ΟΡΕΠΥ	281
	201
	201
	∠04
	200
	200

АНТРОПОГЕННОГО И КОСМОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И	
ИХ ПОДОБИЕ	292
<b>Циркунова В. Д., Уланова А.С.</b> ОСОБЕННОСТИ	
СТРУКТУРЫ Nd-ПИРОХЛОРОВЫХ КЕРАМИК	296
Чевычелов В.Ю. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ Та И Nb B СИСТЕМАХ Та-	
Nb МИНЕРАЛЫ – ГРАНИТОИДНЫЕ РАСПЛАВЫ (ПО	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ)	300
Чижова И.А., Ханчук А.И., Гореликова Н.В., Раткин В.В.,	
Шелястина Е.В. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОИ	
ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ	
РУДОНОСНЫХ КОМПЛЕКСОВ	304
Чирков Е.Б. МЕТААЛГОРИТМИЧЕСКИИ АНАЛИЗ МЕТОДОВ	
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА	309
Шихова Н.М., Смирнов В.Б., Пономарёв А.В., Патонин А.В.	
ВАРИАЦИИ НАПРАВЛЕНИИ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗЛОМОВ ПРИ	
ИСПЫТАНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНОЙ ПОРОДЫ	313
Шорников С.И. ВОЛЛАСТОНИТ: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ	
СВОЙСТВА КОНДЕНСИРОВАННОЙ И ГАЗОВОЙ ФАЗ	316
Шорников С.И., Яковлев О.И. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ	
ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ РАСПЛАВОВ CAIs (ТИПЫ А И В)	
ΜΕΤΕΟΡИΤΑ ΕΦΡΕΜΟΒΚΑ	320
Щербаков И.П., Мамалимов Р.И., Пономарёв А.В.	
САМООРГАНИЗАЦИЯ "ЗАРОДЫШЕВЫХ" ТРЕЩИН ПРИ	
РАЗРУШЕНИИ КВАРЦА	324

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АРХЕЙСКИХ И РИФЕЙСКИХ ПОРОД В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА И БАРЕНЦЕВОМОРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (П-ОВ СРЕДНИЙ) <sup>1</sup><u>Агаркова М.А.</u>, <sup>1,2</sup>Глазнев В.Н., <sup>1</sup>Жаворонкин В.И. <sup>1</sup>Воронежский государственный университет (ВГУ), Воронеж <sup>2</sup>Геологический институт КНЦ РАН (ГИ КНЦ РАН), Апатиты masha\_agarkova03@mail.ru

Рассматриваются результаты комплексных петрофизических исследований керна пород скважины П-1, пройденной на перешейке между полуостровами Средний и Рыбачий (северо-запад Мурманской обл.). Впервые выполнены лабораторные измерения теплопроводности образцов рифейских терригенных и архейских кристаллических пород, также дана оценка их теплогенерации.

Глубина скважины П-1 составляет 5200 м, из которых верхние 1090 м сложены терригенными породами рифея, а ниже залегают архейские граниты, гранитогнейсы, сиениты, диориты и более молодые силлы габброидов [Сорохтин и др., 2022]. Комплекс исследований включал определение плотности, скорости продольных и поперечных упругих волн. Выполнено определение теплопроводности и теплогенерации пород. Петрофизические характеристики исследованы неоднородно: наиболее полно изучена плотность – 95 образцов, а наименее полно теплофизические свойства – 32 образца. При этом для 19 образцов выполнено совместное определение всех характеристик.

Анализ данных о скорости продольных упругих волн и плотности изученных образцов корреляция показал, что между для указанными параметрами практически отсутствует (рис. 1). породы характеризуются Терригенные средним значением кг/м<sup>3</sup>, что сопоставимо с плотности около 2690 плотностью архейских гранитоидов. По величине скорости упругих волн гранитоиды в среднем имеют несколько большие значения, чем терригенные породы, для которых средняя скорость равна 4790 м/с.

Данные совместных определений плотности и теплопроводности для изученных образцов керна показывают значимые различия для терригенных и кристаллических пород (рис. 2). Терригенный комплекс имеет большие значения теплопроводности (около 2,3 Вт/м·К) и более широкий диапазон вариаций, что объясняется большей пористостью рифейских образований [Сорохтин и др., 2022]. Для образцов архейских пород отмечается некоторое уменьшение теплопроводности при увеличении их плотности, что не типично для аналогичных пород северо-востока Балтийского щита [Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2004]. Природа этого явления требует

13

более детального минералогического исследования образцов высокоплотных пород.



Рис. 1. Корреляция плотности и скорости распространения продольных волн



Рис. 2. Корреляция плотности и теплопроводности пород

По данным о концентрации радиогенных элементов в образцах керна пород, были рассчитаны величины их теплогенерации. Корреляция плотности и теплогенерации пород, приведённая на рис. 3, демонстрирует значимые отличия терригенных образований рифея — среднее значение теплогенерации 1,75 мкВт/м<sup>3</sup>, от архейских пород, для которых среднее значение составляет 0,3 мкВт/м<sup>3</sup>. Полученные величины теплогенерации для архейских пород согласуются с результатами определений для аналогичных пород Балтийского щита и фундамента Восточно-Европейского кратона [Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2004; Глазнев и др., 2021; Kremenetsky et al., 1989].



Рис. 3. Корреляция плотности и теплогенерации пород

Трёхмерная диаграмма распределения плотности, скорости продольных волн и теплогенерации пород, представленная на рис. 4, наглядно отражает дифференциацию комплексов верхней коры в зоне перехода от Балтийского щита к Баренцевоморской платформе.



Рис. 4. Сводная 3D диаграмма петрофизических характеристик пород Полученные результаты дают возможность использовать обобщённые петрофизические характеристики для комплексной интерпретации геофизических полей, развитой в работах [Глазнев, 2003; Минц и др., 2018; Buyanov et al., 1995; Mints et al., 2020].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-05-00190).

#### Литература

1. Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии / Апатиты, «КаэМ», 2003. 252 с. 2. Глазнев В.Н., Кукконен И.Т., Раевский А.Б., Ёкинен Я. Новые данные о тепловом потоке в центральной части Кольского полуострова // Доклады РАН. 2004. Т. 396. № 1. С. 102-104.

3. Глазнев В.Н., Муравина О.М., Минц М.В., Чернышова Д.М. Теплогенерация пород фундамента центральной части Восточно-Европейского кратона // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2021. №3. С. 60–78.

4. Минц М.В., Соколова Е.Ю., Варданянц И.Л. и др. Объемная модель глубинного строения Свекофеннского аккреционного орогена по данным МОВ-ОГТ, МТЗ и плотностного моделирования // Труды Карельского научного центра РАН, 2018, № 2. С. 34-61.

5. Сорохтин Н.О., Козлов Н.Е., Глазнев В.Н., Куликов Н.В., Чикирев И.В., Мартынов Е.В., Марчук Т.С. Архей и неопротерозой полуостровов Рыбачий и Средний (Балтийский щит): геология, геодинамика, нефтегазоносность и алмазоносность / СПб.: Наука. 2022. (В печати).

6. Buyanov A.F., Glaznev V.N., Mitrofanov F.P., Raevsky A.B. Threedimensional modelling of the Lapland Granulite Belt and adjacent structures of the Baltic Shield from geophysical data // Norges Geologiske Undersokelse, 1995. Special Publ. v.7. p. 167-178.

7. Kremenetsky A.A., Milanovsky S.Y., Ovchinnikov L.N. A heat generation model for continental crust based on deep drilling in the Baltic Shield // Tectonophysics. 1989. V. 159. № 3-4. P. 231-246.

8. Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M., Sokolova E.Yu. 3D model of Svecofennian Accretionary Orogen and Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modelling: Geodynamic speculations // Geoscience Frontiers. 2020. V. 11. № 3. P. 999-1023.

PETROPHYSICAL PROPERTIES OF ARCHEAN AND RIPHEAN ROCKS IN THE ARTICULATION ZONE OF THE BALTIC SHIELD AND THE BARENTS SEA PLATFORM (SREDNIY PENINSULA) <sup>1</sup><u>Agarkova M.A.,</u> <sup>1,2</sup>Glaznev V.N., <sup>1</sup>Zhavoronkin V.I. <sup>1</sup>Voronezh state University (VSU), Voronezh <sup>2</sup>Geological Institute KSC RAS (GI KSC RAS), Apatity

masha\_agarkova03@mail.ru

The results of petrophysical studies of the rocks of the P-1 well, located on the isthmus between the Sredny and Rybachy peninsulas (north-west of the Murmansk region), are considered. The analysis of the relationships between the petrophysical characteristics of the Riphean and Archean rocks is given.

#### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФТОРСОДЕРЖАЩЕГО ГРАНИТНОГО РАСПЛАВА И КАЛЬЦИТА ПРИ 750<sup>0</sup>С И 1 КБАР <u>Алферьева Я.О.</u>, Граменицкий Е.Н., Микшин А.В., Щекина Т.И. Геологический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, YanaAlf@bk.ru

В ходе кристаллизационной дифференциации магматических расплавов в остаточной жидкости накапливаются компоненты, которые не входят в структуры породообразующих минералов. В кварцнормативных системах числу таких К несовместимых компонентов относятся многие редкие металлы, редкоземельные элементы и некоторые летучие. Продуктом кристаллизации таких остаточных расплавов являются, например, топазсодержащие альбит-амазонитовые граниты. Возможны условия, в которых богатые несовместимыми компонентами силикатные расплавы контактируют с вмещающими карбонатными породами.

Данная работа направлена на экспериментальное моделирование диффузионного контактово-реакционного взаимодействия глубоко дифференцированного богатого фтором кварцнормативного силикатного расплава и кальцита и определение закономерностей образования фазовых ассоциаций в колонке замещения.

В качестве исходных веществ использовался химический реактив CaCO<sub>3</sub> как источник карбонатного вещества и смесь химических реактивов SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, KalSi<sub>3</sub>O8, AlF<sub>3</sub>, LiF, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, воспроизводящая валовый состав природных глубокодифференцированных кварцнормативных расплавов. В силикатную часть исходной навески некоторых опытов добавлялись WO<sub>3</sub>, MoO<sub>3</sub> по 1 мас.% каждого в пересчете на чистый металл.

В одну часть платиновой ампулы загружалась тщательно перетертая силикатная смесь, во вторую – кальцит. В ампулу добавлялась вода в количестве 10% от массы всей навески. Ампула заваривалась. Опыты проводились на установке высокого газового давления УВГД10000 в институте Экспериментальной минералогии ИЭМ РАН (г. Черноголовка). Продолжительность экспериментов составила 4 суток.

В процессе эксперимента в ампулах происходит существенный перенос вещества. Из силикатной части в карбонатную в большом количестве выносится кремний, фтор и рудные компоненты. Вынос щелочей проявлен слабо. Перенос кальция из апокарбонатной части в силикатную почти отсутствует. Полученные образцы имеют ярко выраженное зональное строение. В апокарбонатной части границы между зонами резкие. Для каждой зоны характерна своя ассоциация фаз. Границы обусловлены появлением или исчезновением какой-либо фазы. В разных зонах апокарбонатной части образца встречены кальцит, волластонит, куспидин, кварц, гроссуляр и новая фаза, состав которой характеризуется примерно одинаковым массовым количество кальция, кремния, кислорода и фтора. В силикатной части вдоль контакта развит плагиоклаз основного состава, который далее сменяется силикатным стеклом и щелочным полевым шпатом.



Рис. 1. Приконтактовая область образца с рудными минералами.

Условные обозначения: PI – плагиоклаз, Kfs – щелочной полевой шпат, Cal – кальцит, Woll – волластонит, Mo-Sh – молибдошеелит, L – силикатное стекло.

Рудные фазы встречаются как в силикатной части, так и в приконтактовой области карбонатной части образцов. В карбонатной части они представлены молибдошеелитом, который образует скопления и цепочки, расположенные вдоль границ зерен волластонита (Рис.1). В силикатной части встречаются отдельные небольшие (первые микроны) зерна вольфрамита.

Выводы. На границе кальцита и фторсодержащего гранитного расплава при заданных параметрах эксперимента происходит интенсивное взаимодействие. сопровождаемое перераспределением вещества и образованием новых фаз. Из силикатной перераспределяются карбонатную В значительном части В количестве кремний, фтор, а также рудные компоненты вольфрам и молибден.

# INTERACTION OF FLUORINE-CONTAINING GRANITE MELT AND CALCITE AT 750°C AND 1 Kbar

## Alferyeva Ya.O., Gramenitsky E.N., Mikshin A.V., Shchekina T.I.

Faculty of Geology, Moscow State University M.V. Lomonosov, YanaAlf@bk.ru

At the boundary of calcite and fluorine-containing granite melt, under the given experimental parameters, intense interaction occurs. Si, F, as well as ore components W and Mo are redistributed in a significant amount from the silicate part to the carbonate part. The resulting samples have a pronounced zonal structure. In different zones of the apocarbonate part of the sample, calcite, wollastonite, cuspidin, quartz, grossular, and a new phase are found. The composition of new phase is characterized by approximately the same mass content of calcium, silicon, oxygen, and fluorine. In the silicate part along the contact, basic plagioclase is developed, which is further replaced by silicate glass and alkali feldspar.

# ОБЪЯСНЕНИЕ МЕХАНИЗМА СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ГАЛАКТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ Баренбаум А.А.

Институт проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН), Москва <u>azary@mail.ru</u>

**Введение:** Известно, что континентальные литосферные плиты имеют тенденцию объединяться в единый суперконтинент, который затем снова распадается на части. Этот процесс, как и образование самих литосферных плит, происходит на Земле, начиная с архея [1].

В настоящее время с разной степенью достоверности выявлено былое существование на Земле 10 суперконтинентов, периодически возникавших с периодом  $T_s = 400$  млн лет [2]. В жизни каждого из них можно выделить стадию сборки ~150 млн лет, когда суперконтинент формируется из сравнительно небольших плит, и стадию распада ~250 млн лет, когда он распадается на части. Распад может быть как полным, так и частичным. Во втором случае сильно разрушенная часть суперконтинента оказывается поочередно, то в северном, то в южном полушарии земного шара. Поэтому суперконтинентальный период можно также принять в 2 раза большим, т.е. 800 млн лет [3].

Предложены гипотезы [4,5], объясняющие суперконтинентальную цикличность механизмом тектоники литосферных плит при тех или иных моделях конвенции мантии. Однако эти гипотезы не отвечают на 2 ключевых вопроса: 1) источника энергии перемещения плит, и 2) физического механизма, который заставляет суперконтиненты попеременно формироваться в разных полушариях нашей планеты.

**Цели и задачи статьи.** В связи с открытием явления струйного истечения вещества из ядерного диска спиральных галактик [6] и созданием Галактоцентрической парадигмы [7], автором построена галактическая модель [7-12], установившая причинно-следственную связь геологических циклов Земли с движением Солнца в Галактике и бомбардировками Солнечной системы галактическими кометами.

В данной статье последняя версия модели [11,12] привлечена к объяснению явления суперконтинентальной цикличности.

Галактическая модель реализует представления [7], согласно которым после образования в одном из рукавов Галактики Солнце обращается вокруг ее центра по эллиптической орбите, пересекая время от времени струйные потоки и галактические рукава. В такие моменты планеты Солнечной системы подвергаются интенсивным бомбардировкам галактическими кометами, которые являются на Земле причиной цикличности глобальных геологических процессов. Моменты бомбардировок в истории Земли зафиксированы в виде

границ стратиграфической шкалы фанерозоя, причем номенклатура этих границ определяется мощностью кометных бомбардировок.

Представление о модели дает рис. 1 [10]. На рис. 1-а в проекции на плоскость Галактики показано положение Солнца относительно рукавов и струйных потоков в настоящее время, а изменение этого положения в предшествующие 600 млн лет в сопоставлении с границами систем и эр шкалы фанерозоя приведено на рис. 1-б.



Рис. 1: а) положение Солнца на орбите (эллипс) по отношению к 4-м рукавам (римские цифры) и 2-м струйным потокам (арабские цифры) Галактики. Малый круг – ядерный диск, средний круг — радиус изотермического ядра Галактики, большой круг — радиус коротации R\*. Стрелка — направление вращения Солнца, линии апсид его орбиты (прямая линия), рукавов и ядерного диска Галактики. Звездочка — место образования Солнца в рукаве IV; б) изменение положения Солнца при движении по орбите (синусоида) относительно центра Галактики, а также ее рукавов и струйных потоков. Цифры время (в млн лет) попадания Солнца в струйные потоки (кружки) и одновременно в галактические рукава (квадраты). Черные значки — это моменты, когда струйные потоки R\*. Внизу приведена шкала фанерозоя с указанием границ систем и эр

Отметим высокую точность расчета шкалы фанерозоя, которая для границ ранга систем превышает точность их определения в геологии [10]. Высокая точность расчетов достигается, во-первых, оптимизацией параметров конструкции Галактики [10] и, во-вторых, учетом участия Солнца при движении по орбите в многочастотном резонансе [13] с вращением рукавов и ядерного диска Галактики. В результате за один полный оборот линии апсид орбиты (период Та = 2.0 млрд лет) Солнце совершает 8 оборотов по орбите и 9 оборотов вокруг галактического центра, а Галактика и ее ядерный диск делают 10 и 80 оборотов. 80 колебаний поперек галактической плоскости совершает и само Солнце. На рис. 1-б видно, что самые мощные кометные бомбардировки определяют границы эр, менее мощные – границы систем, а более слабые – границы отделов шкалы фанерозоя. Границы отделов (не показаны на рис. 1-б) отвечают попаданиям Солнца в струйные потоки, границы систем – одновременно в струйные потоки и галактические рукава, а такие же попадания, но на расстоянии радиуса коротации R\* от центра Галактики являются границами эр и эонов. Границы ранга эр и эонов приходятся на участки орбиты Солнца, совпадающие с радиусом коротации R\*, при котором резко активизируется в рукавах процесс образование звезд и комет [6].

Шкала докембрия. С момента образования Солнечной системы строение Галактики и орбита в ней Солнца не изменились [10]. Поэтому чередование кометных бомбардировок разной мощности, присущее фанерозою (рис. 1-б), свойственно и докембрию. Вместе с тем в отличие от фанерозоя шкала докембрия строится на изучении тектономагматических процессов. Однако по этим данным удается надежно выявить лишь очень мощные кометные бомбардировки в галактических рукавах на расстоянии R\* от центра (табл. 1).

Рукав Галактики	Время события, млрд лет	Границы эонов и эр докембрия
I. Carina-Sagittarius	1.067	Неопротерозой
	3.067	
II. Perseus	1.567	Мезопротерозой
	3.567	Палеоархей
III. Norma-Perseus+1	2.067	
	4.067	Архей (эоархей)
IV. Crux-Scutum	0.567	Фанерозой (палеозой)
	2.567	Протерозой (палеопротерозой)
	4.567	2-й этап формирования планет [6]
	6.567	Образование Солнечной системы [6]

Таблица 1: Связь границ докембрия с галактическими рукавами [12]

Табл. 1 свидетельствует, что такие бомбардировки поочередно происходили в каждом из галактических рукавов и повторялись с периодом  $T_B = 500$  млн лет. Причем в разных рукавах мощность бомбардировок отличалась. В рукавах Carina-Sagittarius и Norma-Perseus+1 бомбардировки были слабее, чем в рукаве Perseus, и тем более в рукаве Crux-Scutum (IV), в котором произошли оба главных этапов образования планет Солнечной системы [6,7].

Анализ показывает [11,12], что в рукаве IV интенсивность падения на Землю комет была не только выше, чем в других рукавах, но и сам рукав имел вдвое большую «ширину», чем показано на рис. 1.

Другой вывод [11,12] состоит в том, что цикличность образования суперконтинентов и глобальных оледенений на Земле зависит как от мощности кометных бомбардировок, так и от ориентации оси вращения Земли к направлению падений галактических комет [7]. В результате прецессии плоскости эклиптики Солнечной системы, пространственная ориентация оси Земли меняется, что приводит к периоду суперконтинентальной цикличности, отличающемуся от Т<sub>в.</sub>

Суперконтинентальная цикличность. Периоды существования суперконтинентов [3] на рис. 2 сопоставлены с эпохами наиболее сильных бомбардировок в галактических рукавах (табл. 1).



Рис. 2. Периоды существования суперконтинентов (вертикальная ось) в сравнении с эпохами бомбардировок кометами в рукавах Галактики (I – IV) при R = R\* (в кружках) и при R < R\* (без кружков). Черные значки — данные [3], квадраты – результаты других авторов

Мы видим, что суперконтиненты главным образом возникали в галактических рукавах на расстоянии ≈ R\* от центра Галактики. Так, суперконтиненты Kenoria и Pannotia возникли в мощном рукаве IV, Sebakwia и Gothia – в рукаве II слабее, а Vaalbara и Rodinia – в еще более слабом рукаве I. Суперконтиненты Yatulia и Pangaea также образовались в рукаве IV, но на расстоянии от центра R < R\*.

Средний период суперконтинентальной цикличности  $T_s = 400$  млн лет не совпадает ни с периодом бомбардировок  $T_B = 500$  млн

лет в галактических рукавах (табл. 1), ни с орбитальным периодом вращения Солнца в Галактике (рис. 1-б). Причиной тому, как уже отмечено, является изменение ориентации оси Земли вследствие прецессии плоскости эклиптики. С учетом периода  $T_S$  величину периода прецессии найдем как  $T_E = (T_S^{-1} - T_B^{-1})^{-1} = 2.0$  млрд лет.

Таким образом, в результате прецессии эклиптики с периодом T<sub>E</sub> = 2.0 млрд лет кометы галактических рукавов поочередно через T<sub>S</sub> = 400 млн лет бомбардируют разные полушария земного шара.

Этот вывод может быть подкреплен картами палеореконструкций суперконтинентов, которые дают основания считать, что в период формирования Pannotia, Kenoria, Sebakwia и Gothia ось Земли была ориентирована по направлению падений галактических комет. При этом блоки суперконтинентов Pannotia и Kenoria преимущественно располагались в южном полушарии, а блоки Sebakwia и Gothia в северном. На рис. 2 это отмечено значками (S) и (N). Что касается суперконтинентов Vaalbara, Columbia и Rodinia, то их реконструкции показывают, что они находились на низких и средних широтах и, потому вряд ли могли существовать в слитном состоянии.

Заключение. Приведем три наиболее важных вывода:

1) Период прецессии эклиптики  $T_E$  в точности совпал с периодом вращения линии апсид солнечной орбиты  $T\alpha$ . Равенство  $T_E = T\alpha = 2.0$  млрд лет означает, что в резонансе с вращением Галактики и ее ядерного диска Солнце участвует вместе с плоскостью эклиптики.

2) Первопричиной суперконтинентальной цикличности являются космические процессы в Галактике и в Солнечной системе.

2) Принимая во внимание физику взаимодействия галактических комет с планетами [14–16], суперконтиненты возникают вследствие очень высокой плотности падений галактических комет в полярные области Земли, а прекращают существование на средних широтах в условиях гораздо меньшей плотности кометных падений.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. Palin R.M. et al. Secular change and the onset of plate tectonics on Earth // Earth-Science Reviews. 2020. V. 207, 103-117.
- 2. Божко Н.А. Суперконтинентальная цикличность в истории Земли // Вестник МГУ. Сер. геол. 2009. № 2. С. 13–28.
- 3. Божко Н.А. О двух типах суперконтинентальных циклов // Вестник МГУ. Сер. геол. 2011. № 5, С. 15-24.
- 4. Dien H.G.E. et al. Global geochemical fingerprinting of plume intensity suggests coupling with the supercontinent cycle // Nature Communications. 10(1) 2019.
- 5. Doucet L.S. et al. Coupled supercontinent–mantle plume events evidenced by oceanic plume record // Geology. 2019. V. 48, 159–163.

- 6. Баренбаум А.А. Галактика, Солнечная система, Земля. Соподчиненные процессы и эволюция. М.: ГЕОС. 2002. 393 с.
- 7. Баренбаум А.А. Галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии. М.: ЛИБРОКОМ. 2010. 546 с.
- 8. Баренбаум А.А., Гладенков Ю.Б., Ясаманов Н.А. Геохронологические шкалы и астрономическое время // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2002. Т.10. №2, 3–14.
- 9. Баренбаум А.А., Хаин В.Е., Ясаманов Н.А. Крупномасштабные тектонические циклы: анализ с позиций галактической концепции // Вестник МГУ. Сер. геология. 2004. №3. С.3–16.
- 10. Баренбаум А.А., Титоренко А.С. Галактическая модель геологической цикличности: оптимизация параметров и тестирование по данным геологии и астрономии // Труды ВЕСЭМПГ-2020.– М: ГЕОХИ РАН. 2020. С.210-215.
- 11. Баренбаум А.А. Подтверждение гипотезы «Snowball Earth» галактической моделью // Геология морей и океанов. Т.1. М.: ИО РАН, 2021. С.21-25.
- 12. Баренбаум А.А. Анализ причин оледенений и δ<sup>13</sup>С аномалий карбонатов на основе галактической модели // Физикохимические и петрофизические исследования в науках о Земле. Материалы конференции. – М.: ИГЕМ РАН. 2021. С.22-26.
- 13. Молчанов А.М. Резонансы в многочастотных колебаниях // Доклады АН. 1966. Т.168, №2. С.284-287.
- 14. Barenbaum A.A. Geological structures created by falls of galactic comets // J. Phys.: Conf. Ser. 653 (2015) 012073.
- 15. Barenbaum A.A., Shpekin M.I. To the development of the mechanism of interaction of galactic comets with the terrestrial planets // J. Phys.: Conf. Ser. 774 (2016) 012096.
- Barenbaum A.A., Shpekin M.I. Origin and formation mechanism of craters, seas and mascons on the Moon // J. Phys.: Conf. Ser. 1147 (2019) 012057.

# EXPLANATION OF SUPERCONTINENTAL CYCLICITY MECHANISM ON BASIS OF GALACTIC MODEL

## Barenbaum A.A.

Oil and Gas Research Institute (OGRI) RAS, Moscow, <u>azary@mail.ru</u>

Based on the galactic model, it was concluded that, due to the precession of Earth's axis with period of 2.0 Gyr, supercontinents arise as a result of a very high density of galactic comet downfall into Earth's polar regions, and they cease to exist at middle latitudes under conditions of a much lower density of comet downfalls.

ЭФФЕКТ ВЛИЯНИЯ МИГРАЦИИ ГАЗОВ ИЗ НЕДР НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ СИТУАЦИЮ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНОВ

<sup>1</sup>Батугин А.С., <sup>1</sup>Кобылкин А.С., <sup>1</sup>Мусина В.Р., <sup>1</sup><u>Шерматова С.С.,</u> <sup>2</sup>Хотченков Е.В., <sup>3</sup>Емельянов С.В., <sup>4</sup>Диваков Д.В.

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный

исследовательский технологический университет «МИСиС» НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия, as-bat@mail.ru.

<sup>2</sup>Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва, Россия, jek79@mail.ru.

<sup>3</sup>ООО Центр комплексных исследований недр «Катари», г. Москва, Россия, <u>semelianov56@mail.ru.</u>

<sup>4</sup>Российский университет дружбы народов, РУДН, г. Москва, Россия, <u>divakov\_dv@rudn.university</u>.

Возгорание углепородных отвалов и попадание продуктов окружающую среду горения является одной из крупных В экологических проблем горнопромышленных районов [Kříbek, 2017; Ren, 2022]. Основным фактором, влияющим на самовозгорание, признается попадание воздуха в тело отвалов [Shenghua, 2014]. Замечено, что отвалы, расположенные в геодинамически активных зонах, самовозгораются чаще, чем остальные [Батугин, 2021]. Так, в Восточном Донбассе из 33 горящих углепородных отвалов, 40% расположены в геодинамических зонах и их количество на единицу площади в этих зонах выше в несколько раз, чем на всей территории. Приуроченность горящих отвалов к геодинамическим зонам объяснена эффектом миграции газов из недр к отвальной массе.

Летом 2022 года проведена газохимическая съемка в районе расположения геодинамической зоны, выделенной методом геодинамического районирования в 2002 году на юге Московской области [Алексеев, 2003]. Был заложен газохимический профиль вкрест простирания границы двух крупных блоков земной коры и обнаружен эффект ее выраженности в газохимических полях, экологическое значение которого для густонаселенных районов еще предстоит оценить.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-27-00728).

#### Литература

 Trace element geochemistry of self-burning and weathering of a mineralized coal waste dump: The novátor mine, Czech Republic / B.Kříbek, I.Sýkorová, F.Veselovský et al. // International Journal of Coal Geology. 2017. Vol. 173. P. 158-175. DOI: 10.1016/j.coal.2017.03.002

- 2. Ren, H., Zhao, Y., Xiao, W., Yang, X., Ding, B., & Chen, C. (2022). Monitoring potential spontaneous combustion in a coal waste dump after reclamation through unmanned aerial vehicle RGB imagery based on alfalfa aboveground biomass. *Land Degradation and Development,* doi:10.1002/ldr.4297
- 3. Shenghua Chen. Construction of isolation layers for preventing spontaneous combustion of coal gangue dump and its effects / Shenghua Chen, Zhenqi Hu, Shengyan Chen // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2014. Vol. 30. № 2. P. 235-243. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.02.031 (in Chinese).
- 4. Батугин А.С., Кобылкин А.С., Мусина В.Р. Исследование влияния геодинамической позиции углепородных отвалов на их эндогенную пожароопасность // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 1-10. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.15
- 5. Алексеев В. К., Батугин А. С., Батугина И. М., Гаранькин Н. В., Калинин А. М., Петухов И. М., Челпан П. И. Геодинамическое районирование территории Московской области // Ступино: СМТ. – 2003. – 126 с.

THE EFFECT OF SUBSOIL GAS MIGRATION ON THE ECOLOGICAL SITUATION OF MINING AREAS.

<sup>1</sup>Batugin A.S., <u><sup>1</sup>Shermatova S.S.</u>, <sup>1</sup>Kobylkin A.S., <sup>1</sup>Musina V.R., <sup>2</sup>Hotchenkov E.V., <sup>3</sup>Emelyanov S.V., <sup>4</sup>Divakov D.V.

<sup>1</sup>National University of Science and Technology «MISiS», «MISiS», Moscow, Russia, <u>as-bat@mail.ru</u>.

<sup>2</sup>The Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, jek79@mail.ru.

<sup>3</sup>LLC Center for Integrated Subsoil Research "Katari", Moscow, Russia, <u>semelianov56@mail.ru</u>.

<sup>4</sup>Peoples' Friendship University of Russia, RUDN University, Moscow, Russia, <u>divakov\_dv@rudn.university</u>

It has been noted that coal waste dumps located in geodynamic active zones ignite spontaneously more often than others. The confinement of burning dumps to geodynamic zones is explained by the effect of gas migration from the earth's interior to the dump mass by high fractured rocks what causes the combustion. Also a geodynamic active zone located in the south of the Moscow region was investigated in the summer of 2022. A gas-chemical profile was laid across the strike of the boundary of two large blocks of the earth's crust and the effect of anomaly of gas-chemical fields was discovered.

The study was supported financially by the Russian Science Foundation (Project No. 22-27-00728).

## ВЛИЯНИЕ ТРЕЩИННОЙ ПОРИСТОСТИ НА ПАРАМЕТР ПОРИСТОСТИ ДОЛОМИТОВ ЮРЯХСКОГО ГОРИЗОНТА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

<sup>1</sup>Белкова Е.А., <sup>2</sup>Жуков В.С.

<sup>1</sup>Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, <u>ekatbelk@gmail.com</u>

<sup>2</sup>Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, <u>Zhukov@ifz.ru</u>

Исследования влияния трещинной пористости, Введение. играет важную роль при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых, при решении геотехнических задач и имеет важный фундаментальный аспект. При растрескивании среды имеющие возникают эффекты, определенное отражение В геофизических полях, в частности, в поле удельных электрических сопротивлений. Методы малоглубинной геофизики. обладая достаточной информативностью и детальностью, успешно решают проблемы обнаружения оценки нарушенных И 30H приповерхностных слоёв геологического разреза [Манштейн, 2002].

В процессе разработки месторождений при росте эффективного происходят изменения пористости и сжимаемости давления приводят порового пространства, которые К различным геодинамическим последствиям. Обнаружение систем трещин на поможет избежать развития ранних этапах ИΧ ряда катастрофических последствий. Отсюда вытекает еще один важный влияния аспект изучения трещинной пористости сейсмологический. Понимание электрических предвестников землетрясений может помочь в мониторинге и прогнозировании активизации сейсмических 30H (изменение УЭС перед землетрясениями) [Жуков, Мострюков, 2022].

**Цель** данной работы - исследование влияния трещинной пористости горных пород на их важную электрическую характеристику - параметр пористости.

**Методика и объект исследований**. Объектом исследования являлись образцы горных пород, изготовленные из керна скважин месторождения в Восточной Сибири (спутник Чаяндинского месторождения) – доломиты из юряхского продуктивного пласта с глубин 1657-1697 метров. Пластовые условия для доломитов составляют Рвс=480 атм, Рпл=180 атм, Рэф=300 атм, Т=23°С.

При исследовании влияния трещинной пористости параметр пористости Рп был рассмотрен комплекс петрофизических электрическое характеристик горных пород, как: удельное сопротивление, коэффициент пористости; объемная плотность; скорости упругих волн, сжимаемость порового пространства Спор. В уравнениях Арчи-Дахнова [Дахнов, 1941, 1985; Archie, 1942] и Агилера [Aguilera, 1976; Tiab, Donaldson, 2004] (зависимости Рп =

*а*/Кп<sup>*m*</sup>) **а** - параметр связанный с извилистостью токопроводящих каналов и **m** – показатель цементации горной породы. Причем в уравнении Арчи Дахнова *m* изменяется вблизи величины 2 (0,6-3,0), а в уравнении Агилера и Тиаба он равен 1 в случае взаимосвязанных и проницаемых трещин.

Методики определения петрофизических параметров, рассматриваемых в данной работе, приведены в [Жуков, Люгай, 2016; Иванов и др., 2008]. Для расчета трещинной пористости используется методика, приведенная в [Жуков, 2012, Жуков, Кузьмин, 2020].

результатам исследования 42 образцов доломита По В атмосферных и пластовых условиях для были построены графики зависимости от эффективного давления следующих параметров: Кп пл, УЭС, Vp и Vs,  $\delta_{\pi\pi}$ , Спор, Pп; а также собраны зависимости параметра пористости (Рп) ОТ коэффициента пористости, построенные при разбиении образцов на три группы – по величине коэффициента трещинной пористости и по величине доли трещинной пористости в общей пористости образцов.



Рис. 1. Зависимости параметра пористости, рассчитанного по Арчи-Дахнова для 42 образцов уравнению доломитов, OT Образцы коэффициента пористости. разбиты ПО величине трещинной пористости на три группы: менее 0,2% 16 образцов, от 0,2% до 0,4% 16 образцов, более 0,4% 10 образцов. Проведены аппроксимирующие линии: (1) - все образцы  $P_{\Pi} = 0,7827 \text{ Кn}^{-2,099} R^2 =$ 0,8191; (2) Кп тр менее 0,2% Рп = 0,4725 Кп<sup>-2,471</sup> R<sup>2</sup> = 0,9911;(3) Кп тр от 0,2% до 0,4%  $P_{\Pi}$  = 0,3737 Кп<sup>-2,498</sup>  $R^2$  = 0,9299; 4Кп тр более 0,4%. Аппроксимирующие линии (1-4) для каждого случая описываются уравнениями: (1); (2); (3);  $P_{\Pi} = 0,8779 \text{ Km}^{-1,963} R^2 = 0,6515$  (4);

Рисунок 1 показывает, что в целом с ростом трещинной пористости уменьшается наклон графика степенной зависимости параметра пористости от коэффициента пористости. Показатель извилистости токопроводящих каналов (*a*) для образцов с наименьшей трещинной пористостью ниже (0,4725), чем для образцов с наибольшей (0,8779), а показатель цементации *m*, наоборот, выше (минус 2,471 и минус 1,963).

Заключение. Как показывают результаты экспериментальных трещинной пористости ростом исследований, С показатель цементации доломитов снижается, а по величине показателя извилистости можно сделать вывод о том, что трещины в образцах слабо взаимосвязаны. Анализ экспериментальных данных позволяет прийти к выводу, что свой вклад в изменение величины удельного электрического сопротивления кроме межзерновой компоненты пористости вносит и трещинная компонента пористости, влияющая на зависимость параметра пористости от коэффициента пористости. Группирование образцов по величине коэффициента трещинной пористости и доле трещинной пористости показало, что линий тренда, характеризующий показатель наклон степени цементации, понижается с увеличением трещинной пористости, а извилистость токопроводящих каналов снижается почти в два раза.

## Литература

- 1. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. 2-е издание, переработанное и дополненное М.: Недра. 1985. 310с.
- 2. Дахнов В.Н. Интерпретация каротажных диаграмм. М-Л. 1941. 496с.
- 3. Жуков В.С. Кузьмин Ю.О. Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны // Физика Земли. – 2020. – № 4. – С. 39-50. – DOI 10.31857/S0002333720040109
- 4. Жуков В.С., Мострюков А.О. Возможности метода срединных градиентов для выявления изменений кажущегося электросопротивления при подготовке землетрясений // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 2. С. 132-142. DOI 10.21455/GPB2022.2-7.
- 5. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2012. № 1(9). С. 148-152.
- 6. Жуков В.С., Люгай Д.В. Определение фильтрационно-емкостных и упругих свойств и электрических параметров образцов горных пород при моделировании пластовых условий: Учебно-

методическое пособие - М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», РГУ Н и Г имени И.М. Губкина. 2016. 56с.

- 7. Иванов М.К., Калмыков Г.А., Белохин В.С., Корост Д.В., Хамидуллин Р.А. Петрофизические методы исследования кернового материала. Учебное пособие в 2-х книгах. Кн. 2: Лабораторные методы петрофизических исследований кернового материала. - М.: Изд-во МГУ, 2008.113 с.
- 8. Манштейн А.К. Малоглубинная геофизика: Учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2002. 136 с.
- 9. Aguilera R. Analysis of Naturally Fractured Reservoirs from Conventional Well Log // Journal of Petroleum Technology, 1976, pp. 764-772.
- Archie G.E. The Electrical resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics // Transactions of the AIME. 1942. Vol. 146. P. 54–62.
- 11. Tiab D., Donaldson E.C. Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties, 2nd ed., Oxford: Gulf, 2004. 866 p.

#### INFLUENCE OF FRACTURED POROSITY ON THE FORMATION FACTOR OF DOLOMITES OF THE YURYAKH HORIZON OF EASTERN SIBERIA

<sup>1</sup>Belkova E.A., <sup>2</sup>Zhukov V.S.

<sup>1</sup>Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, <u>ekatbelk@gmail.com</u>

<sup>2</sup>Schmidt Institute of Earth Physics RAS, <u>Zhukov@ifz.ru</u>

Studies of the influence of fractured porosity, plays an important role in the search and exploration of mineral deposits, in solving geotechnical problems and has an important fundamental aspect. Fracture porosity of rocks affects the geophysical fields, so the fracture porosity in rock masses is reflected in the form of electrical resistivity anomalies. We present the results of processing the experimental data of laboratory studies of petrophysical properties of dolomites of the Yuryakh horizon of Eastern Siberia under conditions simulating reservoir conditions. The results of experimental studies have shown that the cementation index of dolomites decreases with an increase in fractured porosity, and by the value of the index of tortuosity we can conclude that the fractures in the samples are weakly interconnected. Analysis of the experimental data allows us to conclude that, in addition to the intergranular component of porosity, the fracture component of porosity contributes to the change in the value of specific electrical resistance and formation factor.

#### КАРТИРОВАНИЕ АСКАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЕНТОНИТОВЫХ ГЛИН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

<sup>1</sup>Боева Н.М., <sup>1</sup>Мельников Ф.П., <sup>2</sup>Лучнева Н.В.

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, <u>boeva@igem.ru</u>; <sup>2</sup>Российский Государственный Геологоразведочный Университет (МГРИ) имени Серго Орджоникидзе

Термин "бентонит" был применен Найтом еще в 1848 году к очены пластичному глинистому материалу, встречающемуся близ Форт-Бентона, штат Вайоминг. В настоящее время бентонит нашел широкое применение во многих отраслях промышленности И сельского хозяйства. В промышленности он используется металлургии, бурении, литейном производстве, в строительстве, производстве тонкой керамики, для при а также очистки промышленных стоков и т.д. Всего известно более 200 областей применения бентонита [1].

Все глинистые минералы обладают определенной емкостью катионного Монтмориллонит обмена (ЕКО). обладает самой высокой среди глинистых минералов ЕКО (до 150 мг-экв/100 г). Влияние состава обменных катионов сказывается в первую очередь свойствах, связанных с взаимодействием глин С водой на (пластичность, набухание, размокание и др.). По составу обменных катионов бентониты подразделяют на щелочные, когда основным компонентом обменного комплекса являются катионы натрия, и шелочноземельные (кальциевые, магниевые, кальцие-магниевые и магниево-кальциевые), где больше 50% обменных катионов принадлежат кальцию и магнию.

Щелочные бентониты относятся, в основном, К категории высококачественного сырья, которое используется во многих отраслях промышленности. Щелочноземельные бентониты, как по качеству щелочным уступают правило, бентонитам И К естественном состоянии использованию в В ряде отраслей народного хозяйства малопригодны. Щелочноземельные бентониты гидрофильностью характеризуются меньшей И связывающей способностью.

Асканское месторождение бентонитовых глин находится в 20-25 км восточнее районного центра и ж/д станции г. Махарадзе (Грузия), с которым соединено автомобильной дорогой. На Цихисубанском участке имеются бентонитовые глины двух разновидностей:

1. Щелочно-земельный бентонит – асканглина. Глина кремовая, серовато-зеленая, светло-голубоватая, часто с характерной

текстурой материнской породы, жирная на ощупь, с восковым блеском. Излом неправильный.

2. Щелочной бентонит – аскангель. Макроскопически глина светло-голубовато-зеленоватая, темно-серая с зеленоватым оттенком, весьма плотная, жирная с восковым блеском. Излом раковистый.

Учитывая то, что эти разновидности обладают различными свойствами и применяются в разных отраслях промышленности, важно иметь четкое представление о том, где какие глины залегают.

проведено опробование бентонитов Нами было на разрабатываемом карьере участка Цихисубани. Пробы были изучены следующими методами: рентгенофлуоресцентный, рентгенофазовый, термический, СЭМ.

Особое внимание в этом исследовании мы уделяем методу термического анализа, по результатам которого очень четко глины разделяются на щелочные и щелочно-земельные.

минералов группы монтмориллонита Для установлены закономерности дегидратации. Присутствующие следующие В минерале OH<sub>n</sub> группировки выделяются в 2 основных этапа: в первый этап – интервал 30-300°С выделяется межслоевая вода, во 300-600°C) (интервал происходит второй этап выделение гидроксила, участвующего в образовании октаэдрического слоя. Первый этап носит название дегидратации, второй дегидроксилизации [2].

Дегидратация. Вода, выделяющаяся в первый этап обезвоживания, носит обратимый характер и способна полностью возвращаться в межслоевое пространство. Как правило этот тип воды в межслоевом пространстве присутствует в двух позициях: а) в виде молекул H<sub>2</sub>O, образующих гидратные оболочки вокруг катионов Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и Ca<sup>2+</sup>, б) в виде тонкого слоя, прилегающего к внешней поверхности тетраэдров. В этом случае молекулы воды удерживаются Ван-дер-Ваальсовыми связями.

В натриевых (щелочных) бентонитах выделение гидратной воды сопровождается одним эндотермическим эффектом с максимумом при 110-130°С (рис. 2).

В Ca-Mg бентонитах обычно наблюдается 2 низкотемпературных эффекта: основной и побочный, как правило в виде дополнительного перегиба при температуре 200-230°С.

Основной эндотермический эффект в кальциево-магнезиальных бентонитах связан с отделением гидратной воды от катиона Ca<sup>2+</sup>, побочный эффект связан с разрушением гидратной оболочки вокруг катиона Mg<sup>2+</sup>. По мере увеличения содержания в составе обменных катионов Mg<sup>2+</sup>, интенсивность перегиба возрастает и достигает

величины самостоятельного эндоэффекта, т.е. этот эндоэффект как бы раздваивается на 2 составляющие.



Рис. 2. Термические кривые щелочного бентонита.

Дегидроксилизация. Этот этап обезвоживания бентонита охватывает температурный интервал от 400 до 600°С. Если судить по разности потери веса между началом плавления (T > 800°С) и максимумом на эндотермическим пике, то с уверенностью можно сказать, что при температуре этого максимума монтмориллонит практически полностью обезвоживается, т.е. «омертвляется». Таким образом, максимум второго эндотермического эффекта является истинным показателем термостойкости бентонита [3].

Характерно, что для бентонитов высокой термостойкости порядка 0,9-1 этот показатель обычно соответствует 640-700°С. Для щелочно-земельного бентонита Асканского месторождения он составляет 640-680°С.

Таким образом, проведя исследование термических свойств бентонитовых глин методом термического анализа мы смогли провести картирование глин на карьере участка Цихисубани Асканского месторождения.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания ИГЕМ РАН № 121041500220-0.



Рис. 2. Термические кривые щелочно-земельного бентонита.

# Литература

- 1. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС. 2013. 576с.
- 2. Наседкин В.В., Боева Н.М., Васильев А.Л. Аккалканское месторождение бентонитовых глин (Ю-В Казахстан) и перспективы их технологического использования // Геология рудных месторождений. 2019. № 5. С. 84-95.
- Боева Н.М., Бочарникова Ю.И., Наседкин В.В., Белоусов П.Е. Термический анализ – экспресс-метод оценки качественных и количественных характеристик природных и синтезированных органоглин // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. № 3-4. С. 33-36.

MAPPING OF THE ASKANSK BENTONITE CLAY DEPOSIT BASED ON THE RESULTS OF THERMAL ANALYSIS

<sup>1</sup>Boeva N.M., <sup>1</sup>Melnikov Ph., <sup>2</sup>Luncheva N.V.

<sup>1</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) RAS, Moscow, <u>boeva@igem.ru</u>;

<sup>2</sup>Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University (MGRI)

The mapping of bentonite of the Askansk deposit was carried out based on the results of thermal analysis. Alkaline and alkaline earth clays are clearly identified by the nature of the DSC curve.

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТИТАНА МЕЖДУ ЦИРКОНОМ И РАСПЛАВОМ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

#### <u>Борисов А.А.</u>, Борисовский С.Е.

Институт геологии рудных месторождений (ИГЕМ) РАН, Москва, <u>aborisov@igem.ru</u>

Сведения о распределении титана между цирконом (Zrn) и силикатным расплавом ( $D^{Ti}$ ) противоречивы, от совместимого поведения ( $D^{Ti} = 3.2-16.8$ , [Thomas et al., 2002]) до резко несовместимого ( $D^{Ti} = 0.007-0.01$ , [Hofmann et al., 2009]).

В недавней работе по растворимости Zrn в силикатных расплавах [Borisov, Aranovich, 2019] авторы использовали, среди прочих, высокотитанистые расплавы. Предварительный микрозондовый анализ Ti в экспериментальных Zrn показал большой разброс значений D<sup>Ti</sup> вне зависимости от температуры, все коэффициенты оказались меньше единицы. Целью данной работы является уточнение величин D<sup>Ti</sup> и их возможной зависимости от температуры. Для этого мы тщательно перемерили содержание Ti в цирконах нескольких серий [Borisov, Aranovich, 2019] и провели ряд дополнительных экспериментов.

Fo-An-SiO<sub>2</sub>, дополнительно Состав эвтектики системе В обогащенный смесью ZrO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (по стехиометрии соответствующей Zrn) выбран за основу и обогащен оксидом титана с тем, чтобы получить три исходных смеси: T8, T15 и T25 (TiO<sub>2</sub> ≈ 8, 15 и 25 мас.%, соответственно). Эксперименты выполнены методом петли на воздухе в вертикальной трубчатой печи со всеми тремя исходными при температурах 1300 и 1400°С с различными составами анализировались выдержками. После закалки образцы на микрозонде JEOL Superprobe (ИГЕМ РАН).

Хотя нас интересует равновесное содержание Ті в цирконах, равновесие Zrn/расплав в отношении ZrO<sub>2</sub> (Рис. 1) является минимальным признаком ТОГО, требуемое равновесие ЧТО достигнуто. При 1300°С составы Т8 и Т15 имеют на ликвидусе циркон и расплавы демонстрируют одинаковое в пределах ошибки содержание ZrO<sub>2</sub> для всех выдержек, от 21 до 112 ч. Образцы T25, богатые TiO<sub>2</sub>, демонстрируют иное поведение. «Длинные» опыты (≥ 46 ч) не имеют Zrn на ликвидусе, и лишь в «коротком» эксперименте обнаруживается циркон (см. Рис. 1А). Мы полагаем, что этот циркон метастабильный и не используем его в дальнейшем обсуждении. 21-часовая Хочется подчеркнуть, что даже выдержка при относительно высокой температуре 1300°С может оказаться недостаточной для достижения фазового равновесия в столь
высокотитанистых образцах. Все они (т.е. образцы T25 при 1300°С) содержат фазу, представляющую собой твердый раствор рутилбадделеит состава (Ti<sub>0.58</sub>Zr<sub>0.42</sub>)O<sub>2</sub>. При 1400°С все образцы, включая T25, имеют на ликвидусе Zrn и демонстрируют сходное содержание ZrO<sub>2</sub> в расплавах в опытах длительностью 46 и 69 ч (см. Рис. 1Б).

Все значения D<sup>Ti</sup>, полученные в данном исследовании, нанесены в зависимости от температуры на Рис. 2. Очевидно, что в температурном интервале 1200-1450°С при 1 атм общего давления коэффициент распределения Ti между цирконом и расплавом остается постоянным на уровне 0.035±0.001.

Работа поддержана Российским Национальным фондом (грант 22-17-00052).

#### Литература

1. Borisov A., Aranovich L. Zircon solubility in silicate melts: New experiments and probability of zircon crystallization in deeply evolved basic melts // Chemical Geology. 2019. V. 510. P. 103-112.

2. Hofmann A.E., Baker M.B. and Eile J.M. An experimental study of Ti and Zr partitioning among zircon, rutile, and granitic melt // Contribution to Mineralogy and Petrology. 2013. V. 166. P. 235–253.

3. Thomas J.B., Bodnar R.J., Shimizu N., Sinha A.K. Determination of zircon/melt trace element partition coefficients from SIMS analysis of melt inclusions in zircon // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002. V. 66. P. 2887–2901.



Рис. 1. Растворимость циркона в расплавах при 1300 (А) и 1400°С (Б). Заметим, что при 1300°С в высокотитанистом расплаве T25 циркон обнаружен лишь в самой короткой плавке, но он исчезает при более длительных выдержках.



Рис. 2. Распределение Ті циркон/расплав при различных температурах. Заметим, что в интервале 1200-1450°С коэффициент распределения постоянный в пределах ошибки.

#### TITANIUM PARTITIONING BETWEEN ZIRCON AND MELT: AN EXPERIMENTAL STUDY AT HIGH TEMPERATURES **Borisov A.A., Borisovsky S.E.** Institute of geology of ore deposits (IGEM) RAS, Moscow, aborisov@igem.ru

We experimentally studied Ti partitioning between zircon and a set of  $TiO_2$  –rich silicate melts. It was found that at least in the temperature range from 1200 to 1450°C at 1 atm total pressure the titanium partition coefficient between zircon and silicate melt is constant at the level of 0.035±0.001.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЕРЕОТЛОЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ Pb-Zn РУДНЫХ ЖИЛ НА КАРБОНАТНОМ БАРЬЕРЕ В ПОСТГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ **Борисов М.В., Бычков Д.А., Шваров Ю.В., Лубкова Т.Н.** Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (МГУ), Москва, borisov@geol.msu.ru

Для Садонского рудного района (Северная Осетия, Россия) характерной чертой являются полиметаллические рудопроявления, проявлены карбонатных породах верхней которые В юры. Формирование жильных Pb-Zn месторождений района происходило предкелловейское время  $J_2$ [Некрасов, 1980]. Можно В предположить, что в позднеюрское или раннемеловое время произошла повторная активизация системы, при которой рудная низкотемпературных (100-150°C) гидротермальных нагрузка растворов формировалась за счет взаимодействия с веществом рудных жил. Примером таких объектов ранее образованных является рудопроявление Урсдон, локализованное в карбонатных породах верхней юры и пространственно, лежащее на продолжении рудоконтролирующих разломов рудной Бозанг зоны (месторождение Джими), но на удалении в несколько км. В настоящей работе исследованы равновесно-динамические модели переотложения вещества рудных тел на карбонатном барьере в постгидротермальных процессах (пакет программ HCh [Шваров, 2008], включающий базу термодинамических данных Unitherm; система H-O-K-Na-Ca-Mg-Al-Si-Fe-C-Cl-S-Zn-Pb-Cu, описанная 54 минералами, 78 частицами водного раствора).

Расчеты проведены для множества вариантов двух типов моделей. В вариантах менялись количество последовательных проточных реакторов, составы руд и первичных гидротермальных растворов, отношения руда/раствор, температура и давление.

Модели 1 типа: нулевой реактор – вещество рудной жилы, с которым реагирует безрудный раствор (1 m NaCl, 0.5 m H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>,1 кг  $H_2O$ ) при  $T_0$  и  $P_0$ ; первый реактор – кальцит, с которым вступает в реакцию с рудоносным раствором из нулевого реактора при T<sub>1</sub> и P<sub>1</sub>. Состав руды в нулевом реакторе: кварц (Qtz), пирит (Py), сфалерит халькопирит (PbS), (ZnS),галенит (ChPy) В различных соотношениях. Т и Р в реакторах могут быть одинаковыми или снижаться в первом реакторе. Через реакторы проходит до 20 волн раствора, а каждая следующая порция рудоносного раствора реагирует со всем веществом предшествующей волны.

Рассмотрим часть полученных результатов.

Если в реакторах одинаковые Т и Р: например, 100°С и 1000 бар. Рудоносный раствор имеет следующие характеристики: pH=3.1, Eh до -0.1 в, суммарные концентрации Fe до 8.7e-7 m, Zn=5.7e-5 m, Si=1.1e-3 m, Cu=1.8e-7 m, S(II)=6.2e-5 m. Pb=4e-6 m. При взаимодействии такого раствора кальцитом происходит С постепенное его растворение, рН повышается до 4.9-5. Eh снижается до -0.24 в, концентрации компонентов уменьшаются до Fe=3.8e-8 m, Zn=9.5e-7 m, Pb=6.5e-8 m, Cu=2.5e-8 m, S(II)=1.9e-6 m. Соответственно отлагаются (суммарно из 20 порций раствора): сфалерит до 1е-3 m, галенит до 8е-5 m, сульфиды меди (халькопирит, борнит, халькозин) до 1e-6 m, кварц до 1.5e-5 m. Пирит не отлагается.

Положительным результатом данной модели является формирование устойчивых содержаний ZnS и PbS. Однако кварца отлагается значительно меньше, а пирита вообще нет. Для рудопроявления Урсдон характерна высокая степень окварцевания карбонатных пород (содержание Si до 17 мас.%) и пиритизация, которая отчетливо проявляется на обнажении развитием зоны лимонитизации. Таким образом, рассмотренный вариант модели не соответствует данным по реальному объекту.

Понизим Т до 90°С в реакторе с карбонатом (остальные параметры без изменения). Отлагаются аналогичные первому варианту количества сфалерита, галенита и сульфидов меди, но кварца на два порядка больше (до 4е-3 m). Пирит не отлагается. Т.е. окварцевание усилилось, но пиритизации нет.

Усложняем модель – задача добиться устойчивой пиритизации, которая может развиваться по трещинам в карбонатных породах. На рис. 1 показана многореакторная схема расчетов для *моделей 2 типа.* 



Рис. 1. Многореакторная схема расчетов в моделях 2 типа.

Структура моделей: 0 реактор – вещество рудной жилы (T<sub>0</sub>, P<sub>0</sub>); 1-5 реакторы – пустое трещинное пространство, в котором при понижении температуры возможно отложение вещества (от T<sub>1</sub>-P<sub>1</sub> до T<sub>5</sub>-P<sub>5</sub>); 6-8 реакторы – кальцит (массой 20, 50 и 100 г) с T'-P', отвечающими аналогичным в трещинах. Отложение вещества в трещинах описано слоевым механизмом [Борисов, 2000], т.е. из каждой порции рудоносного раствора из нулевого реактора отлагается отдельный слой минералов, а равновесный с ними раствор перетекает в следующий реактор с понижением T и реагирует с кальцитом при той же температуре.

Рассмотрим результаты расчетов по модели 2 типа, когда температура при реакции с рудой составляет 150°С, в пустых реакторах постепенно понижается от 140 до 100°С (шаг 10°С), кальцит реагирует с раствором из трещинного канала. Повышение температуры при реакции с рудой (в отличие от рассмотренных выше двухреакторных моделей) приводит к росту концентраций Fe=2e-6 m, Zn=1.7e-4 m, Pb=1.8e-5 m, Si=2.5e-3 m, Cu=1.4e-6 m, S(II)=1.9e-4 m (pH=3.3, Eh=-0.13 в).

Главное, что удалось получить в этих моделях – это отложение пирита в трещинах и при реакции с кальцитом. Частичные результаты расчетов (при N=20 или на время прохождения 20 порции растворов) по одной из моделей 2 типа показаны на рис. 2. Эффективность отложения пирита можно усилить, если уменьшить отношение руда/вода в нулевом реакторе.



Рис. 2. Результаты расчетов по модели 2 типа. Отложение новообразованных минералов в микротрещинах и при реакции с карбонатом. А – основные минералы, Б – минералы в меньших количествах.

Таким образом, можно считать установленным, что в моделях второго типа удается получить минерализацию сопоставимую с наблюдаемой рудопроявлении Урсдон. Интенсивное на окварцевание и пиритизация проходят по системе трещин и микротрещин, распространенных в карбонатных породах, при снижении температуры. Пиритизация происходит и при реакции с кальцитом в пористом пространстве вмещающих пород, но при условии его полного растворения. Варианты с уменьшением безрудного давления С изменениями состава раствора И дополнительной информации не добавляют.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №20-05-00098).

#### Литература

- 1. Борисов М.В. Геохимические и термодинамические модели жильного гидротермального рудообразования. М.: Научный мир. 2000.
- 2. Борисов М.В., Бычков Д.А., Шваров Ю.В. Геохимические структуры полиметаллических жил выполнения и параметры гидротермального рудообразования // Геохимия. 2006. №11. С. 1218-1239.
- 3. Некрасов Е.М. Структурные условия локализации жильных свинцово-цинковых месторождений. М.: Недра, 1980.
- 4. Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических процессов, предоставляемые Windows // Геохимия. 2008. № 8. С. 898–903.

THERMODYNAMIC MODELS REDEPOSITION OF COMPONENTS OF Pb-Zn ORE VEINS ON THE CARBONATE BARRIER IN POSTHYDROTHERMAL PROCESSES **Borisov M.V., Bychkov D.A., Shvarov Yu.V., Lubkova T.N.** Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, <u>borisov@geol.msu.ru</u>

The possibility of redeposition of the previously formed vein ore material  $(J_2)$  on the carbonate barrier  $(J_3)$  during the reactivation of the hydrothermal system was estimated by the methods of equilibrium-dynamic modeling. It has been established that late low-temperature hydrothermal solutions can provide pyritization, silicification and deposition of Pb-Zn ores in carbonate rocks.

# О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО КВАРЦА ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТИПОВ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖЕЛАННОЕ, ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

# Бурмистров А.А., Земскова М.И.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, <u>alek.durmistroff2017@yandex.ru</u>

Это месторождение особо чистого (оптического) кварцевого субвертикальными представлено жильными И сырья линзообразными телами, контролируемыми зонами трещиноватости вдоль надвигов и залегающими в кварцитопесчаниках Тельпосской свиты нижнего ордовика, в разной степени перекристаллизованных в ходе гидротермально-метаморфогенных процессов. Выделяются 3 технологических подтипа (ТП) крупно- и гигантокристаллического жильного кварца: 1- прозрачный с участками молочно-белого, 2молочно-белый с участками прозрачного, 3 – серый, дымчатый с прозрачного. Bce они различаются ΠО уровням участками светопропускания обычно оконтуриваются данным И ПО опробования.

Для петрофизических исследований были выбраны следующие параметры: плотность твердой фазы (d, г\см<sup>3</sup>), эффективная пористость (Por, %), пьезоэлектрический модуль (Piezo, 10<sup>-13</sup> K\H), период полунасыщения **(**Т<sub>1/2</sub>, часы). Расчеты проводились по следующим формулам [Бурмистров и др., 2009]:

 $d = 0.998^{*}(P_{obp} / (P_{obp} - P_{H/B})),$ 

Por = 100%\*(P<sub>обр</sub> - P<sub>обр(н)</sub>) / (P<sub>обр(н)</sub> - P<sub>(нв)</sub>), где

вес образца(г): Р<sub>обр</sub> – сухого, Р<sub>обр(н)</sub> – насыщенного водой в воздухе, Р<sub>(нв)</sub> - насыщенного водой в воде.

Период полунасыщения (T<sub>1/2</sub>) соответствует времени насыщения половины эффективной пористости. Пьезомодуль рассчитан по формуле:

Piezo = 21\*10<sup>-13</sup> \*Uобр /700, где

Uoбр (мВ) – электронапряжение, возникающее на гранях образца при пропускании через него ультразвуковых упругих колебаний на измерителе пьезоэффекта ЭПО-ТОИЭ (ЦНИГРИ), соотнесенное с его величиной для кристалла кварца такого же размера для известного пьезомодуля для определенного направления прозвучивания.

Дополнительно по значениям d и Por (образца) и плотности кристаллического кварца (2,65 г\см<sup>3</sup>) вычислялось объемное содержание (V%) закрытых пор с ГЖВ (плотность которых по

данным авторского изучения их состава принята равной 1,1 г\см<sup>3</sup>) по формуле:

 $V = 100\%^{*}(2,65 - d) / (2,65 - 1,1)$ 

Для возможности более контрастного разделения образцов на группы по всем свойствам сразу использовался комплексный аномальный петрофизический коэффициент (Kanom), определяемый для каждого образца по формуле:

Капот (обр) = (Por/0,3)\*Piezo/0,61\*(2,64/d), где

использовались значения свойств каждого образца и средние их значения по всем образцам (с учетом прямой и обратной связи между свойствами). Полученные результаты приведены в таблице 1.

Табл. 1.

тп	d	Por	V	piezo	T1/2	Kanom
1	2,65	0,18	0,0	0,8	0,6	0,8
1	2,64	0,18	0,6	0,5	0,1	0,5
1	2,64	1,49	0,6	0,8	4,0	6,1
1	2,64	0,13	0,6	1,3	0,2	0,9
1	2,63	0,14	1,3	1,0	1,3	0,7
сред.	2,64	0,42	0,6	0,9	1,2	1,8
2	2,64	0,18	0,6	0,5	0,5	0,5
2	2,64	0,26	0,6	0,3	7,7	0,4
2	2,64	0,13	0,6	0,1	0,8	0,0
сред.	2,64	0,19	0,6	0,3	3,0	0,3
3	2,64	0,27	0,6	0,9	2,7	1,3
3	2,64	0,02	0,6	0,1	7,7	0,0
сред.	2,64	0,3	0,6	0,6	2,5	1,1

Наиболее качественный (перекристаллизованный) 1-й подтип кварца выделяется по высоким средним значениям пористости, пьезомодуля и пониженному периоду полунасыщения.

Все параметры по своим взаимным корреляционным связям образуют 2 группы (рис. 1). Связи между ними внутри групп слабые. Отчасти это объясняется очень малым число изученных образцов. Однако произведенное по этим параметрам разделение образцов на группы вполне удовлетворительно: 1-й и 2-й подтипы кварца образуют одну группу с двумя подгруппами, а 3-й – свою обособленную группу, в которую все же попадают отдельные образцы из первых двух групп.



Рис.1. Дендрограмма кластерной классификации оценочных параметров кварца, мера сходства - коэффициенты парной корреляции Пирсона (условные обозначения в тексте). Tree Diagram for 6 Variables



Рис. 2. Дендрограмма кластерной классификации образцов кварца по значениям их петрофизических параметров с объединением их в группы методом «дальнего соседа» (цифры на горизонтальной оси соответствуют технологическим подтипам кварца).

Это связано с неоднородностью строения образцов, в которых могут быть включения кварца разных подтипов. Важно также отметить, что данная экспрессная методика может использоваться и для выделения зон гидротермального и динамометаморфогенного кварца, участков перекристаллизации преобразования его С хрусталеносных образованием областей И С повышенным ГЖВ. Отдельные содержанием аномальные ПО некоторым параметрам образцы могут отражать локальные особенности структуры их порового пространства при перекристаллизации.

# Литература

Бурмистров А.А., Старостин В.И., Дергачев А.Л., Петров В.А. Структурно-петрофизический анализ месторождений полезных ископаемых: Учебник – 2-е изд. испр. и доп. М., МАКС Пресс, 2009. 408с.

ON THE POSSIBILITY OF THE USE OF PETROPHYSICAL PARAMETERS FOR THE ESTIMATION OF THE TECHNOLOGICAL TYPES OF OPTICAL QUARTZ (ON THE EXAMPLE OF ZHELANNOE DEPOSIT, CIRCUMPOLAR URALS) **Burmistrov A. A., Zemskova M. I.** Lomonosov Moscow State University (MSU). alek.burmistroff2017@yandex.ru

Using the data base of some petrophysical properties, received for 10 samples of the optical quartz of this deposit it was demonstrated a real possibility of their classification, corresponding to its existing technological types and also to its transitional subtypes, connected as with the intensity of their changes, that took place during hydrothermal and tectonic processes, so and with their composition.

При нагрузке 0,9 от разрушающей отмечены резкие изменения трещинной пористости и ее доли в общей пористости, которые изменили наклон графиков объёмной деформации и межзерновой пористости. Видно, что при упруго-пластичном характере перехода к разрушению межзерновая и трещинная компоненты пористости различным образом реагируют на изменения напряжения.

Дилатансионное разрушение. При нагружении обр.3161 до 0,3 от разрушающей нагрузки общая пористость снижается за счет уменьшения трещинной компоненты. Затем, до примерно 0,7 от разрушающей нагрузки уменьшение общей пористости происходит за счет снижения межзерновой пористости, а величина трещинной пористости мало меняется. В интервале 0,75-0,8 от разрушающей нагрузки отмечается рост трещинной пористости, а затем она вновь значительно снижается вплоть до разрушения образца. Очевидно, рост осевого сжатия до значения 0,8 от разрушающей нагрузки привёл к снижению объёма межзерновых пор, а затем он стал расти возможно за счет слияния мелких трещин в крупные поры и снижения трещинной пористости (рис.4). Т.е. с 0,8 от разрушающей нагрузки и до разрушения развивался дилатансионный процесс пространства образца, увеличения порового сопровождаемый ростом общей пористости и ее межзерновой компоненты, при этом величина трещинной пористости снижалась.





И только после достижения максимальной нагрузки, при которой произошло разрушение образца (50,6 МПа) был отмечен существенный рост трещинной пористости, сопровождавший сброс осевого сжатия (на рисунке не показан).

Заключение. Анализ экспериментальных данных позволяет общей прийти ЧТО изменения пористости К выводу, И ee межзерновой компоненты в процессе роста осевого сжатия имеют характер, близкий к характеру изменений объёмной деформации, практически для всех исследованных образцов. Очевидно, что межзерновая И трещинная компоненты общей пористости различным образом реагируют на изменения напряженного состояния и характера деформирования образцов. Изменения трещинной пористости, несмотря на значительно меньшие величины её изменения, проявляют модулирующий (управляющий) характер при переходе от упругого (линейного) деформирования к хрупкому или упруго-пластичному и дилатансионному характеру их разрушения.

#### Литература

- 1. Жуков В.С., Салов Б.Г., Кузьмин Ю.О. Деформации и трещинообразование в образцах горных пород при длительном воздействии постоянных сжимающих напряжений // В Сборнике: Модельные и натурные исследования очагов землетрясений. М.: Наука. 1991. С.156-162.
- 2. Жу́ков В.С., Кузьмин Ю.О. Физическое моделирование современных геодинамических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень №5. 2003. С.71-77.
- 3. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны // Физика Земли. 2020. № 4. С.39-50. DOI 10.31857/S0002333720040109.
- 4. Кузьмин Ю.О. Современные объемные деформации разломных зон // Физика Земли. 2022. №4. С. 3-18.
- 5. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Тихоцкий С.А., Егоров Н.А., Фокин И.В. Изменения трещинной пористости при подготовке разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2022, т.58, №1, с.53-66.

# INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CRACK POROSITY ON THE TRANSITION FROM ELASTIC DEFORMATION TO DESTRUCTION **Zhukov V.S., Kuzmin Yu.O.**

Schmidt Institute of Physics of Earth RAS, Moscow, zhukov@ifz.ru

Changes in the porosity structure of sandstones when the elastic deformation character is disturbed in preparation for destruction were investigated under conditions simulating reservoir conditions. The samples were separated according to the type (brittle, elastic-plastic, and dilatancy) of deformation before their destruction and differences in the character of changes in their total porosity and its components (intergranular and fractured) were shown. The initial fracture porosity of samples has a significant influence on the transition to destruction of samples. Changes in the fracture porosity, despite its significantly lower values compared to the intergranular porosity, play a major role in the transition from elastic deformation to nonlinear deformation of samples to their destruction.

# СОПОСТАВЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОДХОДОВ ПРИ ОЦЕНКЕ СЖИМАЕМОСТИ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

#### Жуков В.С., Кузьмин Ю.О.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. <u>Zhukov@ifz.ru</u>.

Введение. Изменения напряженно-деформированного состояния характеризуются коэффициентом ИХ объёмной пород горных сжимаемости [Жуков, Кузьмин, 2021], который эффективно применяется для оценки деформационных последствий длительной разработки нефтегазовых месторождений и подземных хранилищ газа [Кузьмин и др., 2018; Кузьмин, 2021; Жуков, Семенов, Кузьмин, 2018; Жуков, Иванов, 2015]. Актуально определение сжимаемости пор там, где большая её величина может привести к значительным просадкам земной поверхности.

Коэффициент сжимаемости пор ( $C_p$ ) нелинейно зависит от величины эффективного давления, но большинство определений приведены без сведений о том, при каких давлениях они были получены. Поэтому важно знать в каком диапазоне изменений давления производилась оценка коэффициента сжимаемости пор. Цель авторов - анализ двух походов к оценке сжимаемости и выбор наиболее адекватного и точно отображающего влияние напряженного состояния горных пород.

Были исследованы 34 песчано-глинистых образца вендского возраста с глубины 1660-1860 м Чаяндинского НГКМ с пористостью от 3 до 15,6 % и проницаемостью по газу от 2 до 100 мД [Жуков, Кузьмин 2021]. Исследования образцов проводилось в условиях, моделирующих пластовые, по методике [Жуков, Люгай, 2016]. Подходы к оценке сжимаемости пор различаются по выбору интервала изменения эффективного давления: интегральный - за весь интервал изменения эффективного давления (0,1-37,0 МПа) и дифференциальный, в выбранном интервале изменения (30-37 МПа). При определении коэффициента объёмной сжимаемости порового пространства С<sub>р</sub> образцов использовали величины изменения объёма пор и эффективного давления при его ступенчатом изменении по (1):

 $C_p = \left(\frac{-\Delta V_p}{V_{p0}}\right) / \Delta P_{eff}$  (1), где,  $\Delta V_p$  – изменение объёма порового пространства (объём поровой жидкости, выдавливаемой из образца), см<sup>3</sup>;  $V_{p0}$  – начальный объём порового пространства образца, см<sup>3</sup>;  $\Delta P_{eff}$  – изменения эффективного давления, МПа. На

#### ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ НОВЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ НА МИГРАЦИЮ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ВЫСОКОРАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ Мальковский В.И.

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, <u>malk@igem.ru</u>

В Российской Федерации подземное хранилище высокорадиоактивных отходов (ВАО) предполагается создать на Енисейский Нижнеканского участке гранитоидного массива В Красноярском крае. Основным механизмом распространения радиоактивного загрязнения из хранилища ВАО является перенос радионуклидов подземными водами. Если содержание радионуклидов в подземных водах уменьшится до максимально вследствие радиоактивного допустимого уровня распада И разбавления загрязненных вод за время миграции радионуклидов от хранилища до границы биосферы, хранилище можно считать безопасным. Поэтому безопасность хранилища зависит от скорости радионуклидов подземными водами. Тектонические переноса способны значительно увеличить скорость разломы течения подземных вод за счет более высокой проницаемости по сравнению ненарушенными вмещающими породами. По ограниченной региональными водоразделами территории, на которой расположен участок Енисейский, проходят старые разломы. Пространство нарушений В зонах этих разломов заполнено разрывных вторичными минералами. Поэтому нет оснований ожидать, что проницаемость старых разломов окажется существенно большей, чем в ненарушенных породах. Однако следует иметь в виду, что участок Енисейский расположен в сейсмически активной области [Кочкин и др., 2017]. Подземное хранилище должно обеспечить изоляцию входящих в состав ВАО радионуклидов от биосферы в течение 10<sup>4</sup> лет и более. За столь длительный срок эксплуатации хранилища вполне возможно, что всплеск тектонической активности приведет к формированию новых или обновлению старых разломов на участке Енисейский.

Поскольку реки часто трассируют древние разломы, можно ожидать, что и положение реки Енисей в районе Нижнеканского массива также коррелирует с каким-либо древним разломом. При естественно предположить, что ориентация разлома этом определяется распределением упругих напряжений в породах участка, вследствие чего новые разломы на участке будут также ориентированы субмеридиональном направлении, В т.е. параллельны береговой линии Енисея на рассматриваемом участке.

Региональное течение на участке обусловлено неоднородностью рельефа и ориентировано в целом от более высокой восточной берегу Енисея. части участка на запад К Влияние субмеридиональных разломов на течение подземных вод на таких рассмотрено В двумерном приближении **участках** В работе [Мальковский, 2021]. Показано, что разлом утягивает нисходящую ветвь течения вниз к слабопроницаемым породам основания артезианского бассейна (рис. 1). В результате путь миграции радионуклидов от хранилища к зоне разгрузки подземных вод удлиняется, и время миграции радионуклидов от хранилища до границы биосферы либо незначительно уменьшается, либо даже возрастает. Вследствие что ЭТОГО можно считать, субмеридиональные разломы не окажут существенного влияния на безопасность хранилища.



Рис. 1. Влияние субмеридионального разлома на течение в подземных водах в малых артезианских бассейнах, ограниченных с востока региональным водоразделом, а с запада – берегом реки, в которую разгружаются подземные воды. На верхнем рисунке – течение в отсутствие разлома, на нижнем – после образования разлома. Положение хранилища условно обозначено крестом на нижнем рисунке. Региональное течение направлено от более высокой восточной части к реке.

Расчет распространения радиоактивного загрязнения из хранилища при образовании субширотного разлома производился при использовании уже трехмерной адвекционно-дисперсионной модели с учетом неоднородной проницаемости ненарушенных пород бассейна. Построение пространственного распределения проницаемости ненарушенных пород на участке по данным откачек в разведочных скважинах описано в работе [Мальковский, Озерский, 2014]. За время между загрузкой ВАО в хранилище и образованием разлома часть загрязненных радионуклидами подземных вод достигнет зоны разлома. При его образовании эти воды за счет высокой проницаемости нарушенных пород очень быстро переносятся по зоне разлома к реке.

Пример такого процесса распространения радиоактивного загрязнения изотопом <sup>241</sup>Am приведен на рис. 3 в случае, когда разлом образуется через 1000 лет после загрузки хранилища.



Рис. 3. Движение загрязненных подземных вод по субширотному разлому к реке Енисей. Расстояние между разломом и границей хранилища – 500 м. Время между созданием хранилища и образованием разлома – 1000 лет; (а) – загрязнение в плоскости разлома в момент его образования; (b) – через 0.1 года; (c) – через полгода.

В рассмотренном случае загрязнение за полгода пройдет по разлому до реки. Следует однако иметь в виду, что этот результат получен в предположении, что радионуклиды переносятся в высокомобильной коллоидной форме. При этом не учитывалась задержки радиоколлоида возможность механической при его миграции в породах участка. Таким образом, приведенная оценка пессимистической действительности является И В миграция радионуклидов будет осуществляться в значительной степени в

менее подвижной ионной форме и будет происходить гораздо медленнее, чем это показывают результаты проведенного моделирования.

Работа выполнена по совместному проекту РФФИ №20-55-12009 и DFG INFRA (NA1528/2-1 and MA4450/5-1).

# Литература

- 1. Кочкин Б.Т., Мальковский В.И., Юдинцев С.В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). М.: ИГЕМ РАН. 2017. 384 с.
- 2. Мальковский В.И. Оценка тектонического воздействия на изоляцию радиоактивных отходов в подземных хранилищах // Атомная энергия. 2021. Т. 130. № 3. С. 158–164.
- Мальковский В.И., Озерский А.Ю. Стохастическая фильтрационная модель вмещающих пород подземного хранилища радиоактивных отходов по данным пакерных тестов // Мат. XV межд. конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИГЕМ РАН. 2014. С.159– 162.

#### INFLUENCE OF ORIENTATION OF NEW TECTONIC FAULTS ON MIGRATION OF RADIONUCLIDES FROM AN UNDERGROUND REPOSITORY OF HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE Malkovsky V.I.

Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry, RAS, Moscow, malk@igem.ru

We carried out 3D simulation of radionuclides migration from an underground repository of radioactive waste at the site Yeniseiskiy taking into account formation of a new tectonic fault. Meridional and latitudinal orientation of the fault is considered. The simulation was carried out on an example of <sup>241</sup>Am at the site Yeniseiskiy (Krasnoyarsk region) taking into account heterogeneity of rock permeability. Simulation results showed that meridional faults do not exert a substantial influence on propagation of radioactive pollution from the repository to the biosphere. Influence of a latitudinal fault on radionuclides migration is quite different. A part of polluted groundwater, which reaches the fault during a time interval between the repository construction and the fault formation, can move relatively fast through the highly permeable fault zone and discharge into the river Yenisei.

# ПОВЫШЕННАЯ СКОРОСТЬ МИГРАЦИИ РАДИОКОЛЛОИДА <u>Мальковский В.И.</u>

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, <u>malk@igem.ru</u>

Подземные воды переносят радионуклиды в виде растворенной компоненты (ионная форма) и в виде компоненты содержащихся в воде коллоидных частиц (коллоидная форма). Коллоидные частицы, включающие в себя радионуклиды, получили название радиоколлоида. За счет сорбции на породах, сквозь которые движутся загрязненные радионуклидами подземные воды, отношение скорости миграции загрязняющего вещества  $V_m$  к скорости течения подземных вод  $V_f$  определяется выражением [de Marsily, 1986]

$$\frac{V_m}{V_f} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\rho_r K_d (1 - \varphi)}{\varphi}\right)},$$

где  $\rho_r$  – плотность пород,  $\varphi$  – пористость пород,  $K_d$  – коэффициент равновесного распределения загрязняющего вещества между породами и подземными водами.

Чем выше сорбционные свойства пород (К,) по отношению к загрязнителю, тем меньше его скорость по отношению к скорости течения. И наоборот, при очень слабых сорбционных свойствах пород ( $K_d \to 0$ ) скорость загрязнителя приближается к скорости течения. Такой загрязнитель получил название «нейтральный свойства пород трассер». Сорбционные ПО отношению К радионуклидам в ионной форме могут быть существенно выше, чем по отношению к радиоколлоиду, в связи с чем скорость миграции радионуклидов в коллоидной форме значительно выше, чем в ионной форме [Honeyman, 1999]. Для исследования миграции радиоколлоида проводились натурные эксперименты, схема которых показана на рис. 1.

Опыты проводились в две стадии: на первой в одну из двух скважин закачивался раствор нейтрального трассера, на второй вода, содержащая коллоидные частицы. По концентрации тестового (нейтрального вещества трассера или коллоида) В воде, откачиваемой скважины. определялось время ИЗ другой прохождения коллоида и трассера t<sub>max</sub>, как точка максимального значения концентрации тестового вещества В откачивающей скважине. Отсюда определялась величина скорости прохождения тестового вещества между скважинами. Отношение этих скоростей и есть отношение скорости коллоида к скорости течения.



Рис. 1. Схема натурного эксперимента.  $\Delta t$  – время закачки,  $t_{max}$  – время прохождения тестового раствора между скважинами.

Результаты, такого эксперимента из работы (Champ, Schroeter, 1988) приведены на рис. 2. Можно отметить, что время, соответствующее максимальной концентрации коллоида в 3–4 раза меньше, чем время максимальной концентрации трассера.





Это объясняли тем, что скорость течения неоднородна в сечении каналов фильтрации, по которым вода движется в породах, и за счет эффекта Магнуса частицы смещаются к той области сечения канала, где скорость имеет наибольшие значения. Таким образом, частицы коллоида движутся с максимальной, а вода – со средней скоростью течения в канале. Этим объясняли повышенные значения скорости миграции коллоида.

Для анализа прохождения частиц и нейтрального трассера через породы будем использовать модель Козени-Кармана, согласно которой каналы фильтрации представляют собой систему параллельных цилиндрических капилляров разного диаметра. Будем аппроксимировать плотность распределения радиусов каналов фильтрации *г* логнормальной зависимостью

$$n = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{l^2}{2\sigma^2}\right), \quad l = \ln\frac{r_w}{r_0},$$

где N — число капилляров, проходящих через единичную площадь в сечении, перпендикулярном капиллярам; n/N — плотность распределения логарифма радиуса капилляров;  $r_w$  — радиус капилляра;  $r_0$  — такой радиус капилляра, что  $\ln r_0$  — математическое ожидание  $\ln r_w$ ;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение логнормального распределения.

В этом случае концентрация трассера в откачивающей скважине зависит от времени следующим образом

$$\frac{C(\tau)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \theta(\tau) \operatorname{erfc}\left(\frac{-0.5\ln\tau - 4\sigma^2}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \theta(\tau - \Delta\tau) \operatorname{erfc}\left(\frac{-0.5\ln(\tau - \Delta\tau) - 4\sigma^2}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right],$$

где *θ* – функция Хевисайда,

$$au = v_0 t / Z, \quad \Delta \tau = v_0 \Delta t / Z, \quad v_0 = -\frac{r_0^2}{8\mu} \frac{\partial p}{\partial z},$$

Концентрация коллоида в откачивающей скважине зависит от времени следующим образом

$$\frac{C(\tau)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \theta(\tau) \operatorname{erfc}\left(\frac{A - 4\sigma^2}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \theta(\tau - \Delta\tau) \operatorname{erfc}\left(\frac{B - 4\sigma^2}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right],$$

где  $r_p$  – радиус частиц,

$$A = \max\{-0.5 \ln \tau, l_p\}, \quad B = \max\{-0.5 \ln(\tau - \Delta \tau), l_p\}, \quad l_p = \ln \frac{r_p}{r_0}.$$

Обе зависимости приведены на рис. 3.

Можно отметить, что на рис. За зависимости  $C(\tau)/C_0$  вначале почти совпадают, а затем концентрация коллоида снижается до нуля. Это означает, что первыми достигают откачивающей скважины частицы, двигавшиеся по самым «быстрым» капиллярам, соответствующим самым большим значениям радиуса капилляра. Более «медленные» пути фильтрации соответствуют меньшим радиусам, и начиная с некоторой величина радиуса капилляра частица уже не проходит сквозь него: ее радиус больше радиуса рис. 3b концентрации трассера и коллоида капилляра. На приведены в разных шкалах, точно так же, как и в работе [Champ, Schroeter, 1988]. При этом рис. 3b практически совпадает с рис. 2. Таким образом, в работе [Champ, Schroeter, 1988] просто неверно интерпретировали результаты эксперимента, учитывая не механическую задержку частиц коллоида при его движении в породах, регистрируя скорость его движения только по каналам фильтрации с наибольшей апертурой, смешивая действие конвекции и гидродинамической дисперсии.



Рис. 3. Зависимости концентраций трассера (серая пунктирная линия) и коллоида (сплошная линия) в откачивающей скважине от безразмерного времени. а) общая шкала для трассера и коллоида; b) разные шкалы.

Работа выполнена по совместному проекту РФФИ №20-55-12009 и DFG INFRA (NA1528/2-1 and MA4450/5-1).

# Литература

 Champ, D.R., Schroeter, J. Bacterial transport in fractured rock – a field-scale tracer test at the Chalk River nuclear laboratories // Water science and technology. 1988. V.20, N<sub>o</sub> 11/12. – P. 81–87.

# ELEVATED VELOCITY OF RADIOCOLLOID MIGRATION Malkovsky V.I.

Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry, RAS, Moscow, <u>malk@igem.ru</u>

Effect of elevated velocity of colloid migration in rocks was considered. Some full-scale experiments evidenced that velocity of colloid migration can exceed velocity of groundwater flow by a few times. It was shown theoretically that this conclusion is caused by a non-correct interpretation of the results of the full-scale experiment. The authors of the experimental study did not take into account mechanical retention of the colloid particles in narrow filtration channels in the rocks. Hence, the elevated velocity of the colloid migration in the field tests is an artifact. ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ АРСЕНИДОВ НИКЕЛЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

<sup>1,2</sup>Михайлова П.С., <sup>2</sup>Каримова О.В., <sup>3</sup>Упорова Н.С.,<sup>1,2,4</sup>Чареев Д.А., <sup>1</sup>Еремин Н.Н.

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (МГУ), Москва, Россия; <u>mihaylowa.pol@yandex.ru</u>

<sup>2</sup>Институт геологии рудных месторождений (ИГЕМ) РАН, Москва; oxana.karimova@gmail.com

<sup>3</sup>Институт геологии и геохимии (ИГГ) УрО РАН, Екатеринбург, <u>nuporova84@gmail.com</u>

<sup>4</sup>Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН, Черноголовка, <u>charlic@mail.ru</u>

Целью данной работы являлось исследование обратимого полиморфного перехода соединении NiAs<sub>2</sub> co В структурой парараммельсбергита (пр.гр. Pbca [Fleet, 1972]) В высокотемпературную фазу со структурой раммельсбергита (пр. гр. Pnnm [Holseth et al., 1968]) при температуре около 590°С [Heyding et al., 1957].

Исследуемый образец был синтезирован методом твердофазного ампульного синтеза. Фазовый состав полученного образца был исследован с помощью рентгенофазового анализа. Содержание парараммельсбергита в образце составило около 95%.

Для уточнения температуры перехода и изучения структурных характеристик NiAs<sub>2</sub> была проведена серия исследований вещества методами рентгенофазового анализа, термического анализа (ДТА, ТГ, ДТГ), спектроскопии комбинационного рассеяния.

исследовании B СВЯЗИ С трудностями В данной группы соединений, связанными с летучестью мышьяка, с целью более определения температуры перехода, структурных точного И термодинамических характеристик парараммельсбергита И раммельсбергита было принято решение использовать метод атомистического структурного моделирования. На данный момент литературные ПО теоретическим моделям данные бинарных соединений мышьяка и никеля отсутствуют, в связи с чем собственного потребовалась разработка набора потенциалов межатомного взаимодействия.

В рамках термического анализа производился непрерывный нагрев образца от 40 до 760°С с последующим охлаждением. В процессе нагрева произошла потеря более 30% массы образца, что связано с разложением образца. При последующем охлаждении пиков на кривых ДТА и ДТГ также не обнаружено. Необходима дальнейшая оптимизация условий проведения анализа в соответствии с высокой летучестью соединений мышьяка.

Таким образом, в рамках данной работы был синтезирован образец парараммельсбергита, определён его фазовый состав и проведён ряд исследований термических свойств вещества. Было принято решение проведения ДТА, ТГ, ДТГ анализов образца с использованием специально подобранных кварцевых ампул.

Также была начата разработка собственного набора потенциалов межатомного взаимодействия с целью теоретического моделирования кристаллических структур парараммельсбергита и раммельсбергита с последующим уточнением температуры полиморфного перехода и структурных, а также термодинамических характеристик NiAs<sub>2</sub> при изменении температуры.

# Литература

- 1. Fleet M.E. The crystal structure of pararammelsbergite NiAs<sub>2</sub> // American Mineralogist. 1972. V. 7. P. 1 9.
- Heyding R.D., Calvert L.D. Arsenides of the Transition Metals: The Arsenides of Iron and Cobalt. // Can. J. Chem. 1957. V. 35. P. 449– 457.
- Holseth H., Kjekshus A. Compounds with the marcasite type crystal structure. II. On the crystal structure of the Binary Pnictides. 1968. V. 22. P. 3284 – 3292.

DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE FOR INVESTIGATION OF NICKEL ARSENIDES AT HIGH TEMPERATURES

# <sup>1,2</sup>Mikhailova P.S., <sup>2</sup>Karimova O.V., <sup>3</sup>Uporova N.S., <sup>1,2,4</sup>Chareev D.A., <sup>1</sup>Eremin N.N.

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University (MGU), Moscow; <u>mihaylowa.pol@yandex.ru</u>

<sup>2</sup>Institute of Geology of Ore Deposits (IGEM) RAS, Moscow; <u>oxana.karimova@gmail.com</u>

<sup>3</sup>Institute of Geology and Geochemistry (IGG) UrB RAS, Ekaterinburg, <u>nuporova84@gmail.com</u>

<sup>4</sup>Institute of Experimental Mineralogy (IEM) RAS, Chernogolovka, <u>charlic@mail.ru</u>

A sample of pararammelsbergite was synthesized using dry technique, and studies of the thermal properties were carried out. It was decided to conduct DTA, TG, DTG analyzes of the sample using specially selected quartz ampoules. Also, the development of our own set of interatomic interaction potentials was started for the purpose of theoretical modeling of pararammelsbergite crystal structure.

#### АНАЛИЗ УПРУГИХ МОДУЛЕЙ И МИКРОСТРУКТУРЫ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД ЗАПАДНОЙ СИБИРИ Муналбаева М.Н., Фокин И.В, Баюк И.О., Гордеев Н.А., Багдасарян Т.Э.

Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ) РАН, Москва, <u>maria.munalbaeva@gmail.com</u>

В данной работе представлены результаты исследования геомеханических и микроструктурных характеристик терригенных пород месторождения Снежное, отличающимся своим сложным строением, в одном из наиболее неисследованных регионах Западной Сибири. Bce исследования проведены Центре В «Петрофизика, коллективного пользования геомеханика И палеомагнетизм» Института Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

В настоящее время геомеханические исследования активно используются для создания моделей, описывающих поведение месторождения в процессе разработки месторождений нефти и газа. Для создания моделей задаются упругие модули (модули Юнга, коэффициенты Пуассона и тд.), характеризующие способность образца горной породы упруго деформироваться под воздействием приложенной к нему силы.

Центре Bce исследования проведены В коллективного пользования «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» Института Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и включали в себя геомеханические испытания керна сервогидравлической на GCTS RTR-4500, испытательной установке разномасштабное микроструктуры изучение состава И пород на оптическом микроскопе Olympus BX53M И сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA LMS с целью исследования взаимосвязи геомеханических параметров пород, их состава и микроструктуры.

Актуальность работы заключается в определении связи геомеханических и микроструктурных характеристик, а также получении корреляционных зависимостей между геомеханическими другими характеристиками – динамическими параметрами И пористостью, модулями упругости которые могут быть И использованы в дальнейшем для месторождений со сходным без необходимости геологическим строением, проведения дорогостоющих геомеханических испытаний.

Изучаемые образцы относятся к отложениям танопчинской свиты, которые являются ОДНИМИ ИЗ ОСНОВНЫХ ПРОДУКТИВНЫХ комплексов, сосредоточена значительная В которых часть больших углеводородов. Накопление запасов углеводородов связано с тем, что отложения в указанное время на данной территории формировались в благоприятных условиях мелкого моря и в прибрежной области переходного осадконакопления, характеризующихся активной динамикой среды и способствующей формированию выдержанных, высокопористых коллекторов [Алексеев, 2014].

Доказанные запасы месторождения Снежное составляют 235,2 млрд м<sup>3</sup> газа и 8,6 млн т жидких углеводородов.

Так как месторождение отличается своим сложным строением была подробна изучена микроструктура керна. При изучении образцы были поделены на два фациальных комплекса отложений, определяющих палеогеографические условия их формирования.

Первым комплексом отложений является комплекс отложений междельтового приливно-отливного побережья, представленный песчано-глинистыми породами приливно-отливных каналов, разделенных алеврито-глинистыми породами приливно-отливных отмелей, прибрежных озер и углями. По типу залежи данные отложения относятся к газовым.

Образцы, принадлежащие к данному комплексу, были отобраны с пластов ПТ2 на интервале глубин 1700-1770 м, ПТ3 на интервале глубин 1772-1794 м и ПТ6 на интервале глубин 1919-1943 м. Здесь была установлена неравномерная цикличность песчаника, алевролитов и их переслаивания. Мощность песчаников от 10 до 40 м, алевролитов – от 4 до 12 м, а их переслаивания от 2 до 10 м.

Образцы комплекса отложений дельты приливно-отливного типа представлены песчано-глинистыми породами приливноотливных дельт и междельтовых областей приливно-отливной зоны, которую рассекают многочисленные каналы и ручьи. Они были отобраны с пластов ПТ18 на интервале глубин 2410-2531 и ПТ22 интервала глубин 2415-2500м. По типу залежи отложения относятся к нефтегазоконденсатным. Здесь наблюдается более равномерное чередование песчаников, алевролитов и их переслаивания. Их мощность варьируется от 1 до 15 м.

Геомеханическиие испытания проводились на сервогидравлической испытательной установке GCTS RTR-4500, имитировать испытуемого позволяющей около образца в термобарические испытательной камере условия пласта И проводить измерения напряжений, действующих на образец. деформаций образца и скоростей пробега упругих волн в этих условиях. Продольные и поперечные ультразвуковые волны были получены на системе измерений скоростей упругих волн GCTS ULT-100.

Для определения геомеханических свойств горной породы использовались образцы цилиндрической формы, размером 60х30 см. Для моделирования пластовых условий максимальное осевое напряжение было взято близким к напряжению, порождаемому весом пород, лежащих над объектом. В процессе нагружения образца с заданным шагом по времени регистрируются скорости упругих волн в образце [Тихоцкий, 2017].

В ходе испытаний были измерены - осевая нагрузка и осевое сокращение образца, радиальное расширение образца, зондирующие акустические сигналы продольных и поперечных волн, всестороннее и поровое давление, что позволило рассчитать динамические и статические упругие параметры, а также пределы прочности образцов. Полученные значения статического модуля деформации варьируются от 1.2 до 48.7 ГПа, динамического модуля Юнга от 15.5 до 78.2 ГПа, предела прочности в атмосферных условиях от 6.73 до 209.03 Мпа, в термобарических условиях - от 67.8 до 376.8 МПа, , скорости продольных волн в атмосферных условиях от 2950 до 5900 м/с, скорости поперечных волн в атмосферных условиях от 1400 до 3410 м/с, скорости продольных волн в термобарических условиях от 3180 до 5850 м/с, скорости поперечных волн в термобарических условиях от 1550 до 3380 м/с.

Таким образом, было выяснено, что упругие характеристики пород комплекса отложений междельтового отливно-приливного побережья почти в два раза меньше, чем у пород комплекса дельты отливно-приливого типа.

#### Литература

- 1. Алексеев В.П. Атлас субаквальных фаций нижнемеловых отложений Западной Сибири// Издательство УГГУ, 2014, -284с.
- И.В.Фокин, 2. С.А.Тихоцкий. И.О.Баюк. Д.Е.Белобородов, Д.Р.Гафурова, М.А.Краснова, И.А.Березина, Н.В.Дубиня, Д.В.Корост. А.А.Макарова, А.В.Патонин. А.В.Пономарев. Р.А.Хамидуллин, B.A Цельмович. КОМПЛЕКСНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРНА В ЦПГИ ИФЗ РАН//Наука и технологические разработки, 2017, том 96, № 2, c. 17–32

ANALYSIS OF ELASTIC MODULES AND MICROSTRUCTURE OF TERRIGENIC ROCKS OF WESTERN SIBERIA **Munalbaeva M.N., Fokin I.V., Bayuk I.O., Gordeev N.A., Bagdasaryan T.E.** Institute of Physics of the Earth. O.Yu. Schmidt (IPE) RAS, Moscow, <u>maria.munalbaeva@gmail.com</u>

This paper presents the results of a study of the geomechanical and microstructural characteristics of terrigenous rocks of the Snezhnoye deposit, which are distinguished by their complex structure, in one of the most unexplored regions of Western Siberia. All studies were carried out at the Center for Collective Use "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism" of the Institute of Physics of the Earth. O.Yu. Schmidt RAS.

#### ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ПЕТРОПЛОТНОСТНОЙ И ПЕТРОМАГНИТНЫХ КАРТ ВОРОНЦОВСКОГО ТЕРРРЕЙНА ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА Муравина О.М., <u>Овечкина А.С.</u>, Сотников А.А. Воронежский государственный университет (ФГБОУ ВО «ВГУ»), Воронеж, muravina@geol.vsu.ru

Приведены результаты исследований, направленных на получение объективной оценке степени достоверности петрофизических карт Воронцовского террейна Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Петроплотностная карта, карта магнитной восприимчивости и карта остаточной намагниченности, построенные на геологической основе масштаба 1:500000, формируют петрофизическую модель Воронцовского террейна. Петрофизическая модель организована в формате ГИС-проекта, что обеспечивает доступ к первичным данным и их сохранность, а также позволяет включать в проект новые материалы с пространственной привязкой. Петрофизические карты сформированы на основе информации пространственной базы петрофизических данных, аккумулирующей результаты многолетних петрофизических определений керна около 500 скважин, локализованных в пределах ВКМ [Глазнев и др., 2020, Муравина и др., 2014]. Подавляющее большинство скважин приурочено к зонам развития железистых кварцитов. В пределах Воронцовского террейна, формирующего восточный блок ВКМ, локализовано 84 скважины, петрофизические данные по которым включают 1591 определений плотности, 1526 определений магнитной восприимчивости и 1489 определений остаточной намагниченности.

Методика формирования петрофизических карт заключается в следующем [Муравина и др., 2018, Муравина, Долганова, 2019]. Геологическая основа петрофизических моделей в формате ГИСпроекта является совокупностью полигонов, каждый из которых отнесен к определенной возрастной группе пород. В зависимости от распространения на площади исследований разные возрастные группы могут быть представлены как единичным числом полигонов, так и десятками. В базе данных, помимо возраста пород, содержится информация о литологии, которая в пределах одной возрастной группы для разных полигонов может отличаться. При создании петрофизических моделей формируются и статистически анализируются выборки данных разного уровня. В выборках первого уровня собрана информация о петрофизике пород определенной возрастной группы по всем полигонам. Выборки второго уровня сформированы только для полигонов, подсеченных скважинами. Полигонам, в которых есть скважины, присваивается осредненное значение петрофизического параметра по данным этих скважин, а полигоны, в которых скважины отсутствуют получают осредненное значение петрофизического параметра по результатам анализа выборок первого уровня. Неравномерность пространственного распределения данных по объему первичной информации приводит к тому, что сформированные таким образом петрофизические карты имеет разную степень достоверности в разных точках. Для численной оценки информативности петрофизических карт были использованы инструменты пространственного анализа данных ГИС ArcView. На первом этапе формируется атрибутивная таблица и карта, отражающие сведения об объемах выборок второго уровня для каждого полигона. Полигонам, в которых нет скважин присваивается нулевое значение. Поскольку размеры полигонов изменяется в широких пределах, эта карта преобразуется в грид-схему, при этом площадь исследования разбивается на ячейки заданного размера, а значение анализируемого параметра усредняются в каждой ячейке.

В результате пространственного анализа петроплотностной и петромагнитных карт получены грид-схемы достоверности петрофизических данных с размерами ячеек 5, 10, 15 км, позволяющие оценить степень информативности петрофизических карт Воронцовского террейна ВКМ.

Полученная пространственная информация о достоверности петрофизических карт необходима для их эффективного использования в процедурах интерпретации геофизических полей, особенно, при решении обратных задач при наложении априорных ограничений на решение [Воронова и др., 2021, Глазнев и др., 2016, Муравина О.М., Лошаков, 2015, Glaznev et al, 2015].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-05-00190.

# Литература

- 1. Воронова Т.А., Муравина О.М., Глазнев В.Н., Березнева С.И. Трёхмерная плотностная модель верхней коры в области сочленения Лосевского и Донского террейнов (Воронежский кристаллический массив // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2021. Вып. 49. С. 24-35.
- 2. Глазнев В.Н., Муравина О.М., Жаворонкин В.И. и др. Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива // Воронеж: Научная книга, 2020. 101 с.
- Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М. Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2016. Вып. 29. С. 53-63.

- 4. Муравина О.М., Давудова Э.И., Пономаренко И.А. Формирование петрофизических моделей И ИХ использование при интерпретации геофизических полей Материалы IXX  $\parallel$ Международной конференции «Физико-химические И петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2018. C. 242-245.
- Муравина О.М., Долганова М.В. Методика формирования петромагнитной модели Хоперского мегаблока Воронежского кристаллического массива // Материалы XX Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2019. С. 252-254.
- Муравина О.М., Жаворонкин В.И., Глазнев В.Н. Пространственный анализ распределения плотности докембрийских образований Воронежского кристаллического массива // Материалы XXI Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2014. С. 170-173.
- 7. Муравина О.М., Лошаков Г.Г. Принципы решения прямых задач потенциала при моделировании строения литосферы // Вестник ВГУ. Сер. Геология. Воронеж, 2015. №3. С.97-100.
- 8. Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M., Raevsky A.B, Osipenko L.G. Complex geological–geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and the crust–mantle boundary // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6. P.133–170.

RELIABILITY EVALUATION OF PETRODENSITY AND PETROMAGNETIC MAP OF THE VORONTSOVSKY TERRRINE OF THE VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF **Muravina O.M., <u>Ovechkina A.S.</u>, Sotnikov A.A.** 

Voronezh state university (VSU), Voronezh, <u>muravina@geol.vsu.ru</u>

The results of studies aimed at obtaining an objective assessment of the degree of reliability of petrophysical maps of the Vorontsovsky terrane of the Voronezh crystalline massif (VKM) are presented. As a result of the spatial analysis of petrodensity and petromagnetic maps grid-schemes of the reliability of petrophysical data were obtained, which make it possible to assess the degree of information content of petrophysical maps of the Vorontsovsky terrane of the VKM. The obtained spatial information is necessary for their effective use in the procedures for interpreting geophysical fields, especially when solving inverse problems when imposing a priori restrictions on the solution/

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ОБЫКНОВЕННЫХ ХОНДРИТОВ ПО МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИМ ДАННЫМ

<sup>1</sup><u>Никитин С.М.</u>, <sup>2</sup>Скрипник А.Я.

<sup>1</sup>Лаборатория петромеханики ООО «ЛС-КАМ»(ЛП «ЛС КАМ») Москва. <u>petromechanika69@mail.ru</u>

<sup>2</sup>Институт геохимии и аналитической химии им.В.И.Вернадского (ГЕОХИ)РАН, Москва

Известные к настоящему времени характеристики метеоритов, касающиеся, ПО ИХ физико-механическим свойствам данных потребовали изменения подхода коренного К определению прочностных параметров. Помимо чисто инженерных сравнительных оценок вещества по предельным напряженным состояниям, возникла необходимость в информации, опирающейся на закономерности статического и динамического деформирования.

прочности Если традиционный инженерный подход К материалов подразумевает сравнительный анализ способности тел сопротивляться разделению на части, то для решения конкретных космодинамических задач приходится опираться, помимо известных «констант», типа пределов прочности при сжатии или при растяжении, на параметры закономерностей, описывающих прогрессирующего эволюционные механизмы разрушения. Желательно, чтобы ЭТИ закономерности были адекватны особенностям процессов в истории космических тел.

Удовлетворение последнего требования приводит К комплексированию методов испытаний метеоритов с учетом данных о структуре И вещественном составе, позволяющих реконструировать сам процесс разрушения, отражающий эволюцию дефектной структуры метеорита в разные стадии его становления как твердого тела.

Ранее А.Я.Скрипник выполненный качественный анализ распределения метеоритов по характеру разрушения позволил выделить основные структурные особенности, определяющие их прочность. Это концентрация и распределение металла, размер частиц и их внутреннее строение, форма выделений стекла в матрице и в хондрах, термальный и ударный метаморфизм, характер агрегации хондр и их структура, текстура обломков [Скрипник, 2011г]. При этом в качестве опорных данных по физикосвойствам механическим ограниченного числа метеоритов (Еленовка, Кунашак, Царев дp.) были использованы И

инструментальные определения прочности при статическом одноосном сжатии

В период 2008-2020гг инструментальные оценки прочности обыкновенных хондритов выполненные на основе стандартных методов испытаний на образцах полуправильной формы при одноосной нагрузке [Slyuta et al.2008], были представлены более широким кругом данных. Было испытано на прочность около ста образцов метеоритов Царев, Ghubara и SAU-001. Для двух экземпляров метеорита Царев на основе представительной СОВОКУПНОСТИ статистической удалось определить параметры анизотропии и характер дискретного распределения прочности внутри метеорита При этом впервые в России были определены деформационные характеристики метеоритов SAU-001 и Царев при полной кривой одноосном сжатии С записью В режиме запредельного деформирования. Позже, на образцах правильной формы метеорита Царев, при объемном сжатии по схеме Кармана [Никитин и др., 2016] были установлены закономерности изменения условий локализации объемного разрушения вплоть до роста магистральных трещин при высоких боковых нагрузках (до 45МПа). Испытания в режиме запредельного деформировавния позволили отметить аномальные проявления разрушения в динамической форме, устойчивые во всем диапазоне бокового сжатия при 5, 15, 25 и 35 МПа.

Анализ полученных данных показал, что без учета связи с веществом и апеллируя в основном только к дефектной структуре (дислокации, трещины и т.п.) нет возможности построения количественных эволюционных моделей зарождения, развития и разрушения космических тел.

Целью настоящего исследования явилось определение условий локализации элементов дефектной структуры и оценка механизмов эволюции прочности метеоритов при внешнем воздействии.

обеспечением работы служит согласие с Теоретическим П.Роу о процессах сдвиговой агрегации представлениями И дезинтеграции частиц грунтов, обладающих обломочной структурой подобной хондритовой и допускающих использование модели дилатирующей среды [Rouw, 1972]. Её адекватность подтверждена экспериментально [Dresher A., de Josseling de Jong G., 1972] и соответствует наблюдаемой дефектной структуре, нами В обыкновенных хондритах.

В качестве информационной базы были использованы результаты определения физико-механических свойств метеоритов Царев, Ghubara и SAU-001 с использованием комплекса испытательных систем Instron, США, W+B, Швейцария, CD-10 и CD-100, Германия.

Контроль механизмов разрушения выполнялся методами оптической и электронной микроскопии. Помимо этого, на атомносиловом микроскопе МИФИ. была выполнена фрактография скола

В итоге на основании петрографических и натурных наблюдений установлены закономерности локализации процесса твердофазного массопереноса, отражающиеся в режиме взрывоподобного увеличения вновь образованной поверхности в окрестности кончиков и в берегах трещин.

Анализ структуры поверхности и распределения обломков по размерам показал, что границами их агрегатов могут служить разные пути перемещения вещества, включающие открытые трещины при их росте, дефекты берегов этих трещин и зоны индукции с возникновением , зарождением и перемещением «дрейфом» перед «головой» и в берегах трещины вторичных трещин меньших размеров.

Предполагается реализация двух основных механизмов разрушения метеорита:

- статическое разрушение путем последовательной агрегации дефектной структуры с постепенным отбором активных трещин и их объединением, стремяшимся к образованию блочной формы обломков, путем последовательного роста магистральных трещин, итогом которого является переход к регулярной упаковке агрегатов;

- динамическое разрушение хондр, источником энергии которого служат ядра хондр, выполненные либо газом, либо включениями метала, что проявляется в форме объемного дробления и подтверждается взрывным процессом разрушения образцов;

- преобладание той или иной формы разрушения определяется условиями локализации при росте трещин и распределением вещества в окрестности их берегов.

Полученная информация может служить основой построения комплексной модели процессов разрушения космических тел.

# Литература

1. Скрипник А.Я. О ряде факторов, влияющих на прочностные свойства метеоритов. Двенадцатая международная

конференция. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле", Москва, 3-5, Борок 6 октября 2011 г.

- 2. Slyuta, E.N., Nikitin, S.M., Korochantsev, A.V. and Lorents C.A.: Physical and mechanical properties of Sayh al Uhaymir 001 and Ghubara meteorites. LPSC XXXIX, abs. #1056, 2008
- Никитин С.М., Скрипник А.Я., Горбацевич Ф.Ф., Асанов В.А., Паньков И.Л., Морозов И.А., Никитин А.С. Деформация и разрушение образцов метеорита Царев при объемном сжатии. // Труды ВЕСМПГ-2015, М. 2015. С.311-315.
- 4. Rowe P.W. Theoretical meaning and observed values of deformation parameters for soll.Proceedings of the Roscoe Memorial Symposium, Cambridge University, 1972, p. 143-192.
- 5. Dresher A., de Josseling de Jong G. Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 20, 337-351 (1972).

RECONSTRUCTION OF DESTRUCTION PROCESSES OF ORDINARY CHONDRITES SAMPLES ACCORDING TO MINERALOGICAL AND PETROGRAPHIC DATA

# <sup>1</sup><u>Nikitin S.M.</u>, <sup>2</sup>Skripnik A.Ya.

<sup>1</sup>Laboratory of mechanics of rocks and ores. Company of «LS-KAM», Moscow. <u>petromtchanika69@mail.ru</u>

<sup>2</sup>V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow

The distribution of defects in the initial structure of fragments of the Tsarev meteorite and SAU-001 is considered on the basis of petrographic data in combination with the results of atomic-force and electron microscopy. Mineral complexes, such as associations of complex chondrules or chondrules and matrix in meteorites, which determine the deformation and strength characteristics of intensely metamorphosed ordinary chondrules, are conductors of plastic deformation or foci of brittle fracture. Manifesting in the form of anomalies on load-deformation diagrams, the latter serve as sources of dynamic shear forms of samples crushing, which complicates quasistatic forms of interchondral (intergranular) destruction.

#### ВЛИЯНИЕ СУЛЬФИДНОЙ СЕРЫ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ХРОМШПИНЕЛИДА В БАЗАЛЬТАХ НОРМАЛЬНОЙ ЩЕЛОЧНОСТИ Николаев Г.С.

Институт геохимии и аналитической химии (ГЕОХИ РАН), Москва, <u>gsnikolaev@rambler.ru</u>

Принцип кислотно-осно́вного взаимодействия Коржинского утверждает, что при повышении кислотности системы валовые коэффициенты активности осно́вных компонентов понижаются, а кислотных — повышаются в соответствии со степенью их диссоциации.

Изменение кислотно-осно́вных свойств магматической системы сказывается на параметрах ликвидуса кристаллизующихся фаз (Коржинский, 1960). При увеличении кислотности системы с сохранением ее состава и температуры минералы-растворы и равновесный им расплав будут обогащаться самым осно́вным миналом и обедняться самым кислотным, что компенсируется степенью закристаллизованности системы. Миналы, обладающие промежуточными значениями этого показателя, будут реагировать в соответствии со степенью их близости к крайним членам.

Оценка компонентов ПО параметру кислотность-(Маракушев 1978) проводилась основность за вслед ПО к протону (протонный эквивалент). показателю сродства т.е. гидратации свободной энергии реакции компонента ⊿G°<sub>т</sub> в пересчете на один протон. Расчеты для 1200°С, позволяют выстроить петрогенные компоненты расплава в ряд по степени увеличения основных свойств:  $H_2S \rightarrow P_2O_5 \rightarrow Fe_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 \rightarrow SiO_2$  $\rightarrow$  TiO<sub>2</sub>  $\rightarrow$  Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\rightarrow$  FeO  $\rightarrow$  MgO  $\rightarrow$  MnO  $\rightarrow$  CaO  $\rightarrow$  Na<sub>2</sub>O  $\rightarrow$  K<sub>2</sub>O. B этом ряду сера является наиболее кислотным компонентом и ее эффекты. вклад В связанные С кислотно-основным взаимодействием, должен быть максимальным. Для оценки основности миналов хромшпинелида рассчитывались их реакции гидратации, которые получались путем сложения в необходимой пропорции реакций гидратации составляющих их ионов. Для 1200°С значения  $\Delta G^{\circ}_{\tau}$  составляют (ккал/моль): Sp – +3.3, Hc – +1.9, Ch – +5.7, Mt – -1.3, Mf – -0.8, т.е. самым оснояным является Ch-минал, а самым кислотным минал Mt.

сульфидной серы Представление 0 влиянии на кристаллизацию шпинелида можно получить ПО экспериментальной работе (Sattari et al., 2002). Целью этого исследования было определение коэффициентов распределения платиноидов между шпинелидом, силикатным и сульфидным расплавами при 1330°С и 10 кбар. Были представлены результаты 5 номинально сухих опытов в которых единственной кристаллической фазой был хромшпинелид. В качестве стартового состава был принят ранее хорошо экспериментально изученный базальт 401 (Roeder, Reynolds, 1991), на примере которого исследовалось влияние на равновесие хромшпинелид - расплав вариаций фугитивности кислорода и содержания хрома в системе при температуре 1200 - 1300°С и давлении в 1 атм и 10кбар. Сопоставление результатов этих исследований позволяет провести сравнение кристаллизации шпинелида из идентичного расплава как в свободной от серы, так и в сульфидонасыщенной системах. Из выборки 26 опытов (24 при 1 атм и 2 при 10 кбар) при дальнейшем сравнительном анализе были исключены 3 сильно окисленных 1-атм эксперимента (fO<sub>2</sub> > *NNO*) и один высокобарный опыт продолжительностью менее 24 часов, как возможно неравновесный.

B СИЛУ ТОГО, ЧТО опыты проводились при различных температурах, В широком диапазоне fO<sub>2</sub> И различными содержаниями хрома, которые являются мощными факторами, влияющими на состав хромшпинелида, непосредственно сравнивать между собой результаты экспериментов невозможно. Для сравнительного анализа использовались расчеты проведенные по модели равновесия шпинелид – расплав SPINMELT-2 (Николаев и др., 2018), которая была откалибрована на экспериментах,

свободных от серы. Моделировались равновесные температура и состав шпинелида соответствующие составу расплава и условиям каждого опыта. В качестве меры для сравнения была выбрана величина отклонения расчетных параметров от экспериментальных (Δ = расч – эксп).

Результаты расчетов приведены на Рис. 1 в виде гистограмм. Эксперименты, не содержащие серу, воспроизводятся моделью с практически симметричным разбросом, который незначительно



Рис. 1 Влияние сульфидонасышенных условий на кристаллизацию шпинелида на примере опытов над базальтом 401. Опыты свободные om серы (Roeder, Reynolds, 1991): белое - эксперименты при 1 атм, серое – при 10 кбар; сульфидонасыщенные опыты (Sattari et al., 2002) при 10 кбар – Систематические различия экспериментальных черное. и параметров полученных расчетных шпинелида, при равновесия шпинелид-расплав моделировании С помошью превеехищин везинынана точность (23°С по температуре, для Сг и AI - 3 ат. %, для Mg, Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> - 0.8 ат. %). Напротив,

189

опыты С сульфидонасыщенными расплавами демонстрируют систематические отклонения, которые следует интерпретировать как результат направленного влияния сульфидной серы. Для части параметров эти отклонения не велики и находятся на грани точности расчета, но для части компонентов они значительны:  $\Delta T =$ 18.4±3.6°C,  $\Delta Cr = -12.0\pm0.8$ ,  $\Delta AI = 11.1\pm0.8$ ,  $\Delta Fe^{3+} = 1.0\pm0.04$ ,  $\Delta Fe^{2+} = 1.0\pm0.04$  $-3.2\pm0.2$ ,  $\Delta$ Mg = 3.1 $\pm$ 0.3 ат.%. Таким образом, можно утверждать, что появление сульфидной серы в системе понижает ликвидусную температуру шпинелида, и в его составе понижает содержания AI, Fe<sup>3+</sup> и Mg, но повышает содержания Cr и Fe<sup>2+</sup>. Установленные эффекты находятся в согласии с проведенным выше теоретическим анализом: появление серы влечет увеличение содержания (хромита) и обеднение твердого наиболее основного минала раствора кислотными миналами, пропорционально их содержанию и степени близости к самому кислотному.

<u>Влияние сульфидной серы на кристаллизацию шпинелида</u> <u>можно продемонстрировать на примере крупного Cu-Ni-PGE</u> <u>месторождения Сакатти</u> (структура Колари-Киттиля-Соданкюля, Центрально-Лапландский зеленокаменный пояс, Сев. Финляндия).

Месторождение сульфидов, магматических слабо приурочено К дифференцированному перидотитовому интрузиву метапелитов среди И кварцитов палеопротерозойского возраста. Тело сложено орто-мезо-адкумулятами гарцбургитов. дунитов И минерализация Рудная приурочена к нижней части представлена тела и как вкрапленными сульфидами, несколькими так И



Рис. 2. Вариации состава хромита на месторождении Сакатти в керне скв. 17MOS8168; черными жирными линиями отмечены горизонты массивных сульфидных руд (вне масштаба); белые кружки — хромиты из разреза, содержащего сульфидную минерализацию, черные — хромиты свободной от сульфидов части разреза.

массивными сульфидными линзами, мощностью до 25 м. Верхняя часть тела сложена неминерализованными гарцбургитами. Вариации состава хромшпинелида по разрезу интрузива по данным
(Silventoinen, 2020), показаны на рис. 2. Хромиты нижней сульфидсодержащей части разреза обладают более высокими значениями Cr# и меньшей Fe<sup>3+</sup># относительно хромитов верхней свободной от сульфидов части разреза. Эти различия двух групп составов хорошо согласуются с теоретическим прогнозом и данными экспериментов.

**<u>Выводы.</u>** 1. Проведен теоретический анализ влияния сульфидной серы на кристаллизацию хромшпинелида. 2. Анализ экспериментальных данных позволил оценить масштабы явления: сдвиг состава по Cr и AI до 10-12 ат.%. 3. Проявления этого эффекта установлены в природе.

Работа выполнена в рамках госзадания ГЕОХИ РАН.

# Литература

- 1. Коржинский Д.С. Кислотность щелочность как главнейший фактор магматических и послемагматических процессов. // в кн. *Маематизм и связь с ним полезных ископаемых*. М.: Изд-во АН СССР. 1960. С. 21 – 30.
- 2. Маракушев А.А. Термодинамический расчет показателей основности химических элементов и простых окислов. // в кн. *Очерки физико-химической петрологии*. Вып. VII. (отв. ред.: Жариков В.А., Федькин В.В.). М.: Наука. 1978. С. 41 - 82.
- Николаев Г.С. и др. SPINMELT-2.0: Численное моделирование равновесия шпинелид – расплав в базальтовых системах при давлениях до 15 кбар. І. Формулировка, калибровка и тестирование модели. // Геохимия.2018. № 1. 28 – 49.
- 4. Composition of chromite in the Sakatti Cu-Ni-PGE deposit, Central Lapland Greenstone Belt, Finland. Master's thesis. University of Helsinki, Faculty of Sci., Department of Geosciences and Geography. 2020. 95 p.
- 5. Roeder P.L., Reynolds I. Crystallization of Chromite and Chromium Solubility in Basaltic Melts. // *J. of Petrol.* 1991. V. 32. P. 909 934.
- 6. Sattari et al. Experimental Constraints on the Sulfide- and Chromite-Silicate Melt Partitioning Behavior of Rhenium and Platinum-Group Elements. // Econ. Geol. 2002. V. 97. P. 385 - 398.

#### EFFECT OF SULFIDE SULFUR ON THE CHROMITE CRYSTALLIZATION OF LOW ALKALI BASALTS **Nikolaev G.S.**

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analitical Chemistry (GEOKHI RAS), Moscow, <u>gsnikolaev@rambler.ru</u>

The appearance of  $S^{2-}$  in melts lowers the liquidus temperature of chromite and the contents of AI,  $Fe^{3+}$ , Mg in it decrease, but the contents of Cr and  $Fe^{2+}$  increase. Relative to  $S^{2-}$ -free systems in  $S^{2-}$ -saturated melts, chromite contains 12 at.% more Cr, and 11 at.% less AI.

## АТОМАРНЫЙ АНАЛИЗ ОЛИВИН-СОДЕРЖАЩИХ ГАББРО-ДОЛЕРИТОВ ЮЖНО-НОРИЛЬСКОГО ИНТРУЗИВА ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ 3D-ТОМОГРАФИИ **Никулин И.И.**

ООО «Норникель Технические Сервисы», Санкт-Петербург, inikulin@gmail.com

Существующие методы атомарного анализа предполагают полное знание всех вовлеченных в рассматриваемую систему внутренних процессов. Такое условие неверно, если некоторые факторы рудогенеза не учтены при генетическом моделировании, особенно при его физико-математическом выражении [Gavriluţ A. et.al., 2019]. Чтобы добавить информацию к дальнейшему решению этой проблему нами предлагается рассмотрение результатов обработки данных рентгеновской 3D-томографии вкрапленных руд в одном из перспективных интрузивов с помощью вычисления предела их атомизации через теорию фрактальной меры.

В этой работе фрактал – не имеющий чётких геометрических пропорций результат взаимодействия энергий определённого знака, несущий в себе все свойства произошедшего целого процесса. То есть с помощью атомизирования агрегатов рудных минералов мы пытались определить его элементарную частицу, описываемую фрактальной размерностью. Фрактальная размерность этой частицы будет описывать рассматриваемую систему рудогенеза в любой ее части интрузива. Вычисление размерности происходило по следующему сценарию: 1) сканирование керна скважины на нанофокусной исследовательской рентгеновской системе для General томографии компьютерной Electric V|tome|X S 240 федеральный (Казанский (Приволжский) университет) 2) определялись объем фазы (мм<sup>3</sup>) и объемная доля в объеме всего фазы (мм<sup>2</sup>), образца (%), площадь поверхности показатель поверхности объекта, который сложности количественно определяет, как поверхность этого объекта заполняет пространство (фрактальная размерность), вычисление меры трехмерной неоднородности (степень анизотропии); 3) электронная микроскопия на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Leo 1450 (Carl Zeiss), оборудованном ЭДС-спектрометром Aztec Ultimmax 100 (Oxford Instruments) (ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты) в обратно рассеянных электронах (BSE-изображения) для получения карт распределения элементов (Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Na, Ni, P, S, Si, Ti); 4) определение 2D-фрактальной размерности с помощью программы GG 3 [Чернявский А.В., Степенщиков Д.Г., 2021] ПО BSEизображениям; 5) содержания элементов платиновой группы,

золота и серебра определялось масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой iCAP Q модели iCAP Qc и атомноабсорбционным спектрометром iCE 3300 (ООО «Институт Гипроникель»).

Южно-Норильский интрузив развит в 30 км южнее г. Норильск на большей своей площади в базальтах сыверминской и гудчихинской свит с максимальной мощностью 90,2 м. Он является естественным петротипа Круглогорского интрузива продолжением И. таким круглогорский тип образом. представляет собой норильского комплекса [Геология Норильской ..., 2020]. Интрузив представляет собой пологосекущее тело, слабо дифференцированное от оливинсодержащих габбро-долеритов и лейкогаббро, развитых почти повсеместно, до такситоподобных и пикритоподобных габбродолеритов с бедной сульфидной вкрапленностью. Пикритовых габбро-долеритов не обнаружено. Повсеместно развит горизонт лейкогаббро, горизонты такситовых, такситовидных а И пикритовидных габбро-долеритов имеют малые мощности и почти развиты. Этот интрузив показывает СВОЮ естественную не зональность с юга на север от разрезов без лейкогаббро (скв. ЮП-1), характерных для флангов тыловой фации (прикорневой зоны) до характерных лейкогаббро, для центральной разрезов С И фронтальной фации на флангах интрузивов норильского комплекса. Буровыми скважинами вскрыта слабо дифференцированная от оливинсодержащих оливиновых и такситовидных габбро-ДО долеритов интрузия – Моронговская ветвь Южно-Норильского интрузива, установлено выклинивание интрузива в скважинах ЮЖ-20 (26,8 м) и ЮЖ-24 (4,3 м) (рисунок).

Подстилающими в выклинивающейся части Моронговской ветви Южно-Норильского интрузива породами являются гломеропорфировые базальты средней пачки надеждинской свиты (T₁nd<sup>2</sup>), характеризующимися несколько пониженным уровнем содержания Cr. но выраженным бимодальным С четко распределением содержаний AI, Mg, Cr, Cu, Zr и Y, и выраженным слабо для Ni, Ti и P. Средняя пачка надеждинской свиты в основании представлена гломеропорфировыми, базальтами (1-2 покрова) темно-серого и черного цвета. Основная масса породы тонкозернистая. Мощность гломеропорфировых горизонта базальтов колеблется от 15 до 35 мм. Остальная часть разреза подсвиты сложена мощным горизонтом порфировых базальтов, составляющих 9-12 покровов, общей мощностью 200-250 м. Общая мощность пачки 210-270 м.

Исследованы образцы керна скважин № ЮЖ-20 (глубины – 19,1 и 29,9 м) оливин-содержащих габбро-долеритов Моронговской ветви

и для сравнения скважины № ЮЖ-12 (глубины – 374,8, 399,4 и 424 м).

1. Разрешение томографии в этом исследовании составляло до 70 мкм. Выделены: фаза 1 – сульфиды и оксиды железа (пирротин, пентландит, халькопирит, кубанит, пирит, ильменит, минералы группы шпинели); фаза 2 – оливин, пироксен, амфибол, биотит, мусковит; фаза 3 – плагиоклазы, тальк, серпентин.

2. Тип оруденения образует капли и интерстициальную вкрапленность. Но капли распределены неравномерно и имеют нетипично для норильского типа маленький размер. Очевидна почти линейная закономерность изменения фрактальной размерности рудных минералов с логарифмом площади поверхности их агрегатов. Вычисленные характеристики в таблице, а выделенный тип оруденения образует капли и интерстициальную вкрапленность с фрактальными размерностями 1.88–1.96 и 1.83–2.20.

3. Рудные минералы представлены, в основном, мелкой оксидной вкрапленностью (хромит, магнетит, ильменит) и мелкими единичными зернами сульфидов.

4. 2D-фрактальной размерности сульфидных агрегатов коррелируется с 3D-размерностью с вариативностью до 10%, которая зависит из-за захвата томографом других (несульфидных) минералов.

Поле вариаций фрактальных размерностей (фрактальной скорости) не представляет реального движения, но способствует передаче информации переданного удельного количества движения и о фокусе энергии ликвации. Это хорошо видно по ее отсутствию в зависимости от сохранения плотности состояний рудных агрегатов и по его роли в вариационном принципе.

Таким образом, с помощью полученной фрактальной размерностью можно описать образ (паттерн) любого рудного минерала.

Представлена математическая перспектива изучения фактов случившихся процессов, которая предлагается как альтернатива их моделированию. Будущее обсуждение автором предлагается как соединение теории меры и квантовой физики через квантовую открывается как новое теорию меры, ЧТО направление исследований – теория мультифрактальной меры и ее прикладное значение в определении сложившийся динамической системы из-за того или иного процесса. В нашем случае - был рудный процесс или не был в нужной динамике, чтобы образовать изученную нами фрактальную размерность.

# Литература

- Геология Норильской металлогенической провинции / Под ред. И.И. Никулина; ПАО ГМК "Норильский никель". Москва: МАКС Пресс, 2020. 524 с. <u>https://elibrary.ru/bytenk</u>
- Чернявский А.В., Степенщиков Д.Г. Метод сегментации изображения для подсчета процентного содержания минералов с помощью авторской программы / Труды Ферсмановской научной сессии, 2021. 18:414–418. https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.078.
- Gavriluţ A., Mercheş I., Agop M. Atomicity through Fractal Measure Theory. Mathematical and Physical Fundamentals with Applications. Springer Cham, 2019. XIII, 184 p. <u>https://doi.org/10.1007/978-3-030-29593-6</u>.

С помощью теории фракталов и разработанной компьютерной атомизированы агрегаты минералов программы рудных ДО элементарных частиц. Эти частицы описываются фрактальной размерностью. Вычисленная размерность описывает гипотетическую определивших энергий. СВЯЗЬ потенциал оливин-содержащих габбро-долеритов рудоносности Южнооруденения образует Норильского интрузива. Тип капли И интерстициальную вкрапленность с фрактальными размерностями математической 1.88-1.96 1.83-2.20. Представлен пример И перспективы изучения фактов случившихся процессов, который предлагается как альтернатива моделированию процессов рудогенеза

# ATOMICITY ANALYSIS OF OLIVINE-CONTAINING GABBRO-DOLERITES OF THE SOUTH NORILSK INTRUSION BASED ON 3D X-RAY TOMOGRAPHY DATA

## Nikulin Iv.lv.

LLC Nornickel Technical Services, St. Petersburg

Using the theory of fractals and the developed computer program, aggregates of ore minerals are atomized to elementary particles. These particles are described by fractal dimension. The calculated dimension describes the hypothetical relationship of energies that determined the ore potential of olivine-bearing gabbro-dolerites of the South Norilsk intrusion. The mineralization type forms drops and interstitial dissemination with fractal dimensions of 1.88–1.96 and 1.83–2.20. An example of a mathematical perspective of studying the facts of the processes that have occurred is presented, which is proposed as an alternative to modeling the processes of ore genesis.

#### ВЛИЯНИЕ СОЧЕТАНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОГО И СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЙ ХИМИЧЕСКИ ЗАКРЕПЛЕННОГО ГРУНТА НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ОЦЕНКИ ЕГО УСТОЙЧИВОСТИ МЕТОДОМ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ Новиков Е.А., Клементьев Е.А.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), Московский горный институт (МГИ), Россия, 119049, Москва, Ленинский проспект, д.4, e.novikov@misis.ru, evgeniy-klementevof@mail.ru

Введение. На сегодняшний день, при устройстве фундаментных оснований высотных зданий и ведении строительных работ на структурно неустойчивых грунтах (просадочных, опасных по подвижкам и сползанию, значительно обводненных и др.), широкое распространение получила практика их искусственного химического закрепления путем нагнетания в геосреду под давлением растворов водоцементных, а также смесей на основе различных компаундов или силиката натрия и калия (жидкое стекло). В отдельных случаях находят применение такие специальные методы усиления грунта, как: плавление и спекание песков и глинистых пород; создание ледопородного ограждения; пропускание постоянного электрического тока через грунтовый материал, активизирующее в нем процессы электроосмоса, электролиза и обменные реакции, приводящие к повышению удельного сцепления частиц грунта при снижении их общей гидрофильности и, как следствие, к формированию более устойчивых грунтовых агломератов. Вместе с тем, несмотря на наличие значительных технических возможностей для выполнения работ по искусственному закреплению грунта, их результативность по-прежнему носит существенно вероятностный характер. Последнее вызвано целым рядом факторов, среди которых особо выделить можно высокую неопределенность пространственной изменчивости структуры, состава и свойств грунтового массива, не позволяющую создать некую универсальную методику закрепления, гарантирующую получение заранее известного результата в любых условиях. Поэтому в каждом отдельном случае необходимо на основе известных методических разработок и априорной информации об особенностях геоподосновы конкретного объекта, специально составлять методику упрочнения его основания. Причем коррективы в нее зачастую вносятся вплоть до завершения работ. Сказанное обосновывает высокие требования к полноте, достоверности и быстроте получения измерительной информации, используемой для принятия оперативных решений по управлению рисками в области промышленной безопасности из-за недостаточного закрепления геосреды. Тем не менее, хотя такие измерения могут проводиться по обширному спектру способов, каждый из них имея определенные достоинства, равным образом не лишен и значимых ограничений области применения.

Отмеченное подчеркивает актуальность и значимость выработки новых и продолжения развития существующих методов определения параметров структуры, свойств и состояния грунтов. Среди перспективных методических разработок, могущих способствовать решению рассматриваемой задачи, следует выделить метод термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ). Уже получены первые результаты [Новиков, 2022], свидетельствующие о его пригодности для мониторинга деформированного состояния подвергнутых квазистатическому нагружению тампонажно-грунтовых материалов. Однако экспериментальная проверка пригодности метода ТАЭ для проведения измерений в более приближенных к натурным и потому более сложных условиях многократного повторно-переменного нагружения - не проводилась. В виду этого, выполнена настоящая работа, направленная на восполнение данного пробела.

Приборное и методическое обеспечение. В качестве объекта испытаний выбрана отвержденная компаундом Этал 143-М проба влагонасыщенного песчано-глинистого грунта массой 4.5 кг: 21.5 % глины; 50.1 % песка с фракционным составом от 0.3 до 0.8 мм; 18.3 % воды и 10.2 % компаунда. Эксперимент состоял из трех циклов механического нагружения пробы, каждый из которых включал несколько серий ступенчато возрастающего псевдотрехосного сжатия с вариативным давлением бокового обжима. Величина P и продолжительность t данных нагружений показаны на рис. 1. В процессе каждого из них, через временные интервалы, достаточные для остывания грунта до комнатной температуры, включались размещенные по периметру пробы нагреватели и выполнялась регистрация ее акустико-эмиссионного отклика на взаимоналожение полей механических и термических напряжений. Одновременно с этим, с целью определения различий в ходе структурных перестановок по продольной и поперечной осям, в дискретном режиме проводилось ультразвуковое зондирование пробы в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Обработка зарегистрированных сигналов акустической эмиссии (АЭ) включала в себя определение таких ее параметров как: активность  $\dot{N}_{\Sigma}$  [имп. / с] (физический смысл: мера интенсивности процессов деструкции и перестройки структурных связей); длительность импульса  $D_{imp}$  [мкс / с] (физический смысл: мера устойчивости структурных связей, ставших источниками АЭ); число выбросов в импульсе  $V_{imp}$  [выбр. / с] (критерий оценки повторяемости событий АЭ, определяющий степень доверия к несомой ими информации); энергия источника  $E_{sour}$  (физический смысл: мера сохраненной в зондирующей упругой волне энергии, после ее взаимодействия с геосредой); время нарастания импульса *IRT* [мкс / с] (физический смысл: мера «емкости» структурных связей по отношению к энергии, которую им нужно аккумулировать для перехода в предельнонапряженное состояние), и предполагала расчет средних значений данных параметров по перечисленным ниже временным интервалам:

- от начала каждого цикла прогрева грунта до достижения им установившейся рабочей температуры  $T_{\text{max}}$ , когда скорость ее изменения не превышает  $\Delta T \approx 1.5 \dots 2$  К/ч (условные обозначения получаемых после усреднения показателей: М[ $\dot{N}^{(l)}{}_{\Sigma}(x)$ ], М[ $D^{(l)}{}_{\text{imp}}(x)$ ], М[ $V^{(l)}{}_{\text{imp}}(x)$ ], где x = 0, 1, 2, 3, …, n – порядковый номер цикла нагрева);

- с момента достижения грунтом температуры  $T_{\text{max}}$  и до начала его прозвучивания упругими волнами (условные обозначения получаемых после усреднения показателей: М[ $\dot{N}^{(II)}_{\Sigma}(x)$ ], М[ $D^{(II)}_{\text{imp}}(x)$ ], М[ $V^{(II)}_{\text{imp}}(x)$ ]);

- период прозвучивания разогретого до  $T_{\text{max}}$  грунта упругими волнами (условные обозначения получаемых после усреднения показателей:  $M[V_{\text{imp}}^{(III)}(y)], M[E_{\text{sour}}^{(III)}(y)], M[IRT^{(III)}(y)], где <math>y = 0, 1, 2, 3, ..., N -$ порядковый номер серии измерений).

Комплексная оценка результатов всех промежуточных этапов обработки экспериментальных данных осуществлена посредством обобщающего показателя *R*T<sup>gr</sup><sub>neu</sub>:

$$RT_{neu}^{gr} = \frac{M\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(\mathrm{II})}(x)\right] \times M\left[D_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(x)\right] \times M\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(x)\right] \times M\left[\dot{N}_{\Sigma}^{(\mathrm{II})}(0)\right] \times M\left[D_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(0)\right] \times M\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(x)\right] \times M\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(x)\right] \times M\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(x)\right] \times M\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(0)\right] \times M\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(0)\right] \times M\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(0)\right] \times M\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(0)\right] \times M\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{II})}(0)\right] \times M\left[V_{\mathrm{imp}}^{(\mathrm{III})}(0)\right] \times M\left[E_{\mathrm{sour}}^{(\mathrm{III})}(0)\right] \times M\left[IRT^{(\mathrm{III})}(0)\right].$$

Конструкция лабораторной установки, физическое обоснование и теоретические основы *R*T<sup>gr</sup><sub>neu</sub>, произведенные в процессе его построения научные выкладки и другие методические аспекты, которые вследствие ограничений на объем публикации здесь освятить не представляется возможным, подробно раскрыты в [Новиков, 2022].

Результаты экспериментов представлены на рис. 1.



Рис. 1. Зависимости значений показателя *R*Т<sup>gr</sup><sub>neu</sub>, нагрузки *Р* и скорости С<sub>р</sub> распространения ультразвуковых волн в пробе от времени t с начала эксперимента, где  $\sigma_{c*}$ - математическое ожидание предела прочности составляющего пробу тампонажногрунтового материала, определенное на основе результатов серии испытаний контрольных образцов по FOCT 21153.2

Характер  $RT^{gr}_{neu}(t)$  на протяжении цикла I наглядно отображает процесс потери геоматериалом устойчивости по мере накопления в нем микродефектов и возникновения одиночных невзаимодействующих друг с другом разрывных макронарушений, соизмеримых с размерами пробы (зона I-1), очаговой интенсификации образования деформаций на макроуровне (зона I-2), формирования в столбе отвержденного грунта связанных групп магистральных сквозных трещин (зона I-3). Идентифицируемое по  $RT^{gr}_{neu}(t)$  развитие структурной деструкции также подтверждается результатам визуального обследования и распределением  $C_{p}(t)$  по области A, вид которого свидетельствует о постепенном разуплотнении пробы, сообразно ее нагружению. Как следует из  $C_{n}(t)$  по области В, в цикле II на фоне продолжающегося трещинообразования в вертикальной плоскости, в силу осадки поверхности нагружения, произошло обширное боковое выпирание пробы. Из-за этого последняя вступила в непосредственной контакт с металлическими стенками вмещающей ее металлической колбы и передала на нее часть нагрузки, благодаря чему устойчивость грунта возросла. Прирост нагрузки сопровождался пропорциональным увеличением степени всестороннего обжатия грунта и, как следствие, повышением его прочностных характеристик, тогда как колба блокировала развитие продольных деформаций. В таком псевдостабильном состоянии грунт пребывал вплоть до достижения предельно напряженного состояния в завершении зоны II-2 и последовавшего за ним развала пробы. Превалирование процессов упрочнения, в последовавшем цикле III, объясняется переуплотнением («утрамбовкой») внутри, выступающей в роли опалубки колбы, образованных при развале отдельных блоков, что в том числе доказывается локальным экстремумом  $C_{\rm p}(t)$  по области С.

**Выводы.** Экспериментальное подтверждение получила пригодность метода ТАЭ для исследования динамики устойчивости грунтов в условиях циклического повторно-переменного нагружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 21-77-00010.

## Литература

1. Новиков Е.А., Клементьев Е.А. Исследование методом ТАЭ прочностных свойств грунтов <...> // ГИАБ. – 2022. – № 4. – С. 134–155.

#### INFLUENCE OF CYCLIC AND STATIC LOADS OF A CHEMICALLY STABILIZED SOIL ON THE RELIABILITY OF ITS STABILITY EVALUATION BY THE THERMOSTIMULATED ACOUSTIC EMISSION METHOD **Novikov E.A., Klementyev E.A.**

FSAEI HE National University of Science and Technology «MISiS», Moscow mining institute (MGI), 4, Lenina ave., Moscow, 119049, Russia

Given the results of experimental research of patterns of thermostimulated acoustic emission (TAE) in hardened soil under variable loading. Based on these results and data from ultrasonic sounding, confirmed TAE method high informational value when taking measurements in such conditions.

## ОЦЕНКА АМПЛИТУДНОГО ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

<sup>1</sup><u>Патонин А.В.</u>, <sup>1</sup>Шихова Н.М., <sup>1,2</sup>Смирнов В.Б., <sup>1</sup>Пономарёв А.В. <sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (ИФЗ), Москва <sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

#### patonin\_borok@mail.ru

Разработанный И апробированный при лабораторных испытаниях образцов горных пород метод определения механизма акустической эмиссии (AESAM) [Shikhova, источника сигнала Patonin, 2021] основан на оценке амплитуд первого полупериода волны, приходящей на акустический датчик. Метод предполагает, распространение энергии упругой волны, исходящей ЧТО OT образуемой трещины, происходит в соответствии с диаграммой направленности в виде двойного диполя, состоящего из диполя сжатия и диполя растяжения. При этом разработанный алгоритм учитывает изменения амплитуды сигнала только за счет его геометрического расхождения. Затухание сигнала, происходящее в результате поглощения его самой средой, не учитывается, что может приводить к увеличению ошибки определения как самой амплитуды векторов сжатия и растяжения, так и направлений осей сжатия и растяжения распространяющейся волны.

В общем виде уменьшение амплитуды принимаемого сигнала описывается формулой  $A = 1/r * A_0 * e^{-\alpha r}$  (1), где  $A_0$ - амплитуда в

расстояние источник\приемник, α- коэффициент источнике. rзатухания, обусловленный физическими свойствами материала. коэффициент варьируется широком Этот В диапазоне для различных горных пород. Особенно сильное его изменение происходит при насыщении флюидом высокопористого песчаника. В данной работе мы попытались провести оценку коэффициента затухания С использованием волновых форм сигналов ультразвукового зондирования.

Классический пространственного метод определения сигнала реализовать амплитудного затухания сложно В лабораторных условиях ввиду малого размера образца. Попытки перейти пространственного к временному коэффициенту ОТ затухания также не дают хороших результатов. Это связано с тем, между пространственным и временным коэффициентами ЧТО затухания существует нелинейная связь, которая, в силу малых размеров образца, обусловлена наличием большого количества переотраженных сигналов. Помимо этого, в ходе лабораторных испытаний образцов горных пород, скорости распространения упругих волн значимо изменяются, что также вносит ошибку в определение коэффициента затухания по волновой форме сигнала акустической эмиссии. Все перечисленные сложности не позволяют достоверно определять коэффициент затухания по амплитуде сигнала акустической эмиссии и характеру спада его огибающей.

Использование амплитуды первого вступления волновых форм ультразвукового зондирования для определения сигналов коэффициента затухания исключают такого рода ошибки. Основным преимуществом здесь служит то, что в ходе всего эксперимента как излучаемая амплитуда сигнала  $(A_{0}),$ так И расстояние источник\приемник остается постоянным. По записанным в ходе эксперимента волновым формам принимаемых сигналов проводим ультразвукового зондирования мы вычисление как абсолютного, так и относительного коэффициента затухания. Для получения абсолютного значения коэффициента затухания нами проводится калибровка на материале с известным коэффициентом затухания. В качестве такого материала ΜЫ используем алюминиевый образец. Исходя из соотношения (1) мы можем записать выражение для амплитуд:  $A * e^{-\alpha r} = B * e^{-\beta r}$  (2), где A и Bамплитуды принятой волны на испытуемом образце и на алюминии,  $\alpha$  и  $\beta$  - коэффициенты затухания образца и алюминия. Проведя несложные преобразования и взяв натуральный логарифм получим  $Ln\frac{A}{B} = r * (\alpha - \beta)$ , или  $\alpha = \beta + \left(\frac{1}{r}\right) * Ln\frac{A}{B}$ (3).

Рассчитанный таким образом амплитудный коэффициент затухания предполагается использовать для уточнения характеристики распространяющегося фронта упругой волны в методе AESAM.

Зачастую, при проведении испытаний образцов в условиях всестороннего сжатия, важное значение имеют не абсолютные значения коэффициента затухания, а его относительные изменения, как наиболее яркие его вариации при смене условий нагружения. Для этого мы используем расчеты коэффициента затухания относительно первой сессии зондирования. Взяв за основу формулу (2) и переписав ее в виде  $\frac{A_1}{A_n} = \frac{e^{-\alpha_n r}}{e^{-\alpha_1 r}}$ , где  $A_1$  и  $A_n$  амплитуды первой и последующих сессий зондирования,  $\alpha_1$  и  $\alpha_n$  соответствующие коэффициенты затухания. Логарифмируя это выражение, получим  $\frac{\alpha_1}{\alpha_n} = Ln \frac{A_1}{A_n}$  (4).

На рисунке 1 представлены изменения относительного коэффициента затухания, вычисленные по данным нагружения

образца песчаника в условиях трехосной деформации. Начальная стадия деформирования характеризуется квазилинейным ростом осевой нагрузки до момента начала дилатансии (примерно 4000 с). Далее начинается процесс формирования магистрального разлома, характеризуемый ростом интенсивности акустической активности и постепенным падением несущей способности образца (падение Ha 5500 секунде испытания осевой нагрузки). В образце сформировался магистральный разлом. Дальнейшая динамика нагрузки определяется изменения осевой напряжениями, действующими на образец и силой трения берегов магистрального разлома.



**Рис. 1** История нагружения образца. Осевая нагрузка (1), изменение относительного коэффициента затухания α (2), акустическая активность (3).

Показано (рис.1), что этап квазилинейного роста осевой нагрузки (до 4000 с) сопровождается плавным увеличением относительного коэффициента затухания. При этом с началом этапа дилатансии и магистрального разлома отмечается подготовки резкий DOCT относительного коэффициента затухания. То есть относительный затухания оказался чувствителен к изменениям коэффициент внутреннего, напряженного состояния образца. При этом, ΠО волновым ультразвукового имеющимся формам сигналов динамичное зондирования, возможно отследить более его поведение ПО различным направлениям прозвучивания С дальнейшим построением томограммы всего объема образца. коэффициента Уменьшение затухания этапе после на магистрального 5500 формирования разлома (после C) соответствует дополнительному обжиму и уплотнению образца за

счет повышения всестороннего давления. Отсутствие ярко выраженных изменений относительного коэффициента затухания на этапе после формирования магистрального разлома (7000-10500 с) говорит о достаточно стабильном состояния самого образца. В это время происходит плавное скольжение берегов магистрального разлома под воздействием осевой деформации.

Определение коэффициента затухания используется нами для уточнения амплитуды распространяющейся упругой волны в методе AESAM.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования "Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм" ИФЗ РАН и в рамках госзадания ИФЗ РАН.

#### Литература

1. Shikhova N., Patonin A. Methods for determining focal mechanisms in laboratory experiments // EGU General Assembly 2021, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3305.

ESTIMATION OF AMPLITUDE ATTENUATION OF ULTRASONIC SENSING SIGNALS ACCORDING TO LABORATORY EXPERIMENT DATA

<sup>1</sup><u>Patonin A.V.</u>, <sup>1</sup>Shikhova N.M., <sup>1,2</sup>Smirnov V. B., <sup>1</sup>Ponomarev A.V. <sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow <sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow patonin\_borok@mail.ru

The issue of estimating the attenuation coefficient of the amplitude of the ultrasonic sounding signal during testing of rock samples under conditions of triaxial deformation is considered. It is shown that at the initial stage of loading, this parameter is more sensitive to changes in the stress state of the material. ИЗМЕНЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ

ПОДГОТОВКЕ РАЗРУШЕНИЯ <sup>1</sup>Пономарев А.В., <sup>1,2</sup>Смирнов В.Б., <sup>1</sup>Фокин И.В., <sup>1</sup>Патонин А.В., <sup>2</sup>Шаталина Е.И., <sup>1</sup>Строганова С.М., <sup>1</sup>Шихова Н.М., <sup>1</sup>Сергеев Д.С., <sup>1</sup>Леонова А.М., <sup>1</sup>Егоров Н.А.

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук, (ИФЗ РАН), г. Москва, avp@ifz.ru;

<sup>2</sup>Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова, физический факультет, г. Москва, vs60@mail.ru;

Экспериментально исследована изменчивость проницаемости образцов осадочных и изверженных горных пород при всестороннем сжатии одноосном нагружении вплоть разрушения. И ДО Проницаемость определялась на регулярной основе методом стационарного потока флюида (constant flow-rate method) при градиенте давления фильтрующейся жидкости 1 МПа. Давление всестороннего сжатия поддерживалось на уровне 20 или 30 МПа, а средняя скорость деформирования составляла около 0.2×10E-7 1/с. Эксперименты выполнялись в режиме ступенчатого нагружения с управлением по величине деформации (strain control), при этом величина деформационных ступеней составляла около 50 мкм. В качестве нагружающих машин использовались сервоуправляемые комплексы GCTS RTR 4500 и ИНОВА. Методика проведения опытов обеспечивала получение полной реологической кривой – от упругой области до формирования узкой зоны микротрещиноватости на этапе деформирования за пределом прочности. В результате были получены динамические оценки изменчивости проницаемости на всем интервале нагружения (рис.1).

Длительность отдельного эксперимента достигала 3 суток, что при частоте измерения проницаемости каждые 40 минут позволяло получить достаточно детальную картину изменения этого параметра Значения развития разрушения. проницаемости ПО мере вычислялись закону Дарси предположении согласно В Показано, флюида. ламинарности потока ЧТО изменения проницаемости носят закономерный характер для всех типов исследованных пород и определяются, в основном, возникновением и развитием популяции трещин в условиях полного насыщения Ha деформирования образцов флюидом. этапе упругого проницаемость задается первичной структурой породы и меняется незначительно. Далее, по мере приближения к пределу прочности и переходу материала к неупругому поведению, проницаемость заметно увеличивается и может возрастать на 1-2 порядка для изверженных пород по сравнению с первичной матричной (около 10 мкДа). После образования зоны макроразрушения и падения осевой нагрузки проницаемость меняется слабо, оставаясь при этом на высоких значениях. Вполне очевидно, что эти изменения обусловлены образованием и ростом дефектов (микротрещин), выявлена которых может быть наблюдениями динамика за акустической эмиссией (АЭ). Мы исследовали акустические режимы на образцах-близнецах песчаников для сопоставления изменения проницаемости и параметров акустического режима при подготовке макроразрушения. Обнаружено, как и в ранее проведённых опытах, что акустическая активность возрастает на этапе перехода от упругой деформации пределу прочности, что хорошо К коррелируется с изменением проницаемости (рис.1).



Рис 1. Типичная история нагружения образца

Анализ амплитудного распределения АЭ показал, что энергия закономерно увеличивается по событий мере формирования макроразрушения. Это подтверждает реализацию сценария роста размеров трещин и их слияния, что приводит к образованию крупной сложно построенной зоны трещиноватости, которая обеспечивает относительно высокие значения проницаемости

образующихся предположительно за счет роста площади микротрещин. Возможно, дополнительный вклад в этот сценарий воздействие, которое вносит флюидное понижает прочность деформируемой породы. Выявлена корреляция между ростом проницаемости и увеличением энергии акустических событий по мере приближения к началу разрушения образца (рис.2). Показано, что отношение скоростей продольной и поперечной волн в испытанных песчаниках хорошо отражает ход изменения проницаемости.

Исследование эволюции проницаемости по уже сформированной зоне «разлома» в условиях сдвига осложняется неоднородным распределением нормальных напряжений, морфологией рельефа поверхности, скоростью скольжения, величиной сдвигового смещения, процессами залечивания трещин, диффузии флюида и т. д., учёт которых требует специальных экспериментов.



Рис 2. Взаимосвязь проницаемости и энергии событий АЭ в эксперименте.

Лабораторные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования ИФЗ РАН в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

# CHANGES IN ROCK PERMEABILITY DURING PREPARATION OF DESTRUCTION

<sup>1</sup><u>Ponomarev A.V.</u>, <sup>1,2</sup>Smirnov V.B., <sup>1</sup>Fokin I.V., <sup>1</sup>Patonin A.V., <sup>2</sup>Shatalina E.I., <sup>1</sup>Stroganova S.M., <sup>1</sup>Shikhova N.M., <sup>1</sup>Sergeev D.S., <sup>1</sup>Leonova A.M., <sup>1</sup>Egorov N.A.

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth (IPE) RAS, Moscow, <u>avp@ifz.ru</u>

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, <u>vs60@mail.ru</u>

The evolution of the permeability of sedimentary and igneous rocks (cores 30 mm in diameter and 60 mm high) was studied experimentally under confining pressure and uniaxial loading up to failure. The permeability was determined by the constant flow-rate method with a pressure gradient of 1 MPa of the filtered fluid. Permeability values were calculated based on Darcy's law.

The experimental technique ensured obtaining a complete stressstrain curve - from the elastic part to postfailure deformation during the formation of a narrow microfracture zone. As a result, estimates of the dynamics of permeability were obtained over the entire loading interval. It is shown that changes in permeability are determined mainly by the appearance and development of a population of fractures under conditions of complete saturation of the samples with fluid. As the ultimate strength is approached, the permeability increases by 1–2 orders of magnitude for igneous rocks compared to the primary matrix permeability.

A correlation was found between the increase in permeability and the increase in the energy of acoustic events as the onset of sample destruction is approached. t's obvious that the formation of a large complex fractured zone provides relatively high permeability values. It is shown also that the ratio of compressional and shear wave velocities in the tested sandstones well tracks changes in permeability.

ИСТОЧНИКИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ НЕРКАЮСКОГО КОМПЛЕКСА (ПРИПОЛЯНЫЙ УРАЛ)

Пономарева Т.А., Кушманова Е.В.

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, taponomareva@inbox.ru, e.v.kushmanova@mail.ru

Неркаюский эклогит-сланцевый комплекс, расположенный в северной части Приполярного Урала, вытянут с юга-запада на север-восток по правобережью р. Хулги от ее крупного притока – р. Хальмеръю до р. Бол. Тыкотлова на 80 км. Высокобарические породы комплекса граничат на западе с рифейскими вулканогенноосадочными отложениями керегшорского комплекса, а на юговостоке – с палеозойскими габбро-гипербазитовыми породами Олыся-Мусюрского массива, маркирующими Главный Уральский разлом [Иванов и др., 1980; Казак, 1982; Вализер и др., 1988; Пыстин, 1994; Ремизов и др., 2006; Пыстин и др., 2014].

По результатам комплексного геолого-геофизического изучения установлено, что неркаюский комплекс характеризуется знакопеременными геофизическими полями, в которых северовосточный сектор отличается по структурным признакам (формой, размерами), интенсивностью магнитных И гравитационных аномалий от юго-западной его части [Пономарева и др., 2016, 2017]. северо-восточного Положительные аномалии сектора имеют "паукообразную" неправильную форму обусловлены породами основного состава (амфиболитами и эклогитоподобными породами (ЭПП), В меньшей степени, амфиболитовыми И гранатглаукофановыми сланцами). В целом отрицательные поля Δg и (ΔT) в юго-западной части комплекса связаны с низкотемпературными слюдяными кристаллическими сланцами различного состава. В связи с этим неркаюский комплекс условно делится на две части: северо-восточную более "основную", И юго-западную "сланцевую".

Одновременно с геофизическим работами системно проводились петрофизические исследования пород с учетом их вещественного состава, петрографических и петрохимических особенностей, которое помогли глубже понять природу северовосточных положительных аномалий и проверить достоверность геофизических выводов.

Изучение физических свойств пород (главным образом, удельной магнитной восприимчивости и плотности) у метабазитов определенные позволило выявить закономерности между минеральным составом пород, степенью метаморфического и преобразования метасоматического И ИХ петрофизическими свойствами.

B амфиболитах удельной изменчивость магнитной восприимчивости фиксируется в пределах от 16.85 до 1176×10<sup>-8</sup> СИ. Выделяются три выраженных интервала: слабо магнитный (n=29) -16.85-74.75×10<sup>-8</sup> СИ при <sub>Хср</sub> 38×10<sup>-8</sup> СИ; средне магнитный (n=6) – 123.5-273.5 ×10<sup>-8</sup> СИ при <sub>Хср</sub> 196,72×10<sup>-8</sup> СИ и магнитный (n=6) -687.39-1584 ×10<sup>-8</sup> СИ при <sub>Хср</sub> 968.41×10<sup>-8</sup> СИ. Слабо магнитными свойствами характеризуются неизмененные амфиболиты с низким ильменита. Среднемагнитные содержанием свойства имеют альбитизированные амфиболиты с содержанием ильменита 2-3 %, магнетита 1–3% и титаномагнетита (1–3%). Магнитными являются альбитизированные амфиболиты с повышенным содержанием ильменита (3-5%), магнетита (4-8%) и титаномагнетита (3-5%). Самое высокое значение магнитной восприимчивости (1584.74×10-8 СИ) имеет окварцованный амфиболит с высоким содержанием магнетита (12 %).

На диаграмме зависимости магнитной восприимчивости от Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Na<sub>2</sub>O положительная корреляция между этими параметрами намечается только у магнитных амфиболитов, у слабо магнитных амфиболитов такой корреляции нет.

Схожая картина по значениям магнитной восприимчивости наблюдается у ЭПП. В пределах вариаций  $\chi_{yd}$  выделяются только два выраженных интервала: слабо магнитный (n=12) – 26.38-74.75×10<sup>-8</sup> СИ при  $\chi_{cp}$  49.96×10<sup>-8</sup> СИ и средне магнитный (n=6) – 144.56-273.5×10<sup>-8</sup> СИ при  $\chi_{cp}$  217.85×10<sup>-8</sup> СИ. Слабо магнитные характеристики кварц-гранат-амфибол-омфацитовые породы, а среднемагнитные значения получены по пироксен-гранат-эпидот-амфиболовым образованиям с повышенным количеством эпидота. Четкой корреляции между химическим составом и магнитной восприимчивостью у ЭПП не наблюдается, среднемагнитные породы имеют повышенные значения Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Na<sub>2</sub>O по сравнению со слабомагнитными разновидностями.

Большая часть исследуемых образцов среди метабазитов немагнитна, а 30% имеют повышенные и высокие значения  $\chi_{yg}$ .

При изучении плотностных характеристик амфиболитов (n=29) наблюдается широкий спектр значений плотности. от 2,87 до 3,27×10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup> при среднем значении (ρ<sub>cp</sub>) 3,13×10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>. Гистограмма частот плотности фиксируют попадание большего количества образцов в интервал 3,12–3,17×10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>.

Эклогитоподобные породы (n=17) характеризуются небольшим разбросом значений плотности от 3,13 до 3,34×10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>, при р<sub>ср</sub> 3,26×10<sup>3</sup> кг/м3. На гистограмме и графике распределения частот видно, что эклогитоподобные породы характеризуются большими значениями плотности со смещением максимума на интервал 3,25–3,28×10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>.

При анализе петрофизических характеристик наблюдается присутствие прямой связи между магнитной восприимчивостью и плотностью в амфиболитах только среди слабомагнитной группы пород (коэффициент корреляции 0,55). В эклогитоподобных породах среди слабомагнитных и среднемагнитных разностей корреляционная связь между физическими свойствами отмечена, но выражена очень слабо (К=0,2).

Таким образом, в процессе комплексных петрофизических, петрографических и петрохимических исследований установлено, что источниками положительных магнитных и гравитационных аномалий северо-восточной части неркаюского комплекса являются сильно измененные в процессах диафтореза и метасоматоза альбитизированные, окварцованные, хлоритизированные И карбонатизированные амфиболиты с повышенным содержанием ильменита, магнетита и титаномагнетита. Возможно, что свой вклад В потенциальные поля также внесли высокоплотные эклогитоподобные породы с большей плотностью и схожей с амфиболитами намагниченностью. Вариации физических свойств ЭПП, в частности их повышение, также связано с вторичными изменениями, точнее с эпидотизацией.

Авторы выражают огромную благодарность Уляшевой Н.В. за помощь в описании шлифов.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (рег. номер 1021062211107-6-1.5.6; FUUU-2022-0085).

210

## Литература

1. Иванов К.С., Пучков В.Н., Пелевин И.А. Эклогиты и глаукофановые сланцы районы реки Балбанъю (Приполярный Урал) // Ежегодник 1980 ИГиГ УНЦ АН СССР. Свердловск.1981. С.72-74.

2. Казак А.П. Глаукофансланцевые формации Севера Урала // Петрология и минералогия метаморфических формаций Сибири. Новосибирск. 1982. С. 143-150.

3. Вализер П.М., Ленных В.И. Амфиболы голубых сланцев Урала. М.: Наука, 1988. 203 с.

4.Пыстин А.М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. М: Наука, 1994. 208 с.

5. Ремизов Д.Н, Григорьев С.И., Григорьева Н.Г., Юдин В.В., Иванов В.Н., Феофилактов Ф.Н. Первичный состав и геодинамика неркаюского комплекса и лемвинсконо аллохтонов Приполярного Урала. Проблемы геологии и минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 2006. С. 128–142.

6. Пыстин А.М., Кушманова Е.В., Потапов И.Л., Панфилов А.В. Неркаюский метаморфический комплекс Приполярного Урала. Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. №11. 2014. С.14-19.

7. Пономарева Т.А., Пыстин А.М. Анализ физических свойств пород Восточной зоны севера Урала // Известия Коми НЦ УрО РАН, 2016. №1(25). С.51-61.

8. Пономарева Т.А., Пыстин А.М., Кушманова Е.В. Глубинная характеристика неркаюского эклогит-сланцевого комплекса приполярного Урала по гравиметрическим данным // Вестник Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 11. С. 9-15.

# SOURCES OF POSITIVE GEOPHYSICAL ANOMALIES IN THE NORTHEASTERN PART OF THE NERKAYU COMPLEX (NETHER-POLAR URALS)

# Ponomareva T.A., Kushmanova E.V.

Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, <u>taponomareva@inbox.ru</u>

In this article, based on the analysis of petrophysical, petrographic and petrochemical data, an attempt is made to find the sources of positive magnetic and gravitational anomalies in the northeastern part of the Nerkayu complex. The authors focus on the increased magnetic properties of metabasites acquired in the processes of diaphthoresis and metasomatosis, which affect the structure of geophysical fields.

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ

Пономаренко И.А., Муравина О.М.

Воронежский государственный университет (ФГБОУ ВО «ВГУ»), Воронеж, <u>kochuma@yandex.ru</u>

Идентификационное моделирование методом группового учета аргументов (МГУА) позволяет получить комплексную петрофизическую модель, характерную для объекта исследования, например пород определенного литологического типа, возраста, структурновещественного комплекса (СВК). Модель представляет собой полиномиальную зависимость Колмогорова-Габора и связывает несколько петрофизических параметров [Муравина, 2012; Муравина, 2013; Муравина и др. 2016; Муравина и др. 2017; Муравина и др. 2018; Муравина и др. 2019; Муравина, Пономаренко 2020; Муравина и др. 2021; Пономаренко Муравина 2021].

Выполнены исследования, показывающие преимущество использования МГУА по сравнению с традиционным методом регрессионного анализа.

В качестве примера рассмотрим результаты анализа по двум выборкам петрофизических данных супракрустальных пород Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Первая выборка данных представляет собой петрофизические параметры гнейсов брянской серии пород. Брянская серия, которая является одной из трех фациальных ассоциаций раннеархейских (саамских) стратифицированных образований обоянского комплекса (SM*ob*), территориально приуроченна к Брянскому макроблоку в северо-западной части мегаблока КМА. [Глазнев и др., 2020].

Рассматривались данные, полученные для 66 образцов. В таблице 1 приведены попарные коэффициенты линейной корреляции петрофизических параметров.

Таблица 1

Корреляционная матрица петрофизических параметров гнейсов брянской серии

	σ	х	Vp	η
σ	1			
х	0.03	1		
Vp	0.69	-0.08	1	
η	0.07	0.20	0	1

Примечания:  $\sigma$  - плотность (г/см<sup>3</sup>),  $\varkappa$ - магнитная восприимчивость (n\*10<sup>-5</sup>ед. СИ);  $\eta$  – поляризуемость , %.

Как видно из таблицы 1, плотность и скорость продольных волн связаны тесной корреляционной зависимостью — коэффициент корреляции составляет 0,69. Линейная взаимосвязь между остальными петрофизическими характеристиками практически отсутствует. Уравнение линейной регрессии для плотности и скорости продольных волн, полученное традиционным способом имеет вид:

σ=2.145+0.123v

(1)

Среднеквадратичная невязка экспериментальных и модельных данных составляет ±0,059 г/см<sup>3</sup>. Идентификационное уравнение МГУА имеет вид:

σ=2.390+0,079v-0.188η+0.033v\* η

(2)

Среднеквадратичная невязка экспериментальных и модельных данных второго уравнения составляет ±0,057 г/см<sup>3</sup>

Вторая выборка данных характеризует петрофизические свойства амфиболитов воронцовской серии (КR<sub>1</sub>vc) и включает данные по 187 образцам. Палеопротерозойские (нижне-карельские) образования воронцовской серии распространены в пределах Хоперского мегаблока в восточной части ВКМ [Глазнев и др., 2020]. Для этих пород петрофизические параметры не обнаруживают тесной линейной связи (табл. 2).

Таблица 2

	σ	х	Vp	η		
σ	1					
Х	-0.33	1				
Vp	0.48	-0.06	1			
η	-0.13	0.45	-0.16	1		

Корреляционная матрица петрофизических параметров амфиболитов воронцовской свиты (KR<sub>1</sub>vc)

Примечания: σ - плотность (г/см<sup>3</sup>), х- магнитная восприимчивость (n\*10<sup>-5</sup>ед. СИ); η – поляризуемость , %.

Традиционное уравнение регрессии имеет вид:

σ=2.419+0.084v

(3)

Среднеквадратичная невязка экспериментальных и модельных данных модели (3) составляет ±0,06 г/см<sup>3</sup>

МГУА получена идентификационная модель вида:

σ=2.462+-0.00001**x**-0.08v

(4)

Среднеквадратичная невязка экспериментальных и модельных данных уравнения (4) составляет ±0,01 г/см<sup>3</sup>

Анализ качества полученных зависимостей показал, что в случае существования тесной линейной взаимосвязи качество моделей, полученных традиционным способом, и МГУА отличается несуще-

ственно. Во втором случае качество идентификационной модели МГУА существенно выше.

Включение в модель МГУА дополнительных петрофизичеких параметров увеличивает точность моделирования, и объединяет в единую зависимость несколько петрофизических параметров, что расширяет круг задач, при которых их можно использовать [Муравина, Пономаренко 2020; Муравина и др. 2021; Пономаренко Муравина 2021]

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-05-00190.

# Литература

- 1. Глазнев В.Н., Муравина О.М., Жаворонкин В.И. и др. Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива // Воронеж: Научная книга, 2020. 101 с.
- 2. Муравина, О.М. Метод группового учёта аргументов при анализе геофизических данных / О.М. Муравина // Геофизика. 2012. № 6. С. 16-20.
- Муравина О.М. Идентификационный анализ петрофизических характеристик пород осадочного чехла Воронежской антеклизы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2. Вып. 22. С. 20–25.
- Муравина О.М., Давудова Э.И., Пономаренко И.А. Разделение пород михайловской серии Воронежского кристаллического массива по петрофизическим и пространственным параметрам // Материалы XVII Международной конференции «Физикохимические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2016. С. 235-237.
- Муравина О.М., Давудова Э.И., Пономаренко И.А. Использование метода группового учета аргументов для выявления выбросов в экспериментальных петрофизических данных // Материалы XVIII Международной конференции «Физикохимические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2017. С. 200-203.
- Муравина О.М., Давудова Э.И., Пономаренко И.А. Формирование петрофизических моделей и их использование при интерпретации геофизических полей // Материалы IXX Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2018. С. 242-245.
- 7. Муравина О.М., Чернышова М.Н., Жаворонкин В.И., Кислова Е.И. Комплексный анализ петрофизических данных при изуче-

нии ультрамафит-мафитовых интрузий в пределах Хоперского мегаблока Воронежского кристаллического массива// Материалы XX Международной конференции «Физикохимические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2019. С. 255-258.

- Муравина О.М., Пономаренко И.А. Идентификационный анализ плотности и удельного электрического сопротивления кристаллических пород воронежского кристаллического массива // Материалы XXI Международной конференции «Физикохимические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2020. С. 177-179.
- 9. Муравина О.М., Пономаренко И.А., Минц М.В. Применение группового учета аргументов для метода анализа петрофизических данных// Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2021. N⁰ 3. Вып. 51. C. 5-15. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-3-51-5-15.
- 10. Пономаренко И.А., Муравина О.М. Методика применения идентификационного моделирования для анализа петрофизических данных // Материалы XXI Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2021. С. 213-215.

## COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF PETROPHYSI-CAL MODELS OBTAINED BY THE METHOD OF GROUP ACCOUNT-ING FOR ARGUMENTS

## Ponomarenko I.A., Muravina O.M.

Voronezh state university (VSU), Voronezh, kochuma@yandex.ru

The results of a comparative analysis of models obtained by the method of group consideration of arguments and the traditional method of regression analysis are presented. An analysis of the quality of the obtained dependencies showed that in the case of a close linear relationship, the quality of the models obtained in the traditional way and the method of group accounting for arguments differ insignificantly. In the absence of close correlations, the accuracy of identification models is significantly higher.

# ПЕРВАЯ НАХОДКА Au-Ag НАНОЧАСТИЦ В ПЛОТНОМ УГЛЕКИСЛОТНОМ ФЛЮИДЕ СРЕДНЕЙ КОРЫ

<sup>1</sup>Прокофьев В.Ю., <sup>2,3</sup>Бэнкс Д.А., <sup>1</sup>Лобанов К.В., <sup>4</sup>Селектор С.Л.,
<sup>5</sup>Миличко В.А., <sup>6</sup>Боровиков А.А., <sup>1</sup>Чичеров М.В.
<sup>1</sup>ИГЕМ РАН, Москва, Россия, <u>vpr@igem.ru</u>
<sup>2</sup>University of Leeds, Лидс, Великобритания, <u>D.A.Banks@leeds.ac.uk</u>
<sup>3</sup>Pamukkale University, TR-20020 Denizli, Turkey
<sup>4</sup> ИФХЭ РАН, Москва, Россия, <u>sofs@list.ru</u>
<sup>5</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, <u>ariesval@mail.ru</u>
<sup>6</sup>ИМП СО РАН, Новосибирск, Россия, borovikov.57@mail.ru

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) глубиной 12262 м информации источником процессах. является важным 0 происходивших В глубинных зонах континентальной коры [Кольская..., Балтийского 1998]. вскрыла щита Скважина протерозойские архейские рудной И породы С различной минерализацией [Казанский и др., 1989]. В интервале глубин 9.5-11 км среди амфиболитов и двуслюдяных гнейсов архейского возраста (2.6-2.8 Ga) методом нейтронной активации была обнаружена золотая минерализация с концентрациями Au от 0.01 до 6.7 ppm. Вмещающие Au минерализацию породы подверглись воздействию регионального метаморфизма при 500-650 °С и 3.5-[Козловский др., 1988]. Золотая минерализация 6 кбар И представлена самородным Au (до 10 мкм) в кварце и других минералах [Казанский и др., 1989].

Ранее [Prokofiev et al., 2020 и др.] были получены данные о флюидных включениях (ФВ) в кварцевых прожилках из керна золотоносного интервала. В этой зоне выделено 4 типа ФВ: 1) газовые ФВ с плотной углекислотой; 2) двухфазовые ФВ водносолевых растворов; 3) трехфазовые ФВ хлоридных рассолов, кубический NaCl, содержащие кристалл И 4) включения углекислотно-водно-солевых флюидов. Исследование ФВ методом LA ICP MS показало наличие высоких концентраций Au в индивидуальных ФВ всех типов во всём исследуемом диапазоне глубин (9050-11000 м) и присутствие наночастиц золота в ФВ типа 3 и 4 [Prokofiev et al., 2020]. Настоящее сообщение посвящено детальному исследованию ФВ типа 1 с плотной углекислотой, которые имеются в кварце на всем протяжении золотоносного интервала и преобладают в его нижней части.

Микротермометрические исследования ФВ проводились в лаборатории геохимии ИГЕМ РАН с использованием микротермокамеры THMSG–600 фирмы "Linkam" (Англия). Изучение состава газовой фазы индивидуальных ФВ проводилось методом

КР-спектроскопии при комнатной температуре и при 140°С в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск при помощи спектрометра Jobin Yvon рассчитывались LabRAM HR800. Мольные доли газов С использованием данных [Schrötter, Klöckner, 1979]. Содержание Au и Ад в индивидуальных ФВ изучались методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и с лазерным пробоотбором (LA ICP) MS) в университете г. Лидс, Великобритания с помощью массспектрометра Agilent 7500с в сочетании с лазерной системой для абляции Geolas Q Plus. Спектры пропускания в оптическом диапазоне для разных точек внутри индивидуальных ФВ были получены в университете ИТМО на специальной конфокальной установке высокого разрешения (спектр регистрировался для объёма 1 µм<sup>3</sup>).

Установлено, что углекислота в большинстве газовых ФВ типа 1 гомогенизируется в жидкость при температурах от -45.0 до +30.8 °C. В некоторых ФВ (образец К-10205.8) углекислота гомогенизируется температуре +30.5 °C. газ при Температура плавления В углекислоты изменяется от -56.7 до -60.3 °C, что свидетельствует о наличии в ней примеси низкокипящих газов. Изучение состава газовой фазы ΦВ методом КР-спектроскопии при комнатной температуре показало наличие в углекислоте ФВ типа 1 по всему изученному разрезу небольшой примеси азота (3.3-1.9 мол. %), и сероводорода (пределы обнаружения отсутствие метана И 0.1 мол. %). Плотность углекислоты составляет 0.37–1.14 г/см<sup>3</sup>.



Sample depth 10744 m

Рис. 1. Профиль лазерной абляции через углекислотные ФВ.

При температуре 140 °C в тех же газовых ФВ с плотной углекислотой при КР-спектроскопических исследованиях появились пики воды, что позволило оценить концентрацию воды в плотном газовом флюиде (0.11-0.44 мол. %). Основным компонентом флюида является углекислота (98.2-99.5 мол. %), в которой также обнаружен азот (0.43-1.80 мол. %).

Исследование методом LA ICP MS показало наличие высоких концентраций золота (1-2611 ppm, 62 определения) и серебра (1-4389 ppm, 58 определений) в однофазовых ФВ с плотной углекислотой (рис. 1) в пробах с глубин 9052-10744 м.

Доказательство того, что Аи и Ад находятся в ФВ в форме наночастиц. было получено при регистрации С помошью конфокального микроскопа спектров пропускания в оптическом диапазоне в разных частях ΦВ с шагом 1 µм по глубине. При записи спектров в плотной углекислоте ФВ типа 1 было обнаружено, что вблизи границы флюид/кварц эти спектры имеют выраженную полосу в области около 440 нм. Такая полоса характерна для плазмонного поглощения наночастиц сферической формы диаметром около 10 нм, содержащих около 75% Ag [Mallin, Murphy, 2002]. В спектрах других областей раствора ФВ и во вмещающем кварце такая полоса не наблюдается. Однотипные данные были получены для 3 ФВ, имеют одинаковые тренды и однозначно доказывают наличие наночастиц Ag-Au в растворе ФВ вблизи границы флюид/кварц. Подобное скопление наночастиц на межфазной границе жидкость/твёрдое тело также является характерным для наносистем. Некоторое несоответствие данных ICP MS и конфокальных спектров пропускания относительно наночастицах Au И Aq ΜΟΓΥΤ объясняться соотношения В обогащением поверхности наночастиц серебром, что характерно для частиц типа ядро(Au)/оболочка(Ag).

ФВ, заполненные плотной углекислотой, часто интерпретируют как свидетельства гетерогенизации углекислотно-водного флюида. Однако обобщения данных по составу и плотности флюидов во включениях в минералах коровых и мантийных пород [Реддер, 1987 и др.] показали, что для пород верхней мантии характерен газовый флюид, который состоит главным образом из плотной углекислоты. Для минералов из верхней части земной коры, напротив, характерны ΦВ, содержащие растворы. Поскольку водные значительная часть природных вод концентрируется на поверхности Земли и вблизи нее, глобальная миграция газов из мантии в верхние оболочки должна сопровождаться взаимодействием глубинных газовых флюидов с водными флюидами.

Золотая минерализация СГ-3 формировалась на глубинах средней коры (17 км и более) и, по современным представлениям, отвечает уровню мобилизации флюидов орогенных месторождений Au [Goldfarb, Groves, 2015 и др.]. Обнаружение наночастиц Au и Ag в углекислотном флюиде доказывает возможность переноса Au и Ag в

форме наночастиц плотным углекислотным флюидом глубинного происхождения из глубинных зон в область средней коры.

## Литература

- 1. Кольская сверхглубокая: Научные результаты и опыт исследований. М.: МФ «ТЕХНОНЕФТЕГАЗ», 1998. 260 с.
- 2. Казанский В.И., Новгородова М.И., Смирнов Ю.П., и др. // Геология рудных месторождений. 1989. Т. 31. № 6. С. 75–82.
- 3. Козловский Е.А., Губерман Д.М., Казанский В.И., и др. // Советская геология. 1988. № 9. С. 3–11.
- 4. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. Т. 1. М.: Мир, 1987. 360с.
- 5. Goldfarb, R. J., Groves, D. I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time // Lithos. 2015. 233. P. 2–26.
- 6. Mallin M.P., Murphy C.J. Solution-Phase Synthesis of Sub-10 nm Au-Ag Alloy Nanoparticles // Nanoletters. 2002. V. 2. № 11. P. 1235-1237.
- Prokofiev V., Banks D., Lobanov K., Selektor S., Milichko V., Borovikov A., Akinfiev N., Lüders V., Chicherov, M. Exceptional Concentrations of Gold Nanoparticles in 1,7 Ga Fluid Inclusions From the Kola Superdeep Borehole, Northwest Russia // Scientific Reports. 2020. 10. 1108.
- Schrötter H.W., Klöckner H.W. Raman scattering cross sections in gases and liquids. In: Raman Spectroscopy of Gases and Liquids (A. Weber editor). Topics in Current Physics, Springer–Verlag, Berlin, 1979. P. 123–166.

FIRST FINDING OF Au-Ag NANOPARTICLES IN DENSE CARBON-DIOXIDE FLUID OF THE MIDDLE CRUST

<sup>1</sup>Prokofiev V., <sup>2,3</sup>Banks D., <sup>1</sup>Lobanov K., <sup>4</sup>Selektor S., <sup>5</sup>Milichko V., <sup>6</sup>Borovikov A., <sup>1</sup>Chicherov M.

<sup>1</sup>IGEM RAS, Moscow, Russia, <u>vpr@igem.ru</u>

<sup>2</sup>University of Leeds, Leeds, UK, <u>D.A.Banks@leeds.ac.uk</u>

<sup>3</sup>Pamukkale University, TR-20020 Denizli, Turkey

<sup>4</sup>A.N. Frumkin IPhChE RAS, Moscow, <u>sofs@list.ru</u>

<sup>5</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russia, <u>ariesval@mail.ru</u>

<sup>6</sup>V.S. Sobolev IMP SB RAS, Novosibirsk, Russia, <u>borovikov.57@mail.ru</u>

Individual fluid inclusions with dense carbon dioxide in quartz of the goldbearing interval of the Kola Superdeep borehole SG-3 were studied using modern techniques. The presence of Au-Ag nanoparticles in the fluid of the inclusions has been proved. The possibility of gold and silver transport by dense carbonic acid fluid in the middle and lower crust and upper mantle in the form of nanoparticles is discussed.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТВОРЕНИЯ ШЕЕЛИТА В НАДКРИТИЧЕСКИХ ВОДНЫХ ХЛОРИДНЫХ РАСТВОРАХ Редькин А.Ф., Котова Н.П.

Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН, Черноголовка, redkin@iem.ac.ru

В результате экспериментальных исследований взаимодействия шеелита CaWO<sub>4</sub> (Sch) с растворами 0.01-0.316 *m*HCl установлено, что растворение шеелита в растворах HCl проходит инконгруэнтно с образованием окислов вольфрама и гексагональной кальций вольфрамовой бронзы состава Ca<sub>0.07</sub>WO<sub>3</sub> (HTB) [Редькин, Котова, 2021, 2023]. Состав стабильных окислов вольфрама в изученном интервале температур 400 – 500°C и  $fO_2$  от Cu<sub>2</sub>O-CuO до Co-CoO кислородных буферов, как это следует из анализа литературных данных, ограничен составами WO<sub>3</sub> и WO<sub>2.9</sub> (или W<sub>20</sub>O<sub>58</sub>).

Полученные сведения по устойчивости вольфрам-содержащих фаз, были использованы в термодинамических расчетах. На первом этапе термодинамических исследований выполнено согласование свободных энергий Гиббса компонентов раствора и твердых Wсодержащих фаз. В расчетах были использованы следующие частицы водного раствора:  $H_2O$ ,  $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $CI^-$ ,  $HCI^0$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $CaCI^+$ ,  $CaCl_2^0$ ,  $CaOH^+$ ,  $WO_4^{2-}$ ,  $HWO_4^{-}$ ,  $H_2WO_4^0$ . Расчеты проводились по програмным комплексам HCh, и OptimA и OptimB [Шваров, 2007; Shvarov, 2015]. Индивидуальные коэффициенты активности частиц рассчитывались по расширенному уравнению Дебая-Хюккеля во Ha приближении. рис. представлены втором 1 результаты согласования расчетных (показаны линиями) и экспериментальных (показаны символами) данных. В настоящих расчетах использованы только частицы W(VI)для водного раствора. константы устойчивости которых приведены в работе [Wood, Samson, 2000]. Расчеты показали, что в условиях Cu<sub>2</sub>O-CuO буфера при 400°C конгруэнтной растворимости шеелита находится при область концентрации HCI ниже  $4.34 \cdot 10^{-3} m$ , а при  $500^{\circ}$ C - при концентрации HCI ниже 0.004 *m*. Растворимость шеелита в H<sub>2</sub>O, согласно расчетам, составляет 2.78<sup>.</sup>10<sup>-6</sup> и 2.93<sup>.</sup>10<sup>-6</sup> моль кг<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O. Рост концентрации HCI, приводит к осаждению WO<sub>3</sub> из раствора.

В окислительно-восстановительных условиях, соответствующих Co-CoO буферу, шеелит растворяется с образованием HTB. Область конгруэнтной растворимости шеелита, так же, как и с Cu<sub>2</sub>O-CuO буфером, достаточно узкая и ограничена *m*HCI < 2·10<sup>-3</sup>.



**Рис. 1.** Влияние *m* HCI на содержание *m* W и Ca в растворе, равновесном с шеелитом при 400 (а) и 500°C (б), *P* = 1000 бар и фугитивности кислорода заданной различными металлоксидными буферами, по экспериментальным (символы) и расчетным (линии) данным.

На рис. 2 представлены результаты моделирования растворимости Sch в растворах 0.001 – 1.0 *m*KCl на линиях гидролизного равновесия микроклина (Mic) с кварцем (Qtz) и мусковитом (Ms)

1.5 Mic + HCl = 3 Qtz + 0.5 Ms + KCl

при 400 и 500°С, *P*=1000 бар, Ni-NiO буфере. Отмечается удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными Фостера [Foster, 1977] при 400 и 500°С, *P*=1000 бар. Согласно расчетам, основной вклад в растворимость шеелита вносит частица HWO<sub>4</sub><sup>-</sup>. Рост растворимости шеелита связан, главным образом, с ростом ионной силы раствора [Брызгалин, 1976].



Рис. 2. Растворимость шеелита в растворах KCI-HCI, контроли-руемых кварцмикроклин-мусковитовым буфером, при 400 и 500°С. 1000 бар фугитивности И кислорода заданной Ni-NiO буфером ПО экспериментальным (Foster. 1977] символы: квадратные-

400°C, круглые-500°С,) расчетным (линии) данным. И Нами также выполнены расчеты по растворимости шеелита в растворах NaCl-KCl-HCl, кислотность которых контролируется алюмо-силикатными буферами, содержащими альбит, микроклин, мусковит, парагонит, андалузит, пирофиллит и кварц. Расчеты выполнены при 400 и 500°C, давлении 1000 бар. Было показано, что шеелит растворяется конгруэнтно в растворах, контролируемых буферами Qtz-Ab-Mic-Ms, Qtz-Ab-Prg-Ms, и Qtz-And-Prg-Ms при 500 °C, Qtz-Ab-Mic-Ms и Qtz-Ab-Prg-Ms при 400 °C. О.-В. условия не влияют на *m* W в растворе ввиду того, что в рассматриваемых условиях (500 °C, 100 МПа, *m*KCl, *f*O<sub>2</sub>) устойчива единственная твердая фаза, содержащая W(VI): Sch. Содержание W растет с общей концентрацией хлоридов и с кислотностью AI-Si буфера (рис. 3).



**Рис. 3.** Влияние концентрации хлоридов (NaCl, KCl) на растворимость шеелита при 400 (а) и 500°С (б), Cu<sub>2</sub>O-CuO буфере и кислотности, регулируемой Al-Si ассоциациями. +WO<sub>3</sub> – область, где шеелит растворяется инконгруэнтно с образованием WO<sub>3</sub>.

Проведенные исследования показали, что растворение шеелита в растворах HCI проходит инконгруэнтно с образованием окислов вольфрама и кальций вольфрамовых бронз. Установлена достаточно высокая растворимость шеелита при 500°С и 1000 бар в растворах HCI. Расчетами показано, что шеелит имеет широкую область конгруэнтной растворимости в солевых системах.

Работа финансировалась за счет гранта РФФИ 20-05-00307а и ФНИ государственных Академий Наук FMUF-2022-0003.

# Литература

1. Брызгалин О.В. О растворимости вольфрамовой кислоты в водно-солевых растворах при высоких температурах. Геохимия. 1976. №6. С.864-870.

- Редькин А.Ф., Котова Н.П. Влияние температуры и f(O2) на растворимость шеелита в растворах HCl по экспериментальным и расчетным данным. Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Двадцать вторая международная конференция. Москва, 27 – 29 сентября, Борок, 1 октября 2021 г. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2021. – 308 с.
- 3. Редькин А.Ф., Котова Н.П. Особенности взаимодействия шеелита с растворами НСІ при 400 и 500°С, 100 МПа и различных *f*(O<sub>2</sub>) (по экспериментальным и расчетным данным). Геология рудных месторождений. 2023. № 1. (в печати).
- 4. Шваров Ю.В. О термодинамических моделях реальных растворов. Геохимия. 2007. № 6. С. 670-679.
- 5. Foster R.P.\_Solubility of scheelite in hydrothermal chloride solutions. Chemical Geology. 1977. V. 20(1). P. 7-43.
- 6. Shvarov Yu.V. A suite of programs, OptimA, OptimB, OptimC, and OptimS compatible with the Unitherm database, for deriving the thermodynamic properties of aqueous species from solubility, potentiometry and spectroscopy measurements. Applied Geochemistry. 2015. V. 55. P. 17–27.
- 7. Wood S.A., Samson I.M. The hydrothermal geochemistry of tungsten in granitoid environments: I. Relative solubilities of ferberite and scheelite as a function of *T*, *P*, pH, and  $m_{NaCl}$ . Econ. Geol. 2000. 95, 143-182.

# EXPERIMENTAL AND THERMODYNAMIC MODELING OF THE SHEELITE DISSOLUTION IN SUPERCRITICAL AQUEOUS CHLORIDE SOLUTIONS

# Redkin A.F., Kotova N.P.

Institute of experimental mineralogy (IEM) RAS, Chernogolovka, redkin@iem.ac.ru

Experiments have been performed in (0.01 - 0.316m) HCl solutions at 400-500 °C, pressure of 100 MPa, and the fugacity of oxygen (hydrogen) specified by the buffers Cu<sub>2</sub>O-CuO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni-NiO and Co-CoO. It was found that scheelite in HCl solutions at the specified parameters dissolves incongruently forming WO<sub>3</sub>, WO<sub>2.9</sub>, and Ca<sub>0.07</sub>WO<sub>3</sub>. Based on the analysis of the experimental data obtained, the free energies of the formation of tungsten oxides WO<sub>3</sub>, WO<sub>2.9</sub>, scheelite and calcium of tungsten bronze were calculated. Using mutually agreed thermodynamic data, the solubility of Sch in solutions of HCl, (Na,K)Cl with the participation of alumo-silicates is calculated. It is shown that the scheelite has a wide area of congruent solubility in saline systems.

СВИДЕТЕЛЬСТВА СКВОЗЬКОРОВЫХ ФЛЮИДНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И БАЗЫ ДАННЫХ МИКРОЭЛЕМЕТНОГО СОСТАВА ФЛЮИДОВ

<sup>1,2,3</sup>Родкин М.В., <sup>2</sup>Пунанова С.А., <sup>1</sup>Прохорова Т.В., <sup>1</sup>Рукавишникова Т.А. ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики (ИТПЗ) РАН, Москва, Россия;

<u>rodkin@mitp.ru</u>

<sup>2</sup>ФГБУН Институт проблем нефти и газа (ИПНГ) РАН, Москва, Россия; <u>punanova@mail.ru</u>

<sup>3</sup>ФГБУН Институт морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

В современных геологических и геофизических построениях часто допускается существование мощных глубинных прямых флюидов, свидетельств СКВОЗЬКОРОВЫХ потоков HO ПОТОКОВ немного. они существования таких И чаще носят предположительный характер. Ниже обсуждается ряд новых свидетельств существования таких флюидных потоков. Эти свидетельства довольно разнообразны, как по своим временным и пространственным масштабам, так и по характеру используемых Сразу отметим, что приводимые данные не дают данных. однозначного указания на нижнюю границу существования таких потоков. Этим данным удовлетворяют как рециклинг флюидов через глубинные зоны надвигов, в частности, через зоны субдукции, так и весьма гипотетические подтоки флюида из нижней мантии.

Вначале напомнил об эффекте существования так называемых сейсмических «гвоздей» [Вадковский, 2012]. В этой работе был описан феномен развития относительно недолго существующей (дни – пара месяцев) активизации сильно локализованных по разнесенных НΟ ПО глубине (на КМ) площади, десятки землетрясений. В работе [Захаров и др., 2013] приводится анализ данных по совокупности такого рода структур. Отмечается связы расположения «гвоздей» с зонами субдукции, центрами вулканизма, иногда с сильными землетрясениями. Составляющие «гвоздь» землетрясения обычно слабые, а динамика развития структуры похожа не на афтершоковые последовательности, а на роевую Возникновение сейсмических «гвоздей» связывали активность. обычно с флюидным режимом, хотя ожидаемой в этом случае явственного «всплывания» тенденции очагов CO временем наблюдено не было. Заметим, однако, что глубины землетрясений, тем более таких слабых, определяются много хуже положения

эпицентра. Большая погрешность в определении глубины может маскировать тенденцию «всплывания» очагов со временем.

Приведем еще пару сейсмологических свидетельств в пользу глубинных коровых развития ПОТОКОВ флюида. Из обших соображений можно ожидать, что роль флюидной компоненты в очагах землетрясений будет наиболее существенна для очагов с глубинами в диапазоне, примерно от 30-40 до 100 км; в этом интервале термодинамических условий предполагается наибольшее развития процессов дегидратации в погружающихся плитах [Файф и др., 1981; и др.]. В [Rodkin, 2022] рассматриваются изменения средних очаговых характеристик землетрясений в зависимости от глубины. Показано, что именно в этом интервале расположение глубины очага глубин ПО данным решения сейсмического момента оказывается устойчиво выше положения очага по данным о первых вступлениях; таким образом, имеет место тенденция развития очагового процесса вверх. В менее и более глубоких землетрясениях такая тенденция не выявляется. Представляется резонным связать тенденцию развития очага землетрясения вверх с наличием в очаговой зоне флюида низкой плотности (не расплава), с тенденцией к прорыву в верхние горизонты литосферы.

характеру особенность была Близкая ПО выявлена при исследовании обобщенной окрестности сильного землетрясения Tikhonov, 2016: Родкин, 2020]. Под [Rodkin, обобщенной окрестностью сильного землетрясения понимается кумулятивная окрестность, составленная из большого числа (сотни, до тысячи) событий. окрестностей отдельных СИЛЬНЫХ В обобшенной окрестности был статистически надежно выявлен целый ряд аномалий, нарастающих по амплитуде к моменту обобщенного Кроме известных ранее аномалий, таких как главного события. форшоковый степенной каскад и аномалия уменьшения b-value, была выявлена аномалия уменьшения средней глубины форшоков по мере приближения момента обобщенного главного события. Естественно объяснить эту особенность прорывом вверх флюида малой плотности при развитии в готовящейся очаговой зоне трещиноватости. Напомним, ЧТО ранее СИЛЬНОЙ тенденция уменьшения глубины событий в форшоковом каскаде и в всплесках афтершоков выявлялась и для числа отдельных, наиболее детально исследованных сильных землетрясениях [Левин и др., 2011].

Указанные аномалии отвечают пространственному масштабу очаговых областей землетрясения, а их временной масштаб от дней до первых месяцев. Большие пространственно-временные

масштабы отвечают результатам, полученным при геохимических исследованиях.

Нами исследовался микроэлементный (МЭ) состав нефтяных, углекислых и грязевулканических флюидов. Ранее было показано, что МЭ состав нафтидов имеет полигенный источник и включает как биогенные, так и глубинные компоненты [Пунанова, 2004]. В работах [Родкин и др., 2016; Родкин, Пунанова, 2022; и др.] для анализа МЭ состава был применен метод корреляционного анализа. Для работы была сформирована база данных (БД) по МЭ составу различных проб флюидов, включающая данные по более чем 200 анализам. Рассчитывались коэффициенты корреляции МЭ состава проб со химическим составом верхней, средней и средним нижней континентальной коры и с разными типами биоты (водные и наземные, растения и животные). При расчете корреляции, с целью максимального учета различающихся на порядки концентраций логарифмы элементов, использовались концентраций разных элементов.

В результате расчетов по сформированной БД было выявлено, что МЭ состав нефтей лучше коррелирует с химическим составом нижней или (много реже) средней коры, нежели верхней. Для составов углекислых (исходно гидротермальных) вод Большого Кавказа также была выявлена лучшая их корреляция не с верхней, а со средней континентальной корой. Эти результаты указывают на участие в формировании МЭ состава нефтей восходящих потоков флюидов, с корнями этих потоков возможно на уровне нижней коры или даже глубже. В ряде случаев корреляционный анализ МЭ состава проб позволяет заключить о доминирующем типе исходной органики (чаще таким доминирующим типом органики являются водные растения).

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИТПЗ РАН, ИПНГ РАН и ИМГиГ ДВО РАН.

## Литература

- 1. Вадковский В.Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений — сейсмические «гвозди» // Вестн. ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. NZ1001. doi:10.2205/2012NZ000110.
- 2. Захаров В.С., Карпенко А.И., Завьялов С.П. Особенности сейсмических «гвоздей» в разных геодинамических обстановках // Вестник МГК. 2013. Сер. 4, Геология. С. 11-18.
- 3. Левин Б.В., Родкин М.В., Тихонов И.Н. Великое Японское землетрясение // Природа. 2011. № 10. С. 14-22.
- 4. Пунанова С.А. О полигенной природе источника микроэлементов нефтей // Геохимия. 2004. № 8. С. 893-907.
- 5. Родкин М.В., Рундквист Д.В., Пунанова С.А. Об относительной роли нижнекоровых и верхнекоровых процессов в формировании микроэлементного состава нефтей // Геохимия. 2016. № 11. С. 1025-1031.
- Родкин М.В. Типовая фор- и афтершоковая аномалия эмпирика, интерпретация // Вулканология и сейсмология. 2020. 1. 64-76.
- 7. Родкин М.В., Пунанова С.А. Корреляционные зависимости микроэлементного состава природных объектов // Геология нефти и газа. 2022. № 4. С. 99–107. DOI: 10.31087/0016-7894-2022-4-99-107.
- 8. Файф У., Прайс Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М.: Мир, 1981. 436 с.
- Rodkin M.V., Tikhonov I.N. The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake // Physics and Chemistry of the Earth. 2016. V. 95. P. 73-84.
- Rodkin, M.V. The Variability of Earthquake Parameters with the Depth: Evidences of Difference of Mechanisms of Generation of the Shallow, Intermediate-Depth, and the Deep Earthquakes // Pure Appl. Geophys. 2022. https://doi.org/10.1007/s00024-021-02927-4

#### EVIDENCE OF THE DEEP\_CRUST FLUID FLOWS BASED ON SEISMOLOGICAL DATA AND THE FLUID MICROELEMENT COMPOSITION DATABASE

## <sup>1,2,3</sup><u>Rodkin M.V.</u>, <sup>2</sup>Punanova S.A.,<sup>1</sup>Prokhorova T.V., <sup>1</sup>Rukavishnikova T.A.

<sup>1</sup>Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics (IEPT) RAS, Moscow, Russia, <u>rodkin@mitp.ru</u> <sup>2</sup>Oil and Gas Research Institute (OGRI) RAS, Moscow Russia; <u>punanova@mail.ru</u>

<sup>3</sup>Institute of Marine Geology and Geophysics (IMGG) FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

New seismological and geochemical data indicating the existence of strong ascending fluid flows in the Earth's crust are presented. Signs of the presence of the deep fluid component are observed in the regime of seismicity and in trace elements composition of oils, hydrothermal and mud volcanic fluids. It should be noted, however, that the presented evidences do not give an unambiguous indication of the base level of such flows. The data can be satisfied both by the fluid recycling through deep thrust zones, in particular, through subduction zones, and by hypothetical fluid inflows from the lower mantle. К АЛЬПИЙСКОМУ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР ИРАНА И МАЛОГО КАВКАЗА, БЛИЖНИЙ ВОСТОК; ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЕГО РУДООБРАЗОВАНИЯ <sup>1</sup><u>Романько А.Е.</u>, <sup>2</sup>Имамвердиев Н.А., <sup>3</sup>Викентьев И.В., <sup>1</sup>Дубенский А.С., <sup>1</sup>Ермолаев Б.В, <sup>4</sup>Хейдари М., <sup>5</sup>Рашиди Б., <sup>1</sup>Киселев А.А., <sup>1</sup>Савичев А.Т., <sup>1</sup>Полещук А.В.

<sup>2</sup>Бакинский Государственный университет, Баку, Азербайджан, <u>inazim17@yahoo.com</u>

<sup>3</sup>Институт геологии рудных месторождений (ИГЕМ) РАН, Москва, viken@igem.ru

<sup>4</sup>Парс Кани, Тегеран, Иран, <u>mehrdad.hei@gmail.com</u> <sup>5</sup>Сатрап ресурсиз, гео-компания, Перт, Австралия, <u>bahman.rashidi@hotmail.com</u>

Изучаемый регион в переделах запада ближнего Востока (some K-Q structures in the western Middle East) представляет исключительный интерес. Обобщены прежние и получены новые материалы по собственно кайнозойскому и более древнему магматизму, тектонике и металлогении некоторых структур Ирана: востока и севера страны (Cu-рудный район Аббас-Абад и др.) и, кроме того, Малого Кавказа (существенно поздний кайнозой). Получены важные данные по расплавным включениям (включая таковые высокоВодные, до 9 мас.% H2O) в прозрачных минералах пород (по В. Ирану - В.Ю. Прокофьев и др., 2019 и по М. Кавказу - Н.А. Имамвердиев и др., 2010). Приведем отдельные замечания и выводы:

Кайнозойский и более широко - альпийский магматизм – региона преимущественно контролируется верхнеМантийной компонентой в результате отрыва или деламинации литосферы при сильной коллизии в миоцене (N1) – ок. 21 млн. лет назад, по М. Кескину (сейсмический эксперимент в Турции) и др. На регион влиял и магматизм с 15 млн. лет – после раскрытия «классического» рифта Красного моря, благодаря активности Африканского суперПлюма. Доминирует важнейшая региональная, именно магматическая **металлогения**, в том числе – и мирового класса.

Охарактеризована альпийская тектоно-магматическая и металлогеническая **субмеридианальная зональность**, обусловленная мантийными событиями кайнозоя, субдукцией Аравийской плиты под Центральный Иран как реакцией на раскрытие упомянутого рифта Красного моря [Ярмолюк и др., 2004 и др.].

Описана мощная региональная олигоцен?-неоген-четвертичная (Pg3?-N-Q) внутриплитная магматическая система. Ее продукты – субщелочные производные шелочные (до карбонатитов Ханнешина, Афганистан и также Аравии, квартер) и экзотические лампроитоПодобные трубок породы взрыва, Ю. Памир, неоген? (с использованием Таджикистан. палеоген важных Э.А. Дмитриева, 1976 материалов И дp.) формируют реконструированный субщелочной щелочной включая ряд, зкзотические магматиты с СаО=34.8%.

Выделены и антиподы – субдукционные продукты (эоценовые (Pg2) шошонит-латит-трахидацитовые магматиты с промышленной металлогенией мирового класса (конкурент сходной порфировой металлогении Анд ! - Анарек, Аббас-Абад и др.), а далее олигоцен-четвертичные, до голоцена? (Pg3-Q)ИЗВЕСТКОВОшелочные образования). Важна магматическая и рудная аналогия с порфировой минерализацией аналогов? Кураминской зоны, Тянь-Шань, поздний палеозой использованы данные В.А. Коваленкера, В.Ю. Прокофьева и др. по расплавным включениям этого региона). Лишь молибден - Мо (который коррелирует с повышенной калиевой кремнекислотностью) щелочностью угнетен В некоторых И структурах В. Ирана, в отличие от упомянутой Кураминской зоны Тянь-Шаня.

Богатейшая **порфировая** минерализация региона (главная фаза – **эоцен (Pg2), до миоцена – N1**) обусловлена активностью источника в обогащенной мантии и **разубоживается** после отрыва (деламинации) литосферы в олигоцене (Pg3) и – как следствие **затруднения** проникновения рапславов обогащенной мантии – главного источника рудных компонентов, учитывая данные Хашке и др. - Haschke et al, 2010, а также [Imamverdiyev et al., 2014, Prokof'ev et al.,2000, Romanko et al., 2018, Vikentev et al.,2004].

Ha востоке Ирана впервые выявлены неожиданно 1150-1220oC, высокоТемпературные, кислые калиевые расплавные включения силикатного стекла в высоко-калиевых же кислых породах квартера? с субдукционными характеристиками НЕтипичности таковых (расплавных включений) (против В перегретых неоген-четвертичных (N-Q) внутриплитных и также шошонит-латитовых палеогеновых (Pg2..) субдукционных производных региона). Своеобразны включения в позднейшем стратовулкана Базман (неоген-квартер), кислом расплаве Т кристаллизации = 690°С и очень высоким содержанием H2O - по независимым методам (среднее - 4.8), на пределе до 9.0 мас.%, - по В. Ю. Прокофьеву и др., 2019; (рис. 1). Устойчив дефицит европия – Eu/Eu\* = 0.38-0.78, а среднее (La/Yb)N=7.8. Этот позднейший

расплав долгоЖивущего (N1-Q, не менее 24 млн.лет) вулкана Базман мы интерпретируем как остаточный ввиду аномального термического состояния региона - по разнообразным прежним и новым данным. Флюидные углеводородные (УВ) и водные включения наиболее развиты в щелочных породах золотоносного массива Лар (N1 - миоцен?), диоритах (Pg3-N1- олигоцен-миоцен?) на контакте с карбонатами, а наименее – в структурированных офиолитах и их меланже (К - мел). Многочисленны средние и магматиты, отвечающие аналогам классических кислые ИЗ отечественных работ [Коваленко, Ярмолюк и др., 1983; Лучицкий, 1985; Маракушев 1988, Рябчиков и др. 2009; и др.].

Давно известна и углеводородная (УВ), субмеридианальная зональность гигантского УВ-пояса (явно обусловленная глубинным Персидского разломом) ОТ залива (немыслимая ПО представительности и сохранности колонка пермь - неоген для Персидского залива) части гигантского УВ-пояса – через Каспий до самого Баренцева моря, по В.Л. Сывороткину и др., 2016, Хаину и др., 2003 и др. Возможно, это связано и со снижением/колебанием теплового эффекта упомянутого суперплюма в северном румбе. Выяляется и частная зональность в пределах этого гигантского пояса – своеобразные волны УВ (в связи с неоднородностью теплового потока?). Привлекательно совместное участие как основного биогенного, так и подчиненного абиогенного факторов в образовании УВ, учитывая известные материалы М.В. Родкина, 2014; а также С.А. и А.А. Маракушевых, А.И. Тимурзиева, В.Л. Сывороткина, Д.А. Астафьева, А.М. Кузина и мн. др. Довольно давно известна и связь рудной минерализации и углеводородов (например, для Ю. Урала и др. - УВ обычно находятся ниже?).

Влияние мантийной компоненты, очевидно, сильнее на Малом Кавказе (своеобразный фронт событий) против Ирана (периферия событий), что выражено в повышенной роли: щелочных и субщелочных расплавов, мантийного рудообразования и др. на М. Кавказа.

Авторы очень благодарны А. Хушманзаде, М.А.А. Ноголь Садату† и Е.Ф. Романько† - руководителям полевых работ на востоке Ирана; а также А.В. Гирнису, В.Ю. Прокофьеву и др., В.В. Ярмолюку, С.Н. Бубнову, В.А. Коваленкеру, В.Н. Волкову†, А.Н. Перцеву, Л.Н. Романько†, Н.Н. Тарасову и многим специалистам за исключительно ценные консультации, продолжительные плодотворные обсуждения, конструктивную критику, помощь и т.д.

Данная работа выполнена в рамках темы госзадания № 0135-2018-0034 Геологического института РАН (Н.П. Чамов), и др.

## Литература

- 1. Лучицкий И.В. Палеовулканология. М.: Наука, 1985. 275 С.
- 2. Магматические горные породы. Средние и кислые породы. Ред. Коваленко В.И., Ярмолюк В.В. М: Наука, 1983. 410 с.
- 3. Маракушев А.А. Петрогенезис. М.: Недра, 1988. 293 с.
- 4. Прокофьев В.Ю., Наумов В.Б., Романько А.Е., Плечов П.Ю., Балашова А.Л., Имамвердиев Н.А. Низкотемпературные кислые расплавы вулкана Базман, Иран // Доклады РАН, 2019. Т. 485. № 5. С. 422-425.
- 5. Русинов В.Л. Метасоматические процессы в вулканических толщах

Наука, 1989. 213 с.

- Рябчиков И.Д., Когарко Л.Н., Соловова И.П. Физико-химические условия магмообразования в основании Сибирского плюма по данным исследования расплавных микровключений в меймечитах и щелочных пикритах Маймеча-Котуйской провинции // Петрология. 2009. Т. 17. № 3. С. 311-323.
- Imamverdiyev N.A., Romanko A., Abdullayeva Sh.F., Prokofiev V., Vikentev I., Savichev A., Stepanov S., Heidari M., Rashidi B. L. CAUCASUS – E. IRAN, Middle East: Some materials on geology and metallogeny, "hot" tectonics due to the African superplume activity, melt and fluid inclusions; different data on hydrocarbons (OIL, HC), and some problems. News of Baku State University. 2014. N 3. P. 113-136.
- Prokof'yev V. Yu., Bortnikov N. S., Zorina L. D., Kulikova Z. I., & Matel N.L. The Darasun intrusive-related goldpolimetallic deposit, Eastern Transbaikalia, Russia: Petrochemical, melt and fluid inclusion, REE and stable isotope (O, C, and S) studies Applid Mineralogy. Rammlmair et al. (eds). Balkema, Rottertdam, Brookfield, 2000. P. 399-402.
- Romanko A., Imamverdiyev N.A., Prokofiev V., Vikentev I., Rashidi B., Savichev A., Heidari M., 2018. Some new and previous materials on Alpine magmatism, tectonics, melt and fluid inclusions, and metallogeny in Eastern Iran. International Journal of Mining Science. 2018. V. 4. Issue 1. P. 11-28.
- Vikentiev I.V., Yudovskaya M.A., Mokhov A.V., Kerzin A.L., Tsepin A.I. GOLD AND PGE IN MASSIVE SULFIDE ORE OF THE UZELGINSK DEPOSIT, SOUTHERN URALS, RUSSIA. Canadian Mineralogist. 2004. V. 42. P. 651-665.



Рис 1. Многокомпонентная диаграмма Сана и МакДоналда – нормировано к примитивной мантии (spider-diagram of Sun and McDonald, 1989, normalized to primitive mantle) для **стекол расплавных включений** в кварце вулкана Базман (звезда – среднее для 5 стекол, кружок–одиночное стекло с минимальным содержанием воды– 4.00 мас.%) и вмещающих пород (точки, 3 кривые, обр. R-82 - риолит и R-75 - дацит).

ON A TECTONIC-MAGMATIC PECULIARITIES OF SOME STRUCTURES IN IRAN AND LESSER CAUCASUS (MIDDLE EAST) AND SOME PROBLEMS OF THEIR ORE-FORMING PROCESSES

<sup>1</sup>Romanko A.E., <sup>2</sup>Imamverdiyev N.A., <sup>3</sup>Vikentev I.V, <sup>1</sup>Dubensky A.S., <sup>1</sup>Ermolaev B.V., <sup>4</sup>Rashidi B., <sup>5</sup>Heidari M., <sup>1</sup>Kiselev A.A, <sup>1</sup>Savichev A.T., <sup>1</sup>Poleshchuk A.V.

<sup>1</sup>Geological Institute (GIN) RAS, Moscow, a-romanko@ya.ru;

<sup>2</sup>Baku State University (BSU), Baku, Azerbaijan; inazim17@yahoo.com;

<sup>3</sup>Institute of geology of ore deposits (IGEM) RAS, Moscow;

<sup>4</sup>Satrap Resources, Perth, Australia, <u>bahman.rashidi@hotmail.com;</u>

<sup>5</sup>Pars Kani Co., Tehran, Iran; <u>mehrdad.hei@gmail.com</u>

We present materials on Cenozoic (KZ) and older magmatism and mineralization in some structures of E. Iran L. Caucasus, Middle East. First acid melt inclusions in E. Iran (led by Prokof'ev V.), also in L. Caucasus (led by Imamverdiyev N.) are important for fluid regime etc. Regional economic Cu-Au (Mo+-Re) porphyry (PCD) mineralization deals with enriched mantle due to lithosphere delamination during collision. U-mantle fluids influence on oil-gas (OG or hydroCarbons - HC) activity.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ SIO<sub>2</sub>-MGO-FEO И ПРИРОДНОГО ФЕРРОБАЗАЛЬТА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ Русак А.А., Луканин О.А.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН, Mocква, rusak@geokhi.ru; lukanin@geokhi.ru

Целью исследования являлось проанализировать процессы кристаллизации и дифференциации магматических расплавов, формирования образующихся на ранних этапах Земли при глобальном плавлении планетного вещества в присутствии летучих компонентов и восстановительных условиях, когда в равновесии с силикатными расплавом и кристаллами образуется металлическая фаза железа. Для достижения поставленной цели выполнялись следующие задачи: постановка экспериментов в модельной системе SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO-C-H [McDonough, 2017] при T=1500 и 1600°С и P=2,5-3,5 ГПа и с природным ферробазальтом [Кадик и др., 2017] при T=1500°C и P=4 ГПа; построение трехкомпонентной диаграммы плавкости для системы SiO<sub>2</sub>-MqO-FeO с областью возможного выделения металлической фазы железа при восстановительных условиях.

Эксперименты проводились на твердофазовой установке типа «наковальня с лункой» с тороидальным уплотнением НЛ-13Т в течение 40 минут (система SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO-C-H) и 1 часа (природный ферробазальт) в ГЕОХИ РАН. Продукты опытов исследовались на SX 100 микроанализаторе Cameca С пятью волновыми спектрометрами и энерго-дисперсионной приставкой Bruker XFlash 6 и на аналитическом сканирующем электронном микроскопе Tescan MIRA 3 ГЕОХИ PAH. Полученные фазы В В хорошо воспроизводимых опытах характеризовались структурно-текстурной и химической однородностью, что говорит о достижении равновесия в проведенных опытах.

В экспериментах системы SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO-C-H получены стекла, содержащие оксид кальция, при Т = 1600°С и Р = 2,5-3 ГПа кристаллизуется фаза кальциевого пироксена по краям образца и графит, в виде вкрапленников, центральная зона представлена стеклом и кристаллами кварца (β-кварц), при T = 1500°C и P = 3 ГПа структура стекла становится однородной и пористой с крупными вкрапленниками графита. При температурах от 1500°С СаО активно мигрирует в образец из тороида, который состоит из прессованного карбоната кальция. Металлическая фаза отсутствует, летучесть кислорода контролировалась буфером ССО (С-СО-СО<sub>2</sub>). Данный является случаем кристаллизации В области результат нестабильности металлической фазы.

В экспериментах с природным ферробазальтом кристаллизовались следующие фазы: закаленный расплав основного состава, гранат, амфибол, клинопироксен, рутил (?) и кварц (коэсит). При температуре 1500°С и давлении 4 ГПа

образуются зональные гранаты, которые можно разделить на две группы: на высоко- и на низко железо-титанистые. Графит кристаллизуется между скелетными закалочными кристаллами клинопироксена. Металлическая фаза отсутствует.

Была построена ликвидусная поверхность тройной диаграммы плавкости для системы SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO, на которой показана область возможного выделение металлической фазы железа при восстановительных условиях. Точки экспериментальных составов SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO-C-H попадают расплавов системы В область Fe<sup>o</sup>. металлической расплава, кристаллов оливина и фазы Показано, что при увеличении давления происходило изменение андезитового состава расплава область В состава. Экспериментальный состав расплава, отвечающий природному ферробазальту, равновесии расплавом находится В С И кристаллами кварца. На тройной диаграмме SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO можно закономерность изменения летучести увидеть кислорода И концентрации оксида железа в расплаве, чем выше летучесть кислорода, тем больше в расплаве находится FeO, и наоборот, чем ниже летучесть кислорода, тем лучше железо образует отдельную металлическую фазу, и тем меньше FeO в расплаве.

Работа выполнена при поддержке государственного задания ГЕОХИ РАН.

#### Литература

- 1. Кадик А.А., Куровская Н.А., Луканин О.А., Игнатьев Ю.А., Колташев В.В., Крюкова Е.Б., Плотниченко В.Г., Кононкова Н.Н. Формирование N-C-O-H молекул и комплексов в расплавах базальт-андезибазальтового состава при 1,5 ГПа и 1400°С в присутствии жидких сплавов железа // Геохимия. 2017. № 2. С. 115-126.
- 2. McDonough W.F. Earth's core // Springer International Publishing. AG (2017). W.M. White (ed.), Encyclopedia of Geochemistry, p. 1-13.

EXPERIMENTAL STUDY OF SILICATE MELTS OF THE SIO2-MGO-FEO MODEL SYSTEM AND NATURAL FERROBASALTS AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

#### Rusak A.A., Lukanin O.A.

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOKHI) RAS, Moscow, <u>rusak@geokhi.ru</u>; <u>lukanin@geokhi.ru</u>

In the experiments of the SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO-C-H model system and natural ferrobasalt the metallic phase of iron is not formed. The volatility of oxygen was controlled by the CCO buffer (C-CO-CO<sub>2</sub>). The points of the experimental compositions of the SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO-C-H system melts fall into the region of the melt, olivine crystals and the Fe metal phase. The experimental composition of the melt corresponding to natural ferrobasalt is in equilibrium with the melt and quartz crystals. It is shown that with an increase in pressure, the composition of the melt changed in the region of saturation of the system with silica, i.e. in the area of andesite composition. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ ДВУМЯ НЕСМЕШИВАЮЩИМИСЯ РАСПЛАВАМИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ) <sup>1</sup> <u>Русак А.А.</u>, <sup>2</sup> Щекина Т.И., <sup>2</sup>Зиновьева Н.Г., <sup>2</sup> Алферьева Я.О.,

<sup>3</sup>Хвостиков В.А.

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН, <u>aleks7975@yandex.ru</u>, <u>rusak@geokhi.ru</u>; <sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

(МГУ), t-shchekina@mail.ru;

<sup>3</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов (ИПТМ) РАН

Проведены эксперименты в модельной гранитной системе Si-Al-Na-K-Li-F-O-H с предельными содержаниями фтора и воды при температуре 800-400°С и давлении 1 кбар. Цель работы состояла в фазовых отношений распределения исследовании И редкоземельных элементов (P33) между силикатным И расплавами алюмофторидным солевым при понижении температуры от 800 до 400°С. В работе решались следующие задачи: 1) изучить распределение РЗЭ между фазами и расплавом: изучить поведение РЗЭ при понижении температуры 2) В равновесных условиях.

Эксперименты проводились на установке высокого газового давления с внутренним нагревом при температуре 400-800°С и давлении 1 кбар в ИЭМ РАН. Опыты при температуре 400-600°С проводились по принципу: подход к равновесию «сверху». Сначала образцы нагревались до 800°С и давлении 1 кбар, выдерживались 3 дня, потом в течение 8 часов охлаждались до 400, 500. 600°С. выдерживались ещё 3 дня и закаливались. Скорость закалки составляла 150-200°С в минуту. Стартовый состав образцов А-40/11 алюмосиликатному расплаву, близкому к отвечал гранитной эвтектике, и солевому расплаву, отвечающему по стехиометрии Na,K,Li-криолиту в количестве, достаточном для выделения алюмофторидной фазы. Содержание воды варьировало от 0 до 50 мас. %. Преимущественно в расплав входило не больше 10 мас.% воды, вся остальная вода находилась в виде свободной флюидной фазы, которая практически не накапливала РЗЭ. В приготовлении исходной шихты использовались: высушенный гель SiO<sub>2</sub>, NaF, LiF, AIF<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>. В состав системы вводился весь ряд P3Э от La до Lu, а также Y и Sc в виде окислов, кроме Pm, в количестве 0,5-2 мас.% элемента.

изучали Продукты экспериментов методами электронной микроскопии и электронно-зондового микроанализа в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ. Анализы главных петрогенных элементов проводили на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6480LV (Япония) с энерго-дисперсионным Oxford X-Max<sup>N</sup> и кристалл-дифракционным INCA Wave-500 (Oxford Instrument Ltd, Великобритания) спектрометрами. РЗЭ, иттрий и скандий определяли с помощью электронно-зондового микроанализатора Superprobe JXA-8230 (Япония). Определение лития, РЗЭ, Y, Sc, а также главных породообразующих элементов проводили в аналитическом сертификационном испытательном центре ИПТМ РАН. Измерения проводили на квадрупольном массспектрометре с индуктивно связанной плазмой X Series II (Thermo Scientific, США) с приставкой для лазерной абляции UP266 MACRO (New Wave Research, США). Более подробное описание методики приведено в работе [Shchekina et al, 2020].

Продуктами опытов являлись закаленный алюмосиликатный расплав (L), солевой алюмосиликатный расплав (LF) и свободный водный флюид (FI), в опытах, в которые добавлялось больше 10 мас.% воды. При 800°С из солевого расплава, не содержащего Li, кристаллизуются алюмофториды щелочей, подобные криолиту. В присутствии в системе более 1% Li проявляется несмесимость алюмосиликатного и солевого расплавов. При 700°С начинается частичная кристаллизация солевых расплавов. Один из интересных примеров: из солевого расплава кристаллизуются кристаллы криолита, окруженные по краям остаточным солевым расплавом, насыщенным РЗЭ. При закалке из этих расплавов образуются фторидные фазы РЗЭ и щелочных металлов. При понижении температуры до 600°С из алюмосиликатного расплава начинают кристаллизоваться кварц, отдельно существенно натриевый и натриево-калиевый криолит, что говорит об их равновесности с расплавом, а также полевой шпат и полилитионит. Скандий частично замещает алюминий в каркасе полилитионита. При данной температуре из солевого расплава кристаллизуются крупные кристаллы криолита (>100 мкм в поперечнике). При понижении температуры на 100°С фазовые отношения не изменяются, но при 400°С исчезает солевой расплав, он весь кристаллизуется в виде фаз алюмофторидных щелочей фторидов РЗЭ. И а алюмосиликатный расплав находится переохлажденном В метастабильном состоянии.

Ранее в работах [Русак, 2019; Shchekina et al, 2020; Rusak et al., 2021] было показано, что при температурах 800, 750 и 700°С все РЗЭ, Y и Sc преимущественно входят в солевой расплав во всех сериях опытов. При более низких температурах, как показали детальные исследования на волновом микроанализаторе, они еще более накапливаются В остаточных солевых расплавах. образующих при закалке тонкие срастания фторидов РЗЭ. алюмофторидов Na, K, Li и LiF. Коэффициенты разделения РЗЭ между остаточным солевым и силикатным расплавами возрастают в несколько раз и достигают величин до 100-300. Методически трудно проанализировать и получить средние величины KD(LF/L) из-за неоднородного строения смеси закалочных фаз. Наблюдаемое при 600 и 500°C уменьшение коэффициентов разделения между солевым и силикатным расплавами, полученное методом лазерной абляции (KD P3Э (LF/L) для 500°С по La = 16, Lu = 12, Y = 18, Sc = 8), объясняется включением в область анализа глобулей не только закаленных остаточных солевых расплавов, но и крупных кристаллов криолита, в состав которых РЗЭ не входят.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-05-0089 и при поддержке государственного задания ГЕОХИ РАН.

#### Литература

- Русак А.А. Фазовые отношения в модельной гранитной системе с водой и фтором и распределение редкоземельных элементов между силикатным и солевым расплавами и флюидом. Дипломная магистерская работа. МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва. 2019. 102 с.
- 2. Rusak A. A., Shchekina T. I., Zinovieva N. G., Alferyeva Y. O., Khvostikov V. A., Gramenitskiy E. N., Kotelnikov A. R. The peculiarities of crystallization of lithium-containing granite melt with high water and fluorine contents in the temperature range of 800 -400°C and pressure of 1 kbar (according to experimental data). *Environmental Sciences Proceedings* (2021), Vol. 6 of *№*1, pp. 1–8.
- 3. Shchekina T. I., Rusak A. A., Alferyeva Y. O., Gramenitskiy E. N., Kotelnikov A. R., Zinovieva N. G., Bychkov A. Y., Bychkova Y. V., Khvostikov V. A. REE, Y, Sc, and Li partition between aluminosilicate and aluminofluoride melts, depending on pressure and water content in the model granite system. *Geochemistry International 58*, 4 (2020), 391–407.

FEATURES OF THE DISTRIBUTION OF RARE EARTH ELEMENTS BETWEEN TWO IMMISCIBLE MELTS AT HIGH TEMPERATURES (EXPERIMENTAL STUDY)

<sup>1</sup><u>Rusak A.A.</u>, <sup>2</sup>Shchekina T.I., <sup>2</sup>Zinovieva N.G., <sup>2</sup>Alferyeva Ya.O., <sup>3</sup>Khvostikov V.A.

<sup>1</sup>Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOKHI) RAS, <u>aleks7975@yandex.ru</u>, <u>rusak@geokhi.ru</u>; <sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University (MSU), <u>t-shchekina@mail.ru</u>; <sup>3</sup>Institute of Problems of Microelectronics Technology and High-Purity Materials (IPTM) RAS

Earlier in our studies it was shown that at temperatures of 800, 750 and 700°C all REE, Y and Sc are predominantly included in the salt melt in all series of experiments. At lower temperatures, as detailed studies on a wave microanalyzer have shown, they accumulate even more in residual salt melts, which form thin accretions of REE fluorides, Na, K, Li and LiF aluminofluorides during quenching. The REE separation coefficients between the residual salt and silicate melts increase several times and reach values up to 100-300. It is methodically difficult to analyze and obtain the average values of KD(LF/L) due to the heterogeneous structure of the mixture of quenching phases. The decrease in the separation coefficients between salt and silicate melts observed at 600 and 500°C, obtained by laser ablation (KD REE (LF/L) for 500°C at La = 16, Lu = 12, Y = 18, Sc = 8), is explained by the inclusion in the area of globule analysis not only of hardened residual salt melts, but also and large cryolite crystals, which do not include REE.

## НОВАЯ ТЕОРИЯ ЭКСПЛОЗИВНЫХ И ЭФФУЗИВНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ Сафронов А.Н.

Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова (ИФА) РАН, Москва, <u>safronov\_2003@mail.ru</u>

В этом исследовании [Safronov, 2022] были разработаны новые принципы происхождения эксплозивных И эффузивных механизмов извержений. Новое вулканических объяснение извержений было сделано с использованием теории элементарной плавучести и новой K-Th-U структуры Земли, разработанной ранее автором [Safronov, 2016; 2020]. Общая схема исследований приведена на Рисунке 1. В ходе исследования эффузивных извержений был дан ясный ответ на вопрос, почему легкие химические элементы, в основном соединения кремния и серы, в настоящее время преобладают в вулканическом пепле, газах и в лавах магмы. При исследовании взрывного механизма извержений проанализировано 38 сильных извержений с индексом было вулканической взрывоопасности (VEI) более 4+. Было показано, что существует связь между конфигурациями планет и извержениями вулканов. Установлено, что извержения вулканов происходили при разных типах линейного выравнивания планет. Оказалось, что указанное явление не зависит ни от массы планет, ни от их взаимного положения. Кроме этого, указанное явление не зависит от расстояния между планетами. Однако часто эксплозивные извержения наблюдались, когда расстояния между планетами были кратными друг другу. В работе было продемонстрировано, что выравнивание планет влияет не только на природные процессы на Солнечную активность. Основываясь Земле. HO И на на исследованиях протуберанцев Солнца, был предложен новый механизм быстрого повышения давления под литосферными плитами Земли за счет генерации гравитационного вихря. По аналогии с солнечными протуберанцами такие гравитационные эпизодически генерируемые в слое верхней вихри, мантии. получили название земных магматических протуберанцев.

#### Литература

- 1. Safronov, A.N. The Basic Principles of Creation of Habitable Planets around Stars in the Milky Way Galaxy // International Journal of Astronomy and Astrophysics. 2016. V. 6, P. 512-554.
- Safronov A.N. A New View of the Mass Extinctions and the Worldwide Floods // International Journal of Geosciences. 2020. V. 11. P. 251– 287.
- Safronov A. N. New Theory of Effusive and Explosive Volcanic Eruptions // International Journal of Geosciences. 2022. V. 3, P. 115-137.



**Рисунок 1.** Схема, поясняющая результат сильного (А), умеренного (В) и слабого (С) воздействия разных факторов на нашу планету. Данные факторы изучались в работах [Safronov, 2016], [Safronov, 2020] и [Safronov, 2022] соответственно.

#### A NEW THEORY OF EFFUSIVE AND EXPLOSIVE VOLCANIC ERUPTIONS <u>Safronov A.N.</u>

Obukhov Institute of Atmospheric Physics (OIAP) RAS, Moscow, <u>safronov\_2003@mail.ru</u>

In this study [Safronov, 2022] we presented a new theory of effusive and explosive of volcanic eruptions. A new explanation of the mechanism of the eruption was made by using the Elemental Buoyancy Theory and the new K-Th-U structure of the Earth, developed early by the author. During the study of effusive eruptions, a clear answer was given to the question why the light chemical elements, mainly silicon and sulfur compound, currently dominate in the volcanic ashes, gases, and in igneous lavas. In the study of explosive mechanism, we analyzed 38 strong eruptions with a Volcanic Explosivity Index (VEI) more than 4+. It has been shown that there is a connection between the configurations of planets and volcanic eruptions.

It can be found that volcanic eruptions have occurred at various types of planet alignments. The phenomenon does not depend on the mass of the planet, nor on the relative positions of the planets. Also, this phenomenon does not depend on the distance between the planets, but eruptions have often been observed when the distances between the planets are multiple units. It was also demonstrated in the work that the alignment of the planets affects not only natural processes on the Earth, also affects the activity of the Sun. Based on the phenomenon of comparison on the Earth and Sun, we discovered a new mechanism to rapidly rising up pressure under the lithospheric planes due to gravity vortexes. This gravitational vortex has been called the terrestrial magmatic protuberances. КОНТАКТ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И РИОЛИТОВОЙ МАГМЫ НА ВУЛКАНЕ КРАФЛА (ИСЛАНДИЯ) ПО ДАННЫМ БУРЕНИЯ IDDP-1, ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ δD <sup>1,2</sup>Симакин А.Г., <sup>3</sup>Биндеман И.Н.

<sup>1</sup>Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН, Черноголовка, simakin@ifz.ru

<sup>2</sup>Институт Физики Земли РАН (ИФЗ), Москва

<sup>3</sup>Dept. of Earth Sciences, University of Oregon, Eugene, USA

Активная вулканическая система Крафла расположена в рифтовой зоне на С.В. Исландии. Для Крафлы характерны трещинные извержения толеитовых базальтов. По геодезическим данным в ходе последнего трещинного извержения "Krafla Fires" в 1975-1984 гг. основной центр накопления базальтовой магмы находился на глубине Мохо, а вблизи поверхности располагался небольшой временный центр. Однако в древние постгляциальные периоды формировались обширные среднекоровые очаги, В фракционировании толеитов которых при (также возможно частичного плавления гидратированных базальтов) образовались кислые дериваты, сформировавшие камеру на глубине 3 км. По сейсмическим данным магма (скорее всего риолитового состава) на глубине 3 км находится в трехфазном состоянии с небольшой долей расплава. При базальтовых извержениях происходит локальная активизация частичного расплава риолита, который внедряется на более высокий уровень.

Исландия единственная страна, которой осуществлен В полный переход зеленой энергетике С использованием К геотермальной энергии. С целью расширения ресурсной базы с включением зоны надкритического водного флюида на границе с Исландии осуществляется проект магмой В международный глубинного бурения. По геофизическим данным ожидалось, что первая скважина проекта на Крафле в 2009 году достигнет зоны контакта с магмой на глубине 3500 м. Но неожиданно магма начала поступать в скважину на глубине 2100 м. Последние 30 м бурения только данными геофизического каратажа охарактеризованы [Mortensen et al., 2014] и материалом, извлеченным из бурового раствора [Zierenberg et al., 2013]. Данные наблюдений говорят о том, магма с содержанием кристаллов несколько ЧТО риолитовая процентов граничит с полнокристаллическим фельзитом, который плавится на контакте. Ширина зоны перехода между геотермальной системой и магмой составляет 30 м. По геофизическим данным вне перехода плотность (нейтронный каратаж) и удельное зоны сопротивление фельзита меняются синхронно, отражая зоны

повышенной и пониженной открытой пористости. Непосредственно зоной перед переходной отмечена зона повышенной трещиноватости (резкое падение сопротивления при переменной отмеченная быстрой потерей плотности), бурового раствора. Контактная переходная зона начинается с резкого синхронного плотности и сопротивления (кварцевая перемычка) и роста последующим падением плотности фельзита с резким ростом сопротивления (роста изолированной пористости). Ближе к границе с расплавом происходит падение сопротивления. Эти данные важны для понимания состояния флюида в переходной зоне от геотермальной системы к магме. Параметры внешней части пограничной зоны (P=200 бар с ростом до 500 бар, T=300-350°C) близки к критической точке воды (P=217.8 бар, T=374°C). Выше по разрезу находится геотермальный резервуар с двухфазным (жидкое-пар) флюидом, а ниже надкритический флюид. Эти зоны разделяются кварцевой перемычкой: в нижнем резервуаре флюид находится в виде слабосвязанных пор под литостатическим давлением, а выше в трещинном пространстве с давлением гидростатическому (плюс динамические близким к эффекты). Образование кварцевой перемычки связано с резким максимумом растворимости кварца по температуре вблизи критической точки ростом Stefansson, 2001]. Немного выше максимума С растворимости происходит выщелачивание фельзита С формированием наблюдаемой зоны повышенной проницаемости, а ниже максимума его отложение. Этот эффект предсказывается при теоретическом моделировании геотермальной конвекции [Scott, Driesner 2018]. Слабосвязанная пористость при литостатическом градиенте давления в контактной зоне подавляет конвекцию. В сочетании с высоким температурным градиентом 160/м это создает уникальные условия для проявления эффекта Соре, изученного для риолитвой системы экспериментально [Bindeman et al., 2013]. Изотопные исследования фельзитов из зоны контакта IDDP-1 показали необычно низкое значение значения в среднем около  $\delta D$ =-118‰, отвечающие составу воды, растворенной в частичном расплаве. Это  $\delta D$  много ниже значения (-90‰), характерного для риолитового магматизма Исландии, а также чем в геотермальном флюиде IDDP-1 (-70/-80‰). Поскольку флюид непосредственно перед переходной зоной вовлечен в активную геотермальную конвекцию, а эпидот (с низким  $\delta D$ ) в этой зоне отсутствует, представляется, что наблюдаемый изотопный эффект связан с термодиффузионным концентрированием легкого водорода горячей зоне. Проведены теоретические расчеты такого разделения с параметрами характерными для Крафлы, которые подтверждают

достижимость наблюдаемых значений. Как показывают данные нашего численного моделирования, перенос примерно 1 мас.% воды из переходной зоны к границе с магмой обеспечивает конвективное плавление фельзита со скоростью порядка 1 м/год.

Показано, что в отсутствии транспорта геотермального флюида вместо плавления происходит объемное остывание магматического очага.

## Литература

- Bindeman, I.N., Lundstrom, C.C., Bopp, C., Huang, F. (2013) Stable isotope fractionation by thermal diffusion through partially molten wet and dry silicate rocks // Earth and Planetary Science Letters V. 365. P. 51–62.
- Mortensen, A.K., Egilson, P., Gautason, B., Árnadóttir, S. & Guðmundsson, Á. Stratigraphy, alteration mineralogy, permeability and temperature conditions of well IDDP-1,Krafla, NE-Iceland // Geothermics. 2014. V. 49. P. 31–41.
- 3. Scott S.W. & Driesner T. Permeability Changes Resulting from Quartz Precipitation and Dissolution around Upper Crustal Intrusions // Geofluids. 2018. # 6957306, 19 pages.
- 4. Stefansson, A. Dissolution of primary minerals of basalt in natural waters: I. Calculation of mineral solubilities from 0°C to 350°C // Chemical Geology. 2001. V. 172. P. 225-250.
- Zierenberg, R.A., Schiffman, P., Barfod, G.H. et al. Composition and origin of rhyolite melt intersected by drilling in the Krafla geothermal field, Iceland. Contributions to Mineralogy and Petrology // 2013. V. 165. P. 327–347.

CONTACT OF GEOTHERMAL SYSTEM AND RHYOLITIC MAGMA IN KRAFLA (ICLAND) ACCORDING TO IDDP-1 DRILLING, NUMERICAL MODELING AND δD DATA

<sup>1,2</sup>Simakin A.G., <sup>3</sup>Bindeman I.N.

<sup>1</sup>Institute of experimental mineralogy (IEM) RAS, Chernogolovka, <u>simakin@ifz.ru;</u>

<sup>2</sup>Institute of Physics of the Earth (IFZ) RAS, Moscow;

<sup>3</sup>Dept. of Earth Sciences, University of Oregon, Eugene, USA

The active melting of felsite at the contact with intruded rhyolite, observed during the drilling of IDDP-1 well in Krafla (Iceland) at a depth of 2100 m, was provided by the transfer of geothermal fluid to the melting front. The low  $\delta D$  of water dissolved in the partial melt is explained by the Soret effect, which became possible due to the large temperature gradient of c.a. 16 °/m and low permeability of the contact zone.

ЭФФЕКТ СВЕРХ -ВОССТАНОВЛЕНИЯ СО<sub>2</sub> В АЛЬБИТОВОМ РАСПЛАВЕ ПРИ НИЗКОЙ ЛЕТУЧЕСТИ ВОДОРОДА <sup>1,2</sup>Симакин А.Г., <sup>1</sup>Девятова В.Н., <sup>1</sup>Бондаренко Г.В. <sup>1</sup>Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН, Черноголовка <sup>2</sup>Институт Физики Земли РАН (ИФЗ), Москва simakin@ifz.ru

Летучесть кислорода в экспериментах при высоком давлении (на УВГД и установке цилиндр-поршень) задается с помощью двухампульной методики. Высокая проницаемость платины по отношению К водороду обеспечивает выравнивание его фугитивности в рабочей ампуле и в ампуле с буферной парой и водным флюидом. Давно [Luth, 1989] стало ясно, что лишь равный состав флюида в обеих ампулах обеспечивает равенство fO2 уровню буфера. Летучесть кислорода в равновесии вода-водород пропорциональна квадратному корню из отношения фугитивностей воды и водорода, поэтому малая фугитивность водорода при малом содержании воды во флюиде обеспечивает низкое значение fO2. Этот эффект усиливается в расплаве.

Нами наблюдалось образование графита (подтверждается КР спектрами) в экспериментах по синтезу сухих углеродсодержащих альбитовых стекол в платиновых ампулах на установке высокого газового давления при давлении 500 МПа и T=1200-1250°C. Этот эффект наблюдался в номинально сухой системе. Содержание воды в альбитовом стекле по данным КFT составляло несколько десятых процента, а содержание СО<sub>2</sub> по загрузке 750-1000 ррт. Летучесть водорода, отвечающая разложению следов воды в сосуде, оценивается в величину менее 1 бар. Предложена термодинамическая модель, которая объясняет достижение низких летучестей кислорода в расплаве на уровне около QFM-2 при низкой фугитивности водорода (см. Рис.1). Парадоксально низкая летучесть кислорода объясняется смещением равновесия реакции между растворенными в расплаве газами CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> = H<sub>2</sub>O +CO вправо за счет низкой активности воды в расплаве при малых её содержаниях в расплаве. При растворении на начальной стадии вода присутствует в основном в виде гидроксила. При превышении содержания СО в расплаве предела, отвечающего равновесию буфера ССО, происходит образование графита по реакции диспропорционирования 2CO = C + CO<sub>2</sub>. При достаточно высокой концентрации воды в расплаве более 1 мас.% эффект сверхвосстановления пропадает (см. Рис.1). Достигаемые высокие локальные концентрации СО в расплаве приводят к растворению

карбонила, платины виде коррозии стенок ампулы В И Водород металла переотложению на границе с расплавом. демонстрирует высокую подвижность и в геологических средах. Так диффузионная подвижность водорода В кварце превышает подвижность воды примерно на три порядка (800оС, 100 МПа), а кислорода на 5.5 порядков [Kronenberg et al., 1986]. Эффект сверхвосстановления в обстановке мантийных плюмов может иметь место в сухих риолитовых расплавах с растворенным СО<sub>2</sub> на контакте с базальтами. Высокая температура свыше 1000°С обеспечивает высокую летучесть водорода при разложении воды в водно-углекислом флюиде на контакте с магмой.



Рис. 1 Реакция водорода и  $CO_2$  растворенного в альбитовом расплаве и во флюиде при P=500 МПа, T=1250°C и начальных содержаниях воды в расплаве  $C_{0,H2O}$ =0.1 и 1 мас.% а) зависимость отношения мольных концентраций CO и молекулярного  $CO_2$  ( $xCO/xCO_{2mol,L}$ ) от фугитивности водорода fH2 в альбитовом расплаве и углекислом флюиде ( $xCO/xCO_2$  <sub>Fl</sub>); заштрихованная область отвечает диапазону ожидаемых летучестей водорода в сосуде, вертикальные линии летучести водорода, отвечающие равновесию с графитом в расплаве и во флюиде.

### Литература

- Kronenberg A.K., Kirby S.H., Arnes R.D. and Rossman G.R. Solubility and Diffusional Uptake of Hydrogen in Quartz at High Water Pressures: Implications for Hydrolytic Weakening // J. Geophys. Res. 1986. V. 91(B12). P. 12723-12744.
- Luth R.W. Natural versus experimental control of oxidation state: Effects on the composition and speciation of C-O-H fluids // American Mineralogist. 1989. V. 74. P. 50-57.

REDUCTION OF CO<sub>2</sub> IN ALBITE MELT AT LOW HYDROGEN FUGASITY.

<sup>1,2</sup>Simakin A.G., <sup>1</sup>Devyatova V.N., <sup>1</sup>Bondarenko G.V.

<sup>1</sup>Institute of Experimental Mineralogy (IEM) RAS, Chernogolovka, <sup>2</sup>Institute of Physics of the Earth RAS (IPE), Moscow <u>simakin@ifz.ru</u>

Graphite formation was observed during the synthesis of dry carboncontaining albite glasses. The experiments were carried out in platinum capsules in IHPV at a pressure of 500 MPa and T=1200-1250°C. We proposed a thermodynamic model to explain the achievement of low oxygen fugacity, close to QFM-2, at low hydrogen fugacity. The paradoxically low fugacity of oxygen is explained by the shift of the equilibrium of the reaction  $CO_2 + H_2 = H_2O + CO$  to the right due to the low activity of water in the melt. High local concentrations of CO in the melt lead to the dissolution of platinum in the form of carbonyl, corrosion of the walls of the capsules, and redeposition of the metal in the melt. The reducing effect disappears when the water content in the melt is 1-2 wt.%. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРА Vp/Vs В ОБЛАСТИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ГРАНИЦЫ ПОГРУЖАЮЩЕЙСЯ ПОД КАМЧАТКУ ТИХООКЕАНСКОЙ ПЛИТЫ (P-H СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ)

## <u>Славина Л.Б.,</u> Кучай М.С.

Институт физики Земли (ИФЗ) РАН, Москва, <u>slavina@ifz.ru</u>, <u>kuchay@ifz.ru</u>

Представлены результаты исследования параметра Vp/Vs отношения скоростей сейсмических Р и S волн в северном сегменте Камчатки, в погружающейся под Камчатку Тихоокеанской плите (слой субдукции) в районе сочленения Камчатской и Алеутской островных дуг, а так же ее положение под Северной группой Ключевского, Шивелуча. Построены вулканов разрезы распределения параметра по глубине. Выявлены слои – границы в коре и мантии. Положение и строение фокального слоя. Значения параметра в слоях в основном пониженные, что свидетельствует о преобладании процесса растяжения, дилатансии в направлении океанической плиты. Обнаружена коллизионная граница сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг на полуострове, Камчатском характеризующаяся повышенными значениями, т.е. процессом сжатия, компрессии.

Расчеты выполнялись по данным региональных землетрясений, зарегистрированных сетью телеметрических сейсмических станций КФ ГС РАН за длительный период времени, с 2009г по июль 2022г. Методика расчета значений параметра сводилась к следующему: единичные значения рассчитывались аналитически, усреднялись по группе станций и, полученное значение, приписывалось положению гипоцентра.

Величина *Vp/Vs* определяется упругими свойствами среды и может быть выражена через параметры Ламе *µ*, *λ*. В частности, когда упругие параметры Ламе *µ*, *λ* равны, *Vp/Vs* равно корню из 3, т.е. ~1.73. Значения равные 1.73±0.05 считались нормальными для исследуемой геологической среды, значения *Vp/Vs* < 1.68 — считались пониженными, *Vp/Vs*>1.78 — повышенными. Пониженные значения интерпретировались нами как процесс дилатансии, растяжения, повышенные - как процесс сжатия [Физ. Свойства,1984; Николаевский,1996; Гарагаш,1983].

Характер распределения землетрясений по площади и глубине в исследуемом районе, как в области вулканической активности СГВ, так и в фокальной зоне представлен на Рис.1а. Показано положение землетрясений на исследуемой площади, линии двух профилей, с раскраской эпицентров используемых при построении

профилей в соответствии с параметром Vp/Vs, разломная тектоника в океанической части в соответствии с морскими работами методом НСП по Н.И. Селиверстову [Селиверстов, 2013]. Разрезы, построенные по двум профилям, приведены на Рис.1 б,в.



#### Рис.1 а,б,в.

Разрезы показывают строение геологической среды исследуемой области.

Профиль АВ построен вдоль линии с коридором +-10км, включающей землетрясения от линии профиля. В направлении от вулкана Шивелуч на юго-восток (вкрест простирания фокальной зоны). Пересекает южное окончание Камчатского полуострова, Камчатский пролив, в направлении Командорских островов. В тектоническом аспекте, совпадает в плане с разломом Стеллера. Цветом показаны значения параметра Vp/Vs. На разрезе особо вертикально расположенный слой (или граница) выделяется параметра, расположенный в североповышенных значений западной части Камчатского п-ова. Слой фиксируется от глубин 5-8 до глубин ~ 50 км. Вероятно, это граница – восточного КМ коллизионного контакта выделенного А.И. Кожуриным [Kozhurin, Pinegina, 2012]. Так же на разрезе можно выделить два слоя глубине 5-8 км и второй слой на глубине 15-20 км, первый на причем, наблюдается подъем слоя в ЮВ направлении – граница М. Полученные границы свидетельствуют об океаническом типе коры.

Фокальный слой до глубин 150 км четко не прорисовывается. Некоторое скопление пониженных значений на глубине около 75 км наблюдается в 25-30 км на ЮВ от Щивелуча.

Разрез по профилю CD построен от Ключевского вулкана в направлении на ЮВ. Пересекает Восточные хребты, Кумроч и далее Ha Камчатский залив. разрезе можно видеть строение Ключевского вулканической структуры вулкана, включающей постройку, столб – магматический канал, периферический очаг на глубине ~ 30-35км, а так же базальтовое образование по Федотову С.А. [Федотов, 2006] на глубине 15-20 км. Далее на ЮВ на этой же глубине можно выделить слой с пониженными значениями параметра. Вероятно это граница базальтового слоя.

Выделяется граница коры-мантии на глубинах ~35-40 км. Четко видны, вероятно, разломные структуры в виде суб-вертикальных полос, в основном пониженных значений. Причем, на границе корымантии их направление и наклон резко меняется. Они как бы разворачиваются в сторону континента. На глубине ~70 км наблюдается еще одна граница, от которой выделяется и начинает свое образование фокальный слой – слой субдуции. До глубин ~80 км погружение слоя происходит полого. В районе глубины ~75 км угол наклона резко меняется до 45<sup>0</sup>.

На глубинах 100-200 км можно видеть двойной фокальный слой. Отметим, что с океанической стороны наблюдаются пониженные значения параметра, с внутренней континентальной стороны значения повышенные. Связи питания очаговых зон вулканов Ключевского и Шивелуча с фокальным слоем на представленных разрезах не наблюдается.

В результате проведенных исследований получены сведения о строении геологической среды северного сегмента Камчатки, выявлены границы в коре и мантии, вдоль которых наблюдаются в основном пониженные значения параметра, что свидетельствует о преобладании процесса растяжения в коре и мантии материкового, над-субдукционного склона Камчатки в сторону океана.

Выявлена граница коллизионного сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг на полуострове Камчатский, для которой, характерны повышенные значения параметра, свидетельствующие процессе (компакции) участке. Факт 0 сжатия на ЭТОМ существования такой границы, а также отмеченного нами выше, процесса растяжения в направлении океана, отмечаются в работах А.И. Кожурина [Kozhurin, Pinegina, 2012]. Связь формирования структуры Камчатского сегмента Курило-Камчатской островной дуги с динамикой зоны поддвига в ее краевой части проявляется также в резкой смене режима деформирования земной коры, при переходе за край погруженной части плиты с примерно поперечного растяжения, на примерно поперечное сжатие.

## Литература

- 1. Балеста С.Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 135 с.
- 2. Гарагаш И.А. О хрупком разрушении упругих тел с большим числом трещин. В кн.: Механика тектонических процессов, Алма-Ата, Наука, 1983, С.61-74.
- Селиверстов Н.И. Подводные морфоструктуры Курило Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский. 2013. 161 с.
- 4. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика под редакцией Н.Б. Дортман. М. «Недра», 1984. 455 с.
- 5. Kozhurin A., Pinegina. T. From arc-normal extension above the subduction zone to arc-normal contraction just beyond its lateral edge: the case of the
- 6. Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с
- 7. Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержения вулканов. М. Наука, 2006, С. 455

BEHAVIOR OF THE Vp/Vs PARAMETER IN THE AREA OF THE NORTHWESTERN BOUNDARY OF THE PACIFIC PLATE SUBMERGING UNDER KAMCHATKA (AREA OF THE NORTHERN GROUP OF VOLCANOES OF KAMCHATKA) Slavina L.B., <sup>2</sup>Kuchay M.S.

Schmidt Institute of Physics of the Earth (IPE) RAS, Moscow, slavina@ifz.ru, kuchay@ifz.ru

The paper presents the results of a study of the parameter Vp/Vs - the ratio of the velocities of seismic P and S waves in the northern segment of Kamchatka, in the Pacific plate subducting under Kamchatka in the area of the junction of the Kamchatka and Aleutian island arcs, as well as its position under the Northern group of volcanoes - Klyuchevskoy, Shiveluch.

ФОРМЫ РАСТВОРЕНИЯ КВАРЦА И КАОЛИНИТА, КАК ТИПОМОРФНЫЕ ПРИЗНАКИ ПРОДОЛЖЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛАТЕРИТИЗАЦИИ В ОСАДОЧНЫХ БОКСИТАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧАДОБЕЦКОГО ПОДНЯТИЯ 1 Слукин А.Д., 1 Боева Н.М., 2 Жегалло Е.А., 2 Зайцева Л.В, 1 Шипилова Е.С., 1 Макарова М.А., 1 Мельников Ф.П. 1 Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, <u>boeva@igem.ru</u>; 2 Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка (ПИН) РАН, Москва, ezheg@paleo.ru

Цель данной работы: изучить поведение кварца и каолинита в бокситах. которые продуктами осадочных являются ИХ вопросы: Какова переотложения, И ответить на 1. судьба 2. переотложенного материала. Прекращаются ли процессы минералообразования, свойственные латеритам, или продолжаются в бассейне аккумуляции. Поиск ответа на эти вопросы идет в постоянном сравнении минерального состава и структур продуктов латеритизации и осадочных бокситов. Латериты ЦМ на всех алюмосиликатных породах: сланцах, щелочных ультрабазитах и кимберлитах великолепно сохраняют реликтовые текстуры. В бокситах все эти продукты диспергированы и тесно перемешаны. Большей частью бокситы сложены нано- и микрочастицами минералов. Эти частицы присутствуют в угловатых и окатанных формах, а также слипшихся тел, пеллет, обломков латеритов и их минералов, в химическом составе которых содержание Се колеблется от 1,04 до 17,75 мас. % (рис. 1). Все они – результат делювиального сноса продуктов латеритизации с поверхности латеритных покровов.



Рис. 1. Формы частиц минералов в осадочном боксите (а, б), псевдоморфоза анатаза по перовскиту (в). СЭМ.

Области питания и аккумуляции подверглись самому интенсивному воздействию биоты [Слукин и др, 2014; 2018]. В пористых участках осадочных бокситов выявлены многочисленные выделения друз, идиоморфных, пластинчатых и столбчатых кристаллов гиббсита (рис. 2). Несомненно, они находятся *in situ* и образовались именно в осадочных бокситах. Стенки трещин бокситов покрыты сплошными

щетками кристаллов гиббсита (рис. 2б). Поверхности однослойных и биоминеральных пленок покрыты многослойных СПЛОШНЫМИ формы кристаллов гиббсита (рис. 2в). Эти также корками толще осадочных бокситов свидетельствует TOM, что В 0 продолжались процессы латеритизации.



Рис. 2. Морфология минералов в осадочных бокситах: а – друзы кристаллов гиббсита в матриксе боксита, б – щетки кристаллов гиббсита между биоминеральных пленок, в - сростки кристаллов гетита на поверхности биоминеральных пленок. СЭМ.

Кварц находится в виде реликтов окатанных и частично растворившихся Было установлено, зерен. что при прогрессирующем растворении кварца вокруг него возникает разрастающийся зазор. Это массовое явление, и оно характерно только для кварца (рис.За, б), что позволило выделить его в типоморфного признака. Стенки зазоров покрыты качестве биоминеральными пленками C-AI-O состава, которые превратились Пленки покрывают и трещины в кварце, где в корки гиббсита. полностью перекристаллизовались в гиббсит. Конечной формой растворения кварца является пустое пространство, окаймленное и прорезанное внутри по бывшей трещине биоминеральной пленкой (рис.3в). Все обнаруженные формы растворения кварца В осадочных бокситах возникли in situ и не подвергались далее транспортировке.



Рис. 3. Формы растворения кварца в осадочных бокситах: а – реликт частично растворившегося зерна кварца со щеткой кристаллов гиббсита, б – зерна кварца и анатаза и их состав, в – каверна от полностью растворившегося кварца, окруженная биоминеральной пленкой. СЭМ.

Каолинит находится в осадочных бокситах в виде обломков твердых червеобразных кристаллов, образованных по флогопиту [Слукин и др, 1985, 2018] и в виде тонкодисперсных частиц, окатышей и пеллет. Каолинит в бокситах подвергся интенсивному червеобразные сростки выветриванию (рис. 4a. б). Его расщепились, и обособившиеся гексагональные пластинки были растворены по краям и приобрели зазубренный облик. Процесс был неравномерным, и сростках соседствуют частично измененные новообразованного пластинки С пластинками гиббсита. химическом составе таких сростков выявляются значительное преобладание AI над Si (рис. 4б).



10мкт

Рис. 4. Формы растворения каолинита и образующегося гиббсита: а, б – реликты червеобразных сростков каолинита, в – бесформенный реликт каолинита на кристаллах гиббсита. СЭМ.

Освобождающийся при растворении глинозем тут же идет на построение кристаллов гиббсита. Это отражается на ассоциации этих минералов: идиоморфные кристаллы гиббсита с гладкими гранями облекаются изъеденными червеобразными сростками каолинита. Дисперсный каолинит находится в бесформенных массах и также льнёт к кристаллам гиббсита. Формы нахождения каолинит-гиббситовых ассоциаций, несомненно, свойственны их автохтонной природе.

Таким образом, наши наблюдения и результаты изучения парагенетической ассоциации латеритных профилей и синхронных осадочных бокситов ЦМ впервые доказывают, что в последних продолжались процессы латеритизации. Они выражались в растворении кварца и каолинита, образовании гиббсита и других минералов, свойственных латеритам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России проект № 13.1902.21.0018.

#### Литература

- Slukin A.D. Role of kaolinite in the formation of bauxite // 5 th Meeting of the European Clay Group, Prague. 1983. Charles University. 1985. P. 359 – 363.
- Slukin A.D., Nikitina A.P., Novikov V.M. Quartz and its role in laterite bauxite formation // Travaux ICSOBA. Zagreb. 1986-1987. V. 16-17. 1987. P. 163-167.

- 3. Слукин А.Д., Боева Н.М., Жегалло Е.А., Зайцева Л.В. Кварц как реликтовый продукт биогенного растворения в латеритных бокситах // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. XIX международная конференция. 2018. С. 298-301.
- 4. Слукин А.Д., Боева Н.М., Жегалло Е.А., Бортников Н.С. Биогенное растворение кварца в процессе образования латеритных бокситов (по результатам электронно-микроскопического изучения) // ДАН. 2019. Т. 486. №2. С. 228-232.
- 5. Слукин А. Д., Бортников Н.С., Жегалло Е.А., Жухлистов А.Д., Боева Н.М. Гиббсит и каолинит в зоне биологической педотурбации латеритного профиля: разные судьбы (на примере месторождений Сибири, Индии, Гвинеи и Бразилии) // ДАН. 2014. Т. 458. № 5. С. 572-577.

FORMS OF DISSOLUTION OF QUARTZ AND KAOLINITE AS TYPOMORPHIC SIGNS OF CONTINUATION OF LATERITIZATION PROCESSES IN SEDIMENTARY BAUXITES OF THE CENTRAL DEPOSIT OF THE CHADOBETSKY UPLIFT <sup>1</sup>Slukin A.D., <sup>1</sup>Boeva N.M., <sup>2</sup>Zhegallo E.A., <sup>2</sup>Zaitseva L.V., <sup>1</sup>Shipilova E.S., <sup>1</sup>Makarova M.A., <sup>1</sup>Melnikov F.P.

<sup>1</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry (IGEM), RAS, <u>boeva@igem.ru</u>; <sup>2</sup>Borisyak Paleontological Institute (PIN) RAS, <u>ezheg@paleo.ru</u>

For the first time, a systematic study under SEM of the forms of quartz and kaolinite in sedimentary bauxites of the Central deposit of the Chadobetsky uplift of the Siberian Platform was carried out. It is proved that as a result of deluvial processes, the relics of these minerals were carried into erosive depressions and underwent lateritization processes up to complete dissolution and formation of voids (in place of quartz) and gibbsite (in place of kaolinite). At the same time, gibbsite crystallization took place in the bauxite matrix in the form of druses, in cracks and on the surface of biofilms – in the form of brushes. Point analysis of mineral bauxite particles revealed the participation of alkaline ultrabasites and carbonatites with hurricane Ti and Ce contents in their formation.

#### ВКЛЮЧЕНИЯ КСЕНОЛИТОВ, РАСПЛАВОВ И ФЛЮИДОВ В ОЛИВИНЕ УЛЬТРАМАФИТОВ КАК СВИДЕТЕЛЬСТВО КОРОВОЙ КОНТАМИНАЦИИ. МАССИВ УИТКОМСТ (ЮАР, БУШВЕЛЬД) <sup>1</sup>Соловова И.П., <sup>1</sup>Юдовская М.А., <sup>1,2</sup>Аверин А.А.

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений РАН, Москва, Россия, solovova@igem.ru

Институт физической химии и электрохимии РАН, Москва, Россия, <u>alx.av@yandex.ru</u>

экспериментальной термобарогеохимии Методом изучены включения расплавов, флюидов и псевдоморфоз (рис. 1) в кумулусном оливине массива Уиткомст, входящего в состав Бушвельдского комплекса. Первичные расплавы во включениях отвечают высококремнистым коматиитам. Магма генерировалась при 1590°С и 2.5 ГПа и обеднена летучими компонентами (в ppm – 168 H<sub>2</sub>O, 264 Cl), что объясняет отсутствие в оливине первичных флюидных включений. Эволюция родоначальной магмы была нами прослежена от 1590°С и 2.5 ГПа до 1330°С и 460 МПа. Показано, что на более поздних этапах в расплаве резко возрастают концентрации летучих и ряда редких элементов и щелочей, что требует привлечения дополнительных источников. Повышение содержания флюидо-мобильных элементов при снижении праметров может быть связано с инфильтрацией флюидов или флюидо-насыщенных расплавов корового происхождения.

Для проверки этой гипотезы в оливине были дополнительно изучены ксеногенные агрегаты полиминеральных включений и поздне-/постмагматические расплавные включения в оливине В составе микроксенолитов определены ортопироксен, амфиболпаргасит, флогопит, альбит и, менее распространенный, пектолит. Было обнаружено, что внутри и вокруг включений *ксенолитов* наблюдаются обильные флюидные обособления, что говорит о позднем появлении флюида в породе (рис. 1, 2). Ramanспектроскопическое изучение флюида показало, что он представлен смесью CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H2O, OH<sup>-</sup> группы, карбонат-иона и графита. Отношение H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> равно 1.6/1, отношение интенсивностей линий графита I(D)/I(G) близко к 0.5, что отвечает его дисперсной модификации. Во включениях определены магнезит и лизардит Mg<sub>3</sub>[Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>](OH)<sub>4</sub>.



Рис. 1. Микрофотографии включений полиминеральных агрегатов (1, 2) и псевдоморфоз замещения (3) в оливине.



Рис. 2. Raman-спектры флюидных обособлений взорванных полиминеральных агрегатов внутри зерен оливина. На спектрах присутствуют линии CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H2O, OH<sup>-</sup> группы, карбонат-иона и графита.

Дополнительно к первичным расплавным и кристаллическим оливине присутствуют ксеногенным включениям, В обильные включения HO определенно позднего расплавные неясного, генезиса, по всем критериям резко контрастирующие с первичными расплавными включениями (рис. 3). Они представляют собой идиоморфные образования размером от < 5 до 50 мкм, их фазовый состав варьирует в широких пределах и представлен стеклом с

одним и множеством флюидных пузырьков, или в разной степени девитрифицированными разностями. Отмечаются редкие случаи обособления флюида с каемкой жидкой Н2О. В включениях часто присутствуют игольчатые кристаллы СІ-апатита, определены антофиллит-жедритовые твердые растворы, альбит-кварцевые сростки, в которых от 6 до 20 мас.% кварца. Дочерний альбит небольшую примесь анортита (0.1 1.3 содержит wt%). Качественно, ПО элементному спектру, можно предположить присутствие перовскита, титанита, ильменита С И рутила. проведены включениями были термические эксперименты В интервале температур 730 – 1275оС.



Рис. 3. Фазовые переходы в первичных (верхний ряд) и поздних (нижний ряд) расплавных включениях при нагревании до указанных температур

Плавление минеральных фаз в интервале 730°С - 1060°С сопровождалось отделением множества пузырьков флюидной фазы (рис. 3). Выше 1100°С флюид постепенно растворялся в расплаве. Большинство включений в интервале 1170 – 1190°С содержит гомогенный расплав. Анализ продуктов пилотных опытов показал, что закаленные стекла отвечают высококремнистым расплавам. Известно, что для достижения равновесия в таких расплавах требуется проведение длительных экспериментов. В связи с этим время выдержки было увеличено от 15 минут до трех часов.

Анализы показали, что расплав характеризуется концентрацией SiO<sub>2</sub> 64 – 67.7 мас.%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14.6 – 16.3 мас.% и Na2O+K2O до 9.2

мас.%. Их особенностью является аномально высокое содержание MgO, особенно в продуктах экспериментов с длительной, до трех часов, выдержкой. Это явление связано с плавлением оливинахозяина при перегревании включений, что подтверждается прямой зависимостью концентраций MgO и FeO от температуры (рис 4), состав оливина. Поэтому в дальнейшем входящих В были использованы анализы природно-закаленных стекловатых включений. Сравнение химического состава гретых и природнозакаленных включений показывает, что длительная выдержка при высоких температурах влияет на концентрации и соотношения компонентов (рис. 5).



Рис. 4. Зависимость концентраций MgO и FeO от температуры экспериментов.



Рис. 5. Составы расплавов включений после проведения высокотемпературных экспериментов (2) и природно-закаленных стекол включений (3). На правой диаграмме показаны поля составов первичных высокомагнезиальных расплавов (1) и кислых коровых (2, 3).

Мы полагаем, что расплавы кислого состава появились в магматической системе в результате поступления порций коровых флюидов, обогащенных минералообразующими компонентами и освобождающихся в результате ретроградного разогрева вмещающих пород.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 21-17-00119 «Контаминация и гибридизация основных-ультраосновных магм как движущая сила магматического сульфидного рудообразования»

INCLUSIONS OF XENOLITHS, MELTS AND FLUIDS AS EVIDENCE OF CRUSTAL CONTAMINATION. UITKOMST MASSIF (SOUTH AFRICA, BUSHVELD)

<sup>1</sup><u>Solovova I.P</u>., <sup>1</sup>Yudovskaya M.A., <sup>1,2</sup>Averin A.A.

<sup>1</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, RAS, Moscow, <u>solovova@igem.ru</u>,

<sup>2</sup>Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Moscow, <u>alx.av@yandex.ru</u>

Our experimental thermobarogeochemical study of the different inclusions in olivine from ultramafic rocks of the Uitkomst Complex in the Bushveld Igneous Province revealed a series of melt compositions that are the result of combined fractional crystallization and assimilation. As a result of the study, it can be assumed that the cumulus olivine were affected by infiltration of volatile (reduced)-rich alkaline melt. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ КОРУНДОВЫХ АНОРТОЗИТОВ-КЫШТЫМИТОВ ЮЖНОГО УРАЛА:

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ <sup>1,2</sup>Сорокина Е.С., <sup>2</sup>Бочарников Р.Е., <sup>3</sup>Рассомахин М.А., <sup>2</sup>Бурэ С., <sup>2</sup>Хэгер Т., <sup>2</sup>Гросшопф Н.

<sup>1</sup>Johannes Gutenberg Universität Mainz (JGU), г. Майнц, Германия Esorokin@uni-mainz.de

<sup>2</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН, г. Москва Россия

<sup>3</sup>Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, г. Миасс, Россия

районе Корундовые анортозиты-кыштымиты расположены в Борзовского месторождения и юго-восточнее него на границе с восточным флангом Вишневогорского массива Южного Урала России. Вмещающими породами являются кварцито-сланцы метатерригенной саитовской серии крупными С телами метагипербазитов. Саитовская серия является одним из структурно-Ильмено-Вишневогорской подразделений вешественных полиметаморфической зоны, являющейся глубинным фрагментом регионального пост-коллизионного сдвига [Русин и др., 2006]. Несмотря на открытие кыштымитов в начале 20-го в., генетическая природа их образования во многом остается дискуссионной.

Для исследования генезиса кыштымитованортозитов Вишневогорского комплекса был отобран локальный профилы гипербазиты – корундовые анортозиты – милониты на жиле анортозитов (55°37'04.0"N, «Пришоссейная» корундовых 60°27'25.5"Е). Структурный характер анортозитов изменялся от мелкозернистого «сахаровидного» ПШ (первые мм) на контакте с милонитами до крупнозернистого ПШ (до нескольких см) с крупными выделениями корунда (3 – 5 см) на границе с метагипербазитами. Главным минералом анортозитов является ПШ (2 генерации – более ранний альбит и КПШ, а также более поздний альбит и олигоклаз). Среди второстепенных минералов отмечены слюда, хлорит и корунд, количественное отношение последнего может достигать 20% вблизи контакта с гипербазитами. В отличие от Борзовского месторождения кыштымитов, на пришоссейной жиле не было отмечено крупных выделений турмалина-шерла. Вмещающие состояли преимущественно ИЗ альбита КПШ. милониты И Приконтактовая зона кыштымитов и метагипербазитов состояла из актинолита-тремолита. Тогда как вмещающие гипербазиты были сложены в основном клинопироксеном, хлоритом и вермикулитом.

Химический состав проб представлен в таблицах 1 и 2. Распределение основных петрогенных элементов значительно изменяется по профилю милониты (T1)-кыштымиты (T2 – T5) гипербазиты (T7) (рис. 1). Так, процессы десиликации, наблюдаемые на контакте кыштымитов и гипербазитов, сменяются обогащением SiO<sub>2</sub> самих у/о пород. Последнее связано с более поздними процессами окремнения гипербазитов, не имеющих отношения к образованию кыштымитов.

отобранных пробах.	Табл		1.	Количес	тво	ОСНОВНЫХ	с пет	роген	ных	элеме	HTOB	(мас.%)	) В
	отобр	pa	HH	ых проба	IX.			-				-	

Оксид/												
проба	SiO <sub>2</sub>	$AI_2O_3$	$Fe_2O_3$	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI	Сумма		
T1	64.34	20.95	0.19	Bdl	0.27	0.75	6.75	5.69	0.41	99.38		
T2	64.56	20.35	0.22	Bdl	0.22	1.57	8.45	2.87	0.54	98.80		
Т3	64.61	20.94	0.16	Bdl	0.11	1.79	9.33	1.55	0.50	99.01		
T4	64.42	20.80	0.20	Bdl	0.31	1.92	9.54	1.01	0.75	98.99		
T5	56.84	28.75	0.32	Bdl	0.20	1.53	7.76	2.04	0.60	98.07		
T6	50.74	4.42	5.02	0.09	25.39	0.53	0.16	0.07	13.46	100.50		
T7	71.45	4.33	3.45	0.08	11.98	0.53	0.46	0.14	7.25	100.05		
. IL .												

Bdl – ниже порога обнаружения.

Значения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, напротив, постепенно увеличиваются от милонитов к контакту с гипербазитами от почти 21 мас.% до 29 мас.%. Содержание K<sub>2</sub>O примерно в 2 раза ниже в кыштымитах по сравнению с милонитами, что, вероятно, связано с преобладанием в последних существенно калиевого ПШ. При этом содержание остальных петрогенных элементов (Fe, Mg, Ca и Na) варьировало в незначительных количествах в милонитах и кыштымитах. Марганец был ниже порога обнаружения. Вмещающие гипербазиты обогащены MgO до 12 мас.%. Также в последних наблюдалось небольшое количество Cr и Ni.



Рис. Распределение основных петрогенных элементов 1. ПО профилю милониты (1) -кыштымиты (2 – 5) -гипербазиты (7). Таким образом, формирование кыштымитов происходило при дисиликации и обогащении алюминием исходных ПШ милонитов на гипербазитами саитовской серии. контакте С Температура образования была определена ранее посредством катион-обменной термометрии циркона и соответствовали примерно 900°С [Filina et al. 2019].

Элемент/ проба	Cr	Со	Ni	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Ва	W	Pb
T1	23	24	9	20	114	424	6	19	2451	302	191
T2	36	29	17	34	57	354	6	33	457	314	61
Т3	20	28	7	24	28	547	22	22	1333	303	116
T4	30	19	22	42	23	459	136	33	424	244	82
T5	14	65	16	17	39	721	6	23	5621	958	183
Т6	2023	63	1408	13	4	38	8	44	63	10	11
T7	1333	44	781	9	9	77	6	33	78	46	15

Табл. 2. Микро-примесный состав (мкг/г) отобранных проб.

## Литература

1. Русин А.И., Краснобаев А.А., Вализер П.М. Геология Ильменских гор: ситуация и проблемы // Геология и минералогия Ильменогорского комплекса: ситуация и проблемы. 2006. Миасс: ИГЗ УрО РАН. С. 3-19.

2. Filina, M.I.; Sorokina, E.S.; Botcharnikov, R.; Karampelas, S.; Rassomakhin, M.A.; Kononkova, N.N.; Nikolaev, A.G.; Berndt, J.; Hofmeister, W. Corundum Anorthosites-Kyshtymites from the South Urals, Russia: A Combined Mineralogical, Geochemical, and U-Pb Zircon Geochronological Study // Minerals. 2019. № 9. C. 234.

SOME FORMATION FEATURES OF CORUNDUM ANORTHOSITES-KYSHTYMITES FROM SOUTH URALS: PRELIMINARY

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL DATA

# <sup>1,2</sup>Sorokina E.S., <sup>2</sup>Botcharnikov R.E., <sup>3</sup>Rassomakhin M.A., <sup>2</sup>Buhre S., <sup>2</sup>Häger T., <sup>2</sup>Groschopf N.

<sup>1</sup>Johannes Gutenberg Universität Mainz (JGU), Mainz, Germany Esorokin@uni-mainz.de

<sup>2</sup>Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry (GEOHI) Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup>South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy, Miass, Russia

Corundum anorthosites-kyshtymites are located in the area of the Borzovskove deposit and to south-east of it at a border with the eastern flank of the Vishnevogorsk massif of the South Urals of Russia. Regardless of the discovery at the beginning of 20<sup>th</sup> century, their genesis remains controversial. Our mineralogical and geochemical data showed their variation from mvlonites toward the contacting metaultramafites. Formation of kyshtymites occurred during the disilication and enrichment with aluminum of the original feldspar mylonites at contact with metaultramafites of the Saitovsky series in South Urals.

# МЕТОД ОЧИСТКИ УРАНСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД <sup>1,2</sup>Софронова С.М.,<sup>1</sup>Богуславский А.Е.

Институт геологии и минералогии (ИГМ) имени В. С. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; <sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, <u>sonya.sofronova.99@gmail.com</u>

**Аннотация:** В работе были проведены исследования совместного осаждения фосфатов кальция и урана на модельном и техногенном растворах. Результаты экспериментов указывают на снижение концентрации ионов урана в растворах. Показано, что уран имеет разные механизмы осаждения. В первом случае осаждение происходит посредством включения урана в соединения фосфата кальция, во втором происходит сорбция урана на поверхности уже сформированных фосфатов кальция.

**Ключевые слова:** сточные воды, загрязнение ураном, очистка сточных вод, соосаждение урана с фосфатами кальция, выщелачивание урана, гидроапатит, отенит.

#### Введение

Вследствие развития атомной промышленности во всем мире, очистка воды от солей и радиоактивных металлов является одной из актуальных международных экологических задач. Работы в данной области ведутся как в нашей стране, так и за рубежом [Рихванов, 1997, Габараев. 2019]. Одним из методов очистки сточных вод от соединений урана является осаждение урана с фосфатами кальция. Исследования такого метода уже проводились в лабораторных условиях на модельных растворах [Mehta, 2016], отличием данной работы, стало применение изученных технологий как на экспериментальных растворах, так и на реальной пробе антропогенного полученной участке загрязнения воды. на предприятия топливно-ядерного цикла.

## Методика экспериментального исследования

			Iau	лица	1 – 31	IEMER	пныи с	JUCIAB	CHER	Thor
	Ca,	К, мг/л	Mg,	Mn,	Na,	PO <sub>4</sub> ,	SO <sub>4</sub> ,	Si,	Sr,	U,
	мг/л		мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л
Техногенный раствор	1128,00± 56,4	35,41± 1,77	86,56± 4,3	11,70±0,5 8	1780,36 ±89,01	1,22± 0,06	929,70±4 6,48	10,28±0, 051	3,16±0 ,16	2,36±0, 12
Модельный раствор	601,96± 30,00	0,014± 0.0007	-	0,002±0,0 001	2,00 <del>±</del> 0, 1	0,04± 0,002	0,47±0,02	0,03±00, 0015	0,27±0 ,013	12,98± 0,65

Таблица 1 – Элементный состав спектров

Эксперимент проводился на модельном и техногенном растворе. Техногенный раствор представляет из себя пробу воды, взятую из
хвостохранилища. В качестве модельного раствора был взят раствор с концентрацией хлорида кальция CaCl2 1000мг/л и уранила (UO2(NO3)2) 10 мг/л.

Для получения осадка, в модельный раствор хлорида кальция CaCl2 концентрацией 1000 мг/л и в раствор техногенной пробы был добавлен концентрированный раствор гидрофосфата натрия Na2HPO4.

Продолжительность каждого эксперимента составила 10 дней до полного завершения реакций осаждения. В ходе эксперимента были отобраны промежуточные и окончательные пробы.

## Результаты и обсуждение

Результаты химического анализа проб, взятых в течении реакции, указывают на снижение концентраций фосфора, кальция и урана как в модельной, так и в техногенной пробах.

На графике (рисунок 1) представлено изменение концентраций фосфора кальция и урана в растворе с техногенной пробой. Можно выделить два этапа: во время первого этапа концентрация урана снижается синхронно с концентрациями фосфатов и кальция. Что позволяет судить о том, что на данном этапе уран выпадает в осадок вместе с фосфатами кальция. Судя по данным СЭМ (рисунок 2). Вторая фаза характеризуется приведенным на концентрацией фосфора неизменной И кальция, однако концентрация урана продолжает снижаться, что позволяет сделать сорбции поверхности вывод 0 урана на предварительно сформированных фосфатов кальция. В результате сорбции урана свежесинтезированном гидроапатите на концентрации урана достигают значений ниже уровня предела обнаружения (0,2 мкг/л) [Zezhen, 2016]. Конечные значения концентрации урана в растворе в нашем исследовании не превышают 0,01 мг/л. При анализе техногенных проб было осаждено 99% урана и выявлены те же закономерности.

## Выводы

В ходе работы были проведены исследования совместного осаждения фосфата кальция и урана на модельной и техногенной пробах воды. Химический анализ полученных растворов показал, что значение концентрации урана в растворах снизилось практически в 100 раз, фосфатов в 4,5 раза.

Удаление урана из раствора происходит в два этапа: на первом этапе уран соосаждается с фосфатами кальция, на втором – уран сформированных фосфатах сорбируется на уже кальция. Результаты экспериментов по выщелачиванию урана из осадков говорят о том, что уран остается в составе твердых фаз при воздействии имитаторов грунтовых вод и дистиллята. Что позволяет на основании полученных результатов разработать технологии по очистке сточных вод от соединений урана, основанные на соосаждении урана с фосфатами кальция.







Рисунок 2 – а) 1 – Спектр 1; 2 – Спектр 2; 3 – Спектр 3, Электронная микрофотография поверхности осадка с урановым включением (Спектр 1)

Из растворов были получены осадки, подвергшиеся экспериментам по выщелачиванию. Результаты экспериментов показывают, что уран остается в составе твердых фаз при воздействии имитаторов

грунтовых вод и дистиллята. Полученные результаты позволяют разработать технологии по очистке сточных вод от соединений урана, основанные на соосаждении урана с фосфатами кальция.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00602.

# Литература

- Рихванов, Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии / Л.П. Рихванов. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 1997. – 384 с.
- Габараев, Б.А. Аналитический обзор материалов v международной научно-технической конференции"инновационные проекты и технологии ядерной энергетики / Б.А. Габараев, А.В. Джалавян, Е.А. Карандина // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 1. – С. 139-149
- Mehta, V. S., Maillot, F., Wang, Z., Catalano, J. G., and Giammar, D. E. (2016). Effect of reaction pathway on the extent and mechanism of uranium(VI) immobilization with calcium and phosphate. *Environ. Sci. Technol.* 50, 3128–3136. doi: 10.1021/acs.est.5b06212
- 4. Zezhen Pan, Daniel E. Giammar Orcid, Vrajesh Mehta, Lyndsay D. Troyer, Jeffrey G. Catalano Orcid, and Zheming Wang Phosphate-Induced Immobilization of Uranium in Hanford Sediments // Environmental Science & Technology. - 2016. - №24. - C. 41-50.

A METHOD OF TREATING URANIUM-CONTAINING WASTE WATER <sup>1,2</sup>Sofronova S.M., <sup>1</sup>Boguslavsky A.E.

<sup>1</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy (IGM) SB RAS, Novosibirsk, Russia, 630090, Akademik Koptyuga pr; <sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University (NSTU), 20 Karl Marx Ave., Novosibirsk, Russia, 630073, sonya.sofronova.99@gmail.com

In this work the joint deposition of calcium and uranium phosphates on model and man-made solutions has been studied. Experimental results indicate a decrease in the concentration of uranium ions in solutions. It is shown that uranium has different deposition mechanisms. In the first case, deposition occurs through the inclusion of uranium in calcium phosphate compounds, while in the second case there is sorption of uranium on the surface of already formed calcium phosphates.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ МЕТЕОРНОГО ФЛЮИДА; СОСТАВ МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ Стрельцова Н.И.

Институт геологии рудных месторождений (ИГЕМ) РАН, Москва

Представлены результаты моделирования эволюции метеорного флюида, циркулировавшего в конвективной ячейке, образовавшейся в результате внедрения интрузии на глубину 3-4 км.

информация Целью исследование являлась 0 составе минеральных ассоциаций, осаждавшихся из соленого флюида при заданных T = 270C °C и P<sub>гидр</sub> = 100 бар. Термодинамическая модель представлена 18-ти компонентной системой Au-Ag-Cu-Pb-Zn-Na-K-Ca-Mg-Al-Fe-Si-C-S-Cl-F-O-Н и включает твердые фазы постоянного состава, ионы, комплексные соединения и молекулы в водном растворе и газовую фазу. Расчеты проводились с использованием пакета программ Hch [Shvarov, Bastrakov, 1999]. Просачивание и моделировалось подъем раствора методом проточного ступенчатого реактора [Методы геохимического..., 1988].

Принятая для расчетов модель предполагает просачивание раствора через вмещающие породы вниз к источнику тепла, его взаимодействие с окружающей породой в режиме преобладания породы (в/п = 1/3) и нагревание. Вмещающие породы представлены сменяющими друг друга сверху вниз толщами кислых (калиевые риолиты), средних (андезиты) и вновь кислых (калиевые риолиты) пород. По мере просачивания метеорного флюида вниз, в них накапливались рудные компоненты, извлекавшиеся из вмещающие породы. Причем, из всех рудных минералов только свинец (PbCl<sub>2</sub>,aq) полностью вынесен из вмещающих пород. Серебро полностью вынесено только из нижней толщи калиевых риолитов. В растворе железо, свинец и цинк присутствуют, преимущественно, в хлоридных комплексах (FeCl<sup>+</sup>, FeCl<sub>2</sub>,aq, PbCl<sub>2</sub>,aq, ZnCl<sup>+</sup>, ZnCl<sub>2</sub>,aq,  $ZnCl_3$ ). Для меди и серебра кроме хлоридных комплексов(CuCl\_2, AqCl<sub>3</sub><sup>--</sup>,  $AgCl_2$ ), существенная роль принадлежала гидросульфидным комплексам (CuHS,aq, AgHS,aq), для серы главная роль принадлежит H<sub>2</sub>S,aq,

Достигший глубины изменения свойств пород от хрупких к пластичным, модифицированный метеорный флюид, нагретый до *Т* = 345 °C, при *Р*<sub>гидр</sub> = 301 бар, поднимается по трещине вверх без взаимодействия с окружающей породой.

На глубине 1000 м при *T* = 270С °С и *Р*<sub>гидр</sub> = 100 бар в равновесии с флюидом устойчива ассоциация, состоящая из кварца - 79.5% и халькопирита - 2.4% (с второстепенным каолинитом - 0.1%).

Состав минеральной ассоциации, осаждающихся из модельного флюида в результате его вскипания, в ответ на падение давления, зависит от количества отделившейся газо-паровой смеси.

При отделении 0.1% газопаровой смеси в результате вскипания флюида — осаждались: кварц 78.3 %+ халькопирит 26.1% (+ каолинит 0.1%), количество осажденных минералов увеличилось примерно в 2.5 раз, в сравнении с количествами, осаждавшимися при охлаждении.

При отделении 21% смеси в результате вскипания флюида – осаждались: кварц 99.83 % (+ пирит 0.1% + каолинит < 0.1%), количество кварца и каолинита выросло в 12 и 6 раз, соответственно, в сравнении с количествами, образовавшимися при охлаждении.

При отделении 30% с газопаровой меси в результате вскипания флюида – осаждались кварц 99.83 % и каолинит < 0.1%, количества образовавшихся кварца и каолинита выросло в 17 и 7 раз, соответственно, в сравнении с количествами, образовавшимися при охлаждении.

При вскипание флюида количества образовавшихся кварца и каолинита возрастали с увеличение доли отделившейся газопаровой смеси. Отделением маленькой доли газопаровой смеси приводит к увеличению как количеств жильных минералов - кварца и каолинита, так и рудных - халькопирита (и пирита). Увеличение количества отделившейся газопаровой смеси препятствует осаждению рудных компонентов, вероятнее всего в результате «потери осадителя» – в данной случае – серы, в фазу пара.

Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема НИР 121041500220-.)

## Литература

- 1. Shvarov Yu.V., Bastrakov E.N. HCh: a software package for geochemical equilibrium modelling. // User's Guide. Geoscience Australia Record 1999, № 25, p. 61
- 2. Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии / 1988.

#### METEORIC FLUID EVOLUTION MODELING; COMPOSITION OF MINERAL ASSOCIATIONS **Strteltsova N.I.** Institute of geology of ore deposits (IGEM) RAS, Moscow

Evolved saline meteoric fluid cooling to T = 270C °C at Phydr = 100 bar led to the precipitation of quartz, chalcopyrite, and kaolinite. Precipitated mineral associations composition as a result of fluid boiling up depended on the amount of the separated gas-vapor mixture. The quartz and kaolinite amounts increased with an increase in the fraction of the separated vapor phase. An increase in the proportion of the vapor phase prevents the precipitation of ore components.

## ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ЭВОЛЮЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОСАДКОВ ПРИ ЭРРОЗИИ МОРСКОГО ДНА НА ИЗМЕНЕНИЯ ПОДДОННЫХ ГИДРАТНЫХ СКОПЛЕНИЙ Суетнова Е.И. ИФЗ РАН Москва elena suetnova@mail.ru

Поддонные гидраты в настояшее время газовые рассматриваются не только как возможный в будущем pecypc углеводородов, но и как возможный источник опасных явлений связанных с различными процессами на морском дне [Гинсбург, Соловьев, 1994; Klauda, 2010]. С использованием математических опубликованных методов моделирования И результатов наблюдений об возможной эволюции газовых гидратов в северных регионах проведено исследование возможного влияния эволюции распределения поддонной температуры в результате процесса эрозии океанической коры на скопления поддонных газовых гидратов. В дне акваторий мирового океана газовые гидраты распределены неравномерно по площади и неодинаково ПО объёму гидратонасыщенности [Соловьев, 2001]. Для аккумуляции и стабильности газового гидрата в морском дне необходимо не только соблюдение условий термобарической стабильности гидрата но и поступление в пористую среду коры необходимого количества как для роста гидратонасыщенности так и соблюдения газа. локальных условий термодинамического равновесия гидрата с Zatsepina and коровым флюидом [Sloan 1998; насыщающим Buffett, 1998; Суетнова 2007].

Гидратонасыщенность морских осадков может косвенно указывать на историю и характер фильтрационного режима осадков зоне гидратонасыщенности [Суетнова 2010]. По морском дне в этому представляется актуальным изучение различных сценариев эволюции гидратных скоплений вызванной различными природными процессами как экспериментального в лабораторных условиях и в течение морских экспедиционных исследований так И теоретического С помощью математического моделирования. Математическое моделирование описывающее количественно процессы накопления газовых гидратов в морском дне при различных геофизических условиях может быть использовано для аргументированных предположений и выводов о термобарических и флюидодинамических условиях в морском дне в зоне обнаружения аккумуляции газовых гидратов..

Математическое моделирование с учетом этих зависимостей позволяет оценить характерные времена и скорости аккумуляции и

эволюции газовых гидратов в различных геофизических условиях, реализующихся в морском дне.

Математическая модель процесса эволюции скоплений газовых бассейнах гидратов окраинных состоит ИЗ системы В дифференциальных уравнений частных В производных, фильтрации аккумуляции описывающих процессы И или разложения газовых гидратов в порах в интервале глубин где выполняются условия стабильности газовых гидратов. Результаты математического моделирования процессов проведенных серий аккумуляции газовых гидратов с учётом геомеханики уплотнения погружающихся осадков и учетом результатов [Suetnova, 2003] даёт возможность оценить гидратонасыщенность в зависимости от При этом при времени, и термобарических условий в среде. изменении термобарических условий характер эволюции гидратных скоплений очевидно должен меняться в силу зависимости условий стабильности и равновесия гидратов с вмещающей средой от термобарических условий и концентрации газа.

Проведённое математическое моделирование показывает что распределение температуры f в морском дне после эрозии слоя мощности l при условии, что начальный градиент температуры был равен b, определяется выражением

f=f0+bz1 +bl erf(z1/( $2\sqrt{\kappa t}$ );

где z1 отсчитывается от новой поверхности осадков.

Полученное решение позволяет нам определять положение новой зоны стабильности для каждого момента времени истории действия эрозии на тепловые условия в дне.

Таким образом случае имеющихся В оценок гидратонасыщенности морского дна, например по результатам интерпретации данных сейсмического профилирования, можно сделать обоснованные предположения о режиме процесса приведшего к накоплению газовых гидратов и о влиянии эрозии используя результаты модельных морского дна расчетов. Изменение температуры вследствие эрозии может привести к изменению глубин зоны стабильности газовых гидратов и кроме того даже увеличению их концентрации в порах что может приводить к проницаемости и объёма свободного изменениям порового пространства породы.

Такие обоснованные оценки полезны для изучения процессов геологической, геофизической, геотермической и геомеханической эволюции гидратосодержащих структур морского дна.

# Литература

- 1. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А., 1994. Субмаринные газовые гидраты. С. Петербург, 199 с.
- Klauda, J. B., and S. I. Sandler. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment . // Energy Fuels. 2005 .19(2). 459–470, doi:10.1021/
- 3. Соловьев В.А. Газогидратоносность недр Мирового океана // Газовая промышленность. 2001. № 12. С. 19–23.
- 4. Sloan E.D. Clathrate Hydrates of Natural Gases. N.Y.: Marcel Dekker. 1998. 705 p.
- Zatsepina O. Y., and B. A. Buffett . Thermodynamic conditions for the stability of gas hydrate in the seafloor // J. Geophys. Res., 1998. 103, 24,127
- 6. Суетнова Е.И Моделирование аккумуляции газгидратов при осадконакоплении и уплотнении осадков субаквальных условиях. // Физика Земли. 2007. №9. С. 87-93.
- 7. Суетнова Е.И Влияние флюидодинамических и реологических свойств осадков на процесс вязкоупругого уплотнения при различных скоростх осадконакопления. // Физика Земли. 2010. №6. С. 72-79

POSSIBLE INFLUENCE OF THE PROCESS OF EVOLUTION OF SEDIMENTS TEMPERATURE DURING SEABED EROSION ON CHANGES IN THE SUBBOTTOM HYDRATE

## Suetnova E.I.

Institute of the Physics of the Earth. RAS. Moscow. elena\_suetnova@mail.ru

Using mathematical modeling methods and published results of observations on the possible evolution of gas hydrates in the northern regions, a study was conducted of the possible influence of the evolution of the distribution of the subbottom temperature as a result of the process of erosion of the oceanic crust on the accumulation of subbottom gas hydrates.

## СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОРИЧНЕВО-ЖЁЛТЫХ АЛМАЗОВ

<sup>1,2</sup>Титков С.В., <sup>2</sup>Смирнов А.А.

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений (ИГЕМ) РАН, Москва, <u>titkov@igem.ru</u>

<sup>2</sup>Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе (МГРИ), Москва, <u>smirnov.a\_@mail.ru</u>

К настоящему времени в структуре природных алмазах с использованием спектроскопических методов выявлено несколько сотен оптически активных центров [Dishchler, 2013]. Многие из этих центров проявляются в спектрах поглощения в видимой области и являются центрами окраски. В настоящей работе исследованы центры окраски в природных коричнево-жёлтых алмазах.

Исследованные образцы представляли собой природные алмазы в огранённом виде массой 0.31 - 0.67 кар. Алмазы были добыты из промышленных россыпей реки Анабар (север Сибирской платформы). Коренные источники этих россыпей до настоящего времени не установлены.

Оптические спектры поглощения в видимой и ближней ИКобласти были записаны с использованием современного волоконнооптического спектрометра OceanOptics QE65000 в диапазоне от 300 до 1100 нм при комнатной температуре и при температуре жидкого азота. ИК-спектры были зарегистрированы на спектрометре Bruker ALPHA в диапазоне 400-7000 см<sup>-1</sup> при спектральном разрешении 1-4 см<sup>-1</sup>.

коричневато-жёлтых Среди исследованных алмазов были выявлены образцы С необычными спектрами оптического поглощения. В одном из образцов были выявлены интенсивная узкая линия 800 нм, которая очевидно обусловлена бесфононными электронными переходами, и сопровождающие ее линии фононных повторений 722, 749 и 766 нм. Такая электронно-колебательная система в алмазах в известных нам работах не была описана. Кроме того, в этом образце наблюдалась широкая полоса с максимумом в области 460-480 нм, а также слабые линии 408, 427, 444, 642 и 667 нм, которые не оказывают существенного влияния на окраску. В однофононной области ИК-спектра данного образца наблюдаются полосы азотных центров С [N<sup>0</sup>], Х [N<sup>+</sup>] и Y, полоса, обусловленная присутствием микровключений карбонатов (1430 см<sup>-1</sup>), а также необычные полосы 1038 см<sup>-1</sup>, 1264 см<sup>-1</sup> и 1395 см<sup>-1</sup>. По физической классификации алмазов этот кристалл относится к типу lb.

В спектре другого коричнево-жёлтого алмаза наблюдались два континуума непрерывного поглощения – один начинался в области 550 нм и усиливался по интенсивности в сторону ультрафиолетовой области, другой - возрастал от области 600 нм в сторону инфракрасной области. Первый континуум характерен для алмазов, содержащих центры С (одиночные изоморфные атомы азота), второй – для алмазов со структурными примесями бора [Dishchler, 2013]. Однако, как свидетельствуют ИК-спектры, центры С и центры бора в данном алмазе отсутствуют. В его ИК-спектрах наблюдаются азотные центры А [N-N], В [4N-V] и плейтлетсы, представляющие собой пластинчатые скопления междоузельных атомов углерода. При этом центры А заметно преобладают. По физической классификации этот алмаз относится к типу IaA.

К настоящему времени работах разных авторов описаны коричнево-жёлтые алмазы с другими типами оптических центров. Наиболее часто коричневый оттенок у жёлтых алмазов возникает в посткристаллизационной результате развития пластической деформации, когда в кристалле образуются характерные плоскости скольжения [Hoffer, 1997]. В оптических спектрах таких кристаллов распространённым центром жёлтой окраски N3 наряду С регистрируется континуум непрерывного поглощения, которого постепенно интенсивность возрастает ближней ОТ инфракрасной ультрафиолетовой области спектра. К Происхождение континуума ЭТОГО традиционно связывалось деформационными дислокациями, которые, по-видимому, декорированы азотом [Минеева и др., 2008]. В последнее время среди исследователей широкое распространение получила точка зрения о том, что континуум поглощения обусловлен присутствием в структуре алмаза сферических агрегатов из 40-60 деформационных вакансий.

В спектрах поглощения некоторых пластически деформированных коричнево-жёлтых алмазов наблюдается только континуум поглощения, интенсивность которого возрастает не равномерно от ИК- к УФ- области, но имеет заметный перегиб в области 550-600 нм [Hainschwang et al., 2020a].

В очень редких пластически деформированных жёлтых алмазах наблюдаются деформационные ламели, окрашенные в розовый алмазов воспринимается цвет. Визуально окраска таких как коричнево-жёлтая [Wang, Moses, 2003]. Эти ламели, по всей вероятности, представляют собой деформационные микродвойники. В спектрах поглощения таких алмазов присутствуют полосы 390 нм, 480 нм и 550 нм, а также малоинтенсивная система N3. Природа 390 установлена. Полоса полосы ΗМ пока не 480 ΗМ

предположительно может быть связана со структурными примесями фосфора. Полоса 550 нм, по всей вероятности, является оптическим аналогом азотного парамагнитного центра M2 [N-C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>-C<sub>2</sub>-N<sup>+</sup>], образующего в результате разрушения под влиянием пластической деформации центра A [N-N] [Titkov et al., 2008].

Кроме того, встречаются природные коричнево-жёлтые алмазы, у наблюдается характерных признаков которых не развития посткристаллизационной пластической деформации. Такая окраска кристаллов, была установлена V некоторых значительно обогащённых структурными примесями водорода. В спектрах поглощения данных алмазов наряду с центрами N3 и N2 наблюдается слабая очень широкая полоса с максимумом в области 700 нм и континуум поглощения, начинающийся в области 720 нм и усиливающийся в сторону ближней ИК-области [King et al., предположительно 2005]. Полоса 700 связывается ΗМ CO структурными примесями водорода.

В спектрах некоторых коричнево-жёлтых алмазов с повышенным содержанием примесей водорода регистрируются интенсивная широкая полоса с максимумом в области 730 нм и непрерывное поглощение, интенсивность которого возрастает примерно от 600 нм к ультрафиолетовой области и на которое наложены системы N3, 474 нм, 562 нм [Hainschwang et al., 2020b].

Другой тип коричнево-жёлтых алмазов без явных визуальных деформации признаков пластической \_ это кристаллы С содержанием примесей CO<sub>2</sub>. ИХ повышенным B спектрах наблюдается видимой области В континуум поглощения непрерывного поглощения, интенсивность которого возрастает от ИК- к УФ-области, а также широкие полосы с максимумами 370 нм и 480 нм [Hainschwang et al., 2020b]

Таким образом, результаты проведённых исследований и анализ литературных данных свидетельствуют, что в оптических спектрах поглощения природных алмазов, окраска которых визуально воспринимается как коричнево-жёлтая, наблюдаются 8 различных типов центров окраски и их сочетаний. В этом смысле алмазы уникальны по сравнению с другими минералами. В спектрах поглощения синтетических и обработанных алмазов наблюдаются другие оптически активные центры [Hainschwang et al., 2020a; Hainschwang et al., 2020b], что позволяет проводить их надёжную геммологическую идентификацию с использованием спектроскопических методов.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием по теме 0136-2019-0011 ИГЕМ РАН

# Литература

- 1. Минеева Р.М., Титков С.В., Сперанский А.В. Структурные дефекты в природных пластически деформированных алмазах по данным ЭПР-спектроскопии // Геология рудн. месторождений. 2009. Т. 51. № 3. С. 261-271.
- 2. Dischler B. Handbook of Spectral Lines in Diamond. Berlin: Springer Verlag, 2012. 467 p.
- 3. Hainschwang T., Notari F., Pamies G. A defect study and classification of brown diamonds with deformation-related color // Minerals. 2020a. № 10. № pap 903.
- 4. Hainschwang T., Notari F., Pamies G. A defect study and classification of brown diamonds with non-deformation-related color // Minerals. 2020b. № 10. № pap 914.
- 5. Hofer S.C. Collecting and Classifying Colored Diamonds: An Illustrated Study of the Aurora Collection. Ashland Press: New York, 1998. 742 p.
- 6. King J.M., Shigley J.E., Gelb T.H., Guhin S.S., Hall M., Wang W. Characterization and grading of natural-color yellow diamonds // Gems and Gemology. 2005. V. 41. № 2. P. 88-115.
- Titkov S.V, Shigley J.E., Breeding C.M., Mineeva R.M., Zudin N.G., Sergeev A.M. Natural-color purple diamonds from Siberia // Gems and Gemology. 2008. V. 44. N 1. P. 56-64.
- Wang W., Moses T.M. Brown-yellow diamonds with an "amber center" and pink lamellae // Gems and Gemology. 2003. V. 39. № 2. P. 144-145.

## SPECTROSCOPIC STUDY OF BROWN-YELLOW DIAMONDS <sup>1,2</sup>Titkov S.V., <sup>2</sup>Smirnov A.A.

<sup>1</sup>Institute of geology of ore deposits (IGEM), Moscow, <u>titkov@igem.ru</u> <sup>2</sup>S.Ordgonikidze Russian state prospecting university (MGRI), Moscow, <u>smirnov.a\_@mail.ru</u>

Structural defects in natural brown-yellow diamonds were investigated using optical absorption spectroscopy in the UV and visible region and IR spectroscopy. The absorption spectra revealed unusual optical color centers. Previous papers have described brown-yellow diamonds whose color is due to other centers.

## ПРОЦЕССЫ РАЗВИТИЯ КОНТРАСТНЫХ ЭКЛОГИТОВЫХ АССОЦИАЦИЙ В МАКСЮТОВСКОМ ЭКЛОГИТ-ГЛАУКОФАНСЛАНЦЕВОМ КОМПЛЕКСЕ Федькин В.В.

Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН им. ак. Д.С.Коржинского, Черноголовка, <u>vfedkin@iem.ac.ru</u>

Высокобарные эклогит-глаукофансланцевые комплексы (ЭГСК), как правило, формируются в условиях постоянной тектонической активности и меняющегося режима метаморфизма [Dobretsov et al., 1996]. В силу этих обстоятельств, блоки основных пород, метаморфизованные при высоких и сверхвысоких давлениях (HP-UHP), часто включены в виде отдельных будин, прослоев и линз в метаосадочные или гранитоидные породы, не имеющие признаков HP метаморфизма.

Причины и условия образования контрастных серий пород эклогитовых будин, блоков и вмещающих их метаосадочных пород до конца не выяснены и вызывают активные дискуссии. Существуют две точки зрения для объяснения данного явления: модель когерентного формирования слоистых толщ (СU-модель) [Liu et al., 2001; Hacker et al., 2010] и модель тектонического меланжа (TMмодель) [Meyer et al., 2014].

Методы фазового соответствия и минералогической термобарометрии позволяют оценить значимость этих концепций при формировании данных структур. Исследования проведены на основе детального микрозондового изучения состава и зональности ключевых минералов эклогитовых пород (граната, клинопироксена и др.) на примере Максютовского ЭГСК (Южный Урал).

Максимальные параметры метаморфизма в Максютовском комплексе определяются наличием в составе его пород UHP минералов (алмаза, коэсита и др.): Т=650-780 °С и Р=2,7-3,2 ГПа [Lennykh et al., 1995; Leech, Ernst, 1998]. Проведенные нами исследования подтвердили топовые параметры метаморфизма: проградный этап 800→900 °С и ретроградный 910→730 °С при Р=3,2-3,5 ГПа. Эти условия сохранились в крупных блоках титановых эклогитов (с. Шубино, уч. Караяново), поднятых на поверхность в результате тектонического меланжа [Fedkin, 2020].

В гранате из эклогитовой будины обр.207 записана вся история проградного процесса. Трещиноватые и слегка окатанные зерна Grt начальной стадии кристаллизовались при 568-751°С (Рис.1а). Затем произошло ретроградное замещение центральной части зерна граната вторичными минералами (Gln+Mu+Chl+Qtz) и образование высокотемпературной каймы при параметрах 689-789°С (Рис1b).

Такая картина могла сохраниться только в результате быстрого подъема образца в процессе тектонического меланжа.



Рис. 1. Двухступенчатая проградная кристаллизация граната из центральной части эклогитовой будины (уч. Караяново).

Явления проградного И ретроградного метаморфизма в Максютовском комплексе неоднократно повторяются, а их РТ тренды, построенные по составам Grt-Cpx парагенезиса, образуют сопряженные пары, характеризующие режимы отдельных этапов (циклов) развития комплекса [Fedkin, 2020]. Гранат демонстрирует сложную, разнонаправленную, подчас, инверсионную зональность, которая отражает развитие РТ условий метаморфизма на всех его этапах и свидетельствует об участии эклогитовых будин в процессе комплекса. Процессы когерентного развития тектонического меланжа и когерентной стадии часто переходят друг в друга, протекают в едином ключе метаморфических событий и не всегда являются независимыми.

Наиболее ярко эти взаимоотношения видны в эклогитовых прослоях во вмещающей гнейсосланцевой матрице (Рис. 2), где гранат имеет разнонаправленную зональность. В центральной части прослоя в крупных разрушенных кристаллах граната сохранилась прогрессивная зональность начального этапа образования эклогита (622→680°С). По мере продвижения к контакту с вмещающей породой зональность зерен граната меняется на обратную: 770→677→619°C, которая на границе с матрицей постепенно 691→547°C, усиливается: 744→673. фиксируя регрессивное комплекса. Низкотемпературные вмещающего влияние новообразованные мелкие зерна граната в основной массе матрицы (547-487°С) завершают процесс когерентного развития породы.



Рис. 2. Температурные вариации кристаллизации граната в эклогитовом прослое во вмещающей Grt-Cpx-Gln-Mu-Qtz матрице в результате их когерентного взаимодействия.

Характерно, что клинопироксен в эклогитовом прослое и в матрице сохраняет устойчивый состав в пределах Х<sub>Jd</sub>=0.34-0.41, и лишь зональность граната Х<sub>Prp</sub>=0.11-0.21 фиксирует значительный разброс температур (>280°C) при формировании данной породы.

**Резюме.** Гранат в высокобарных породах эклогитглаукофансланцевых комплексов, обладает уникальной способностью сохранять свой исходный состав, отражающий РТ параметры начальных этапов метаморфизма, и одновременно фиксировать в новых зернах, наростах и замещениях изменения этих параметров в последующих метаморфических процессах.

Образование контрастных серий пород Максютовского комплекса происходит в результате тектонического меланжа и когерентного развития вмещающих пород. В принципе, они составляют единый процесс эволюции комплекса, но чаще эти процессы разобщены в отдельных этапах метаморфизма и протекают независимо друг от друга. Гранат является чувствительным индикатором процессов формирования контрастных серий пород. Его состав и зональность показывают отчетливые признаки тектонического меланжа (проградные РТ тренды метаморфизма и прогрессивная зональность ключевых минералов) и когерентного этапа развития пород комплекса (разворот и смена направления РТ трендов, регрессивная зональность ключевых фаз)

Работа выполнена в рамках Госзадания FMUF-2022-0004, рег. № 1021051302305-5-1.5.2; 1.5.4, и Программы Фулбрайт Института Международного образования, гранты 2011 и 2015 г.

## Литература.

- Dobretsov N. L., Shatsky V. S., Coleman R. G., Lennykh V. I., Valizer P. M., Liou J. G., Zhang R. and Beane R. J. 1996. // International Geology Review, v. 38, p. 136-160.
- 2. Fedkin V.V. 2020. // Russian Geology and Geophysics Vol. 61: No. 5-6, pp. 543–558.
- 3. Hacker, B.R., Andersen, T.B., Johnston, S., Kylander-Clark, A.R.C., Peterman, E.M., Walsh, E.O., Young, D., 2010. // Tectonophysics 480. 149-171.
- 4. Leech M.L. and Ernst W. G. 1998. // Geochim. Cosmochim. Acta 62, 2143–2154.
- 5. Lennykh, V.I., Valizer, P.M., Beane, R., Leech, M., and Ernst, W.G., 1995, // International Geology Review, v. 37, p. 584–600
- 6. Liu, F., Xu, Z., Yang, J., Maruyama, S., Liou, J.G., Katayama, I., Masago, H., 2001. // Chin. Sci. Bull. 46, 1038–1042.
- Meyer, M., Klemd, R., Hegner, E., Konopelko, D., 2014. // J. Metamorph. Geol. 32, 861–884.

# EVOLUTION OF CONTRASTING ECLOGITE ASSOCIATIONS IN THE MAKSYUTOV ECLOGITE-BLUESCHIST COMPLEX SOUTHERN URALS

## Fedkin V.V.

Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy (IEM) RAS, Chernogolovka, vfedkin@iem.ac.ru

In high-pressure eclogite-blueschist complexes blocks of highpressure mafic rocks are often included in metasedimentary or granitoid sequences that do not have signs of HP metamorphism. There are two points of view to explain this phenomenon: the model of coherent formation of layered strata [Liu et al., 2001; Ye et al., 2000] and the model of tectonic melange [Mayer et al., 2014]. Using the methods of mineralogical thermobarometry and detailed microprobe analysis of the composition and zoning of the key minerals (garnet, clinopyroxene, etc.), the significance of these concepts was assessed in the formation of contrast rocks of the Maksyutov eclogite-blueschist complex. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ОТНОШЕНИЙ В СИСТЕМЕ Pd-As-Sb

<sup>1,2</sup><u>Федяева М. А.,</u> <sup>2</sup>Каримова О. В., <sup>1,2,3</sup>Чареев Д.А.

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия; <u>femaal.femaal3@yandex.ru</u>

<sup>2</sup>Институт геологии рудных месторождений (ИГЕМ) РАН, Москва; oxana.karimova@gmail.com

<sup>3</sup>Институт экспериментальной минералогии (ИЭМ) РАН, Черноголовка, <u>charlic@mail.ru</u>

Актуальность работы заключается в важности изучения фазовых отношений в рядах твердых растворов палладиевых минералов [2, 3]. В нашей работе проводится анализ синтетических и природных образцов С помощью порошкового рентгенофазового И анализа. электронно-зондового рентгеноструктурного а также микроанализа и сканирующей электронной микроскопии. Это важно стабильных предсказания минеральных ассоциаций для В природных условиях. Также данные могут быть использованы при моделировании условий возникновения и накопления платиноидов в природе. Это особенно актуально в настоящее время ввиду важности использования платиноидов в современной технике и технологиях.

В данной работе исследуются минералы и синтетические соединения с общей формулой Pd8T3 (T = As, Sb). Для соединений данной группы характерно изменение структуры в зависимости от содержания Sb и As. Вместо непрерывного твердого раствора Pd8Sb3 -Pd8As3 образуются три разных структурных типа: Pd8Sb3, PdAs2.5Sb0.5, Pd8As3.

Методами сканирующей электронной микроскопии И исследование микрозондового анализа проведено составов арсенидов и стибнидов палладия, отобранных на месторождении Каареоджа Ривер, Финляндия. При изучении природных образцов были выявлены на данном месторождении минералы изомертиита, Pd11Sb2As2, арсенопалладинита, Pd8As2.5Sb0.5, и мертиита-2, Pd8Sb2.5As0.5, и чисто мышьяковистая разность – стилватерит, Pd8As3. Наличие минерала мертиита-1 доказать не удалось. По результатам данных экспериментов были рассчитаны эмпирические исследуемых фаз [1]. Рентгено-дифракционными формулы методами установлены их кристаллохимические характеристики. кристаллической Проведено уточнение структуры минерала изомертиита.

Методом «сухого синтеза» выполнен синтез аналогов минералов в ряду составов Pd8Sb3 - Pd8As3 с разным соотношением Sb:As. Синтетические фазы проанализированы методами сканирующей электронной микроскопии, электронно-зондового анализа и рентгенофазового анализа. По результатам экспериментальных исследований оценивается область устойчивости структурных типов в зависимости от содержания Sb и As.

Синтезирован аналоги минерала стилватерита, Pd8As3, арсенопалладинита, Pd8As2.5Sb0.5, мертиита-II, Pd8Sb2.5As0.5, и ограниченный твердый раствор состава Pd8As2.5Sb0.5-Pd8As2.1Sb0.8.

Ведется разработка методики синтеза монофазных образцов с промежуточными составами для проведения уточнения их структуры.

# Литература

- 1. Булах А. Г., Руководство и таблицы для расчета формул минералов. Издательство "НЕДРА", 1964.
- Cabri L.J. (2002) The platinum-group minerals. In: The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements (L.J. Cabri, editor). Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Special Volume 54, 70–71.
- 3. Vymazalova A. and Chareev D. A., Experimental aspects of platinumgroup minerals, Processes and Ore Deposits of Ultramafic-Mafic Magmas through Space and Time, 2018, pp.303-354.

## ANALYSIS OF PHASE RELATIONS IN THE Pd-As-Sb SYSTEM

# <sup>1,2</sup>Fedyaeva M. A., <sup>2</sup>Karimova O.V., <sup>1,2,3</sup>Chareev D.A.

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; <u>femaal.femaal3@yandex.ru</u>

<sup>2</sup>Institute of geology of ore deposits (IGEM) RAS, Moscow; <u>oxana.karimova@gmail.com</u>

<sup>3</sup>Institute of Experimental Mineralogy (IEM) RAS, Chernogolovka, <u>charlic@mail.ru</u>

In our work synthetic and natural samples were studied using powder X-ray phase and X-ray diffraction analysis, as well as electron probe microanalysis and scanning electron microscopy. The compositions of natural palladium arsenides and stibnides from Kaareodga River locality (Finland) were analyzed. The empirical formulae of the minerals were calculated. X-ray diffraction methods established their crystallographic characteristics. The crystal structure of the mineral isomertieite has been refined. Synthesis of analogues of minerals in the range of compositions Pd8Sb3 - Pd8As3 with different ratios of Sb:As is being carried out.

#### ОЦЕНКА ДОЛГОВРЕМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТХОДОВ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ Хао Цзе, Кочеткова Е.М., Эпштейн С.А.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), Москва, <u>apshtein@yandex.ru</u>

В настоящее время уголь занимает прочную позицию в качестве энергетического pecypca И технологического сырья как на внутреннем рынке Российской Федерации, так и в мире. Добыча и переработка углей сопровождается образованием твердых отходов и попутных продуктов, большая часть которых складируется во внутренних либо внешних отвалах. используется И для рекультивации. В государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации» говорится, что за 2020 год в результате добычи угля было произведено 3911,3 млн т отходов, а утилизации и обезвреживанию подверглось 1878,7 млн Т.

Размещение отходов в породных отвалах приводит к отчуждению земель из-за заболачивания территорий, прилегающих к внешним отвалам, а также к загрязнению грунтовых вод. При длительном воздействии факторов окружающей среды, В частности атмосферных осадков, некоторые из потенциально опасных макрои микроэлементов в составе отходов могут выщелачиваться и проникать в почву или грунтовые воды. Длительное хранение отходов может привести к их окислению, что в свою очередь может изменить выщелачиваемость потенциально опасных элементов. Понимание механизмов инфильтрации макро- и микроэлементов через толщу отходов необходимо для прогнозирования воздействия отходов горнодобывающей промышленности на окружающую среду, в том числе на состоянии поверхностных и подземных вод.

Согласно [Красавцева 2021, Светлов 2015], существуют методы оценки мобилизации экологически опасных элементов, однако эти методы моделируют воздействие только кислотных дождей и не учитывают другие (не кислотные) осадки.

Стандартным методом, используемым для оценки долговременного воздействия отходов на окружающую среду. считается руководящий документ ASTM [ASTM D5744]. Метод заключается в размещении исследуемых образцов в колонке (Humidity Cell). Через колонку пропускают воздух при температуре (25 ± 2) °С и влажности воздуха (95 ± 10) %, а затем сухой воздух. этого через колонку с отходами пропускают воду в После соотношении твердое: жидкое 1: 1 или 1: 0,5. Затем после высыхания твердой пробы в колонке повторяют ее обработку влажным и сухим воздухом и т.д. (количество циклов не ограничено).

После проведения многочисленных экспериментов, было установлено, что осуществление части этапов вышеописанной методики на практике затруднительно, и особенно для пород с высоким содержанием алюмосиликатов или размокающих пород.

В настоящей статье приведены результаты разработки отечественной методики оценки долговременного воздействия отходов добычи и переработки углей на окружающую среду. Для исследований были выбраны вскрышные породы – отходы добычи бурого угля (N392, N390), имеющие различный химический и минеральный состав (таблицы 1 и 2).

Наименование пробы	AI	As	В	Ва	Be	Bi	Ca	Cd	Со			
	мкг/г (ррт)											
N392	113349,00	1,70	31,00	39,00	1,10	н.п.о	1350,00	н.п.о	1,00			
N390	60523,00	18,00	29,00	52,00	1,60	н.п.о	10115,00	0,54	16,00			
Наименование пробы	Cr	Cu	Fe	Ga	К	Li	Mg	Mn	Мо			
	мкг/г (ррт)											
N392	41,00	39,00	6017,00	23,00	15069,00	Н.П.О	2454,00	69,00	Н.П.О			
N390	66,00	26,00	39018,00	12,00	20736,00	135,00	6707,00	327,00	1,30			
Наименование пробы	Na	Ni	Р	Pb	Sr	Ti	V	Zn	S			
	мкг/г (ррт)											
N392	554,00	4,30	127,00	н.п.о	59,00	7313,00	63,00	12,00	Н.П.О			
N390	7114,00	29,00	2966,00	н.п.о	167,00	5881,00	98,00	80,00	16300,00			

•	· · ·	,
	$\mathbf{X}$ IARAIALIGA(*)/IAIA (*(*)(*))	

Примечание: н.п.о. – ниже предела определения

Таблица 2	. Минеральныи	состав отходов

Наименование пробы	Фаза	Состав	Массовая доля, %			
	Кварц	SiO <sub>2</sub>	41,02			
NISOD	Мусковит	KAI <sub>2</sub> AISi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	4,68			
11392	Каолинит	$AI_2Si_2O_5(OH)_4$	32,33			
	Аморфная фаза		21,97			
Наименование пробы	Фаза	Состав	Массовая доля, %			
	Кварц	SiO <sub>2</sub>	37,79			
	Альбит	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	8,20			
	Мусковит	KAI <sub>2</sub> AISi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	4,94			
NOOO	Ортоклаз	KAISi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,39			
11390	Каолинит	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	11,94			
	Гипс	$CaSO_4(H_2O)_2$	3,69			
	Ярозит	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	1,00			
	Аморфная фаза		30,04			

Исследуемые отходы помещают в испытательную камеру «КТХВ-150», имитирующую естественную среду с влажностью (95 ± 10) % и температурой (25 ± 2) °С и аналогичными, приведенным в стандарте ASTM 5744-13. Обработку отходов в камере проводят непрерывно в течение установленного количества времени (например, 1, 3, 6, 9 недель). С определенной периодичностью (через одну, две, три неделю) часть отходов извлекают для проведения испытаний.

Для моделирования условий, максимально близких к природным, применяли второй вариант обработки, сущность которого состояла в периодическом вымывании отходов (соотношение твердой фазы к жидкой 1:5).

Для оценки долговременного воздействия отходов на окружающую среду определяют: выход и состав водорастворимых форм макро- и микроэлементов по ГОСТ Р 58914-2020, потенциал нейтрализации отходов по [Гущина 2021], рН водной вытяжки, а также изменение содержания в отходах серы.

Показано, что в условиях, имитирующих природные воздействия на отходы при хранении, происходит их окисление, приводящее к мобильности потенциально увеличению опасных макро-И микроэлементов. В зависимости химического И OT минералогического состава отходов, их окисление происходит в течении 3-6 недель.

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

## Литература

- 1. Е.А. Красавцева, Д.В. Макаров, Е.А. Селиванова, В.В. Максимова, А.В. Светлов, Моделирование химического выветривания хвостов обогащения лопаритовых руд под действием атмосферных осадков, 2021 г.
- А.В. Светлов, Е.А. Кравченко, Е.А. Селиванова, С.Г. Селезнев, Д. В. Макаров, В.А. Маслобоев. Исследование возможности кучного выщелачивания цветных металлов из сульфидного сырья природных и техногенных объектов Мурманской области. Экология промышленного производства. 2015 г.
- 3. ASTM D5744 Standard Test Method for Laboratory Weathering of Solid Materials Using a Humidity Cell. West Conshohocken 2013 r.
- 4. Гущина Т. О., Соколовская Е. Е., Хао Цзе, Эпштейн С. А. Разработка отечественной методики оценки рисков образования кислых стоков при складировании и использовании отходов добычи и переработки углей. Охрана окружающей среды. 2021 г.

#### ASSESSMENT OF THE LONG-TERM IMPACT OF COAL MINING AND PROCESSING WASTES ON THE ENVIRONMENT Hao Jie, Kochetkova E.M., Epstein S.A.

NUST «MISiS», Moscow, Russian Federation, e-mail: apshtein@yandex.ru

The paper assesses the potential impact of long-term storage of coal mining wastes on the environment. A methodology for assessing the long-term impact of waste on the environment has been developed. To simulate conditions as close as possible to natural influences, two types of liquid treatment of wastes (washout) were used. Changes in the pH of the water medium, the content and yield of water-soluble substances, as well as changes in the composition of wastes, in particular, the content of macro- and microelements in them, were evaluated with a certain periodicity.

# ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗВЛЕЧЕНИЯ НЕФТИ ПО ИНДИКАТОРНЫМ ДАННЫМ

<sup>1</sup>Хозяинов М.С., <sup>1</sup>Чернокожев Д.А., <sup>2</sup><u>Кузнецова К.И.</u>

<sup>1</sup>Университет «Дубна»

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований

Для изучения возможности определения коэффициента извлечения нефти (КИН) и текущей водонасыщенности было проведено моделирование фильтрации оторочек меченой воды с помощью симулятора Eclipse. Исследования проводились на небольших моделях (несколько нагнетательных и несколько добывающих нефтяных пластов, различающихся скважин) для ПО фильтрационно-емкостным свойствам, PVT-свойствам, функциям относительных фазовых проницаемостей и др. На первом этапе коэффициент нефти (KNH) рассчитывался извлечения для выбранной модели однородного проницаемости пласта. ПО Полученное значение использовалось как база сравнения. Затем в добавлялись пласт разной зоны С аномально высокой проницаемостью и площадью. Зоны располагались в пласте в виде параллелепипеда прямоугольного нагнетательной OT ДΟ добывающей скважины (Рис.1).



Рисунок 1. Значения проницаемости и объема высокопроницаемых пропластков, используемых при моделировании.

Исследовались скорость поступления воды по высокопроницаемому пропластку, объем воды, прошедший по нему к общему поровому объему, масса отобранного индикатора. Был сделан вывод, что масса отобранного индикатора является достаточным параметром для оценки прогнозного КИН. Индикатор достаточно быстро выходит по высокопроницаемому пропластку, примерно за 120 дней, далее его выход практически прекращается [1].

## Таблица 1. Результаты моделирования.

А - Объем высокопроницаемого пропластка (ВП), %

Б - Значение проницаемости, мД

В - Добытая нефть, % к варианту однородного пласта

Г - Масса отобранного индикатора из ВП к общей массе, %

Д - Скорость максимума, м/сут

Е - Объем воды, прошедший по каналам НФС в % к общему поровому объему, %

N⁰	Α	Б	В	Г	Д	E	Nº	Α	Б	В	Г	Д	E
1	0.5	1000	99.9	2.4	1.1	0.9	27	10	8000	97.1	90.8	7.4	548.8
2	1	1000	100.0	4.5	1.1	2.1	28	15	8000	96.4	87.4	6.8	966.1
3	3	1000	99.9	17.6	1.0	13.2	29	0.5	10000	99.6	48.0	14.9	4.9
4	5	1000	99.9	24.6	0.9	24.9	30	1	10000	99.5	60.3	14.9	15.3
5	10	1000	99.9	40.8	0.8	71.1	31	3	10000	98.6	81.9	12.0	89.1
6	0.5	2000	99.9	5.8	2.3	1.2	32	5	10000	97.5	86.8	13.3	230.3
7	1	2000	99.9	9.4	2.3	2.8	33	10	10000	96.3	92.8	10.1	688.4
8	3	2000	99.8	33.0	1.9	20.7	34	12	10000	95.9	92.3	9.8	841.7
9	5	2000	99.6	41.3	1.9	43.9	35	15	10000	95.3	92.9	8.5	1082.3
10	10	2000	99.5	61.0	1.6	138.7	36	20	10000	94.6	90.2	7.8	1424.4
11	25	2000	99.3	72.7	1.2	298.5	37	25	10000	95.0	89.7	6.4	1444.7
12	5	4000	99.2	64.2	3.9	90.1	38	0.5	12000	99.7	56.6	18.6	6.0
13	8	4000	98.9	75.8	3.4	181.8	39	8	12000	96.3	92.8	12.8	534.9
14	12	4000	98.6	81.9	3.2	349.1	40	10	12000	95.4	93.3	12.8	814.2
15	0.5	5000	99.8	22.9	6.1	2.8	41	12	12000	94.9	94.1	12.0	1029.6
16	1	5000	99.6	32.5	6.2	7.6	42	20	12000	93.3	92.2	10.6	1681.1
17	3	5000	99.4	62.7	5.0	46.1	43	25	12000	93.6	91.7	8.5	1736.8
18	5	5000	98.8	70.9	5.2	112.4	44	0.5	15000	99.5	74.8	31.0	11.2
19	10	5000	98.4	83.6	4.4	340.2	45	5	15000	96.9	93.3	21.9	461.1
20	3	6000	99.2	68.3	6.3	54.1	46	8	15000	95.0	95.4	23.3	975.4
21	8	6000	98.4	84.0	5.4	266.6	47	10	15000	93.8	94.7	23.3	1464.6
22	12	6000	97.7	88.2	5.1	515.4	48	12	15000	93.0	94.5	21.9	1664.1
23	15	6000	97.4	84.3	4.9	657.7	49	15	15000	92.1	95.1	18.6	2047.5
24	25	6000	97.3	76.8	3.7	713.1	50	20	15000	90.9	94.7	14.9	2452.6
25	5	8000	98.2	82.8	9.1	180.9	51	25	15000	91.7	95.0	9.8	2369.5
26	8	8000	97.7	88.1	7.6	349.7							

Отбор индикатора из модели продолжался и далее, но за время моделирования, сравнимое со временем реальной разработки месторождения, примерно 20 лет, он из модели не поступал. Сорбция индикатора предполагалось нулевой. Таким образом, можно сделать вывод, что индикатор поступил в основной пласт и двигался по нему очень медленно. Анализ показывает, небольшие по объему и размерам высокопроницаемые каналы практически не

влияют на значения КИН. Он остается постоянным в пределах погрешности измерений. Но когда объем высокопроницаемой зоны превышает 10 %, а значение проницаемости более, чем в 10 раз значение проницаемости, превышает средне величина КИН уменьшается. Это можно объяснить тем, что при таких параметрах пласта закачиваемая вода в очень больших объемах фильтруется по высокопроницаемой зоне и не охватывает тот объем пласта, который она заводнила бы в случае однородного пласта. Таким образом. было показано, ЧТО наличие высокопроницаемых пропластков уменьшает КИН, и что это уменьшение можно оценить, массу индикатора, переносимого ПО ВΠ. При определяя моделировании варьировались объем и проницаемость ВΠ. В общем случае уменьшение КИН по отношению к плановому (у, %) можно оценить по формуле  $y=100-a/(x-b)^2$ , где x - bмасса индикатора, прошедшая по ВП, а и b коэффициенты, полученные моделировании фильтрации на постоянно действующей при гидродинамической модели (Рис.2).





Можно предложить следующий порядок проведения полевых 1) краткосрочные исследований: проводятся индикаторные месторождении исследования нефтяном (120 дней) на для ВΠ параметров выявления И определения ИХ (объем, проницаемость и масса перенесенного индикатора); 2) проводится действующей моделирование фильтрации на постоянно гидродинамической модели С учетом выявленных BΠ; 3) рассчитываются коэффициенты а и b; 4) определяется уменьшение КИН по приведенной выше формуле.

Подчеркнем несколько обязательных условий проведения работ: индикатор не должен сорбироваться (этому условию отвечает окись трития), отбор проводится из всех окружающих скважин, первого, второго и третьего рядов.

Выявление ВП с помощью индикаторных исследований на ранней стадии разработки и проведения мероприятий по их ликвидации позволит повысить КИН до плановых показателей.

## Литература

 Индикаторный (трассерный) метод исследования фильтрационных процессов в нефтяном пласте / М.С. Хозяинов, Д.А. Чернокожев, К.И. Кузнецова. – Москва: КУРС, 2022. – 128с.

POSSIBILITIES FOR DETERMINING THE OIL RECOVERY FACTOR FROM INDICATOR DATA

# <sup>1</sup>Khozyainov M.S., <sup>1</sup>Chernokozhev D.A., <sup>2</sup>Kuznetsova K.I.

<sup>1</sup>Dubna university

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research

The results of modeling the filtration of injected labeled water in an oil field are presented. The presence of significant zones with abnormally high permeability (AHP) reduces the oil recovery factor (ORF). It is shown that, based on the results of the withdrawal of labeled water from the AHP zone, it is possible to predict a decrease in the value of the ORF. Identification of such zones and carrying out work on them to reduce AHP will ensure the planned value of ORF.

# МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ СЛЕДЫ ГЛОБАЛЬНОЙ КАТАСТРОФЫ 536 ГОДА, НАЙДЕННЫЕ В ТОРФЯНИКАХ

## <u>Цельмович В.А.</u>

Геофизическая обсерватория «Борок» - филиал Института Физики Земли РАН, <u>tselm@mail.ru</u>

Введение. Использование диагностики для механизма катастрофических событий микрочастиц, извлечённых из различных природных планшетов, может дать ответ о причинах события. К таким планшетам можно отнести ледники, торф, осадки. Торфяники встречаются на территории Европы и Азии значительно чаще, чем ледники. Они хорошо накапливают и фиксируют атмосферные примеси. Отработав методики их выделения и идентификации из торфяных толщ, мы получим новый инструмент для идентификации климатических событий, понимания их причин и пространственных масштабов. Обнаруженные в торфе микрочастицы были отнесены к пылевому вулканическому событию, возможно, к катастрофе 536 года н.э. Летописи отразили её, как одну из самых масштабных в истории человечества. Отмечают, что: "Солнце потемнело, и пришел сумрак раннего вечера, длившегося на Земле больше года". Многие исследователи изучают причину этой катастрофы.

исследования. Объект методы Состав минералов-И индикаторов катастрофических событий, обогащенных пылевым веществом, изучался в ГО «Борок» ИФЗ РАН на СЭМ «Tescan Vega II» с приставкой для ЭДС. На начальном этапе исследования были проведены методические работы, позволяющие установить: 1) материал и процессы, ведущие к образованию пылевидных частиц; фиксации микрочастиц; 2) механизм 3) как изменяются микрочастицы в процессе жизни торфяника (консервируются, или разлагаются); 4) как выделить наиболее важные слои торфа; 5) как записывается «катастрофный» сигнал в различных средах (снег, лёд, осадочные породы) в сравнении с записью в торфе. При препарировании особое внимание уделялось магнитной чистоте рабочего места и оператора. Комплекс этих задач решался в ходе анализа уникальных коллекций, отобранных в разных точках Земли.

**Результаты.** В керне из Шалимовского болота, (Ярославская обл., глубина отбора. 150 см, 57° 45′ 14,5″ с.ш., 38° 35′ 39,0″ в.д., отбор проводил Гарин Э.В.) было выделено аномально большое количество мелких железоалюмосиликатных (FeAlSi) шариков размером 0.3-5 мкм (рис.1) в слое с возрастом около 1600 лет, что может соответствовать (с учетом возможных ошибок при отборе и датировке) вулканической катастрофе 536 года н.э., приведшей к появлению мощного пылевого следа и последовавшей глобальной

катастрофе. Образцы экологической датировались радиоуглеродным методом в ИМКЭС СО РАН. Типичные примеры шариков приведены на рис.1. Находки аналогичных мелких шариков были сделаны также на отобранном нами керне из Обуховского болота (Ярославская обл.). На молодых болотах (В.Балкария, отбор проводил Филиппов Д.А., возраст 886±120 лет и др.), подобные аномалии не обнаружены. Также не видны они в торфяных разрезах с Прибайкалья и с Оби. На кривых SIRM, снятых на датированных сибирских кернах, возрасту 536 лет соответствует лишь небольшой [Цельмович др., 2019]. Эти результаты пик И ΜΟΓΥΤ свидетельствовать 0 пространственных масштабах пылевого события, видимого Ярославской области, но незаметного в кернах Прибайкалья Кемеровской области. И3 И Сравнивались извлеченных из микроструктура И состав частиц, различных торфяников. Фоновая компонента В была схожей них И представлена как вулканогенной компонентой – Tm, IL, обломочным космогенной. представленной Mt микросферами, Mt. так И металлами и сплавами - Fe, FeCr, FeZn, FeNi, W (рис.2а).



Рис.1. a) общая картина железистых алюмосиликатных И микрочастиц, выделенных из катастрофического слоя, в центре полая микросфера; b) Mt FeAlSi микросферы. видна И сконцентрировавшиеся около сильномагнитных частиц самородного Fe: c) группа слипшихся FeAlSi микросфер, включая полые микросферы; d) FeAlSi микросферы размером от 0,3 до 5 мкм; e) мелкие и крупные полые FeAISi микросферы; мелкие микросферы на поверхности крупной отмечены стрелкой; f) мелкие FeAlSi и железистые микросферы на поверхности крупной Mt микросферы.

Кроме FeAlSi частиц в катастрофическом слое были отмечены и оплавленные Mt частицы – со следами дегазации (Puc.2a), а также с формами, близкими к полым цилиндрам (Puc.2b). Морфология этих частиц указывает на необычные условия образования этих частиц.



Рис.2. а) Мt частицы со следами дегазации; b) полый Мt цилиндр. На рис.3а, 3b показаны микросферы, зафиксированные на поверхности торфа. Мелкая микросфера на рис.3b имеет размер, позволяющей ей «проваливаться» через поры. На рис.3c показаны мелкие частицы, выделенные после воздействия ультразвука.



Рис.3. a),b) - микросферы на поверхности торфа; c) группа микросфер размером 0,3-4 мкм.

**Обсуждение и выводы.** Нами в торфяном разрезе были найдены сотни мелких FeAlSi микросфер. Мы полагаем, что такие шарики возникли в пепловой туче, а механизм образования этих микросфер связан с «грязными молниями», в результате которых и образуются мелкие FeAlSi и Mt микросферы (рис.1,2,3), а также оплавленные Mt частицы (рис.2a,b). Установлено [Адамчук и др., 1984], что для образования молний в вулканической туче материал выброса должен в заметном количестве содержать мелкодисперсную фракцию (1-30 мкм), а средний диаметр частиц в вулканической туче D<sub>сp</sub>=3,2 мкм. Именно такую картину мы наблюдали в торфе.

FeAlSi частицы могут располагаться как на поверхности Mt шариков, благодаря их магнитным свойствам (рис.1f), так и на поверхности мха, где они зафиксированы благодаря адгезии (рис.3a,3b). При этом нельзя исключить размывания катастрофического слоя как за счёт «проваливания» мелких частиц ниже, так и за счёт «всплывания» полых частиц до момента их адгезионной фиксации в массе торфа.

Мы полагаем, ЧТО именно FeAlSi частицы являются индикаторами вулканической катастрофы, приведшей к появлению мелких пылевых частиц, затмивших свечение солнца в 536 г. В пользу вулканической катастрофы также сделан вывод в работе 2018] [Clifford et al., при изучении ледяного керна. Распространённость торфяников позволяет сделать вывод о том, какие пространства были покрыты пылевым облаком. Недостатком торфа является сложность его датировки, связанная с размыванием катастрофического слоя из-за малого размера пылевых частиц.

Работа выполнена в рамках гос. задания ИФЗ РАН.

## Литература

- Адамчук Ю.В., Титов В.В. Электрические процессы и образование молний в вулканическом аэрозоле. - М. : ИАЭ, 1984. - [1], 61 с. : ил. ; 21 см. - (Препринт / Ин-т атом. энергии им. И.В. Курчатова; ИАЭ-4016/1).
- 2. Цельмович В.А., Куражковский А.Ю., Казанский А.Ю., Щетников А.А., Бляхарчук Т.А., Филиппов Д.А. Исследования динамики поступления космической пыли на земную поверхность по торфяным отложениям // Физика Земли. 2019. №3. С. 150–160.
- Clifford H., Bohleber P., Spaulding N., Mayewski P., Kurbatov A., Sneed S., Handley M., Korotkikh E., McCormick M., Alexander More A., Loveluck C. A New Approach for Ultra-High-Resolution Ice Core Data Processing Geophysical Research Abstracts. Vol. 20, EGU2018-11521-1, 2018 EGU General Assembly 2018.

# MICROSCOPIC TRACES OF THE GLOBAL CATASTROPHE OF 536 FOUND IN PEATLANDS

## Tselmovich V.A.

Borok Geophysical Observatory – branch of Schmidt Institute of Physics of the Earth (IPE RAS), <u>tselm@mail.ru</u>

Layers in peat bogs have been found that are roughly dated to 536 AD, containing large amounts of fine FeAlSi particles. It has been suggested that these dust particles are an indicator of a volcanic catastrophe.

## МАГНИТНЫЕ МИКРОСФЕРЫ АНТРОПОГЕННОГО И КОСМОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ИХ ПОДОБИЕ <sup>1</sup>Цельмович В.А., <sup>2</sup>Максе Л.П.

<sup>1</sup>ГО «Борок» ИФЗ РАН» <u>tselm@mail.ru</u>, тел.7(9066327448), <sup>2</sup>БГУТ, Могилев, Республика Беларусь, <u>larissa\_maxe@rambler.ru</u>

Магнитные микросферы (Мt-микросферы) естественным путем образуются в тектонических процессах и в атмосферных: при абляции и взрывах метеороидов, выпадении дисперсных потоков кометного вещества. Антропогенные космической пыли, Mtмикросферы продукты деятельности человека, древнего И современного. Современное промышленное производство И транспорт создают и выбрасывают в окружающую среду огромный поток нано- и микрочастиц, включая Мt-микросферы.

Mt-микросферы, которые попадают в атмосферу Земли в результате космогенных событий и эндогенных процессов, служат индикаторами прошлых катастроф. Эндогенный нагрев и выброс лавовых расплавов происходит за счет быстро протекающих физических и химических процессов, со взрывом и молниями. атмосферу Земли Входящие В на сверхвысоких скоростях метеороиды. обладают аэродинамическим сопротивлением, подвергаются кинетическому нагреву и деструкции, которая чаще всего протекает в две стадии. Начальная стадия – это резкое нестационарное торможение с абляции поверхности за счет плавления и испарения. Конечная стадия – взрывная, вызванная кинетическим перегревом метеороида, протекает с потерей массы: разлетом твердофазных фрагментов, расплава, пара и плазмы.

Материалы и методы. Мt-микросферы, которые образуются в природных и промышленных процессах, по своей структуре и в много общего, что обусловлено физикоморфологии имеют химическими процессами, в которых они являются конечными продуктами реакции сверхбыстрого окисления. Сходство и трудная различимость в смеси техногенных и космогенных Мt-микросфер служат основанием для изучения и анализа процессов их синтеза. Кристаллизация расплавов, различных по исходному составу, образует морфологически подобные структуры. Авторами была поставлена задача сопоставительного сравнительного анализа Мtмикросфер, извлеченных из осадочных пород (трепел, торф) и Mtмикросфер, образовавшихся в промышленных процессах. Для решения поставленной задачи использовали оптическую микроскопию, а также СЭМ (Цельмович и др., 2021).

Для сравнительного анализа были выбраны процессы: металлообработки (заточка на абразивном круге), электрокоррозии

(контакт- пантограф), электродуговой сварки, плазмотронной резки и конвертерной плавки стали. Отобранные пробы предварительно изучали с применением USB микроскопии, выделяли необходимые объекты, затем исследовали в Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН с использованием СЭМ Tescan Vega II.

**Результаты и обсуждение.** Результаты исследования Мtмикросфер, извлеченных из природных и техногенных проб с использованием СЭМ были сведены в базы. В сопоставлении часть данных в формате изображений представлена на рисунках 1 и 2.



Рис. 1. Изображения Мt-микросфер: А – дендритные; В – сетчатые, абляционные; С – с приоткрытой внутренней частью.

Источники, из которых выделены Мt-микросферы, по вертикали: трепел 1 месторождения «Стальное», Хотимский район. Могилевская обл., Беларусь; 2 торф, месторождение \_ «Гончанское», Могилевская обл., Беларусь; 3 - торф тундры, Россия; 4 - торф, Мышкин, Ярославская обл., Россия (с мелкой вулканической пылью).

При заточке стальных лезвий корундовым абразивом частицы зоны окисляются, выбрасываются рабочей И ИЗ формируя дендритную или блочную структуру. Значительная часть срезаемого металла не нагревается до температуры плавления и представлена частицами сливной микростружки. Конвертерная выплавка стали образованием Mt-микросфер сопровождается С дендритной, звездчатой структурой, встречаются микросферы с блочной,

мелкокристаллической структурой. Крупно дендритные полые Mtмикросферы часто имеют сквозные зерна кристаллитов направленные от поверхности к центру.

При резке плазмотроном сплава FeNi образовались дендритные Мt-микросферы и промежуточные фазы, при электродуговой сварке – дендритные Mt-микросферы со сквозными кристаллитами, тонкостенные полые, но абляционного типа редки. Токоприёмные узлы движущегося транспорта образовали Mt-микросферы с дендритной структурой, полые, стружку разнообразных форм и видов.



Рис. 2. Изображения Мt-микросфер: А – дендритные; В – абляционные, сетчатые; С – сложные структуры, сколы.

Процессы, в которых выделены Мt-микросферы: 5 – заточка корундовым кругом (мастерская «Спортмастер», Могилев); 6 – конвертерная плавка (Магнитогорск); 7 – резка плазмотроном (БРУ, Могилев); 8 – электродуговая резка (ООО «СТРИМ», Могилев); 9 – электрокоррозия (токоприемник, Магнитогорск).

Мы отметили общие стадии и характер высокотемпературной железа. Из металлического химической реакции окисления сверхбыстрому расплава, который подвергается окислению кислородом воздуха, практически мгновенно образуется твердофазный магнетит, имеющий более высокую температуру плавления, чем железо. Учеными разработан способ производства магнитных нано- и микросфер путем плазмодинамического синтеза (ПДС). Установлено, что в ПДС может протекать синтез нескольких форм магнетита, одна из которых **ε**-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> отличается значительной коэрцитивной силой, сильным поглощением СВЧ излучения, химической устойчивостью (Шаненков, 2018).

Выводы. Физико-химические процессы образования Мtмикросфер в промышленности во многом подобны тем, в которых происходит синтез Мt-микросфер при деструкции метеороидов, соответственно, могут быть и другие аналоги. Мt-микросферы заключенные в осадочных породах, относимые к космогенным, по форме и морфологии схожи и сопоставимы с микрочастицами продуктов ПДС. Диагностика происхождения микросфер возможна только с учётом дополнительных диагностических факторов, уникальных для каждого изучаемого объекта.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН

# Литература.

- 1. B.A., Л.П. Цельмович Максе 0 Космогенной природе микросфер из трепела и пустынных песков. // Материалы XXII междунар. конференции «Физико-химические И петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, 27 - 29 сентября, Борок, 1 октября 2021. Москва, 2021. C.289 -292
- 2. Шаненков И.И. Плазмохимический синтез дисперсных оксидов железа С высоким содержанием эпсилон фазы В высокоскоростной струе электроразрядной плазмы: диссертация кандидата технических ФГБУ наук. «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Томск. 2018. – 153 с.

## MAGNETIC MICROSPHERES OF ANTHROPOGENIC AND COSMOGENIC ORIGIN AND THEIR SIMILARITY <sup>1</sup>Tselmovich V.A., <sup>2</sup>Maxe L.P.

<sup>1</sup>GO Borok IPE RAS., (<u>tselm@mail.ru</u>),

<sup>2</sup>BSUT, Mogilev. Republic of Belarus, (<u>larissa\_maxe@rambler.ru</u>)

By comparative analysis Mt-microspheres of natural origin and from industrial processes have been studied. The authors revealed a distinctive feature of Mt-microspheres and other microparticles that were extracted from sedimentary rocks and considered as cosmogenic is the presence of morphology and shapes characteristic for by-products of metal processing and target products of plasma chemical synthesis.

# МЕТААЛГОРИТМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА <u>Чирков Е.Б.</u>

Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта (ИФЗ) РАН, Москва, <u>ye\_chirkov@list.ru</u>

работа Данная демонстрирует возможности металгоритмического подхода для разработки и совершенствования позволяющего объединить геофизических методов, методику измерений и методику обработки исходя из цели измерения и представлений о природе сигнала И помех. Метаоперации фиксируют цель определенной операции/способа измерения или обработки. операции отвязывая eë ОТ конкретного способа/устройства измерения или математического алгоритма обработки. Это упрощает разработку или усовершенствование геофизического метода, одновременно связывая операции измерения и обработки в единую цепь. О необходимости такой связи свидетельствует неудача моей попытки перенести алгоритмы обработки сигналов SES работающие на моей установке на установку профессора Варотсоса, где они оказались полностью неработоспособными и потребовалось полное изменение алгоритма обработки [Чирков, 2021а].

Для того, чтобы увеличить отношение сигнал/шум на уровне метаопераций следует по возможности устранить влияние помех на этапе измерения, увеличить размерность образа полезного сигнала для эффективного различения аномалий разной природы, оптимизировать обработку сигнала на основе различия свойств сигнала и помех, и, наконец, формализовать её для исключения влияния субъективного фактора. Выбор конкретных способов реализации будет целиком определяться физикой решаемой задачи (целью мониторинга и природой сигнала и помех).

Продемонстрируем это на примере методик двух электромагнитных методов для контроля малых деформаций Целесообразность трещиноватой горной породы. применения решения электромагнитных методов для данной задачи определяется возможностью контроля сразу некоторого объёма породы, робастностью и экономичностью проведения мониторинга.

Первый метод, полностью разработанный мной, представляет развитие известной методики профессора Варотсоса, предложенной им в качестве метода краткосрочного прогноза землетрясения на основе сигналов SES [Varotsos et al, 1984].

Рассмотрим, согласно указанным метаоперациям, методы повышения достоверности результатов мониторинга на примере

варианта измерительной установки, предложенной мной в 2004 году [Chirkov, 2004].

Снижение влияния помех. К помехам относятся вариации потенциала измерительных электродов под действием вариаций НДС, вариаций температуры и дрейфа электродов. Для снижения влияния этих факторов нами использовались высокостабильные электроды М.М, Богородского с корпусом, защищающим специально подготовленную свинцовую пластину от вариаций локальной НДС. Дополнительно каждый электрод помещен в пластиковое ведро, наполненное насыщенной соленой водой глиной, и закопан на метровую глубину в грунт. Это усредняет электрический потенциал грунта по верхней открытой части ведра, уменьшает влияние на улучшает вариаций локальной HДC, электрод переходное сопротивление и условия эксплуатации электродов, исключает влияние быстрых изменений температуры.

Увеличение размерности образа полезного сигнала. Поскольку для выделения кластеров сигналов нужно сделать малым порог выделения сигнала требуется увеличить число регистрации, обеспечив независимых линий регистрацию пространственных сигналов сразу на все линии. Поэтому 8 электродов располагаются по кругу вокруг центрального с шагом в 45 разности потенциалов градусов измеряются И между диаметрально-противоположными электродами разница И разностей их потенциалов относительно центрального электрода (всего 8 разностей) [Chirkov, 2004].

Оптимизация обработки сигнала на основе различия свойств сигнала и помех. Помехами, обладающими сходной морфологией с сигналом являются сигналы, возникающие при смене нагрузки локомотивов железных дорог, распространяющиеся на десятки километров и внезапные начала магнитных бурь. Отличием их является непостоянство положения источников и относительная редкость. Для использования этих отличий каждый отсчет на нескольких независимых линиях анализируется на одновременного предмет наличия изменения И выделенные сигналы кластеризуются по соотношению компонент на разных выделения групп сигналов обладающих ЛИНИЯХ, для одной геометрией источника [Chirkov, 2004].

Формализация обработки сигнала. В качестве единственного параметра выбираемого в пункте измерения выступает порог выделения сигнала, дальнейшая обработка полностью формализована и исключает влияние субъективного фактора.

Вторым методом является метод измерения кажущегося сопротивления (КС) в водонасыщенной скважине с целью контроля

вариаций локальной НДС, аппаратура и методика измерения которого разработана в группе Шамиля Идармачева [Идармачев и др., 2014]. Мною на основе анализа результатов мониторинга была предложена модификация методики измерения и обработки [Chirkov Согласно первоначальной and Idamachev, 2021]. методике четырехэлектродная измерительная измерения, установка. располагается в водонасыщенной скважине много ниже уровня воды, ведется регистрация тока и напряжения с повышенной частотой высокоразрядным АЦП.

Рассмотрим методику согласно указанным метаоперациям.

Снижение влияния помех. Поскольку на КС сильно влияет водонасыщенность, то расположение измерительной установки в области полной водонасыщенности полностью устраняет влияние этого фактора. Одновременное измерение тока и напряжения высокоразрядным АЦП исключает погрешности, связанные С точной стабилизацией Полная недостаточно тока. окружающих водонасыщенность трещин максимизирует чувствительность метода к изменению их геометрии при вариации локальной НДС.

Увеличение размерности образа полезного сигнала. Поскольку на степень раскрытости трещин влияют вариации атмосферного давления и изменение уровня воды в скважине, которое дополнительно изменяет геометрию геоэлектрической модели, мной предлагается измерять оба ЭТИХ параметра Так как КС изменение дополнительно. на сильно влияет сопротивления воды, предлагается также в непосредственной близости от верхнего и нижнего питающего электродов расположить дополнительно маленькие измерительные линии, на которых производить измерения КС воды.

Оптимизация обработки сигнала на различия основе свойств сигнала и помех. Помехами для нас являются: изменение геометрии трещин под действием вариаций атмосферного давления и изменения уровня воды, и изменение КС воды. Независимое измерение этих факторов в пункте наблюдения позволяет в линейном приближении учесть ИΧ влияние на результаты мониторинга.

Формализация обработки сигнала. Использование метода главных компонент позволяет полностью исключить влияние субъективного фактора на результаты мониторинга.

Таким образом, несмотря на общность метаопераций, способы их реализации различны и полностью определяется физикой решаемой задачи. Проведенный анализ, совместно с анализом всех полученных результатов, позволил для первого метода заключить
об обусловленности SES излучением трещин при вариации локальной НДС [Чирков,.2021б]. Для второго метода предложена модернизация методики измерения (добавление в точку наблюдения измерений атмосферного давления, уровня воды в скважине и КС воды и перемещение АЦП в герметичный корпус, расположенный ниже уровня воды, для снижения влияния вариаций температуры на результаты мониторинга).

## Литература

- 1. Идармачев Ш.Г., Алиев И.А., Мусаев М.А., Идармачев И.Ш. Вариации горных пород в скважине, расположенной в разломной зоне в период сильных землетрясений // Геофизика. 2014. №2. С. 26–31.
- 2. Чирков Е.Б. О проблемах мониторинга SES на установке профессора Варотсоса. Труды Восьмой Всероссийской научноконференции "Проблемы технической комплексного мониторинга сейсмоактивных геофизического регионов"26 октября сентября-2 2021a. GS RAS Γ. Петропавловск-Камчатский, с.133-137.
- 3. Чирков Е.Б. Проблемы краткосрочного прогноза землетрясений: содержательный аспект. Наука и технологические разработки, ИФЗ РАН (Москва), 2021б, том 100, № 1, с. 5-23.
- 4. Chirkov Ye. B. The study of local sources of ULF geoelectric signals with steep fronts Annales of Geophysics, Vol. 47, N. 1, February 2004, pp.213-227.
- 5. Chirkov E.B.and Idarmachev I.Sh. Control of variations in the stressstrain state based on monitoring the apparent resistivity in the well.IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, издательство IOP Publishing ([Bristol, UK], England), 2021 vol. 929, c. 012021(1)-012021(9).
- Varotsos P., Aiexopouios K. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes I //Tectonophysics, i 10, 1984a, P. 73-98.

# APPLICATION OF METAALGORITHMIC APPROACH TO ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC MONITORING METHODS Chirkov E.B.

Schmidt Institute of Physics of the Earth (IPE) RAS, Moscow, <u>ye\_chirkov@list.ru</u>

On the example of the analysis of two methods of electromagnetic monitoring, the prospects of the meta-algorithmic approach for the development and improvement of geophysical methods are shown.

ВАРИАЦИИ НАПРАВЛЕНИЙ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗЛОМОВ ПРИ И ИСПЫТАНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

<sup>1</sup>Шихова Н.М., <sup>1,2</sup>Смирнов В.Б., <sup>1</sup>Пономарёв А.В., <sup>1</sup>Патонин А.В. <sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (ИФЗ), Москва <sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

patonin\_borok@mail.ru

При изучении трещиноватости горных пород большое значение пространственное имеет расположение трещин, ИΧ преимущественное ориентирование. Информация об углах распространения основных систем трещин, на том или ином участке, расчёте ослабления оценке важна при 30H И пространственной неоднородности пород при ее деформировании.

направлений распространения Для определения основных трещин, ориентирования их в зависимости от напряженно деформационного состояния образца были проанализированы лабораторных экспериментов результаты ПО трехосному разрушению образцов гранитов и песчаников на управляемом прессе ИНОВА в ЦПГИ ГО БОРОК. В качестве исходных данных были использованы координаты гипоцентров событий акустической эмиссии, величины и скорости деформаций, значения осевой нагрузки и всестороннего давления, информация об амплитудах и знаках первых вступлений упругих волн на датчиках акустической эмиссии (АЭ).

На основе метода AESAM определения механизма очага [Shikhova and Patonin, 2021] в скользящем временном окне событий AЭ вычислялись средние значения угла Φ между осью прикладываемого избыточного напряжения (вертикальной осью образца) и вектором сжатия в очаге. Для этого же окна событий рассчитывалось уравнение плоскости, до которой минимальна сумма расстояний от гипоцентров АЭ, вычислялся угол α наклона к оси образца. С использованием данных о данной плоскости величинах сжимающих напряжений И учитывая табличные предельные параметры разрушения для испытуемого материала, рассчитывался  $\mathbf{\psi}$  полу скола, показывающий направление плоскости возможной ориентации формируемой системы трещин.

Анализ изменений трёх указанных параметров позволил выявить сходство динамики углов **φ** и **θ** при неизменной разности 20°-25° между этими величинами (рис.1). Показано, что значимое последовательное уменьшение **φ**, **θ** и увеличение угла **α** перед

образованием магистральных разломов большинстве В экспериментов отражает группируемость гипоцентров И преобладающего направления упорядоченность ОСИ сжатия В AЭ. Изменение угла очагах α согласуется С моделью формирования разлома в образцах горных пород, предложенной в [Reches and Lockner, 1994].





Проанализированы вариации угла α наклона плоскости разлома условий в экспериментах В зависимости ОТ ПО трехосному испытанию. Показано, что угол наклона плоскости формируемого магистрального разлома к оси образца составляет, как правило, 25-40 градусов для песчаников и 10-25 градусов для гранитов. Изменение угла наклона преобладающей сети трещин существенным образом зависит от распределения поля напряжений в образце и на стадии разрушения согласуется с критериями прочности Кулона – Мора. Анализ механизмов событий АЭ позволил выявить, что на этапе квазиупругой деформации появляется система несвязанных сдвиговых трещин, первичная а перед формированием магистрального разлома трещины объединяются в массивы с преимущественным механизмом трещин растяжения.

Исследования проводились в Центре коллективного пользования "Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм" в рамках госзадания ИФЗ РАН.

## Литература

- 1. Shikhova N., Patonin A. Methods for determining focal mechanisms in laboratory experiments // EGU General Assembly 2021, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3305.
- Reches Z.E., Lockner D.A. Nucleation and growth of faults in brittle rocks// J. Geophys. Res., 99 (B9) (1994), pp. 18159-18173, 10.1029/94JB00115

VARIATIONS IN THE DIRECTIONS OF FAULT FORMATION DURING TESTING OF ROCK SAMPLES

<sup>1</sup><u>Shikhova N.M.</u>,<sup>1</sup>Patonin A.V., <sup>1,2</sup>Smirnov V. B., <sup>1</sup>Ponomarev A.V. <sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow

Variations of the slope of the fault plane of the samples depending on the conditions in the experiments on the triaxial test are analyzed. The change in the angle of inclination of the prevailing crack network significantly depends on the distribution of the stress field in the sample and at the stage of destruction is consistent with the Coulomb–Mohr strength criteria. Analysis of the mechanisms of AE events revealed that at the stage of quasi-elastic deformation, a primary system of unrelated shear cracks appears, and before the formation of the main fault, the cracks are combined into arrays with a predominant mechanism of tensile cracks.

The research have been carried out in the Research Equipment Sharing Center of "Petrophysics, geomechanics and paleomagnetizm" within the state task of the IPE RAS.

#### ВОЛЛАСТОНИТ: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНДЕНСИРОВАННОЙ И ГАЗОВОЙ ФАЗ <sup>1</sup>Шорников С.И.

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, <u>sergey.shornikov@gmail.com</u>

волластонит обладает Среди промышленных минералов *УНИКАЛЬНЫМИ* свойствами благодаря высокой химической И температурной стойкости. Мономинеральные включения CaSiO<sub>3</sub> и им подобные были описаны в алмазах ряда месторождений Гвинеи, Бразилии и Канады. Особый интерес вызывает обнаружение волластонита в тугоплавких белых включениях CV3 хондритов, образование которого не полностью выяснено при равновесной Волластонит конденсации. существует в двух полиморфных модификациях высокотемпературной  $(\alpha - CaSiO_3)$ И низкотемпературной (β–CaSiO<sub>3</sub>). Помимо волластонита в системе CaO-SiO<sub>2</sub> установлены: ларнит Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, трехкальциевый силикат  $Ca_3SiO_5$  и ранкинит  $Ca_3Si_2O_7$  (рис. 1).



Рис. 1. Диаграмма состояния системы  $CaO-SiO_2$  в области волластонита [Bale et al., 2016]: 1 – SiO<sub>2</sub> (тридимит) +  $\alpha$ -CaSiO<sub>3</sub>; 2 и 3 –  $\alpha$ -CaSiO<sub>3</sub> + жидкость; 4 –  $\alpha$ -CaSiO<sub>3</sub> + Ca<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>; 5 – Ca<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> +  $\alpha$ '-Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>; 6 – Ca<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> +  $\alpha$ -Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>; 7 и 8 –  $\alpha$ -Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> + жидкость; 9 –  $\alpha$ '-Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> + Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>; 10 –  $\alpha$ -Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> + Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>; 11 – Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> + жидкость; 12 – Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> + CaO; 13 – CaO + жидкость; 14 – жидкость.

Информация о термодинамических свойствах волластонита однако довольно неточна: различия обширна. В значениях теплоемкостей составляют до 7 Дж/(моль×К), в энтальпиях и энтропиях образования – до 5 кДж/моль и до 3 Дж/(моль×К). Обнаруженные расхождения могут быть вызваны неполным фазовым соответствием исследуемых образцов составу волластонита, что оказывает влияние на измеряемые термодинамические величины. Значения активностей CaO В волластоните при температуре 1873 К, полученные различными методами, могут различаться в 70 раз, величины активностей SiO<sub>2</sub> – более, чем в 2 раза.

В настоящей работе масс-спектрометрическим эффузионным методом Кнудсена исследовано испарение волластонита ИЗ молибденового контейнера в области температур 1751–2087 К. Используемый масс-спектрометр МИ-1201 был оснащен модифицированным ионным источником (до температуры 3000 К). Конструкция разработанного ионного источника и методические особенности проведения эксперимента описаны paнee [Shornikov et al., 2000]. Синтез волластонита был выполнен методом прекурсора с последующим рентгенофазовым и химическим анализом образца.

Обнаруженный в газовой фазе над волластонитом газообразный CaSiO<sub>3</sub> свидетельствовал о протекании гетерогенной реакции:

$$[CaSiO_3] = (CaSiO_3), \tag{1}$$

последующая диссоциация которого приводила к установленному составу газовой фазы, типичному для индивидуальных оксидов.

Рассчитанные величины парциальных давлений молекулярных форм газовой фазы над волластонитом приведены на рис. 2. Из этих данных были определены термодинамические свойства волластонита в конденсированной фазе: активности оксидов и энергия смешения, а также энтальпия и энтропия образования волластонита в кристаллической ( $\Delta H_{T} = -38.92 \pm 0.52$ кДж/моль,  $\Delta S_T = 2.33 \pm 0.29$  Дж/(моль×К)), и жидкой ( $\Delta H_T = -$ 11.29±0.24 кДж/моль, ΔS<sub>7</sub> = 17.53±0.12 Дж/(моль×К)) фазах в интервалах температур 1751–1818 и 1818–2087 К. На основании последних величин вычислено значение энтальпии плавления волластонита при температуре 1818±7 К, равное 27.64±0.57 Полученные результаты удовлетворительно кДж/моль. соответствуют экспериментальным [Sharma, Richardson, 1965; Rein, Chipman, 1965; Jakobsson, Tangstad, 2015; Зайцев, Могутнов, 1997; Шорников, Арчаков, 2000] и теоретическим [Bale et al., 2016] данным (рис. 3).



**Рис. 2.** Парциальные давления молекулярных форм газовой фазы над волластонитом: O (1), O<sub>2</sub> (2), Ca (3), CaO (4), SiO (5), SiO<sub>2</sub> (6), Si<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (7), CaSiO<sub>3</sub> (8). Линией (9) обозначена точка плавления волластонита.



**Рис. 3.** Энергия смешения в волластоните, определенная: [Sawamura, 1962] (1), [Sharma, Richardson, 1965] (2), [Rein, Chipman, 1965] (3), [Jakobsson, Tangstad, 2015] (4); [Зайцев, Могутнов, 1997] (5), [Шорников, Арчаков, 2000] (6) и в настоящей работе (7), а также рассчитанная [Bale et al., 2016] (8). Линией (9) обозначена точка плавления волластонита.

## Литература

- 1. Зайцев А. И., Могутнов Б. М. Термодинамика силикатных расплавов систем CaO–SiO<sub>2</sub> и MnO–SiO<sub>2</sub>. I. Экспериментальное исследование // Неорг. материалы. 1997. Т. 33. № 7. С. 839 847.
- Bale C.W., Belisle E., Chartrand P., Decterov S.A., Eriksson G., Gheribi A.E., Hack K., Jung I.-H., Kang Y.-B., Melancon C., Pelton A.D., Petersen S., Robelin C., Sangster J., Spencer P., Van Ende M-A. FactSage thermochemical software and databases, 2010–2016 // CALPHAD. 2016. V. 54. P. 35 – 53.
- Jakobsson L. K., Tangstad M. Thermodynamic activities and distributions of calcium and magnesium between silicon and CaO– MgO–SiO<sub>2</sub> slags at 1873 K // Met. Mater. Trans. B. 2015. V. 46. № 2. P. 595 – 605.
- Rein R. H., Chipman J. Activities in liquid solution SiO<sub>2</sub>–CaO–MgO– Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 1600 °C // Trans. Met. Soc. AIME. 1965. V. 233. № 2. P. 415 – 425.
- 5. Sawamura K. Activity of lime in blast-furnace type slags // Tetsu-to-Hagane Overseas. 1962. V. 2. № 3. P. 219 – 225.
- 6. Sharma R. A., Richardson F. D. Activities in lime–alumina melts // J. Iron Steel Inst. 1961. V. 198. № 4. P. 386 390.
- Shornikov S. I., Archakov I. Yu., Chemekova T. Yu. A mass spectrometric study of vaporization and phase equilibria in the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system // Russ. J. Phys. Chem. 2000. V. 74. № 5. P. 677 - 683.
- Shornikov S. I., Archakov I. Y. Mass spectrometric study of phase relations and vaporization processes in the CaO–SiO<sub>2</sub> system // Glastech. Ber. Glass. Sci. Technol. 2000. V. 73C2. P. 51 – 57.

#### WOLLASTONITE: THERMODYNAMIC PROPERTIES OF CONDENSED AND GAS PHASES Shornikov S.I.

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, Moscow, sergey.shornikov@gmail.com

The wollastonite evaporation was studied by the Knudsen effusion mass spectrometric method at 1751–2087 K. The vapor species typical of simple oxides and the CaSiO<sub>3</sub> gaseous oxide were identified in the gas phase over wollastonite. The oxide activities and the mixing energy in the melt were determined. The enthalpy and entropy of wollastonite formation were calculated (–38.92±0.52 kJ/mol and 2.33±0.29 J/(mol×K), respectively). The calculated enthalpy of wollastonite melting at 1818±7 K is equal to 27.64±0.57 kJ/mol.

#### МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ РАСПЛАВОВ CAIs (ТИПЫ А И В) МЕТЕОРИТА ЕФРЕМОВКА Шорников С.И., Яковлев О.И.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, sergey.shornikov@gmail.com

Тугоплавкие включения хондритов являются уникальными объектами геохимии. В англоязычной литературе его обозначают аббревиатурой CAIs (Ca-Al-Inclusions). CAIs представляют самое примитивное вещество Солнечной системы с возрастом 4.567 млрд лет. Они состоят из высокотемпературных минералов богатых Al, Са, Ті, таких как корунд, гибонит, перовскит, шпинель, мелилит, фассаит, анортит. Большинство исследователей придерживаются мнения, что CAIs образовались при конденсации газа солнечного состава. Согласно современным представлениям [Grossman et al., 2008], процессы высокотемпературного испарения также играли заметную роль в формировании составов CAIs. В свете последних данных в эволюции составов многих CAIs можно выделить две стадию образования первичных конденсатов CAIs и стадии: последующую стадию, при которой произошло нагревание вещества. его плавление и частичное испарение. В данной представляем результаты экспериментов публикации ПО ΜЫ испарению основных типов CAIs (А и В), в которых определена температурная последовательность появления в парах основных форм оксидов CAIs.

Экспериментальные данные об испарении типичных ПО составу расплавов CAIs типа A (мас. %: CaO 36.17; MgO 5.04; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 38.25; SiO<sub>2</sub> 20.55) и типа В (мас. %: CaO 27.60; MgO 11.38; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 32.30; SiO<sub>2</sub> 28.72) [Grossman et al., 2000] в области температур 1300-2600 масс-спектрометрическим Κ были получены Кнудсена. эффузионным методом Исследуемые составы представляли собой природные включения метеорита Ефремовка, принадлежащего к группе CV3 углистых хондритов и содержали некоторое количество оксидов калия, натрия, серы, железа, титана, хрома и никеля. Навески образцов массой 10–15 мг, находящиеся в рениевой фольге, помещались в вольфрамовый эффузионный нагреваемый цилиндрический контейнер, электронной бомбардировкой с вольфрамовых катодов.

Ионизация молекулярного пучка из эффузионного контейнера осуществлялась электронным ударом при энергии ионизирующих электронов равной 28 эВ. В масс-спектрах пара над исследуемыми расплавами были обнаружены следующие ионы: Ca<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, Al<sup>+</sup>, AlO<sup>+</sup>, Al<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, SiO<sup>+</sup>, SiO<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, a также K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>2</sub><sup>+</sup>, Fe<sup>+</sup>, Ni<sup>+</sup>, Cr<sup>+</sup>, TiO<sup>+</sup>, TiO<sub>2</sub><sup>+</sup>.

Наблюдаемые молекулярные ионы WO<sub>2</sub><sup>+</sup> и WO<sub>3</sub><sup>+</sup> соответствовали газообразным оксидам вольфрама, образующимся вследствие взаимодействия кислорода, содержащегося в газовой фазе, с материалом вольфрамового эффузионного контейнера. Наличие в масс-спектрах пара ионов CaWO<sub>3</sub><sup>+</sup> и CaWO<sub>4</sub><sup>+</sup> обусловлено протеканием реакций в газовой фазе:

$$CaO + WO_i = CaWO_{i+1}.$$
 (1)

Парциальные давления молекулярных форм газовой фазы (*p<sub>i</sub>*) над расплавами исследуемых составов CAIs типов A и B были рассчитаны с использованием данных о парциальном давлении стандартного вещества (*p<sub>s</sub>*) по следующему соотношению [Семенов и др., 1976]:

$$p_{i} = \frac{I_{i}T_{i}}{I_{s}T_{s}}p_{s} \times \frac{\sigma_{s}\eta_{s}}{\sigma_{i}\eta_{i}} = K\frac{I_{i}T_{i}}{\sigma_{i}\eta_{i}}, \qquad (2)$$

где  $I_i$  и  $I_s$  – интенсивности ионных токов исследуемого и стандартного вещества,  $\sigma_i$  и  $\eta_i$  – эффективные поперечные сечения ионизации и коэффициент изотопного распределения *i*-той формы газовой фазы, соответственно. В качестве стандарта были использованы термодинамические данные для золота [Paule, Mandel, 1972]. Рассчитанные по соотношению (2) парциальные давления газообразных Са, Mg, Al и SiO над расплавами CAIs типов А и В приведены на рис. 1. Парциальное давление атомарного кислорода было вычислено на основании следующей реакции:

$$WO_2 + O = WO_3. \tag{3}$$

Полученные величины *p*<sub>O</sub> удовлетворительно соответствовали таковым, определенным на основании подобных реакций с участием атомарного кислорода:

AI + O = AIO	(4)
AI + O = AIO	(2

- $2AI + O = AI_2O \tag{5}$
- $SiO + O = SiO_2 \tag{6}$
- $TiO + O = TiO_2$ (7)
- $O_2 = 2O.$  (8)



Рис. 1. Испарение расплавов CAIs тип A и B.

Сопоставление температурных зависимостей парциальных давлений над расплавами CAIs типов A и B, представленных на рис. 1, показывает их приблизительное сходство. Можно сделать вывод о большем содержании CaO и AI<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в конденсированной фазе CAIs тип A, чем в таковой типа B.

некоторые Наблюдаются различия В температурных молекулярных зависимостях парциальных давлений форм, отвечающих компонентам расплавов CAIs. Так, в расплавах CAIs типа А магниевая составляющая расплава первой покидает расплав, опережая кремниевую составляющую, что следует из положения максимумов парциальных давлений преобладающих молекулярных форм пара (рис. 1). Для расплавов CAIs типа В выход расплава одновременный типичен ИЗ магниевого И кремниевого компонента. Интересной особенностью CAIs типов А и В сохранение в расплаве остатков является кремниевого компонента до высоких температур, превышающих 2500 К.

#### Литература

- 1. Семенов Г. А., Николаев Е. Н., Францева К. Е. Применение масс-спектрометрии в неорганической химии / Л.: Химия, 1976. 152 с.
- Grossman L., Ebel D. S., Simon S. B., Davis A. M., Richter F. M., Parsad N. M. Major element chemical and isotopic compositions of refractory inclusions in C3 chondrites: the separate roles of condensation and evaporation // Geochim. Cosmochim. Acta. 2000. V. 64. № 16. P. 2879 – 2894.
- Grossman L., Simon S. B., Rai V. K., Thiemens M. H., Hutcheon I. D., Williams R. W., Galy A., Ding T., Fedkin A. V., Clayton R. N., Mayeda T. K. Primordial compositions of refractory inclusions // Geochim. Cosmochim. Acta. 2008. V. 72. № 12. P. 3001 – 3021.
- Paule R. C., Mandel J. Analysis of interlaboratory measurements of the vapor pressure of gold // J. Pure Appl. Chem. 1972. V. 31. № 3. P. 371 – 394.

#### MASS SPECTROMETRIC STUDY OF EVAPORATION OF CAIS MELTS (TYPES A AND B) IN THE EFREMOVKA METEORITE **Shornikov S.I.**, **Yakovlev O.I.**

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, Moscow, <u>sergey.shornikov@gmail.com</u>

We present the experimental results on the evaporation of the main types of CAIs (A and B), in which the temperature sequence of the appearance of the main forms of CAIs oxides in vapors is determined.

# САМООРГАНИЗАЦИЯ "ЗАРОДЫШЕВЫХ" ТРЕЩИН ПРИ РАЗРУШЕНИИ КВАРЦА

# <sup>2</sup>Щербаков И.П., <sup>1,2</sup>Мамалимов Р.И., <sup>1</sup><u>Пономарёв А.В.</u>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук, (ИФЗ РАН), г. Москва, <u>avp@ifz.ru</u>;

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А. Ф. Иоффе), <u>mamalun@mail.ru</u>

В рамках модели самоорганизованной критичности [Бак, 2013] пространственно-временное распределение анализируется образующихся дефектов в приповерхностных слоях образца альфапроцессе кварца непосредственно разрушения. В его Под дефектами здесь и далее подразумеваются так называемые "зародышевые" (они же "первичные") трещины [Веттегрень и др., 2022]. В кристаллическом кварце размер таких трещин составляет несколько нанометров [Веттегрень и др., 2020]. Зародышевая трещина может являться предвестником разрушения твёрдого тела на макроуровне и поэтому непосредственно связана с физикой прочности материала. Согласно классическим представлениям Гриффитса прочность твёрдого тела связана с зародышевыми трещинами (с их размером) [Надаи, 1954]. В кварце природа зарождения первичных трещин имеет дислокационный характер [Веттегрень и др., 2022]. Группировка дислокаций может привести к образованию "зародышевых" трещин, которые в свою очередь способны также объединяться и инициировать разрушение на макроуровне. Зачастую самоорганизация дефектов начинается не в объёме, а на поверхности материала, именно поэтому актуальным является изучение, как размеров дефектов приповерхностного слоя, так и модели их природного поведения. Одной из основных характеристик модели самоорганизованной критичности является математическое описание пространственно-временных событий степенной зависимостью [Макаров, 2010]. В двойных логарифмических координатах график такого распределения имеет вид прямой линии.

Для изучения природы и кинетики образующихся дефектов в приповерхностном слое кварца в процессе его разрушения использовалось оборудование, описанное в [Веттегрень и др., 2020, 2022]. Регистрация образующихся дефектов производилась при помощи механолюминесцентного метода. Анализ спектра триболюминесценции при трении позволил предположить, ЧТО образующееся свечение, В процессе разрушения, является следствием разрыва кремний-кислородных межатомных связей в кристаллической решётке кварца [Веттегрень и др., 2022]. Такое значит с помощью данного свечение квантовано, а метода теоретически можно определять размеры дефектов, образующихся процессе разрушения, с учётом принимаемых допущений В [Веттегрень и др., 2021].

Характерная картина зарегистрированной триболюминесценции в процессе разрушения приведена на рис.1. Видно, что свечение состоит из серии вспышек разной интенсивности, интервал между которыми составляет от нескольких десятков до нескольких сотен наносекунд.



Рис. 1. Типичная временная зависимость интенсивности триболюминесценции при трении кристаллического кварца.



Рис. 2. Амплитудное (а) и временное (б) распределения сигналов триболюминесценции кристаллического кварца. Здесь: I – интенсивность сигнала триболюминесценции, ∆t – временной интервал между ближайшими вспышками.

В результате проведения анализа распределений интенсивности триболюминесценции и временных интервалов между ближайшими актами свечения были построены соответствующие зависимости в двойных логарифмических координатах. На этих зависимостях можно выделить основные участки, представленные на рис. 2. Они соответствуют дефектам (образовавшимся в кварце в процессе его разрушения), размер которых не превышает 30 нм [Веттегрень и др., 2022]. Видно, что обе зависимости имеют степенной вид и могут быть описаны уравнением следующего вида:

N∞I<sup>-b</sup>,

где I – интенсивность сигнала триболюминесценции, N – число вспышек заданной амплитуды, b – показатель степени.

Отсюда можно сделать вывод что совокупность 0 TOM, образующихся такого размера трещин может находиться В состоянии самоорганизованной критичности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-05-00155 А) и в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

## Литература

- Бак П. Как работает природа: Теория самоорганизованной критичности. Пер. с англ. № 66. Изд. 2. – М.: Либроком. 2013. 276 с.
- 2. Веттегрень В.И. Пономарёв А.В., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Нанотрещины при разрушении кварца // Физика Земли. 2020. № 6. С. 106-112.

- 3. Веттегрень В.И., Кадомцв А.Г., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И. Фракто- и фотолюминесценция кварца при разрушении // Физика твёрдого тела. 2021. Т. 63. № 8. С. 1120-25.
- 4. Веттегрень В.И., Кадомцев А.Г., Пономарёв А.В., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Образование "первичных" трещин при разрушении кварца // Физика твёрдого тела. 2022. Т. 64. № 8. С. 1022-25.
- 5. Макаров П.В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. № 5. С. 97-112.
- Надаи А. Пластичность и разрушение твёрдых тел. Пер. с англ. М.: Иностранная литература. 1954. 647 с.

In memory of Victor Ivanovich Vettegren'

SELF-ORGANIZATION OF "GERM" CRACKS UPON FRACTURE OF QUARTZ

# <sup>2</sup>Shcherbakov I.P., <sup>1,2</sup>Mamalimov R.I., <sup>1</sup>Ponomarev A.V.

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, (IPE RAS), Moscow, <u>avp@ifz.ru</u>;

<sup>2</sup>loffe Institute of the Russian Academy of Sciences, (loffe institute), St. Petersburg, <u>mamalun@mail.ru</u>

The triboluminescence kinetics of the quartz sample destruction was studied. The measured triboluminescence amplitudes are proportional to the size of cracks. The dependences of the amplitude of nucleating defects and time intervals between triboluminescence flashes on the count of signals are characterized by the power law dependence. Therefore, it was concluded that the system of defects of a certain size in quartz is in a state of self-organized criticality. Научное издание

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ ДВАДЦАТЬ ТРЕТЬЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ Москва, 26 – 28 сентября, Борок, 30 сентября 2022 г. МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

# ISBN 978-5-88918-069-2



ISSN 2686-8938



Фото на обложке сотрудников ИГЕМ РАН

Подписано к печати 15.09.22. Формат 60х90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая. Уч. изд. л. 20.5 Тираж 300 экз. Заказ №

ФГУП «Издательство «Наука»» 121099, Москва, Шубинский пер., д. 6