

Л.М. Делицын

**МЕХАНИЗМ ЛИКВАЦИИ
В ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СИЛИКАТНО-СОЛЕВЫХ РАСПЛАВАХ –
КОНЦЕНТРАТОРАХ
РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ И НИОБИЯ**



Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный Институт высоких температур
Российской академии наук

Российский фонд фундаментальных исследований
РФФИ

Л.М. Делицын

**МЕХАНИЗМ ЛИКВАЦИИ
В ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СИЛИКАТНО-СОЛЕВЫХ РАСПЛАВАХ –
КОНЦЕНТРАТОРАХ РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ
И НИОБИЯ**

Москва
ГЕОС
2018

УДК 669 + 552.11

ББК 26.323

Д 13

Делицын Л.М.

Механизм ликвации в природных и технологических силикатно-солевых расплавах – концентраторах редких земель и ниобия. – М.: ГЕОС, 2018. 408 с.
ISBN 978-5-89118-784-9

В монографии рассматривается механизм формирования апатито-нефелиновых месторождений Хибинского щелочного массива с позиций ликвации магматического расплава. Рассматриваются научные и технологические аспекты ликвационной гипотезы образования апатитовых месторождений: прогнозирование рудоносности, комплексное использование сырья, локальное прогнозирование качества руды в неразведанных участках рудных тел, новая технология пирохимического обогащения и переработки фосфатного и фосфатно-редкоземельно-редкометалльного минерального сырья.

Для научных сотрудников, инженеров, аспирантов и студентов, работающих в области петрологии магматических горных пород, рудных месторождений и специалистов, занимающихся переработкой минерального сырья.

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ)
Проект № 18-18-00033Д



Издание РФФИ не подлежит продаже.

© Объединённый институт
высоких температур РАН, 2018
© Л.М. Делицын, 2018
© Издательство ГЕОС, 2018

Оглавление

Введение	3
ЧАСТЬ I. МЕХАНИЗМ ЛИКВАЦИИ РАСПЛАВОВ В ПРИРОДНОЙ СИЛИКО-ФОСФАТНОЙ СИСТЕМЕ	7
ГЛАВА 1. Обзор гипотез происхождения апатито-нефелиновых месторождений Хибинского массива	8
ГЛАВА 2. Геологическое строение Хибинского щелочного массива	15
ГЛАВА 3. Геологическое строение апатито-нефелиновых месторождений	23
3.1. Общая характеристика месторождений.	23
3.2. Форма рудных тел и особенности их внутреннего строения.	37
3.3. Тектурные типы апатито-нефелиновых руд	50
ГЛАВА 4. Количественный минеральный (фазовый) состав апатито-нефелиновых руд и вмещающих их пород.	52
4.1. Роль количественного минерального состава горных пород в Петрологии	52
4.2. Фазовый анализ апатито-нефелиновых руд и щелочных пород массива.	58
4.3. Химический состав главных минералов апатито-нефелиновых руд	66
4.4. Количественный минеральный состав тектурных типов апатито-нефелиновых руд.	69
4.4.1. Пятнистые и пятнисто-полосчатые руды	71
4.4.2. Брекчиевидные руды	73
4.4.3. Линзовидно-полосчатые руды	82
4.4.4. Блоковые руды	86

4.4.5. Сетчатые руды	87
4.4.6. Сфено-апатитовые руды	89
4.4.7. Изменчивость количественного минерального состава текстурных типов руд по падению рудных тел.....	91
4.4.8. Изменчивость количественного минерального состава текстурных типов руд вкрест простирания рудных тел.....	98
4.4.9. Изменчивость минерального состава текстурных типов руд по простиранию рудных тел	102
4.5. Количественный минеральный состав ийолит-уртитов	104
4.5.1. Уртиты массивные порфиroidные	106
4.5.2. Уртиты апатитовые	108
4.5.3. Уртиты полевошпатовые	110
4.5.4. Уртиты апатито-полевошпатовые.....	111
4.5.5. Уртиты сфеновые	113
4.5.6. Уртиты апатито-сфеновые.....	113
4.5.7. Ийолиты массивные.....	114
4.5.8. Ийолиты полевошпатовые	115
4.5.9. Уртиты и ийолиты трахитоидные.....	117
4.6. Количественный минеральный состав ювитов, рисчорритов, малиньитов, луявритов	118
4.6.1. Ювиты	118
4.6.2. Рисчорриты	120
4.6.3. Малиньиты.....	121
4.6.4. Луявриты.....	122
4.7. Корреляционные связи между минералами в апатито-нефелиновых рудах и ийолит-уртитах	122
4.7.1. Корреляционная связь апатит – нефелин.....	123
4.7.2. Корреляционная связь апатит – пироксен	126
4.7.3. Корреляционная связь нефелин – пироксен	129
4.7.4. Корреляционная связь нефелин – сфен.....	131
4.8. Результаты изучения количественного минерального состава апатито-нефелиновых руд и вмещающих их пород	132

ГЛАВА 5. Петрохимические особенности руд и пород апатито-нефелиновых месторождений

5.1. Химический состав апатито-нефелиновых руд и ийолит-уртитов	140
5.1.1. Геохимическая связь $P_2O_5-SiO_2$	143
5.1.2. Зависимость $CaO-SiO_2$	148
5.1.3. Зависимость $F-SiO_2$	150
5.1.4. Зависимость $\sum(Na_2O + K_2O)-\sum(CaO + SrO + TR_2O_3)$	150
5.1.5. Зависимость $Al_2O_3-SiO_2$	151
5.1.6. Зависимости Na_2O-SiO_2 и K_2O-SiO_2	154
5.1.7. Зависимость $(Fe_2O_3 + FeO)-SiO_2$	154
5.1.8. Зависимость $MgO-SiO_2$	158

5.1.9. Зависимость $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})\text{-Al}_2\text{O}_3$	158
5.1.10. Зависимость $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	158
5.1.11. Зависимость $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})\text{-P}_2\text{O}_5$	161
5.2. О содержании фтора в апатито-нефелиновых рудах и вмещающих породах.....	161
5.3. Распределение химических компонентов между apatито-нефелиновыми рудными телами и сопряжёнными с ними породами.....	166
5.4. Результаты петрохимического исследования руд и пород apatито-нефелиновых месторождений.....	172

**ГЛАВА 6. Экспериментальные исследования несмесимости
расплавов в системе апатит – нефелин – пироксен –
полевой шпат – сфен – титаномагнетит**

173	173
6.1. Методика экспериментальных работ.....	176
6.1.1. Лабораторные установки.....	176
6.1.2. Материалы тиглей.....	179
6.1.3. Исследование продуктов плавления.....	180
6.1.4. Синтез исходных минералов.....	180
6.1.5. Приготовление природных минералов	181
6.2. Экспериментальное исследование ликвации расплавов силикатно-фосфатно-фторидных систем	182
6.2.1. Система $\text{SiO}_2\text{-NaF}$	182
6.2.2. Система $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NaF}$	186
6.2.3. Система $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F-SiO}_2\text{-NaF}$	187
6.2.4. Система $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F-SiO}_2\text{-NaF-CaO-MgO}$	193
6.2.5. Система $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F-SiO}_2\text{-NaF-Al}_2\text{O}_3$	195
6.2.6. Система $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F-SiO}_2\text{-NaF-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$	200
6.2.7. Система $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F-SiO}_2\text{-NaF-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$	201
6.2.8. Система $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F-SiO}_2\text{-NaF-FeO}$ и $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F-SiO}_2\text{-NaF-Fe}_2\text{O}_3$	203
6.2.9. Система $\text{NaAlSiO}_4\text{-NaF}$	206
6.2.10. Система $\text{KAlSiO}_4\text{-NaF}$	213
6.2.11. Система $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F-NaAlSiO}_4\text{-NaF}$	213
6.2.12. Система $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F-NaF}$	216
6.2.13. Система $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6\text{-NaF}$	218
6.2.14. Система $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6\text{-NaAlSiO}_4\text{-NaF}$	220
6.2.15. Система $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6\text{-Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F-NaF}$	222
6.2.16. Система $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6\text{-CaMgSi}_2\text{O}_6\text{-NaF}$	223
6.2.17. Система $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6\text{-Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F-NaF}$	225
6.2.18. Система $\text{NaAlSiO}_4\text{-CaTiSiO}_5\text{-NaF}$	226
6.2.19. Ликвация расплавов в системе с природными минералами	228
6.2.20. Система ургит – апатит – виллиомит.....	245

6.2.21. Распределение SrO и TR ₂ O ₃ между фосфатными и силикатными жидкими фазами при ликвации уртитовой магмы	249
6.2.22. Состав и давление насыщенного пара в системе Ca ₅ (PO ₄) ₃ F–NaF	254

ГЛАВА 7. Роль ликвации в формировании апатито-нефелиновых месторождений Хибинского массива 257

7.1. О механизме формирования полосчатых и такситовых текстур руд и пород	257
7.2. Вихревые текстуры в апатито-нефелиновых породах	273
7.3. Ликвационная гипотеза образования апатито-нефелиновых месторождений	274
7.4. Оценка альтернативных гипотез происхождения апатито-нефелиновых месторождений.....	281

ЧАСТЬ II. МЕХАНИЗМ ЛИКВАЦИИ РАСПЛАВОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИЛИКО-ФОСФАТНЫХ СИСТЕМАХ..... 285

ГЛАВА 8. Научные и технологические аспекты гипотезы ликвационного происхождения апатито-нефелиновых месторождений..... 286

8.1. Комплексное использование апатито-нефелиновых руд и их вещественный состав.....	286
8.2. Локальное прогнозирование качества руды в неразведанных участках рудных тел при подземной разработке апатито-нефелиновых месторождений.....	290
8.3. Пирохимическое обогащение и переработка низкосортного природного и техногенного фосфатного минерального сырья.....	300
8.3.1. Основные принципы пирохимического обогащения и переработки низкосортного минерального сырья.....	300
8.3.2. Пирохимическое обогащение и переработка низкосортного фосфатного сырья.....	302
8.3.2.1. Характеристика низкосортного фосфатного сырья	302
Руды, породы и отходы обогащения фосфоритовых месторождений	302
Апатито-нефелиновое низкосортное сырьё.....	304
Охристые железистые фосфатно-редкометалльные руды и отходы обогащения месторождений коры выветривания карбонатитов	306
8.3.2.2. Физико-химические исследования процесса образования несмешивающихся расплавов при ликвационной плавке фосфатного сырья.....	307

Ликвационная плавка хвостов флотационного обогащения фосфоритовых руд Каратау.....	308
Ликвационная плавка шламов суспензионного обогащения фосфоритовых руд Чулактау	310
Ликвационная плавка фосфатно-кремнистых сланцев месторождения Джанатас	310
Ликвационная плавка бедных апатито-нефелиновых руд и хвостов флотационного обогащения апатито-нефелиновых руд.....	312
Ликвационная плавка апатит-редкометалльных руд месторождений Белая Зима и Новополтавское	317
Технология комплексной переработки высокожелезистых апатит-ниобиевых охристых руд и шламов месторождения Белая Зима.....	320
Ликвационная плавка отходов обогащения	327
8.3.3. Переработка несмешивающихся расплавов	332
8.3.3.1. Переработка фосфатно-фторидных расплавов.....	332
Вакуумная дистилляция.....	332
Восстановление жёлтого фосфора.....	335
Обесфторивание фосфатно-фторидных расплавов.....	338
Азотнокислотная переработка	339
Сернокислотная переработка (клинкерный метод).....	339
8.3.3.2. Переработка силикатных расплавов.....	341
Шлакоситаллы	341
Обесфторивание	342
Восстановление ниобийсодержащих железистых расплавов.....	342

ГЛАВА 9. Механизм ликвационной плавки

редкоземельно-редкометалльных фосфатных руд

кору выветривания месторождения Томтор	344
Вещественный состав Томторских руд	344
Фазообразование в системе $\text{LnPO}_4\text{-NaF}$ (Ln – La, Ce).....	349
Система $\text{LaPO}_4\text{-NaF}$	350
Система $\text{CePO}_4\text{-NaF}$	355
Сосуществование несмешивающихся жидких фаз в системе $\text{LaPO}_4\text{-SiO}_2\text{-NaF-Nb}_2\text{O}_5$	358
Распределение ниобия и лантана между двумя несмешивающимися расплавами в системе $\text{LaPO}_4\text{-SiO}_2\text{-NaF-Nb}_2\text{O}_5\text{-Fe}_2\text{O}_3$	364
Система $\text{CePO}_4\text{-SiO}_2\text{-NaF-Fe}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$	370
Система $\text{CePO}_4\text{-SiO}_2\text{-NaF-Nb}_2\text{O}_5$ (без железа).....	372
Система $\text{CePO}_4\text{-SiO}_2\text{-NaF-Nb}_2\text{O}_5\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (с оксидом железа).....	373

Ликвационная плавка редкоземельно-редкометалльных руд коры выветривания месторождения Томтор	376
Переработка фосфатно-солевого расплава	381
Переработка силикатного расплава	384
Технология ликвационной плавки руд Томторского месторождения	384
Основные технологические операции ликвационной плавки Томторских руд (дуплекс-процесс).....	385
Заключение	387
Литература	391