

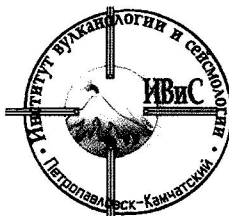
А.Ю. Озеров

КЛЮЧЕВСКОЙ ВУЛКАН:
ВЕЩЕСТВО,
ДИНАМИКА,
МОДЕЛЬ

Петропавловск-Камчатский – Москва
2019



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



А.Ю. ОЗЕРОВ

**КЛЮЧЕВСКОЙ ВУЛКАН:
ВЕЩЕСТВО, ДИНАМИКА, МОДЕЛЬ**

ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ – МОСКВА

ГЕОС

2019

УДК 551.21:[552+532.5]
ББК 26.323

**Озеров А.Ю. КЛЮЧЕВСКОЙ ВУЛКАН: ВЕЩЕСТВО, ДИНАМИКА, МОДЕЛЬ. – М.: ГЕОС, 2019.
306 с.**

ISBN 978-5-89118-798-6

Монография является первым фундаментальным изданием, посвященным генетической вулканологии. Исследованы петрологические процессы образования магм и физические процессы, определяющие механизмы разных типов извержений. Показано, что непрерывная известково-щелочная серия Ключевского вулкана (высокомагнезиальные базальты – высокоглиноземистые андезибазальты) образуется в результате декомпрессионного фракционирования темноцветных минералов, происходящего преимущественно между извержениями, во время остановок движения магмы. Впервые вулкан рассматривается как широкополосный генератор периодических процессов, проявляющихся в интервале от первых секунд до нескольких суток. Для изучения этих процессов создана уникальная крупногабаритная экспериментальная установка – лабораторный вулкан. Физическое моделирование на установке позволило создать новую схему газогидродинамических режимов в протяженных вертикальных колоннах. Установлены физические законы, определяющие монотонные и периодические типы извержений базальтовых и андезибазальтовых вулканов.

На основе исследований базовых составляющих базальтового-андезибазальтового вулканизма: эволюции магматических расплавов, периодичностей в динамике эруптивного процесса и механизмов разных типов извержений – создана динамическая модель извержений Ключевского вулкана.

Для широкого круга специалистов в области геологии, вулканологии, петрологии, минералогии, геофизики, геотермии, нефтяной геологии, физики, газогидродинамики, географии и экологии.

Ключевые слова:

Вулкан, извержение, магмы, базальты, андезибазальты, минералы, дифференциация, периодичности, крупногабаритная установка, газогидродинамика, моделирование, режимы течения, генетическая вулканология.

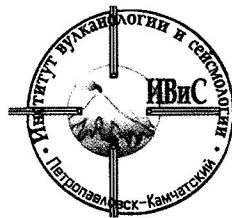
Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ)
Проект № 19-15-00034



Издание РФФИ не подлежит продаже

© Озеров А.Ю., 2019
© Издательство ГЕОС, 2019

RUSSIAN MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
INSTITUTE OF VOLCANOLOGY AND SEISMOLOGY
FAR-EASTERN BRANCH
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES



OZEROV A.Yu.

**KLYUCHEVSKOY VOLCANO:
ROCKS, DYNAMICS, MODEL**

Petropavlovsk-Kamchatskiy – Moscow

GEOS

2019

UDK 551.21:[552+532.5]

BBK 26.323

Ozerov A.Yu. KLYUCHEVSKOY VOLCANO: ROCKS, DYNAMICS, MODEL. – M.: GEOS, 2019.
306 p.

ISBN 978-5-89118-798-6

This book is the first basic edition considering the issues of genetic volcanology. Petrological aspects of magma formation have been investigated as well as physical processes that account for the mechanisms of various types of eruptions. Continuous calc-alkaline series of the Klyuchevskoy volcano rocks (high-Mg basalts – high-Al basaltic andesites) have been shown to form due to decompression fractionation of dark-colored minerals taking place mostly between the eruptions during the pauses of magma migration. For the first time a volcano has been presented as a wideband generator of periodic processes occurring within the intervals from a few seconds to a few days. To study the above processes, a unique large experimental facility representing a laboratory volcano was designed and constructed. Physical modelling carried out using this facility allowed developing a new classification of gas-hydrodynamic regimes occurring in long vertical columns. Physical principles accounting for the monotonous and periodic types of eruptions of basalt and basaltic andesite volcanoes have been defined.

Dynamic model of the Klyuchevskoy volcano eruptions has been developed based upon the major aspects of basalt-basaltic andesite volcanism – magmatic melts evolution, periodicities in the eruption dynamics, and mechanisms of various types of eruptions.

For experts in geology, volcanology, petrology, mineralogy, geophysics, geothermal researches, oil geology, physics, gas-hydrodynamics, geography, and ecology.

Keywords:

Volcano, eruption, magma, basalt, basaltic andesite, minerals, differentiation, periodicity, large experimental facility, gas-hydrodynamics, modelling, flow regimes, genetic volcanology.

Published at financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR),
Grant 19-15-00034



The edition of RFBR is not subject for sale

© Ozerov A.Yu., 2019

© GEOS, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Глава 1. КЛЮЧЕВСКОЙ ВУЛКАН – МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, ИЗВЕРЖЕНИЯ, ПИТАЮЩАЯ СИСТЕМА	13
1.1. Преамбула	13
1.2. Общие сведения о Ключевском вулкане	13
1.3. Ключевская группа вулканов и ее структурное положение	16
1.4. Ключевской вулкан – морфологические особенности	22
1.5. Геологическое строение Ключевского вулкана	23
1.6. Вершинный кратер Ключевского вулкана и его извержения	26
1.7. Побочные извержения на склонах Ключевского вулкана	29
1.8. Глубинное строение Ключевского вулкана	57
1.9. Заключение по Главе 1	60
Глава 2. ФОРМИРОВАНИЕ МАГМАТИЧЕСКОЙ СЕРИИ ПОРОД КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА	61
2.1. Преамбула	61
2.2. Распространенность базальтов и андезибазальтов на Земле	62
2.3. Распространенность базальтов и андезибазальтов на Камчатке	62
2.4. Петрохимические типы базальтоидов Камчатки и их распространенность	65
2.5. Распространенность разных типов базальтоидов на Ключевском вулкане	66
2.6. Представления об образовании островодужных высокоглиноземистых базальтоидов	67
2.7. Представления о генезисе пород Ключевского вулкана	68
2.8. Задачи исследований	71
2.9. Методика исследований пород Ключевского вулкана	72
2.10. Петрохимическая типизация серии пород Ключевского вулкана	81
2.11. Петрохимическая типизация пород в базальт-андезибазальтовой серии Ключевского вулкана	87
2.12. Петрохимические особенности серии пород Ключевского вулкана	91
2.13. Вариации содержания микроэлементов	95
2.14. Петрографические особенности пород Ключевского вулкана	102
2.15. Закономерности поведения силикатных минералов пород Ключевского вулкана	105
2.15.1. Общие замечания по разделу	105
2.15.2. Тренды Sr_x , Or_x , $O1$ и $P1$ из высокоглиноземистых андезибазальтов прорыва Юбилейный	105
2.15.2.1. Клинопироксены прорыва Юбилейный	105
2.15.2.2. Ортопироксены прорыва Юбилейный	110
2.15.2.3. Оливины прорыва Юбилейный	111
2.15.2.4. Плагиоклазы прорыва Юбилейный	113
2.15.2.5. Взаимоотношение трендов вкрапленников и микролитов силикатных минералов прорыва Юбилейный	113
2.15.3. Тренды изменения химических составов силикатных минералов, как показатели парагенетических соотношений кристаллических фаз в ВГ-АБ	115
2.15.3.1. Определение начала кристаллизации плагиоклаза по тренду Al_2O_3 - $Mg\#$ в клинопироксене	115
2.15.3.2. Определение начала кристаллизации плагиоклаза на тренде SiO_2 - $Mg\#$ в клинопироксене	117

2.15.3.3.	Определение начала кристаллизации плагиоклаза по трендам Al_2O_3 -Mg# и SiO_2 -Mg# в ортопироксене	117
2.15.3.4.	Типоморфные признаки Сrx-трендов, обусловленные появлением и последующей кристаллизацией плагиоклаза	117
2.15.4.	Клинопироксен и оливин из высокоглиноземистых андезибазальтовых прорывов Ключевского вулкана	118
2.15.4.1.	Клинопироксены из высокоглиноземистых андезибазальтовых прорывов Ключевского вулкана	119
2.15.4.2.	Оливины из высокоглиноземистых андезибазальтовых прорывов Ключевского вулкана	119
2.15.4.3.	Сопоставление Mg# клинопироксенов и Fo-составляющей оливинов из высокоглиноземистых-высокомагнезиальных базальтоидов Ключевского вулкана	119
2.15.4.4.	Сопоставление Сrx и Ol из высокоглиноземистых андезибазальтов Ключевского вулкана с минералами мантийных ксенолитов	122
2.15.4.5.	Общие закономерности поведения силикатных минералов в породах Ключевского вулкана	123
2.16.	Устойчивые парагенезисы Ключевского вулкана по результатам исследований твердофазных включений в породообразующих минералах	125
2.16.1.	Твердофазные силикатные микровключения	125
2.16.1.1.	Минерал-хозяин Ol – включения Сrx и Орх (прорыв Юбилейный)	125
2.16.1.2.	Минерал-хозяин Сrx – включения Ol и Орх (прорыв Юбилейный)	127
2.16.1.3.	Минерал-хозяин Pl – включения Сrx и Ol (прорыв Юбилейный)	127
2.16.1.4.	Минерал-хозяин Pl – включения Сrx и Ol (прорыв Апахончич)	128
2.16.1.5.	Заключение о совместной кристаллизации силикатных микровключений и породообразующих минералов ВГ-АБ	128
2.16.2.	Твердофазные включения, шпинелиды	128
2.16.2.1.	Минерал-хозяин Ol – включения Sp и Mgt (прорыв Юбилейный)	129
2.16.2.2.	Минерал-хозяин Сrx – включения Sp и Mgt (прорыв Юбилейный)	129
2.16.2.3.	Минерал-хозяин Pl – включения Sp и Mgt (прорыв Юбилейный)	129
2.16.2.4.	Минерал-хозяин Ol – включения Sp и Mgt (прорывы Апахончич и Булочка), по литературным данным	131
2.16.2.5.	Заключение о совместной кристаллизации рудных включений, находящихся в породообразующих минералах из высокоглиноземистых и из высокомагнезиальных базальтоидов Ключевского вулкана	132
2.16.3.	Области кристаллизации твердофазных включений (силикатных и рудных) в минерале-хозяине Ol, Сrx и Pl из ВГ-АБ прорыва Юбилейный	132
2.17.	Сведения о газовой фазе в породообразующих минералах Ключевского вулкана	134
2.18.	Общее заключение об устойчивых минеральных парагенезисах пород Ключевского вулкана	135
2.19.	Моделирование формирования серии пород Ключевского вулкана	138
2.20.	Механизм формирования серии пород Ключевского вулкана	141
2.20.1.	Магмогенерирующая система (выплавление магматических расплавов и их транспорт вверх; интервал глубин 170–32 км)	142
2.20.2.	Магмофокусирующая система (концентрирование расплавов в каналах, генезис ГДП-землетрясений, образование верлитов. Интервал глубин 31–27 км)	143
2.20.3.	Магмоподводящая система	147
2.20.3.1.	Характеристики питающей системы Ключевского вулкана	147
2.20.3.2.	Формирование разнообразия расплавов в генеральном магмоводе вулкана, извержение высокоглиноземистых андезибазальтов	149
2.20.3.3.	Одноактные каналы побочных извержений, образование серии высокомагнезиальных базальтов – высокоглиноземистых андезибазальтов	150

2.21. Основные выводы по Главе 2	151
2.22. Заключение по Главе 2	152

**Глава 3. ПЕРИОДИЧНОСТИ В ДИНАМИКЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ
КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА**

3.1. Преамбула	153
3.2. Периодичности в динамике извержений Ключевского вулкана 1932–1984 гг. (по данным литературных источников и режимных наблюдений).....	155
3.3. Выделение периодичностей в динамике извержений Ключевского вулкана с использованием вулканического дрожания.....	157
3.3.1. Общая характеристика вулканического дрожания	157
3.3.2. Соотношение характеристик низкочастотного вулканического дрожания и параметров базальтовых-андезитобазальтовых извержений	159
3.3.3. Методика выделения периодичностей в динамике извержений Ключевского вулкана, основанная на использовании записей вулканического дрожания	163
3.3.4. Сейсмические данные	168
3.3.5. Аналитические данные и их обсуждение.....	170
3.3.5.1. Периодичности 1983–1984 гг.	171
3.3.5.2. Влияние лунно-солнечного деформирующего процесса	179
3.3.5.3. Периодичности 1978 г. (ретроспективный анализ)	182
3.3.6. Основные выводы по разделу 3.3	183
3.4. Три группы периодических явлений в эруптивной деятельности Ключевского вулкана.....	184
3.4.1. Периодичность пульсирующего фонтанирования	184
3.4.2. Периодичность стромболианских взрывов	185
3.4.3. Периодичность в динамике фонтанирования	189
3.4.3.1. Соотношение равномерных и периодических режимов извержения	189
3.4.3.2. Учащающаяся периодичность в динамике фонтанирования	192
3.4.3.3. Периодическое фонтанирование Ключевского вулкана по литературным данным (ретроспективный анализ)	196
3.4.3.4. Слоистость шлаковых конусов	198
3.4.4. Характеристики главных типов периодичностей в динамике извержений Ключевского вулкана	200
3.4.5. Сравнительный анализ периодичностей в динамике извержений Ключевского вулкана	203
3.4.6. Общие представления о причинах периодических явлений	204
3.4.7. Выводы по разделу 3.4	204
3.5. Заключение по Главе 3	206

Глава 4. КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

БАЗАЛЬТОВЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ (КАМБИ) И ПРЕДПОСЫЛКИ ЕГО СОЗДАНИЯ.....	207
4.1. Преамбула	207
4.2. Исторический обзор литературных данных	208
4.3. Комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений – КАМБИ.....	216
4.3.1. Основные принципы конструирования лабораторной установки	216
4.3.2. Технические характеристики КАМБИ	217
4.3.3. Моделирующая система КАМБИ	219
4.3.3.1. Моделирующая система в варианте газонасыщенной колонны	219
4.3.3.2. Моделирующая система в варианте барботажной колонны	223
4.3.4. Регистрирующая система КАМБИ	224
4.4. Главные конструктивные особенности КАМБИ	225
4.5. Обсуждение технических характеристик КАМБИ	226
4.6. Заключение по Главе 4	227

Глава 5. МЕХАНИЗМЫ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ФОНТАНИРОВАНИЯ, СТРОМБОЛИАНСКИХ ВЗРЫВОВ И ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОНТАНИРОВАНИЯ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)	229
5.1. Преамбула	229
5.2. Механизм пульсирующего фонтанирования	230
5.2.1. Экспериментальные исследования (газонасыщенная колонна, $\varnothing_{\text{внутр}} = 50$ мм, $h_{\text{колонны}} = 16,6$ м, $P_{\text{насыщения}} = 1,6$ атм., H_2O , CO_2).....	230
5.2.2. Обсуждение результатов моделирования пульсирующего фонтанирования.....	232
5.2.3. Сопоставление экспериментальных и вулканологических данных	233
5.2.4. Основные выводы (пульсирующее фонтанирование).....	233
5.3. Механизм стромболианских взрывов.....	234
5.3.1. Экспериментальные исследования (газонасыщенная колонна, $\varnothing_{\text{внутр}} = 18$ мм, $h = 16,6$ м, $P = 1,6$ атм.; барботажная колонна, $\varnothing_{\text{внутр}} = 18$ мм, $h = 15,7$ м, $\varnothing_{\text{пузырьков}} \sim 2,5$ мм).....	234
5.3.2. Обсуждение результатов моделирования стромболианских взрывов	237
5.3.3. Механизм формирования режимов заблокированных кластеров и снарядного	238
5.3.4. Сопоставление экспериментальных и вулканологических данных	239
5.3.5. Основные выводы (стромболианские взрывы).....	242
5.4. Механизм периодического фонтанирования	243
5.4.1. Экспериментальные исследования (барботажная колонна, $\varnothing_{\text{внутр}} = 18$ мм, $\varnothing_{\text{пузырьков}} \sim 1$ мм и $\varnothing_{\text{пузырьков}} \sim 2,5$ мм)	243
5.4.2. Обсуждение результатов исследований.....	250
5.4.3. Механизм формирования открытых пузырьковых кластеров.....	253
5.4.4. Сопоставление экспериментальных и вулканологических данных	255
5.4.5. Основные выводы (периодическое фонтанирование).....	259
5.5. Новая схема режимов течения двухфазных смесей в вертикальных колоннах.....	259
5.6. Общее обсуждение всех режимов.....	261
5.7. Заключение по Главе 5	264
Заключение	266
Литература	267
Приложения	285