

УДК 552.313

ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЙ КОМПОНЕНТОВ В РАЗРЕЗАХ ФЛАД-БАЗАЛЬТОВ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ КАК ПОКАЗАТЕЛИ ЭВОЛЮЦИИ МАГМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© 2004 г. В. Н. Шарапов

Представлено академиком В.В. Реввердатто 30.06.2003 г.

Поступило 14.07.2003 г.

Распределения содержаний компонентов в разрезах флад-базальтов Сибирской платформы (СП), сгруппированные по свитам и представленные в форме вариационных диаграмм, являются основой для построения гипотез возникновения и эволюции базитовых магматических систем [1–9 и др.]. Этот подход может быть развит, если его дополнить модельными динамическими построениями магматической системы, в которых учитывается изменение давления (P), которое определяет частоту и объемы извержений вулканических продуктов, и температуры (T), которая контролирует изменение состава магмы со временем в очаге питания вулкана [10–13 и др.]. Такие модели наиболее корректно верифицировать с помощью временных рядов или временных функций распределения составов лав. Переход от временных последовательностей к временным функциям для рассматриваемого случая, по-видимому, может быть осуществлен следующим образом. Временная дискретная последовательность проб составов лав может быть преобразована в дискретную или непрерывную временную функцию, если точки опробования соотнести с реальной или условной шкалой времени [14]. Поясним эту операцию на примере полно динамически изученных разрезов современных и доисторических извержений вулкана Килауэа (о. Гавайи) [15]. На рис. 1а показаны данные опробования эпизода № 48 извержения вулкана Капаинахи 1986–1992 гг.; на рис. 1б приведены аналогичные результаты по всем эпизодам извержения вулкана Пуу-Оо 1983–1984 гг.; на рис. 1в приведен “сборный” разрез лав от наиболее ранних субмаринных и до субаэральных исторически датированных извержений Килауэа. Они не изучены в реальной динамике, поэтому временная последовательность в форме функции распределения приведена для условной шкалы.

В первом случае имеется непрерывное извержение с дискретными примерно помесечными пробами, во втором зафиксирована последовательность датированных по времени событий некоторой длительности с прерываниями известной продолжительности, опробование лав в эпизодах также дискретно. В третьем случае имеется последовательность событий в виде проб составов отдельных лавовых потоков, для которых нет достоверных данных по общей длительности процесса, отдельных его актов и продолжительности перерывов между ними. Для последнего случая дискретная последовательность событий преобразована в условно однородную временную функцию и применяется безразмерная шкала, т.е. предполагается, что перерывы между “точками опробования” одинаковы ($\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = \dots = \Delta\tau_n = t$, $\Sigma n = 1$). Тогда получим приведенную однородную шкалу времени ($\Sigma\Delta\tau/t = 1$) и возможность проводить цифровую обработку временных функций распределения составов базальтов в разрезах с неизвестными длительностями перерывов, излияний и общей продолжительности формирования самих разрезов. При этом появляется возможность построения функций распределения, где сочетаются разные по длительности извержения одного вулкана (рис. 1г), или разрезы, состоящие (как в случае флад-базальтов СП) из продуктов, возможно, нескольких вулканов или даже магматических систем.

Отметим содержательные аспекты такого исследования разрезов флад-базальтов СП, разделенных на свиты, которые составляют последовательные магматические “циклы магматизма” [1]. Как указывалось выше, петрогенезис флад-базальтов СП обсуждался с помощью вариационных диаграмм [4–9], на которых выделялись поля отдельных свит, которые располагаются относительно друг друга или с перекрытием, или образуют некоторую последовательность в выбранных координатах. Если рассматривается эволюция магматического процесса и считается, что эффузивные свиты есть некоторые ее обобщенные характеристики (что собственно и делается боль-

Институт геологии
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

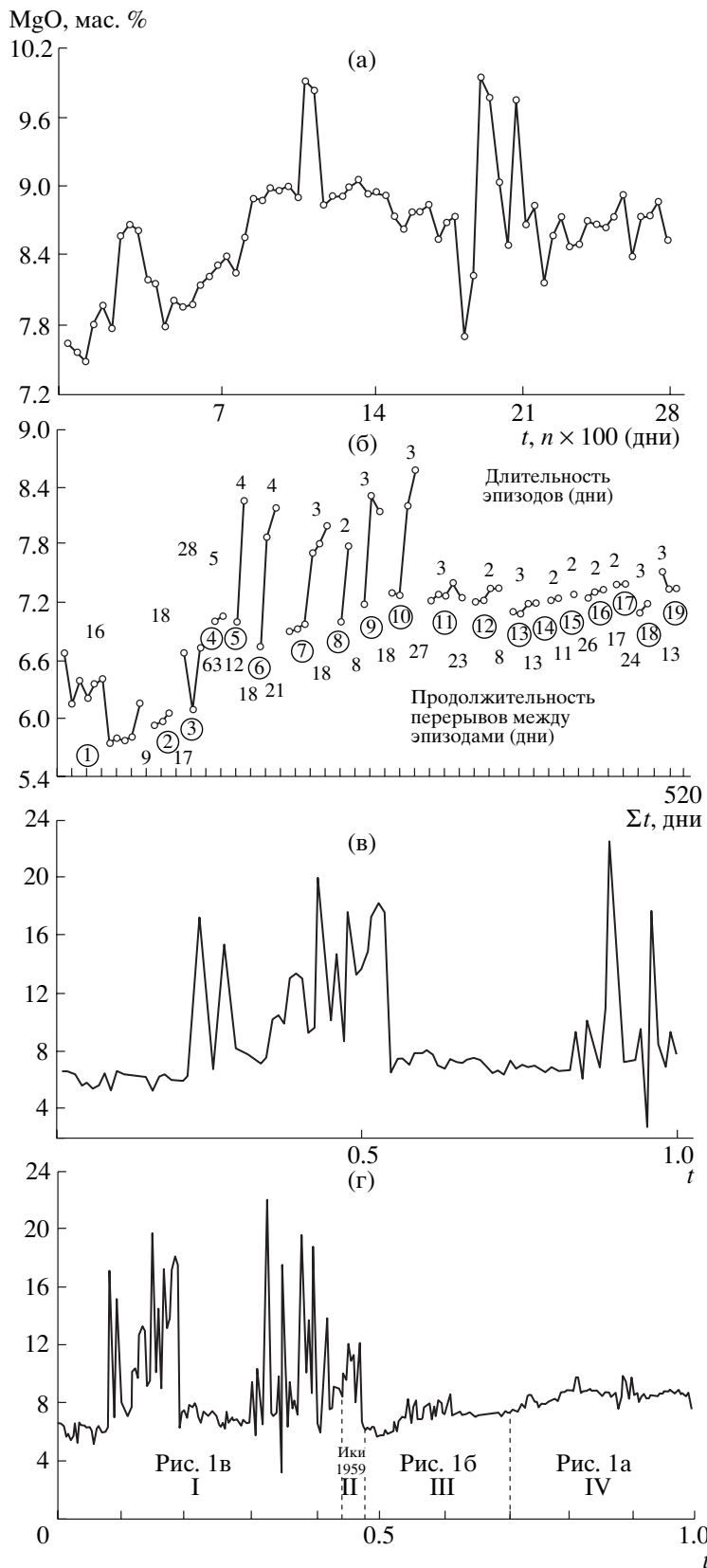


Рис. 1. Временные последовательности и функции распределения составов лав влк. Килауэа (о. Гавайи). а – изменение содержания MgO в эпизоде № 48 извержения влк. Капаинахи (Восточная рифтовая зона) 1986–1992 гг.; б – изменение содержания MgO влк. Пуу-Оо (Восточная рифтовая зона) 1983–1984 гг.; в – временная функция распределения содержания MgO в извержениях влк. Килауэа от субмаринных лав хребта Пуна до извержений влк. Ики 1959 г.; г – общая временная функция распределения MgO влк. Килауэа. t – время, n – число событий, Σ – сумма.

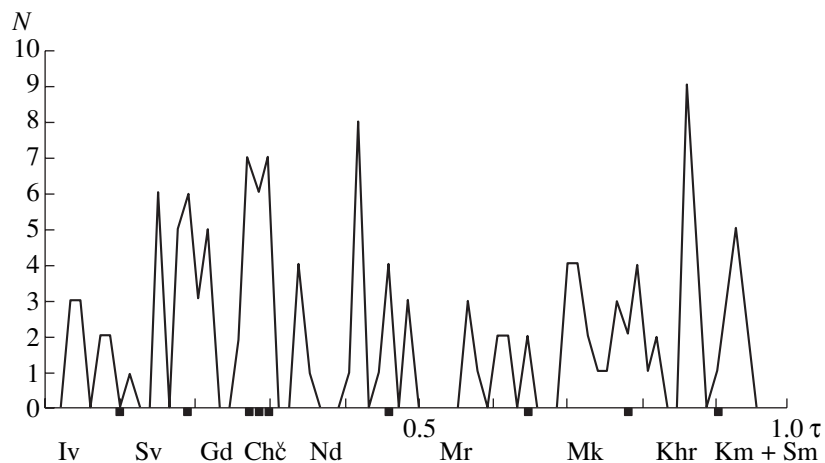


Рис. 2. Распределение частот прерывания в функциях распределения перечисленных в тексте примесных и петрохимических компонентов на условной временной шкале по разрезу скважины СГ-9 (восточная часть Хараелахской мульды, “Норильский район”). Квадратами показано положение границ свит: Iv – ивакинская, Sv – сьверминская, Gd – гудчихинская, Chç – хаканчанская, Nd – надеждынская, Mr – моронговская, Mk – мокулаевская, Khr – хараелахская, Km – кумгинская, Sm – самоедская (две последние свиты “приклеены” к верху разреза в данной скважине, где они эродированы, по данным из ближайшего разреза, в котором они сохранились).

шинством авторов), то неявно допускается когерентность влияния функций T и P на эволюцию составов магмы в очагах питания вулканов и их “опробования” при извержениях. Или, иными словами, изменения составов магм в очаге отождествляются с перерывами между свитами, тогда как вариации составов лав внутри свит принимаются несущественными, хотя вид кривых распределений компонентов [4–9] скорее свидетельствует о весьма сложных изменениях содержаний компонентов как внутри, так и на границах свит. Обсудим такие распределения составов флад-базальтов СП с помощью цифровой обработки [14] существующих баз данных. В разрезах флад-базальтов СП выделено до 11 свит в наиболее масштабном проявленных областях их развития (Норильский район), в которых зафиксировано присутствие более 140 вулканических единиц, сформировавшихся за 5 “тектоно-магматических циклов” [1].

Нами была проведена цифровая обработка опубликованных в [1–9] данных и базы данных составов вулканических траппов СП, созданной А.И. Альмухамедовым и А.Я. Медведевым в ГЕОХИ СО РАН. Численные данные из указанных источников были сведены в удобные для обработки файлы, которые позволяли одновременно анализировать от 35 до 60 параметров в отношении “описательных статистик”, вида и характера “кластеров” и частотных спектров временных рядов.

Как показано выше, функция распределения геохимических сигналов в разрезе эффузивов – это последовательность продуктов отдельных извержений базитовых вулканов, которые являются естественными дискретными “пробами” текущих составов магм в питающих очагах. Ее вид может

быть оконтурен или объединением ломаной линией соседствующих в ряду величин, или кривой, построенной каким-то методом сглаживания (сплайн, метод наименьших квадратов и т.д.). Естественно, что рассматриваемые нами последовательности относятся к разряду ограниченных временных рядов с прерыванием последовательностей [14]. При цифровой обработке временных последовательностей для выявления в них видов периодичности, “стационарности” и т.п. желательно иметь возможно “длинные” временные ряды [14]. При существующей изученности разрезов флад-базальтов СП такое требование из цитированных выше данных может быть выполнено пока для весьма ограниченного их числа, например, скважин СГ-9 и СГ-19 (Хараелахская мульда) [1, 6].

“Прерывания” в полученных функциях распределения определялись: по “скачкообразным” и “существенным” изменениям величины содержания рассматриваемого компонента ($\Delta C_i > \pm \sigma$) на каком-то временном шаге; спектральных характеристик; появлением локального тренда и т.п. С использованием таких критериев был проведен анализ функций распределений содержаний петрогенных и примесных компонентов и сопоставлено число и место прерываний в функциях распределения, а также соотнесение их с положением границ свит на принятой шкале (рис. 2).

Наиболее важным при определении локальной области существования специфического проявления содержаний компонентов в породе считался вид функции их распределения между “прерываниями”, характер локальных трендов и т.д., учитывался также общий вид функций авто- и локальной корреляций, а также корреляционных

функций между рядами для содержаний: SiO_2 , Al_2O_3 , FeO^* , MnO , CaO , Na_2O , P_2O_5 , п.п.п., (СГ-19, СГ-9); Li , Be , B , F , Sc , V , Cr , Co , Ni , Cu , Zn , Rb , Sr , Y , Zr , Nb , Ag , Sn , Ba , La , Ce , Pr , Nd , Sm , Eu , Gd , Tb , Dy , Ho , Er , Tm , Yb , Lu , Hf , Ta , Pb , Th , U , ϵ_{Nd} , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (СГ-9).

Цифровое исследование временных рядов этих компонентов показывает, что “поведение” магматической системы в рассматриваемом районе СП, похоже, значительно сложнее, чем следует из построения вариационных диаграмм с учетом структурно-петрографического разделения разрезов эффузивов [1–9]. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены соотношения, которые показывают, что динамические характеристики рассматриваемых магматических систем в отношении изменения содержаний компонентов в породах чаще всего не совпадают с границами эффузивных свит. Этот вывод может представляться тривиальным, если в указанном отношении рассмотреть временные последовательности и функции распределения составов лав вулкана Килауэа (рис. 1). На примере изменения MgO можно убедиться, что данное свойство реализуется как в отдельных эпизодах, отдельных извержениях, так и в последовательностях свит этого действующего более 40 000 лет вулкана. За неимением места мы не останавливаемся на более подробном описании функций распределения составов лав Гавайских вулканов.

Сравнение соотношения границ тектоно-магматических циклов [1–7] и вида функций распределения различных компонентов в разрезах флад-базальтов СП показал сходные с отмеченными особенностями соотношения в эволюции магматической системы, т.е. состав лав может меняться по разным компонентам в разных частях эффузивного разреза, в том числе и на границах свит. Так, для Хараелахской мульды в функциях распределений содержаний петрогенных компонентов находят отражение два петрохимических “цикла” (по [1]) – ивакинско-гудчихинский и надеждинско-самоедский (рис. 3). В пределах второго, который проявлен в той или иной мере на остальной площади развития толеитов [1, 2], судя по виду изменения функций распределения некоторых изотопных отношений (ϵ_{Nd} , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) [4–9], есть два относительно значительных изменения в эволюции источника питания вулканов, которые приходится приблизительно на средние части надеждинской и мокулаевской свит (см. их аналоги в других районах СП [1–9]). Для перечисленных выше петрогенных и примесных компонентов в разрезе флад-базальтов Хараелахской мульды в этом отношении просматривается довольно сложная картина. Есть перерывы в функциях распределения как в области границ свит: надеждинской и моронговской – SiO_2 , TiO_2 , FeO^* , MgO , CaO ; мо-

ронговской и мокулаевской – FeO^* , Cr , Nb , Gd ; мокулаевской и хараелахской – Zn , Tm , так и внутри них. В частности, внутри свит имеются перерывы в функциях распределения следующих компонентов: надеждинская – FeO^* , CaO , Na_2O , K_2O , V , Pb , Sr , Sc , Zr , Ta , Th , U , Y , Nb , Ce , Sm , Nd , Ho , Gd , Tb , Pr ; моронговская – Al_2O_3 , Na_2O , P_2O_5 , V , Sr , Zr , Th , U , Ta , Ce , Sm , Nd , Ho , Pr ; мокулаевская – Al_2O_3 , Sr , Zr , Ta , Dy , Ho ; хараелахская – Cr , Cu , Hf , Tm . Отметим, что “ранг” перечисленных 14 прерываний по виду спектров и локальных трендов различен. Исследование функций автокорреляции показывает существование периодичности с довольно высоким коэффициентом корреляции на малых лагах в распределении TiO_2 . Для содержаний SiO_2 , Al_2O_3 , FeO^* , MgO , CaO , Na_2O , K_2O амплитуда спектров затухает к концу временного ряда, а сами функции приобретают вид белого шума; при этом эти функции распределения имеют на малых лагах коэффициенты корреляции порядка 0.3–0.4. Для корреляционных функций между петрогенными компонентами реализуется на нулевом лаге ковариационная матрица, в которой модули величин коэффициентов обычно меньше 0.5.

Такую периодичность временных рядов составов флад-базальтов затруднительно описывать “генератором геохимических сигналов”, типа уравнения Шейля, которое обычно используется для интерпретации состава выплавов в мантийных плюмах [10], поскольку таким образом можно получать лишь “гладкие” функции распределения [12, 13].

Краткие выводы. 1. В вулканах континентальных и океанических плит скачкообразное или периодическое изменение состава лав не связано обязательно с границами эффузивных свит, из чего следует отсутствие линейной связи между изменениями температуры в магматических очагах и давления, вариации которого контролируют частоту и объемы жидкостей при интродуировании из них (см. рис. 1–3). Существенно то, что, по видимому, данное свойство разрезов эффузивных пород является общим для базитовых магматических систем, которые связывают с мантийными плюмами. При этом существует также и различный характер локальных трендов в продуктах извержений отдельных вулканов, что давно выявлено для Гавайской магматической системы.

2. В разрезах флад-базальтов Хараелахской мульды также проявляются указанные выше характеристики. Так, в них со временем убывает число и существенность изменений содержаний петрогенных и примесных компонентов, а по интегральной характеристике их составов (линейные тренды) можно полагать, что выплавки магмы извлекаются из все более деплетированных мантийных пород. При этом состав лав в

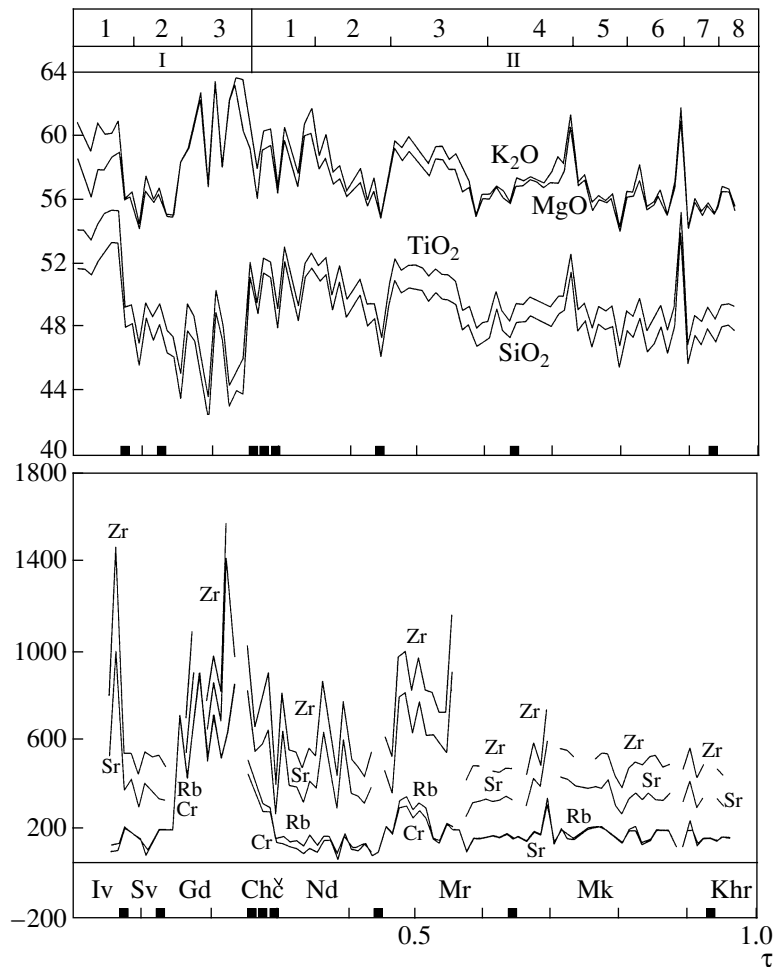


Рис. 3. Распределение частот прерывания в функциях распределения примесных и петрохимических компонентов на условной временной шкале ($y = n/N$, x – “приведенная шкала” времени) по разрезу скв. СГ-19 (центральная часть Хараелахской мульды, “Норильский район”). Наименования свит аналогично рис. 2. Показано предполагаемое соотношение “петрохимических циклов” эволюции магматической системы (I – ивакинско-гудчихинский, II – надеждинско-самоедский) и петрохимическое деление в них на “свиты” разрезов флуд-базальтов на основе положения границ прерывания в функциях распределения компонентов.

центральной, западной и восточной ее частях в одноименных свитах статистически различается как по содержаниям петрогенных, так примесных компонентов.

3. Наличие автокорреляционных функций типа белого шума в верхней части разрезов флуд-базальтов Хараелахской мульды СП свидетельствует о случайном характере пульсаций в составе излияний и “сглаживании” температурных и иных неоднородностей в области генерации мантийных вышпавок. Для Гавайских вулканов такой общей характеристики нами не выявлено.

Автор признателен А.И. Альмухамедову, А.Я. Медведеву и В.В. Рябову за содержательные и критические дискуссии по затронутым в работе вопросам; особенно велика благодарность за создание великолепной базы данных и возмож-

ность работать с ней А.И. Альмухамедову и А.Я. Медведеву.

Работа выполнена при поддержке Комплексного проекта Президиума СО РАН (№ 106).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотухин В.В., Вилинский А.М., Дюжиков О.М. Базальты Сибирской платформы: особенности геологии, состава и генезиса пермо-триасовых эффузивов. Новосибирск: Наука, 1986. 245 с.
2. Золотухин В.В., Альмухамедов А.И. В сб.: Траппы Сибири и Декана. Новосибирск: Наука, 1991. С. 7–39.
3. Васильев Ю.А., Золотухин В.В., Феоктистов Г.Д. и др. // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 12. С. 1696–1705.
4. Sharma M., Basu A.R., Nesterenko G.V. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1992. V. 113. P. 365–381.

5. *Lightfoot P.C., Hawkesworth C.J., Naldrett A.J. et al.* // *Contribs, Mineral. and Petrol.* 1993. V. 114. P. 171–188.
6. *Fedorenko V., Czemanske G.* // *Intern. Geol. Rev.* 1997. V. 39. P. 479–531.
7. *Fedorenko V., Czemanske G., Zen'ko et al.* // *Intern. Geol. Rev.* 2000. V. 42. P. 760–804.
8. *Sharma M.* // *Geophys. Monogr.* 1997. V. 100. P. 273–295.
9. *Basu A.R., Hannigan R.E.* // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 12. P. 2209–2212.
10. *Rollinson H.R.* *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation.* Essex: London Group UK, 1994. 352 p.
11. *Gudmudsson C.* // *J. Volcan. Geotherm. Res.* 1988. V. 35. P. 179–194.
12. *Черепанов А.Н., Шаранов В.Н.* // *Геология и геофизика.* 1993. Т. 34. № 5. С. 32–40.
13. *Marsh D.B.* // *Miner. Mag.* 1995. V. 60. P. 5–40.
14. *Сергиенко А.Б.* *Цифровая обработка сигналов.* М.: СПб.: Питер, 2002. 585 с.
15. [http:// georoc.mpch-mainz/gwdg.del](http://georoc.mpch-mainz/gwdg.del)