

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ СОБЫТИЙ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ ФАЗЫ БОЛЬШОГО ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ (КАМЧАТКА)

В.Л. Леонов

Институт вулканологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, lvl@kcs.iks.ru

Рассматривая динамику литосферы В.И. Кейлис-Борок [1989] отмечал, что, по-видимому, всю геологическую историю Земли можно представить, как цепь эпизодов потери устойчивости, то есть, как процесс, который необходимо рассматривать с позиций нелинейной динамики. В работе [Пушаровский и др., 1990] было показано, что нелинейные явления в тектоносфере Земли проявлены очень широко (от сейсмических процессов через широкий класс тектонических явлений к движениям планет Солнечной системы) и это позволяет выдвинуть новое направление в тектонических исследованиях - «нелинейную геодинамику». Отмечена перспективность подобного рода исследований в геологии.

Эти новые направления исследований, вместе с «нелинейной металлогенией» [Щеглов, 1983], «нелинейной геофизикой» [Кузнецов, 1981], «концепцией самоорганизации» [Жоголев и др., 1991] и другими, свидетельствуют о широком распространении, в том числе и в области наук о Земле, новых взглядов, в основе которых лежит понятие о нелинейности. Ю.В. Сачков [1991] сравнивает становление нелинейного мышления в современном естествознании с ещё одной научной революцией. Он пишет, что в настоящее время вырабатывается «новое видение, создаётся новая базисная модель мира и познания, которая включает такие понятия, как неустойчивость, флуктуации, бифуркации, малые причины - большие следствия, самоусиление процессов, необратимость, многовариантность и т.д.». Многие из этих понятий были введены в широкое обращение благодаря работам лауреата Нобелевской премии И. Пригожина [Николис, Пригожин, 1990; Пригожин, 1985; Пригожин, Стенгерс, 1986].

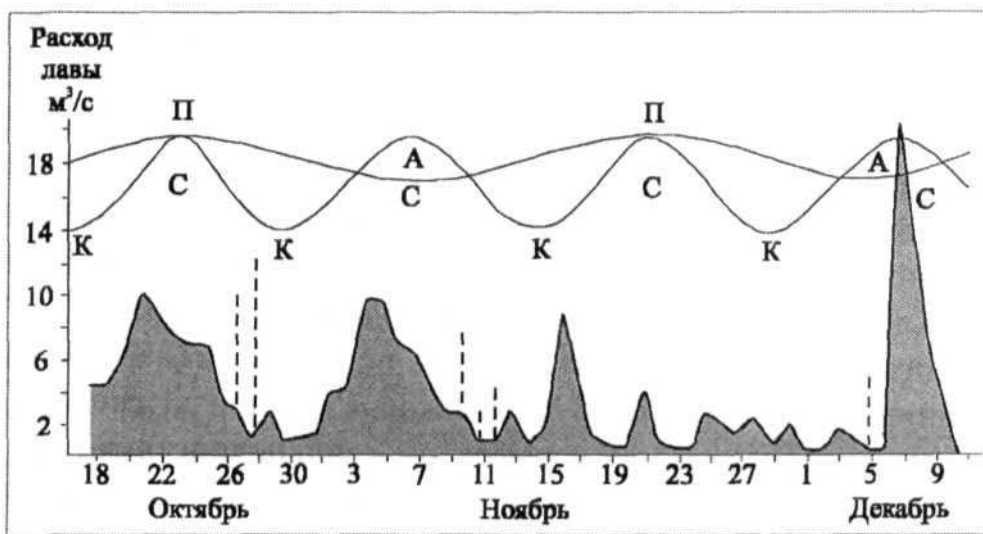
Предложенные понятия и подходы к исследованию нелинейных процессов и неравновесных систем, по-видимому, могут быть успешно применены и в вулканологии. Деятельность вулканов, которая обычно выражается в периодических извержениях с ясным ритмом (последовательностью) состояний покоя и активности [Влодавец, 1984] и которая представляет собой поверхностное проявление сложных и разнообразных процессов, проходящих в тектоносфере Земли, а также вне неё, несомненно, может рассматриваться как нелинейный процесс. Такой подход позволяет с новой, порой неожиданной, стороны увидеть процессы, происходящие на вулканах, найти объяснение явлениям, до сих пор малопонятным и загадочным. Ниже мы проиллюстрируем это на примере некоторых событий, происходящих на БТТИ (Большом трещинном Толбачинском извержении).

Об аномалиях расхода лавы в заключительную стадию БТТИ и принципе «малые причины - большие следствия»

В заключительную стадию трещинного Толбачинского извержения, проходившего в 1975-1976 годах на Камчатке, нами проводились детальные наблюдения за расходом лавового материала [Леонов, Храмов, 1979]. На полученном графике расходов лавы (рис.1) отчётливо обособлялось 4-5 максимумов, разделенных участками с минимальными расходами. Выделялось, таким образом, 4-5 циклов с продолжительностью от 8 до 14 дней. В течение октября и ноября каждый последующий максимум был меньше предыдущего и, таким образом, создавалась картина последовательного и закономерного затухания вулканической активности. Ход приведённой кривой оказывался столь характерным, что даже позволял с середины ноября в рабочем порядке прогнозировать деятельность вулкана на ближайшие дни и возможное окончание извержения на первые числа декабря. И хотя извержение действительно закончилось 10 декабря, наметившаяся закономерность в деятельности вулкана была нарушена резким увеличением на последнем этапе расхо-

Рис. 1. График изменения расхода лавы Южного прорыва в заключительную фазу его деятельности (октябрь-декабрь 1976 г.).

Вверху условно показан график изменения приливообразующих сил Луны и Солнца. С - максимальные приливы (сизигии), К - минимальные приливы (квадратуры). А - апогей, П - перигей орбиты Луны.



дов лавы с начальным максимумом до $20 \text{ м}^3/\text{с}$, значительно превышающим все предыдущие. Попытки в дальнейшем найти причины подобных изменений в расходах лавы позволили предположить, что последняя активизация эффузивной деятельности вулкана могла быть связана с прохождением сизигийного прилива в оболочке Земли (временем, когда Земля, Луна и Солнце были расположены на одной линии, и приливообразующая сила достигала максимальных значений). В то же время отмечалось, что за основной период наблюдений в течение октября - ноября отчётливой корреляции между максимумами расхода лавы и сизигийными приливами не наблюдалось и, таким образом, причины последней резкой активизации вулкана остались не совсем понятными [Леонов, 1979].

Рассмотрим описанные выше события, как результат развития резко неравновесной системы (в данном случае - магматической системы в недрах вулкана, в которой избыточное давление к концу извержения почти иссякло [Большое трещинное..., 1984]). Как отмечено в [Пригожин, Стенгерс, 1986] в подобных системах «очень слабые возмущения, или флуктуации, могут усиливаться до гигантских волн, разрушающих сложившуюся структуру...», другими словами - начинает действовать принцип «малые причины - большие следствия». То, что непосредственно перед окончанием извержения вулкана его магматическая система «вдруг» среагировала на сизигийный прилив, на который раньше не реагировала, может быть свидетельством того, что в эти последние 4 дня система вошла в сильно неравновесное состояние и стала способной реагировать на флуктуации, не действовавшие на неё ранее.

Предложенная интерпретация событий, происходящих на БТТИ перед самым окончанием его деятельности, конечно, дискуссионна, но как нам кажется оправдана. Она позволяет поставить целый ряд вопросов, ответы на которые могут быть получены лишь в результате дальнейших, целенаправленных наблюдений на других извержениях. Можно ли определить заранее, когда магматическая система вулкана «входит» в неравновесное состояние? Как долго она может в этом состоянии находиться? Какие ещё причины, кроме сизигийных приливов, могут воздействовать подобным же образом и вызвать аномальные активизации вулкана? Принципы и опыт изучения нелинейных процессов и неравновесных систем могут при этом существенно помочь и «высветить» неожиданные решения.

О «дальнодействующих корреляциях», «восприимчивости» внешних полей и некоторых других свойствах сильно неравновесных систем

Одним из необычных свойств сильно неравновесных систем, отмеченных в [Пригожин, Стенгерс, 1986], является появление дальнодействующих корреляций. На примере нелинейных химических реакций было установлено, что при переходе от равновесного к неравновесному состоянию частицы, находящиеся на макроскопических расстояниях друг от друга, перестают быть независимыми. «Отзвуки» локальных событий разносятся по всей системе. Амплитуды дальнодействующих корреляций сначала малы, а затем, по мере удаления от равновесного состояния, нарастают и в точках бифуркаций могут обращаться в бесконечность.

Обратимся вновь к событиям, происходящим в заключительную стадию БТТИ, когда после

окончания работы Восьмого конуса началась активная сейсмическая деятельность, прошли рои землетрясений: в декабре 1976 года - на участке южного рифта вулкана Плоский Толбачик, в апреле 1977 года - в Толудской зоне, в мае 1977 года - к северу от вулкана Плоский, в июне-августе 1977 года - в западной Козыревской зоне (рис.2). Землетрясения распространились на территорию до 5000 км² с поперечником до 90 км. Было сделано заключение, что в этот период в глубинные процессы, связанные с извержением, была вовлечена обширная область, включающая всю Ключевскую группу вулканов [Большое трещинное..., 1984]. Рассматривая эти события, как свойство магматической системы в недрах вулкана, находящейся в сильно неравновесном состоянии в условиях, когда приближался конец извержения (особая точка), можно увидеть принципиальное сходство их с эффектом «дальнодействующих корреляций», наблюдавшемся у нелинейных химических реакций. Отдельные части магматической системы (магматические очаги), казавшиеся обособленными, не связанными между собой, подобно «гипнонам» или «сомнамбулам», участвующим в химических реакциях [Пригожин, Стенгерс, 1986], в неравновесных условиях вдруг начали действовать когерентно, обнаруживая связи, в равновесных условиях не вскрываемые.

Среди принципиально новых свойств, приобретаемых системами в сильно неравновесных условиях, отмечается также то, что системы начинают «воспринимать» внешние поля, например гравитационное поле. В [Пригожин, Стенгерс, 1986] приводится пример с ячейкой Бенара, в которой гравитация играет существенную роль и приводит к новой структуре, несмотря на то, что толщина самой ячейки может достигать лишь несколько миллиметров. Действие гравитации на столь тонкий слой жидкости было бы пренебрежимо малым в равновесной ситуации, но в неравновесной ситуации, вызванной градиентом температур, приводит даже в таком тонком слое к наблюдаемым макроскопическим эффектам - неравновесность усиливает действие гравитации. С этих позиций можно объяснить и появление загадочных, закрученных в змеевидную спираль, сростков кристаллов [Спиральные кристаллы, 1989]. Предполагается, что появление таких сростков, закрученных обычно противоположно в Южном и Северном полушариях, связано с действием сил Кориолиса, которые в момент кристаллизации раствора (в неравновесных условиях) проявляются столь необычно и ощутимо. Не исключено, что появление спиральных, вихревых или ротационных структур в геологических средах [Иванова и др., 1990; Кац и др., 1990; Ли Сы гуан, 1958; Мелекесцев, 1979; Чурилин, 1980] также может быть связано с периодами, когда эти

среды попадали в неравновесное состояние.

Этот подход может оказаться особо плодотворным при изучении питающих магматических систем вулканов или магматических очагов, которые в момент перехода от жидкого состояния к твердому (или в других неравновесных ситуациях) могут приобрести неожиданные свойства и начать подчиняться силам, которые обычно на них не действуют, в

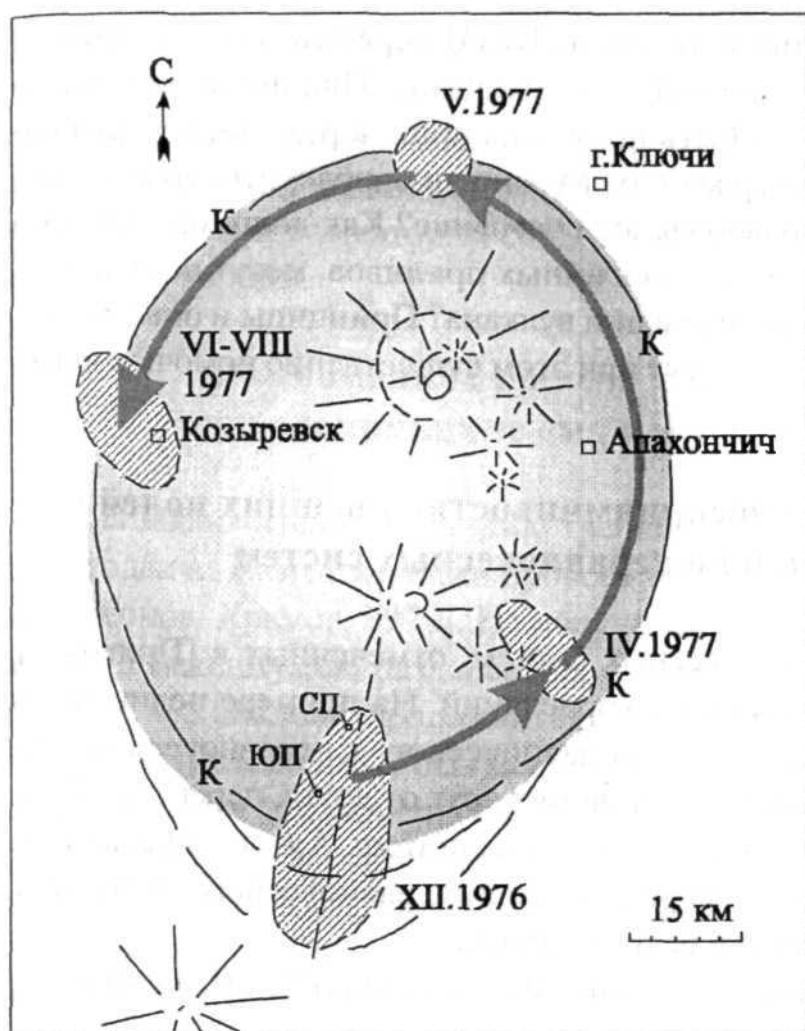
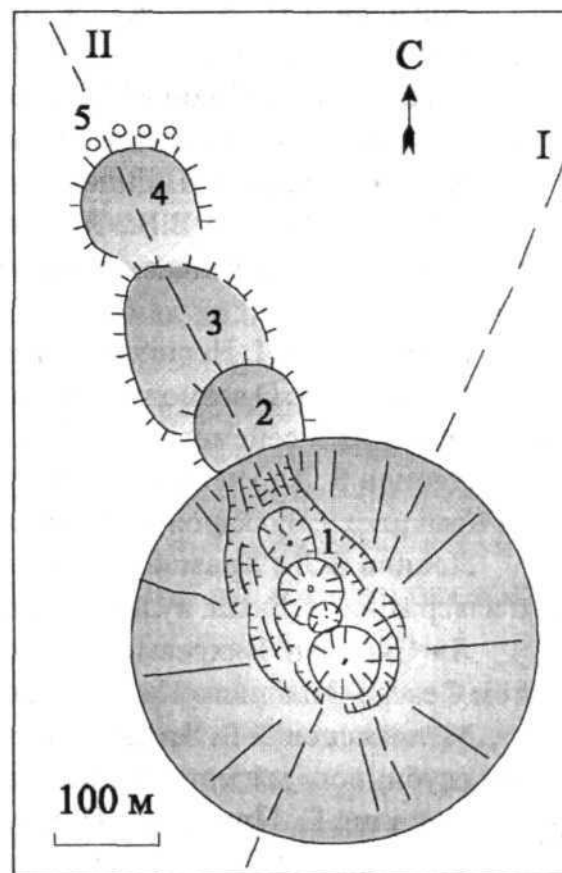


Рис. 2. Карта расположения эпицентральных зон землетрясений, происходивших в районе Ключевской группы вулканов в декабре 1976 г. и в 1977 г. [Большое трещинное..., 1984] (заштрихованные поля).

К — контур области, захваченной интенсивными движениями после завершения извержения. СП и ЮП - Северный и Южный прорывы БТТИ. Стрелки показывают последовательность активации эпицентральных зон.

Рис. 3. Основные структурные элементы Южного прорыва БТТИ в заключительную фазу его деятельности.

I - направление зоны трещин, соединяющей Северный и Южный прорывы. II - направление первичной эруптивной трещины, на которой возник Южный прорыв и вдоль которой в заключительную фазу его деятельности в 1976 году формировались: 1 - нижнее жерло и цепочка «бегающих» жерл на склоне, возникших периодически 7-8 ноября; 2 - поднятие, сформировавшееся 12 ноября; 3 - поднятие, сформировавшееся 13 ноября; 4 - серия поднятий, сформировавшихся 22-26 ноября; 5 - новые поднятия в зоне 4 и многочисленные центры излияний лавы к ССЗ от них, сформировавшиеся 6 декабря.



частности, силам Кориолиса [Giesecke, 1986]. Не исключено, что часто отмечающееся закручивание питающих даек, имеющих на глубине одно простирание, а при приближении к поверхности - другое [Barker, Malone, 1991; Reches, Fink, 1988; Ryan, 1988; и др.], связано с действием таких сил, которые заставляют магму при подъеме использовать спиралевидные каналы.

Подобное изменение направления питающей дайки происходило и на БТТИ. На Северном прорыве глубинная питающая зона имела простирание - СВ 25°, ближе к поверхности - СВ 15°, а непосредственно под конусами - СЗ 320-340° [Большое трещинное..., 1984]. Такое же закручивание против часовой стрелки было характерно и для питающих тел Южного прорыва. В заключительную стадию его деятельности, свидетелями которой нам довелось быть [Леонов, Храмов, 1979], мы удивлялись тому, почему магма при каждой новой активизации устремлялась всё дальше на северо-северо-запад. При этом мигрировали не только бокки, но и вновь формирующиеся жерла в прикратерной части конуса. Было такое впечатление, что какая-то сила заставляла магму уходить из каналов, используемых ею более года, и постепенно смещаться всё далее на северо-северо-запад (рис. 3). Несомненно, что эти события, происходящие в последние месяц - полтора деятельности Южного прорыва, были чем-то особенным, они не наблюдались ранее и характеризовали заключительную стадию извержения, когда магматическая система в недрах вулкана находилась в сильно неравновесных условиях.

Заключение

Приведенные выше примеры по Большому трещинному Толбачинскому извержению показывают, что в исследовании извержений вулканов мы можем столкнуться со многими эффектами, наблюдаемыми в сильно неравновесных системах. Так, могут неожиданно проявиться «дальнедействующие корреляции», магматическая система в недрах вулкана может «вдруг» начать «воспринимать» внешние поля, силы гравитации или силы Кориолиса. Непосредственно перед началом извержения, или перед его окончанием, может начать действовать принцип «малые причины - большие следствия». При этом нарушаются закономерности, установленные ранее, извержение начинает развиваться как бы по новым правилам. Все эти эффекты необходимо изучать, необходимо научиться использовать для оценки вулканической и сейсмической опасности. Можно согласиться с Ю.М. Пущаровским [1993], что «в ближайшие годы внимание к нелинейной геодинамике резко возрастет, ибо вне её нельзя осмыслить многие важные геологические явления».

Список литературы

- Большое трещинное Толбачинское извержение 1975-1976 гг., Камчатка. М.: Наука, 1984. 638 с.
Влодавец В.И. Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 340 с.

Жоголев Л.П., Козлов С.А., Штокаленко М.Б. Концепция самоорганизации и моделирование рудных объектов // Сов. геол., 1991, № П.С. 16-22.

Иванова Т.К., Иванов М.К., Леньчук Д.В. Модели тектоно-магматических структур трапповых полей северо-запада Сибирской платформы // Сов. геол., 1990, № 9. С.28-33.

Кейлис-Борок В.И. Динамика литосферы и прогноз землетрясений. Природа, 1989, № 12. С. 10-18.

Кац Я.Г., Козлов В.В., Полетаев А.И. Ротационные структуры земной коры // Обз. инф. Общ. и регион, геол., геол. морей и океанов, геол. картир. /ВНИИ экон. минерал, сырья и геол.-развед. работ. 1990, № 5. С. 1-41.

Кузнецов О.Л. Нелинейная геофизика // Вопросы нелинейной геофизики. М.: 1981. С.3-14.

Леонов В.Л. О возможности сопоставления вулканической и солнечной активности на примере БТТИ // Вулканология и сейсмология, 1979, № 6. С.62-66.

Леонов В.Л. О некоторых закономерностях развития гидротермальной и вулканической деятельности на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 1991, № 2. С.28-40.

Леонов В.Л., Храмов Н.А. Особенности заключительной стадии Большого трещинного Толбачинского извержения // Бюлл. вулканол. станции, М: Наука, 1979. № 56. С.38-44.

Ли Сы-гуан. Вихревые структуры и другие проблемы, относящиеся к сочетанию геотектонических систем Северо-Западного Китая // Гос. научно-техн. изд-во лит. по геол. и охране недр., М., 1958.

Мелекесцев И.В. Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы её применения // Проблемы глубинного магматизма. М., Наука, 1979. С. 125-155.

Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир., 1990. 344 с,

Пригожин И.Р. От существующего к возникающему. Время и сложность в физических науках. М. 1985.

Пригожин И.Р., Стенгерс И. Порядок их хаоса. М.: Прогресс, 1986. 432 с.

Пушаровский Ю.М. Нелинейная геодинамика // Геотектоника, 1993, № 1. С.3-6.

Пушаровский Ю.М., Новиков В.Л., Савельева А.А., Фадеев В.Е. Неоднородности и конвекция в тектоносфере // Геотектоника, 1990, № 5. С.3-8.

Сачков Ю.В. Вероятностная революция в естествознании // Природа, 1991, № 5. С.3-8.

Спиральные кристаллы // Наука и жизнь, 1989, № 8. С.95.

Чурилин М.А. Спиральные системы геологических структур и некоторые приёмы их выявления // Тектоника Сибири. Т. УШ: Новосибирск, 1980. С.73-80.

Щеглов А.Д. Нелинейная металлогения // Докл. АН СССР, 1983, Т. 271. № 6.

Barker S.E., Malone S.D. Magmatic system Geometry at Mount St.Helens modeled from the stress field associated with post-eruptive earthquakes // J.Geophys. Res.; 1991, 96. P.11883-11894.

Giesecke A. Der magmenaufstieg in rotierenden systemen // Geol. Rdsch, 1986, 75. N3. P.525-534.

Reches Z., Fink J. The mechanism of Intrusion of the Inyo Dike, Long Valley Caldera, California // J. Geophys.Res.; 1988, 93. P.4321-4334.

Ryan M.P. The mechanics and three-dimensional internal structure of active magmatic systems: Kilauea Volcano, Hawaii // J. Geophys. Res.; 1988, 93. P.4213-4248.