

О ВОЗМОЖНОЙ СВЯЗИ ЛУННЫХ ЗАТМЕНИЙ С ЭКСПЛОЗИВНЫМИ ИЗВЕРЖЕНИЯМИ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ

Сенюков С.Л.¹, Шапиро Н.М.², Дрознина С.Я.¹, Дрознин Д.В.¹, Нурждина И.Н.¹

¹ Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г.Петропавловск-Камчатский, ssl@emsd.ru

² Парижский институт физики Земли, г.Париж

Введение

Вулкан Безымянный (55.98° с.ш., 160.59° в.д) с высотой 2869 м над уровнем моря (н.у.м.), находится в самом центре Ключевской группы. В октябре 1955 г. после ~900-летнего покоя начались эксплозии вулканского типа, а 30 марта 1956 г. на вулкане произошло извержение типа «направленный взрыв», уничтожившее вершину и восточный склон. В течение последующих 56-ти лет после пароксизма с периодичностью один два раза в год регистрировались эксплозивные извержения, связанные с ростом экструзивного конуса во вновь образованном кратере [8]. Камчатский филиал (КФ) ФИЦ ЕГС РАН начал проводить мониторинг активности вулканов Камчатки с 2000 г. по трем видам наблюдений: сейсмологические, спутниковые и видео или визуальные. Ежедневная работа по сбору, обработке и представлению информации об активности вулканов позволяет своевременно и обоснованно оценивать их состояние и делать выводы о возможном развитии вулканической активности. Результаты комплексного мониторинга вулканической активности с выставленным цветовым кодом опасности ежедневно публикуются на официальной странице КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>, свидетельство о государственной регистрации № 2014620148 от 20 января 2014 г). Более подробно о методах наблюдений, их развитии и полученных результатах можно ознакомиться в работах [3,6]. С 2000 г. по 1 сентября 2012 г. было зафиксировано двадцать эксплозивных извержений вулкана Безымянный. Извержения проявлялись в виде отдельных эксплозий продолжительностью от 20 минут до трех суток с высотой эруптивных облаков от 6 км до 15 км над уровнем моря и образованием пирокластических потоков [4]. С 13 марта 2000 г. по 1 сентября 2012 г. средний промежуток времени между извержениями составил примерно 240 дней, с минимальным интервалом между извержениями 135 дней и максимальным - 485 дней. После 1 сентября 2012 г. и до декабря 2016 г. эксплозивные извержения не наблюдались. По нашему мнению, четырехлетняя пауза в активности вулкана связана с мощным Трещинным Толбачинским извержением имени 50-летия Института вулканологии и сейсмологии, продолжавшимся с 27 ноября 2012 г. по сентябрь 2013 г. (ТТИ 2012-2013). После паузы на Безымянном произошло еще три эксплозивных извержения: 16.12.2016, 09.03.2017 и 16.06.2017.

На основе данных сейсмологических и спутниковых наблюдений в 2000–2004 гг. были выделены предвестники эксплозивных извержений, определены пороговые значения параметров предшествующих извержениям: количество и энергия локальных вулканических землетрясений, разница между значениями температурной аномалией и фоном. Проведены статистические оценки заблаговременности и достоверности этих предвестников. В 2004–2017 гг. в режиме реального времени сотрудниками лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности были сделаны 14 успешных краткосрочных прогнозов эксплозивных извержений вулкана Безымянный из 16 произошедших при одной ложной тревоге [4, 7].

В соответствии с современными требованиями к прогнозу опасных природных процессов, для вулкана Безымянный разработана методика вероятностного прогноза его извержений на основе шкалы СОУС'09 с использованием энергетических параметров мелкофокусной сейсмичности, локализованной в радиусе 6 км от вершины вулкана, которая была опробована на извержениях 2016-2017 гг. и показала свою работоспособность [2,7].

Заблаговременность прогнозов по сейсмическим и спутниковым данным не превышает 30-40 дней, а средняя по 14-ти прогнозам равна только 5 суток. Поэтому понятны желание и необходимость знать заранее, когда можно ожидать следующее извержение при планировании посещения вулкана с научными или туристическими целями. Возможно, в этом случае может помочь астрономия. Главное достоинство астрономических данных заключается в возможности заблаговременно на много лет вперед вычислить положение планет, используя знания об их орбитах, периодах обращений и т.д., и использовать эти данные для прогноза возможных опасных природных катастроф. Также можно отметить, что такие исследования не требуют больших материальных вложений.

Лунные затмения как заблаговременный предвестник извержений Безымянного

Из всех планет Солнечной системы Луна и Солнце оказывают максимальное гравитационное воздействие на Землю, поэтому рассмотрим их влияние на активность вулкана Безымянный. Периоды максимального воздействия определяются отрезками времени, когда орбита вращения Луны вокруг Земли совпадает с орбитой вращения Земли вокруг Солнца. В такие дни гравитационные воздействия Луны и Солнца суммируются, и именно в эти сутки происходят лунные затмения.

На сайте <https://ru.wikipedia.org/> можно познакомиться с определением лунного затмения и тремя его видами: полное, частное и полутеневое. Лунные затмения происходят только в полнолуние, но не каждое полнолуние сопровождается лунным затмением. Это связано с несовпадением плоскостей лунной и земной орбит. Несовпадение орбит объясняет также существование различных видов затмений. Полное затмение происходит при совпадении лунной и земной орбит, частное – при частичном расхождении орбит, а полутеневое – при еще большем расхождении. Затмения происходят ежегодно, но количество их не постоянно - от 2-х до 4-х лунных затмений в год. При этом последовательность затмений повторяется каждые 18.6 лет. На сайте https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_21st-century_lunar_eclipses были взяты даты лунных затмений для исследуемого периода. На рис.1 представлено сопоставление дат эксплозивных извержений вулкана Безымянный с затмениями луны. При этом затмениям луны (черные кружки) условно присвоены следующие значения: полное – 3, частное – 2 и полутеневое – 1. Для эксплозивных извержений вулкана Безымянный (серые вертикальные линии) были приняты следующие условные обозначения: 3 – высота пепловой эмиссии от 6 до 8 км над уровнем моря, 4 - высота пепловой эмиссии выше 8 км над уровнем моря.

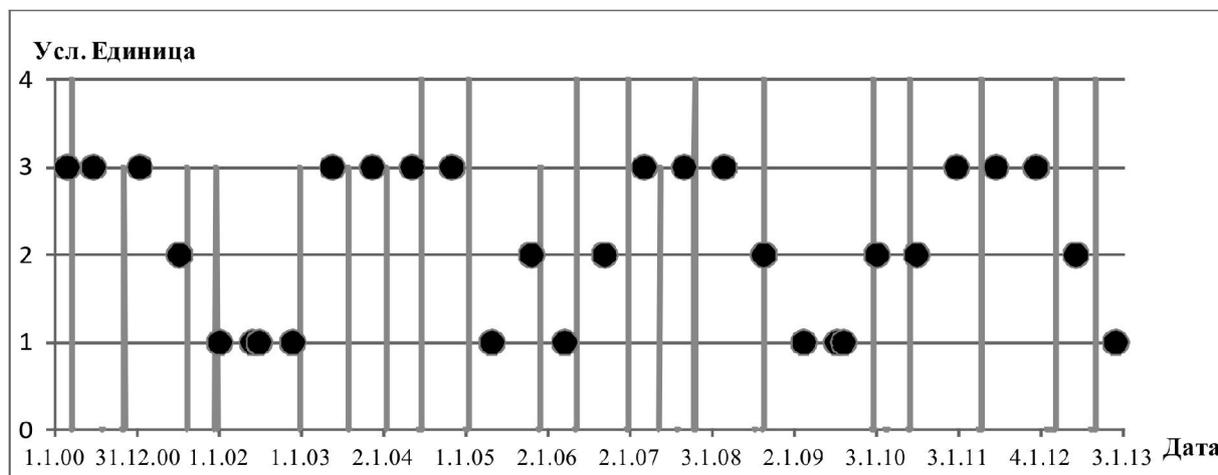


Рис. 1. Гистограмма эксплозивных извержений вулкана Безымянный (серые линии) и лунные затмения (черные кружки) с 01.01.2000 по 31.12.2012.

Результаты сопоставления дат 20-ти извержений вулкана Безымянный и дат лунных затмений для периода 2000-2012 гг., когда вулкан регулярно извергался 1-2 раза в год, приведены в таблице 1. Для анализа сначала из дат произошедших извержений были вычтены даты ближайших лунных затмений, четвертая колонка в таблице 1. Для оценки эффективности и достоверности лунных затмений как предвестника эксплозивных извержений вулкана Безымянный были выбраны временные интервалы (*Тинт.*) удаленности извержений от дат лунных затмений: ± 15 суток, ± 30 суток, ± 60 суток и 90 суток. Если извержение произошло в выбранном интервале, то это считалось «успехом», если нет, то «пропуск». Выбранные интервалы соответствуют окнам длительностью 31, 61, 121 и 241 суток.

В Камчатском филиале Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) [5] для оценки эффективности прогнозов применяется формула А.А. Гусева [1]: $J = N_+ * T / N * Tal$, где J - эффективность, N_+ - количество успешных прогнозов извержений, T - общее время мониторинга, N - общее количество произошедших извержений, Tal - общее время тревоги (суммарная длительность интервалов времени ожиданий). Эффективность J показывает, во сколько раз количество спрогнозированных извержений превышает число попавших в тревожное время случайным образом. Очевидно, что при случайном угадывании эффективность J

равна 1. Формула А.А. Гусева используется для оценки прогнозов, сделанных в режиме реального времени. Если речь идет о ретроспективном анализе, то в таком случае по этой формуле можно оценивать эффективность предвестников.

Таблица 1. Даты лунных затмений и извержений вулкана Безымянный в 2000-2012 гг.

№	даты лунных затмений	тип лунного затмения	продолжительность паузы между затмениями Δ_3 , сутки	даты извержений Безымянного	(Тизв.-Тзатм.)= Δ , сутки	Δ -55, сутки	Δ -60, сутки
1	21.01.2000	полное		13.03.2000	52	2	-8
2	16.07.2000	полное	177	30.10.2000	106	56	46
3	09.01.2001	полное	177		209	154	149
4	05.07.2001	частное	177	06.08.2001	32	-18	-28
5	30.12.2001	полутен.	178	15.12.2001	-15	-65	-75
6	26.05.2002	полутен.	147		213	158	153
7	24.06.2002	полутен.	29		184	129	124
8	20.11.2002	полутен.	149	25.12.2002	35	-15	-25
9	16.05.2003	полное	177	26.06.2003	41	-9	-19
10	09.11.2003	полное	177	13.01.2004	65	15	5
11	04.05.2004	полное	177	18.06.2004	45	-5	-15
12	28.10.2004	полное	177	11.01.2005	75	25	15
13	24.04.2005	полутен.	178		220	165	160
14	17.10.2005	частное	176	30.11.2005	44	-6	-16
15	14.03.2006	полутен.	148	09.05.2006	56	6	-4
16	07.09.2006	частное	177	24.12.2006	108	58	48
17	03.03.2007	полное	177	11.05.2007	69	19	9
18	28.08.2007	полное	178	14.10.2007	47	-3	-13
19	21.02.2008	полное	177		180	125	120
20	16.08.2008	частное	177	19.08.2008	3	-47	-57
21	09.02.2009	полутен.	177		310	255	250
22	07.07.2009	полутен.	148		162	107	102
23	06.08.2009	полутен.	30		132	77	72
24	31.12.2009	частное	147	16.12.2009	-15	-65	-75
25	26.06.2010	частное	177	31.05.2010	-26	-76	-86
26	21.12.2010	полное	178	13.04.2011	113	63	53
27	15.06.2011	полное	176		267	212	207
28	10.12.2011	полное	178	08.03.2012	89	39	29
29	04.06.2012	частное	177	01.09.2012	89	39	29

В таблице 2 (вторая колонка) приведено количество «успешных» событий для выбранных интервалов времени и оценки эффективности лунного затмения как предвестника по формуле А.А. Гусева. В расчетах использованы следующие общие параметры: общее время мониторинга $T=4607$ суток, общее количество извержений $N=20$, общее количество лунных затмений 29 для расчета $Tal=29*(T_{инт}+1)*2$.

Таблица 2. Количество извержений вулкана Безымянный в зависимости от удаленности даты ближайшего лунного затмения и интервала времени.

$T_{инт}$, сутки	N_+	Tal , сутки	J
±15	3	899	0.8
±30	4	1769	0.5
±60	11	3509	0.7
±90	18	5249	0.8

Все эффективности в таблице 2 меньше 1, таким образом, эффективность лунного затмения как предвестника получилась хуже случайного угадывания. Но даты лунных затмений известны, поэтому можно попробовать ввести некоторый постоянный сдвиг во времени, и оценить эффективность предвестника в зависимости от величины сдвига. В таблице 3 приведены сдвиги, при которых получилось наибольшее количество «успешных» случаев и оценок их эффективности. Можно отметить существенное увеличение эффективности лунного затмения как предвестника эксплозивных извержений вулкана Безымянный, например, для окна «±15» эффективность равна 2.1, для окна «±30» - 1.7. Напомним, что в книге [5] максимальное значение эффективности для прогнозов землетрясений по разным методам для 1998-2009 гг. равно 1.7. Все эти результаты свидетельствуют о статистически значимой связи между лунными затмениями и эксплозивными извержениями вулкана Безымянный при условии сдвига лунных затмений на 55-60 суток вперед для окон «±15» и «±30».

Таблица 3. Эффективность лунного затмения как предвестника эксплозивных извержений вулкана Безымянный для максимальных значений «успешных» случаев при временных сдвигах 55 и 60 суток.

Сдвиг, сутки	$T_{инт}$, сутки	N_+	$T_{ал}$, сутки	$T_{ал}/T$	J	R
55	±15	8	899	0.2	2.1	28%
60	±30	13	1769	0.4	1.7	45%
60	±60	17	3509	0.8	1.1	59%

В работе [4] для оценки достоверности прогнозов предлагается использовать формулу, которая учитывает успешные прогнозы, ложные тревоги и пропущенные извержения:

$R = N_+ / (N_+ + N_{л}) * 100\%$, где R - достоверность, N_+ - количество успешных прогнозов, N - количество извержений, $N_{л}$ - количество ложных прогнозов. С помощью этой формулы можно также оценивать достоверность предвестника. В этом случае в знаменателе будет всегда 29 ($N=20$ и $N_{л}=9$), а в числителе количество «успешных случаев». Полученные оценки приведены в последней колонке таблицы 3. Возможным недостатком этой формулы является отсутствие информации об отношении $T_{ал}/T$, что может привести к 100% достоверности, если длительность окна превышает продолжительность пауз между извержениями. Но, тем не менее, для случаев, когда $T_{ал}/T < 0.5$ эта оценка вполне уместна. Она позволяет выбрать из 3-х окон в таблице 3 окно «±30» как наиболее оптимальное. Оно имеет достаточно значимую эффективность $J=1.7$ и неплохую достоверность $R=45\%$.

Возможное объяснение связи

Выше была обнаружена статистически значимая связь между лунными затмениями и эксплозивными извержениями вулкана Безымянный при условии сдвига лунных затмений на 55-60 суток вперед. Возможное объяснение этого сдвига можно предложить, используя результаты, полученные недавно и опубликованные в работе [9]. В этой работе исследуется пространственно-временное распределение длиннопериодных землетрясений в районе Ключевской группы вулканов в 2011-2012 гг. Показано, что источники длиннопериодных событий можно разделить на две группы: приповерхностные события, расположенные непосредственно под активными вулканами Ключевской, Безымянный и Плоский Толбачик и события, расположенные на глубине 25-30 км под вулканом Ключевской. Также установлено, что в 2011-2012 гг. три раза наблюдалось увеличение активности на глубине 25-30 км под вулканом Ключевской. Два наиболее сильных всплеска активности из трех совпали по времени с лунными затмениями и предшествовали на два месяца эксплозивным извержениям вулкана Безымянный 08.03.2012 и 01.09.2012. При этом рассматривается возможная миграция длиннопериодной активности с глубины 25-30 км под Ключевским к приповерхностным магматическим очагам вулканов Ключевской, Безымянный и Плоский Толбачик в виде «переноса давления в жидкости» («transfer of the fluid pressure»).

Эксплозивные извержения вулкана Безымянный в 2016-2017 гг. и прогноз

ТТИ 2012-2013 нарушило режим деятельности Безымянного, и его эруптивная активность возобновилась только в декабре 2016 г. В таблице 4 приведены даты лунных затмений, периоды ожидания возможных эксплозивных извержений вулкана Безымянный для окна «±30» со сдвигом 60 суток и даты произошедших извержений. Для эксплозивного извержения 15.12.2016 можно отметить «успешное» попадание. Следующее извержение 09.03.2017 опередило возможное прогнозное время на четверо суток, а для извержения 16.06.2017 наблюдается пропуск.

Таблица 4. Даты лунных затмений и прогноз времени эксплозивных извержений вулкана Безымянный.

дата лунного затмения	тип лунного затмения	время возможного извержения	Δ_3 , сутки	дата извержения Безымянного	J	R
16.09.2016	полутен.	16.10-15.12.2016	177	15.12.2016		
11.02.2017	полутен.	13.03-12.05.2017	148	09.03.2017		
		пропуск		16.06.2017		
07.08.2017	частное	06.09-05.11.2017	177		1.7	45%
31.01.2018	полное	02.03-01.05.2018	177		1.7	45%
28.07.2018	полное	27.08.-26.10.2018	178		1.7	45%
21.01.2019	полное	20.02-21.04.2019	177		1.7	45%
17.07.2019	частное	16.08-15.10.2019	177		1.7	45%

Заключение

Для периода времени 2000-2012 гг. проведено сопоставление дат лунных затмений с извержениями вулкана Безымянный. Установлено, что только 4 извержения из 20 (20%) произошли в пределах 30 дней от даты лунного затмения. Но если даты лунных затмений сдвинуть на 60 дней вперед, то количество таких извержений увеличивается до 13 из 20 (65%). При этом оценка эффективности выделенного предвестника составила 1.7 по формуле А.А Гусева, что свидетельствует о ее статистической значимости. Одним из объяснений этой возможной связи может быть активизация магматического очага на глубине 25-30 км под вулканом Ключевской под гравитационным воздействием Солнца и Луны во время лунного затмения с последующей 2-х месячной миграцией длиннопериодных вулканических землетрясений к приповерхностному очагу под вулканом Безымянный, накануне его эксплозивных извержений.

Список литературы

1. Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С 109-119.
2. Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. № 3. С. 45–59.
3. Сеньюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 96–108.
4. Сеньюков С.Л. Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке // Saarbrücken: LAP LAMBERTS Academic Publishing, 2013. 144 с.
5. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
6. Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Захарченко Н.З., Кугаенко Ю.А., Мельников Д.В., Мишаткин В.Н., Муравьев Я.Д., Нуржидина И.Н., Рыбин А.В., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Сероветников С.С., Титков Н.Н., Фирстов П.П., Яцук В.В. Развитие системы комплексного инструментального мониторинга вулканов Дальневосточного региона // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 4. С. 40–54.
7. Чебров В.Н., Фирстов П.П., Сеньюков С.Л., Близначев В.Е., Воропаев П.В., Гарбузова В.Т., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Кугаенко Ю.А., Назарова З.А., Нуржидина И.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К., Сероветников С.С., Соболевская О.В. Активность вулкана Безымянный (Камчатка) в 2016-2017 гг // Вестник КРАУНЦ. НАУКИ О ЗЕМЛЕ. 2017. № 1 (33). С. 5-11.
8. Girina O.A. Chronology of Bezumianny Volcano activity, 1956-2010 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 22–41.
9. Shapiro N.M., Droznin D.V., Droznina S.Ya., Senyukov S.L., Gusev A.A. and Gordeev E.I. Deep and shallow long-period volcanic seismicity linked by fluid-pressure transfer // Nature Geoscience, 2017, 10(6), P.442 – 445, DOI: 10.1038/NGeo2952.