

УДК 550.2: 521.937 + 550.340.6

## ПРОГНОЗ СИЛЬНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ ТИХООКЕАНСКОГО ТЕКТОНИЧЕСКОГО ПОЯСА НА БЛИЖАЙШИЕ 20 ЛЕТ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ

© 2008 В.А. Широков<sup>1</sup>, Ю.К. Серафимова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: shirokov@kscnet.ru

<sup>2</sup>Камчатский филиал Геофизической службы РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: yulka@emsd.ru

На основе использования данных наблюдений XVIII–XXI веков впервые проведен анализ совместного влияния 19-летнего лунного прилива и 22-летнего Хейловского цикла солнечной активности на возникновение сильных вулканических извержений Тихоокеанского тектонического пояса. Используя разработанный авторами метод фазовых траекторий, для восьми регионов Тихоокеанского пояса дан прогноз возникновения извержений на ближайшие 20 лет. Сделаны оценки эффективности прогнозов по ретроспективным данным.

*Ключевые слова:* вулкан, извержение, прогноз, солнечная активность, лунный прилив.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что литосфера может быть представлена как открытая нелинейная неравновесная система, активно обменивающаяся с другими геоболочками веществом и энергией (Садовский и др., 1987). В геодинамических системах могут длительно поддерживаться вынужденные колебания, синхронизированные периодическими и квазипериодическими космическими воздействиями планетарного масштаба. В одной из наиболее полных обзорных работ (Кропоткин, 1970), посвященной выяснению роли космических факторов в геотектонике, делается вывод о том, что тектонические процессы представляют собой результат действия двух более или менее равноценных факторов – внутренней эволюции планеты и космических воздействий. В работе (Широков, 1977) на основе литературного обзора сделана попытка в схематическом виде синтезировать представления многочисленных исследователей о роли космических факторов в современном тектоническом процессе и механизме их связи с сейсмическим и вулканическим процессами. Анализ этой связи дает возможность осуществлять долгосрочные прогнозы сильных землетрясений и вулканических извержений (Абдурахманов и др., 1971, 1976; Гусев, Петухин, 1997; Лама-

кин, 1966; Серафимова, 2006; Сытинский, 1982, 1989; Широков, 1973, 1977, 1978, 1985, 2001, 2007 и др.).

Изучение причин возникновения сильных, в том числе пароксизмальных, вулканических извержений и разработка методов их долгосрочного прогноза относятся к числу главных направлений исследований в вулканологии (Пийп, 1956; Токарев, 1977; Кузьмин, Широков, 1990; Федотов, 2006). Долгосрочный прогноз извержений основан на оценке вероятности сильных извержений в конкретные интервалы времени на десятки лет вперед (Токарев, 1977, 1985). Вулканическое извержение определяется обычно как процесс поступления магмы и ее производных на земную поверхность. Количественной мерой масштаба извержений являются масса или объем  $V$  изверженных вулканических продуктов (Гущенко, 1979), а также часто используемый параметр VEI - volcanic explosivity index (Simkin, Siebert, 1994).

К настоящему времени при разработке методов долгосрочного прогноза извержений наметились два различающихся между собой подхода. Первый основан на статистическом анализе временных рядов сильных извержений вулканов в прошлом (Пийп, 1956; Токарев, 1977, 1985 и др.). Второй – на изучении связи извержений с различными общепланетарными процес-

сами и космическими воздействиями, такими, как земные приливы, солнечная активность, неравномерность вращения Земли, перемещения географических полюсов и др. (Абдурахманов и др., 1976; Широков, 1973, 1977, 1978, 2007, 2008а, 2008б; Hamilton, 1973 и др.). Рассмотрим оба этих подхода.

### ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА АНАЛИЗЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПРОШЛЫХ СИЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

В рамках этого подхода можно рассматривать два варианта. В первом интересующие нас сильные извержения (выше некоторого порогового уровня) рассматриваются как пуассоновский поток случайных событий. При этом для оценки вероятности возникновения очередного извержения на интервале длительностью  $\Delta t$  достаточно знать один параметр – средний интервал  $T_{\text{сред}}$  между событиями (или их кластерами) для всего каталога. Вероятность  $p$  одного или более событий на интервале  $\Delta t$  оценивается по стандартной формуле  $p = 1 - \exp(-\Delta t/T_{\text{сред}})$  (Большев, Смирнов, 1965).

Во втором варианте рассматриваются такие извержения отдельных вулканов (или кластеры извержений), которые происходят квазипериодично, в среднем с периодом  $T$  и среднеквадратическим отклонением от этого значения  $\alpha$  (Пийп, 1956; Токарев, 1977, 1985). В соответствии с предложенной в этих работах методикой, при нормальном распределении интервалов между последовательными по времени извержениями ожидаемое время следующего извержения можно определить по формулам

$$t_1 = t_n + T - \alpha \quad \text{и} \quad t_2 = t_n + T + \alpha,$$

где  $t_1$ ,  $t_2$  – начало и конец наиболее вероятного временного интервала возникновения очередного извержения вулкана,  $t_n$  – момент возникновения последнего извержения. При нормальном распределении величин  $T$  в прогнозируемый интервал длительностью  $2\alpha$  будет попадать в среднем 66.7% извержений. Если, например,  $2\alpha = 1/3 T$ , то доля тревожного времени от всего периода наблюдений в среднем составит 1/3, т.е. 33.3%. Отношение доли «спрогнозированных», по ретроспективным данным, извержений к доле тревожного времени будет определять эффективность  $I$  долгосрочного прогноза в соответствии с ее определением (Гусев, 1974). В данном случае  $I = 66.67\%/33.3\% = 2$ . Поскольку для случайного прогнозирования эффективность в пределе равна единице, то рассчитываемая величина  $I$  показывает, во сколько раз предложенная методика прогноза лучше. В нашем

примере эффективность прогноза будет в 2 раза больше. Описанный метод прогноза критичен к пропускам извержений. Даже пропуск одного события, или ошибочное включение в каталог сильных событий слабого, могут существенно отразиться, особенно при малых объемах выборки, на точности определений параметров  $T$  и  $\alpha$ , что приведет к уменьшению эффективности прогнозов. Этот недостаток частично нивелируется в рамках подхода, рассматриваемого далее.

### ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА ИЗУЧЕНИИ СВЯЗИ ИЗВЕРЖЕНИЙ С КОСМИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

Данные методы могут быть основаны на изучении связи извержений с одним (первый вариант) или с несколькими космическими факторами, которые анализируются совместно (второй вариант).

В рамках первого варианта предложены способы долгосрочного прогноза извержений для отдельных вулканов, регионов или мира, основанные на выявлении статистически значимой связи сильных событий с 11-летней цикличностью солнечной активности и 19-летним лунным приливом. На основе этого подхода, при использовании метода наложения эпох, сделаны прогнозы для извержений вулканов мира, Гавайских островов, Камчатского региона и отдельных вулканов Камчатки – Карымского и Ключевского (Абдурахманов и др., 1976; Широков, 1977, 1978, 1985 и др.). Например, для приливного цикла  $T = 18.6$  г. выделены четыре «активные фазы» умеренных и сильных извержений вулканов Камчатки (Широков, 1985), для каждой из которых рассчитана вероятность возникновения извержений. Она оказалась в среднем на порядок больше, чем вне «активных фаз». Реализация подобной схемы для активных вулканов Камчатки оказалась обнадеживающей. В работе (Жаринов, Демянчук, 2008) показано, что умеренные и сильные извержения вулкана Ключевского за последние 20 лет происходили только в указанных выше четырех «активных фазах».

В рамках второго варианта в работе (Широков, Серафимова, 2006) впервые исследовалось совместное влияние 19-летнего лунного прилива и 22-летнего солнечного цикла на возникновение сильных землетрясений. Выявлена статистически значимая связь землетрясений XVIII-XXI веков с этими космическими ритмами для четырех регионов северо-западной части Тихоокеанского тектонического пояса – Камчатки, Курильских островов, Япо-

нии и Алеутских островов. На этой основе разработан метод фазовых траекторий (МФТ), позволяющий рассчитывать «опасные» временные интервалы ожидаемых сильных событий в соответствующих регионах и оценивать эффективность  $I$  таких прогнозов. Этот подход был реализован затем для других регионов Тихоокеанского пояса – Филиппинские острова, остров Новая Гвинея, острова Новые Гебриды (Широков, Серафимова, 2007). Оказалось, что в этом случае эффективность долгосрочных прогнозов в ~2-4 раза выше, чем эффективность прогнозов в рамках первого варианта.

С точки зрения долгосрочного прогноза наибольший интерес представляют 11-летний, 22-летний и вековой ритмы солнечной активности, а также земной прилив с периодом 18.6 г., вызванный вращением узлов орбиты Луны. Оказалось, что для решения задач долгосрочного прогноза важную роль играет 22-летний цикл солнечной активности (Широков, Серафимова, 2006, 2007), открытый Хейлом в 1913 г., и являющийся магнитной характеристикой активности Солнца. При переходе от одного 11-летнего цикла к другому полярность магнитных характеристик ведущих групп солнечных пятен в обоих полушариях Солнца меняет знак на обратный (Витинский, 1973).

В данной статье сделана попытка реализации метода долгосрочного прогноза в рамках второго способа на примере анализа каталогов сильных извержений, происходивших в различных регионах Тихоокеанского вулканического пояса. При этом используется метод фазовых траекторий (МФТ), примененный ранее авторами для сильных землетрясений.

### МЕТОД ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ

Описание метода МФТ, разработанного нами для совместного анализа связи 19-летнего прилива и 22-летнего солнечного цикла Хейла с сильными событиями, сделаем на примере землетрясений.

1. Выбирается сейсмоактивный регион (возьмем в данном случае Камчатку), для которого составляется представительный каталог землетрясений с магнитудами  $M \geq M_0$  и для каждого события рассчитываются значение фазы  $\Phi_1$  лунного прилива и фазы  $\Phi_2$  цикла Хейла.

2. Обычно применяемый при анализе временных рядов метод наложения эпох нами реализован для двумерного варианта. В совмещенных двумерных фазовых окнах ( $\Phi_1, \Phi_2$ ) для каждого цикла Хейла строятся фазовые траектории (рис. 1) в виде отрезков прямых, соединяющих начало и конец Хейловских циклов, причем траектории каждого цикла Хейла приписыва-

ется соответствующий номер этого цикла. За нулевые фазы циклов Хейла нами принимаются эпохи начала четных 11-летних циклов, нумерация которых соответствует общепринятой цюрихской классификации (Витинский, 1973). Хейловским циклам приписываются номера четных 11-летних циклов с добавлением английской буквы Н (Hale). Например, текущий цикл Хейла, начавшийся в декабре 2007 г., (<http://www.izmiran.ru/services/saf>) обозначается как  $H24$ .

3. В общем окне ( $\Phi_1, \Phi_2$ ) анализируется распределение по фазовым координатам землетрясений, обозначенных в виде кружков (рис. 1), и находится такой минимальный магнитудный порог  $M_{пор}$ , начиная с которого можно выделить в площади прямоугольников статистически значимые кластеры, в которые должно входить подавляющее число землетрясений с  $M \geq M_{пор}$ . Для событий такой силы и дается затем долгосрочный прогноз, причем эффективность прогноза  $I$  для землетрясений с  $M \geq M_{пор}$  должна быть статистически значимой ( $I \geq 2.0$ ) и больше, чем для любой другой пороговой магнитуды.

Для камчатских землетрясений пороговая магнитуда  $M_{пор} = 7.6$ . На рис. 1 показано, что события с  $M = 7.5$  уже не соответствуют нашей схеме, так как статистика для событий с  $M \geq 7.5$

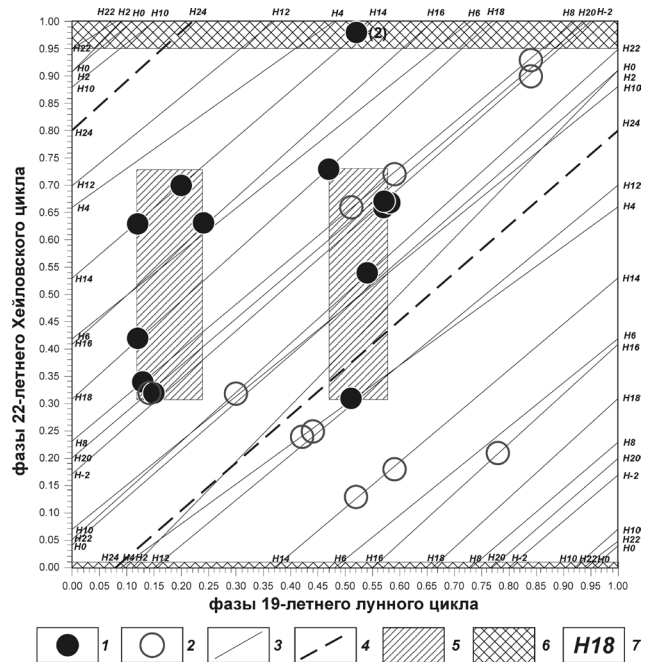


Рис. 1. Распределение камчатских землетрясений в зависимости от фаз лунного и Хейловского циклов за период 1737 – 2007 гг.: 1 – события с магнитудой  $M \geq M_{пор} = 7.6$ ; 2 – события с  $M_0 = 7.5$ ; 3 – фазовые траектории; 4 – траектория предполагаемого Хейловского цикла  $H24$ ; 5 – «опасные» фазовые окна, выделенные для событий с  $M \geq M_{пор} = 7.6$ ; 6 – «опасный» Хейловский «коридор»; 7 – нумерация Хейловских циклов. Пояснения в тексте.

не является значимой.

Под эффективностью  $I$ , согласно определению (Гусев, 1974), понимается отношение доли событий  $N_p$ , попавших в выделенные «опасные окна», относительно общего числа событий  $N$  с магнитудой  $M \geq M_{пор}$ , к доле площади «опасных окон»  $S_{опас}$  относительно общей площади фазового окна, принимаемой за единицу. Таким образом,  $I = (N_p/N)/S_{опас}$ . Поясним, что величина  $I = 2.0$  соответствует прогнозу с уровнем доверия 0.95,  $I = 3.0$  — с уровнем доверия 0.99 и т.д. Долгосрочные прогнозы возникновения сильных землетрясений составлены нами только для тех регионов, где величина  $I \geq 2.0$ , что соответствует уровню доверия 0.95 и более (Широков, Серафимова, 2007).

4. «Опасные» временные интервалы для будущих событий текущего цикла Хейла  $H24$  определяются на основе расчета времени пере-

сечений траектории текущего цикла Хейла с выделенными «опасными» окнами. Длительность текущего цикла  $H24$  принята нами равной 21.3 года, что соответствует среднему значению продолжительности Хейловских циклов с начала прошлого века. Отклонения (до 3%) от среднего значения могут незначительно сместить «опасные» временные интервалы лишь во второй половине цикла  $H24$ . При выделении кластеров в работе (Широков, Серафимова, 2006) выявлена статистически значимая «опасная» фаза цикла Хейла, имеющая планетарную природу. Она приурочена к эпохам минимумов 22-летних циклов и имеет длительность около полутора лет. Этот Хейловский «коридор», именуемый также «опасным» фазовым окном, в различных регионах может иметь разную ширину, но не должен превышать 15-месячного интервала. Остальные «опасные» окна определяются местоположением

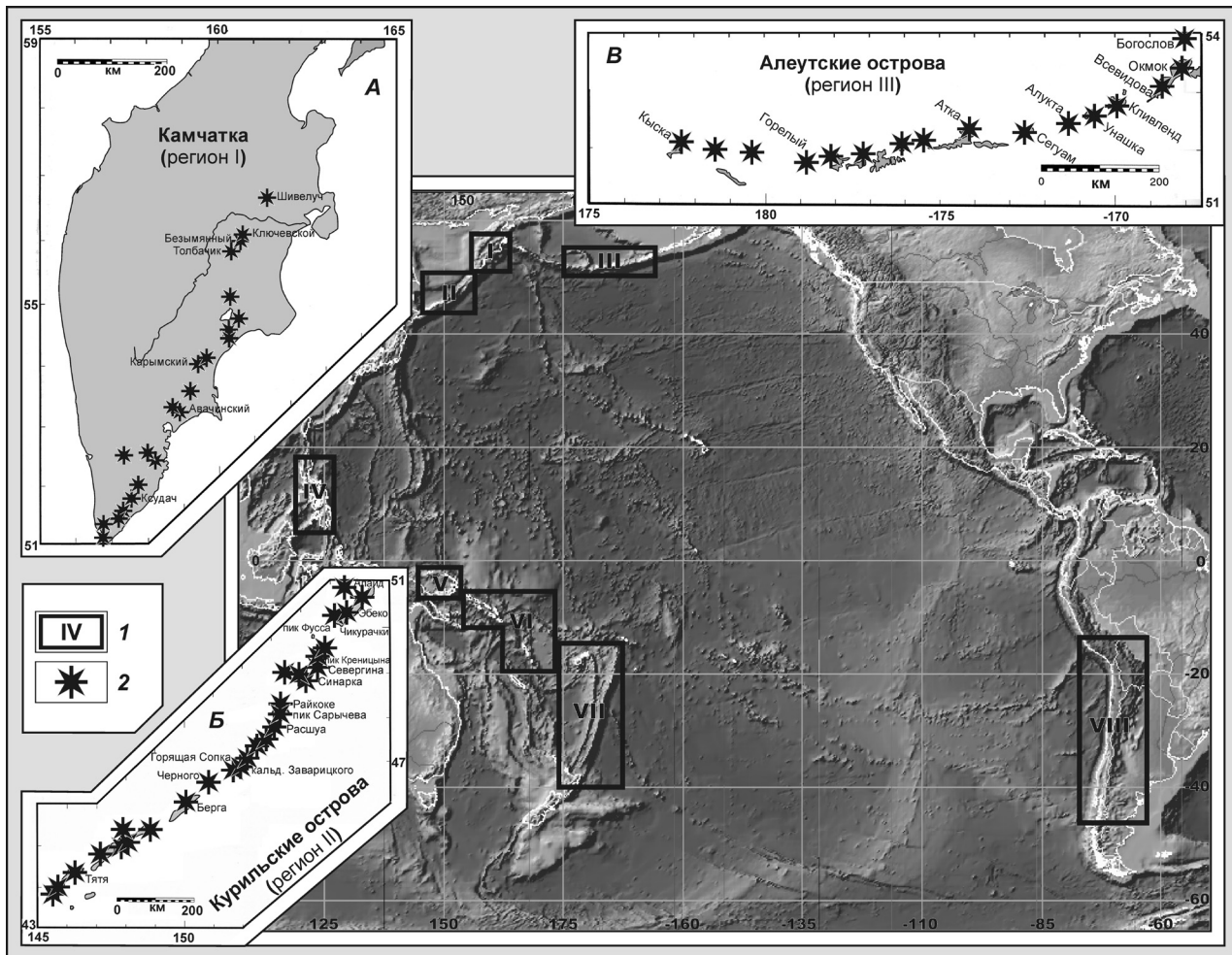


Рис. 2. Схема расположения исследуемых регионов Тихоокеанского тектонического пояса, в пределах которых произвелись выборки вулканических извержений. I — контуры регионов с указанием их номеров: I — Камчатка, II — Курильские острова, III — Алеутские острова, IV — Филиппинские острова, V — о. Новая Гвинея, VI — о-ва Новые Гебриды — Соломоновы о-ва, VII — Новая Зеландия — о-ва Тонга, VIII — Южная Америка; 2 — вулканы и кальдеры. На врезках: А — регион I (Камчатка), Б — регион II (Курильские острова), В — регион III (Алеутские острова). Использовано изображение рельефа из программы WinETDB (Expert Tsunami Data Base Pacific) лаборатории цунами Института вычислительной техники и математической геофизики СО РАН.

соответствующего кластера в фазовом окне и имеют региональную природу.

Поскольку реальная длительность текущего цикла Хейла может отличаться (примерно до одного года) от значения 21.3 г., точность привязки «опасной» фазы конца цикла  $H_{24}$  невелика. Чтобы избежать этой ошибки, целесообразно долгосрочные прогнозы сильных событий давать только на ближайшие 20 лет, т.е. за 1-2 года до срока вероятного окончания текущего цикла  $H_{24}$ , что и сделано в данной работе.

По нашим представлениям сильные землетрясения и вулканические извержения взаимосвязаны (Широков, 1977, 1978, 2007 и др.), в связи с чем представляется целесообразным реализовать метод МФТ для решения задачи долгосрочного прогноза наиболее сильных вулканических извержений. В настоящей работе изложенный выше подход применяется для извержений восьми регионов Тихоокеанского пояса (рис. 2).

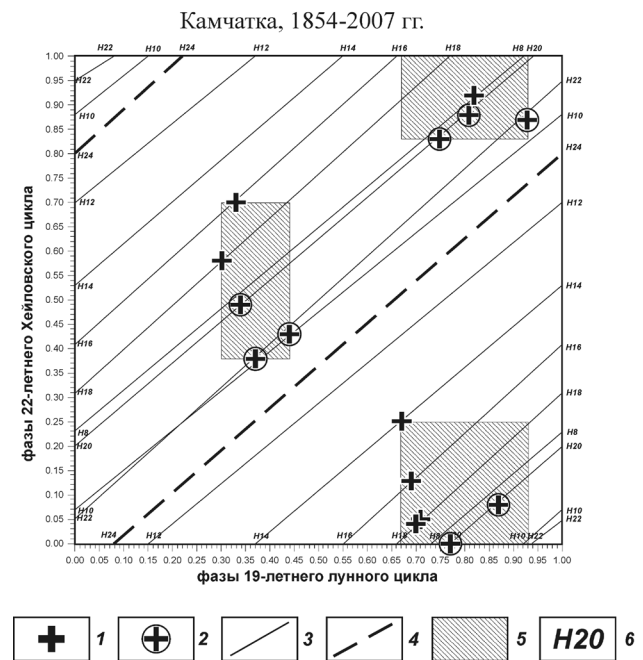
### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для семи регионов (II–VIII, рис. 2) использовались данные об извержениях масштаба  $VEI = 3$  и более до 1993 года включительно по классификации (Simkin, Siebert, 1994).

Для Камчатки (рис. 2, врезка А) в нашем распоряжении имеются достаточно подробные сведения и об относительно более слабых событиях. Поэтому за основу взят не параметр  $VEI$ , а оценки объемов  $V$  изверженных продуктов. Для периода со второй половины XIX в до 1961 г. точность оценок массы и объема изверженных вулканических продуктов во время извержений различных вулканов в разные годы по вполне понятным причинам была неодинакова. С начала 60-х годов прошлого века, после организации на Камчатке в 1962 г. Института вулканологии, в связи с комплексным характером и большей детальностью проводимых исследований, точность определений основных параметров извержений существенно возросла. В связи с этим для периода до 1961 г. включительно данные об объемах  $V$  извержений основывались на общепринятых оценках, приведенных в работе (Гущенко, 1979). Для этого периода было важно, с одной стороны, не пропустить сильные события, с другой стороны, не отнести к сильным относительно более слабые извержения, поэтому нижний порог для сильных извержений выбран равным  $0.3 \text{ км}^3$ . Для периода 1962–2007 гг. оценки  $V$  являются более надежными. Нижний порог сильных извержений выбран равным  $0.10 \text{ км}^3$  при пересчете объема вулканических продуктов на основе определений массы изверженных пород для выбранной плотности  $1.2 \text{ г/см}^3$  (Федотов, Жаринов, 2007). Максимальная длительность

извержений принималась равной 12 месяцам. За период 1962–2007 гг. отмечено восемь извержений указанного масштаба. Каталог всех извержений представлен в табл. 1 с указанием дат их главных пароксизмов для расчета фазовых координат ( $\Phi_1, \Phi_2$ ) и соответствующих ссылок, использовавшихся для расчетов величин  $V$ .

На рис. 3 в качестве примера использования метода МФТ приводится распределение извержений Камчатки. Показано, что на фазовой плоскости выделяются два компактных кластера, к которым приурочены все 15 извержений. Гипотеза о случайном распределении событий отвергается с уровнем доверия более 0.99 (Большев, Смирнов, 1965). Фазовая траектория для текущего цикла Хейла  $H_{24}$  обозначена двумя прерывистыми отрезками прямых на временном интервале с декабря 2007 по 2029 гг. Расчеты сделаны в предположении, что длительность текущего цикла Хейла составит 21.3 года. Видно, что траектория текущего цикла Хейла с рассчитанными для извержений «опасными» фазовыми окнами не пересекается. Таким образом, в текущем цикле Хейла на Камчатке сильные извержения с  $V \geq 0.3 \text{ км}^3$  не ожидаются (табл. 2). Так как статистика для более слабых событий с  $V = 0.10\text{--}0.2 \text{ км}^3$  охватывает примерно последние 50 лет и невелика, вопрос о нижнем пороге



**Рис. 3.** Распределение вулканических извержений Камчатки (дат главных пароксизмов) в зависимости от фаз лунного и Хейловского циклов. 1 – события с объемом изверженного материала  $V \geq 0.3 \text{ км}^3$  (до 1961 года); 2 – события с объемом изверженного материала  $V \geq 0.10 \text{ км}^3$  (с 1962 года); 3 – фазовые траектории; 4 – траектория предполагаемого Хейловского цикла  $H_{24}$ ; 5 – «опасные» фазовые окна; 6 – нумерация Хейловских циклов.

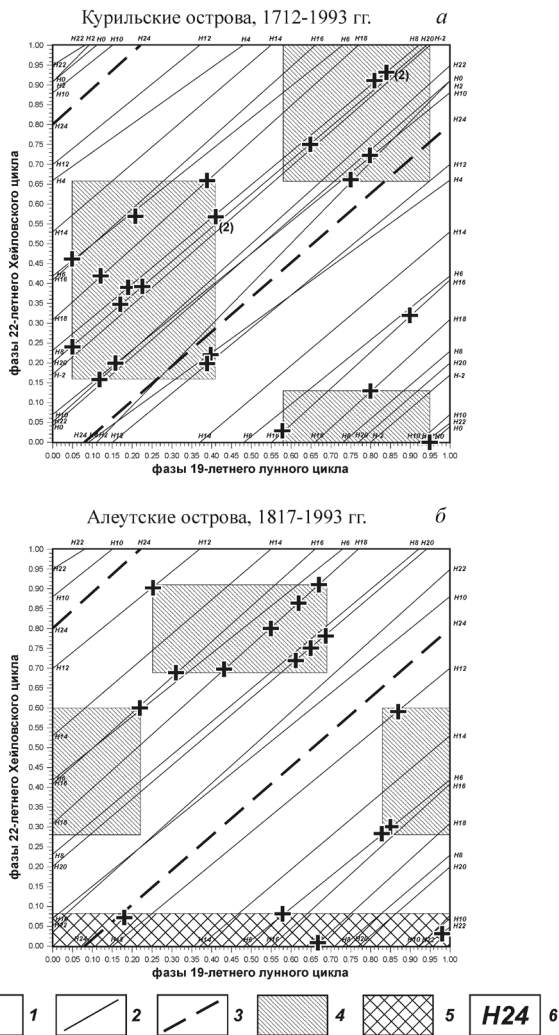
ПРОГНОЗ СИЛЬНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ

Таблица 1. Каталог вулканических извержений Камчатки за период 1854-2007 гг.

№	Дата, гтггммдд	Вулкан	$V$ , км <sup>3</sup>	Фаза лунного цикла (18.6 года), $\Phi_1$	Фаза Хейлового цикла (22 года), $\Phi_2$	Примечания, ссылки
1	18540218	Шивелуч	2	0.82	0.92	-
2	19070328	Ксудач	3	0.67	0.25	-
3	19260328	Авачинский	~ 0.4	0.69	0.13	-
4	19380207	Ключевской	0.4	0.33	0.70	-
5	19450101	Ключевской	0.6	0.70	0.04	-
6	19450225	Авачинский	~ 0.3	0.71	0.05	-
7	19560330	Безымянный	3.1	0.30	0.58	-
8	19641112	Шивелуч	1.5	0.77	0.00	Центральное извержение (Гущенко, 1979)
9	19661005	Ключевской	0.2	0.87	0.08	Побочное извержение (Гущенко, 1979)
10	19750706	Плоский Толбачик	3	0.34	0.49	Побочное трещинное извержение (Большое..., 1984)
11	19830308	Ключевской	0.10	0.75	0.83	Побочное извержение (Федотов, Жаринов, 2007)
12	19840406	Ключевской	0.15	0.81	0.88	Центральное извержение (Федотов, Жаринов, 2007)
13	19941002	Ключевской	0.15	0.37	0.38	Центральное извержение (Федотов, Жаринов, 2007)
14	19960101	Карымский	0.10	0.44	0.43	Центральное извержение и побочное в кальдере Академии наук (Федотов, 1997)
15	20050227	Шивелуч	0.2	0.93	0.87	Центральное извержение (Гирина и др., 2006)

Таблица 2. Оценка эффективности I и долгосрочный прогноз извержений вулканов по методу фазовых траекторий для отдельных регионов Тихоокеанского тектонического пояса

№	Регион	Характеристика исходных данных			Число «спрогнозированных» извержений, $N_1$	Площадь «опасных» окон, $S_{\text{опас}}$	Эффективность прогноза, $I = (N_1/N)/S_{\text{опас}}$	Опасные интервалы на период до 2027 г.
		VEI или $V$ , км <sup>3</sup>	Период наблюдений, годы	Количество извержений, $N$				
I	Камчатка	0.10-3.1, км <sup>3</sup>	1854-2007	15	15	0.17	5.9	Извержения не ожидаются
II	Курильские о-ва	≥ 3	1712-1993	24	23	0.37	2.6	III.2011 – III.2014 X.2021 – IV.2024
III	Алеутские о-ва	≥ 3	1817-1993	17	17	0.33	3.0	XII.2007 – VIII.2009
IV	Филиппинские о-ва	≥ 3	1800-1993	20	17	0.32	2.7	X.2008 – XII.2009 VIII.2022 – II.2024 V.2026 – I.2027
V+VI	о. Новая Гвинея и регион VI	≥ 3	1864-1993	50	47	0.46	2.1	X.2014 – XII.2017
VI	о-ва Новые Гебриды и Соломоновы о-ва	≥ 3	1864-1993	26	25	0.27	3.6	Извержения не ожидаются
VII	Новая Зеландия - о-ва Тонга	≥ 3	1814-1993	19	18	0.27	3.5	V.2014 – XI.2016
VIII	Южная Америка	≥ 3	1802-1993	28	26	0.31	3.0	IV.2010 – XII.2012 XII.2018 – I.2023



**Рис. 4.** Распределение вулканических извержений Курильских (а) и Алеутских островов (б) в зависимости от фаз лунного и Хейловского циклов. 1 – события с  $VEI \geq 3$ ; 2 – фазовые траектории; 3 – траектория предполагаемого Хейловского цикла  $H_{24}$ ; 4 – «опасные» фазовые окна; 5 – «опасный» Хейловский «коридор»; б – нумерация Хейловских циклов. Пояснения в тексте.

И прогнозируемых извержений пока остается открытым.

Аналогичный анализ проведен еще для семи регионов Тихоокеанского тектонического пояса (рис. 2).

Рассмотрим более подробно соседние с Камчаткой регионы Курильских и Алеутских островов (рис. 4).

Поданным (Simkin, Siebert, 1994) в XVIII–XX вв. на Курильских островах (рис. 2, врезка Б) произошло 26 извержений с  $VEI \geq 3$ . Но по данным (Гущенко, 1979) два из них охарактеризованы как слабые, поэтому они не принимались в расчет. На рис. 4а показано, что из 24 извержений 23 приурочены к двум кластерам («опасным» фазовым окнам). Траектория текущего цикла  $H_{24}$  дважды пересекает «опасные» фазовые окна, что

соответствует периодам март 2011–март 2014 гг. и октябрь 2021–апрель 2024 гг. (табл. 2). В остальное время вероятность извержений более чем на порядок меньше.

Для Алеутских островов (рис. 2, врезка В) извержения с  $VEI \geq 3$  выбраны к западу от вулкана Богослов (статистика для остальных извержений оказалась незначимой). Извержения на фазовой плоскости расположены в трех «опасных» фазовых окнах, одно из которых является Хейловским «коридором», приуроченным к эпохам минимумов Хейловских циклов (рис. 4б). Только этот «коридор» пересекается траекторией текущего цикла  $H_{24}$  в период декабрь 2007–август 2009 гг. (табл. 2). В остальное время извержения с  $VEI \geq 3$  маловероятны.

Исходные данные и результаты проведенного анализа для остальных регионов представлены в табл. 2. Для о. Новая Гвинея (регион V) возникли затруднения при выделении кластеров. Значимая статистика получается для объединенных соседних регионов V и VI. При этом регион VI рассматривается отдельно. Для Южной Америки (регион VIII) опасный период XII.2018–I.2023 определен неуверенно, так как соответствует недостаточно надежно выделенному кластеру. Вероятность возникновения извержений в этот период мала. Из общего числа 173 извержений лишь 20 не попадают в выделенные для каждого региона кластеры, что составляет ~12%. Для рассматриваемых восьми регионов эффективность прогнозов по ретроспективным данным меняется от 2.1 до 5.9.

Отметим, что отклонения длительности текущего цикла  $H_{24}$  от среднего значения лишь незначительно изменяют границы указанных в табл. 2 «опасных» временных интервалов. При этом расхождение прогнозируемых и реальных дат «опасных» интервалов будет тем больше, чем сильнее будут различаться рассчитанное нами среднее (21.3 года) и реальное значения длительности текущего цикла  $H_{24}$ .

Природа выявленных эффектов подробно обсуждается нами в работе (Широков, Серафимова, 2006). Предполагается, что при трассировании «опасного» окна за счет однонаправленного действия двух космических ритмов увеличивается скорость сеймотектонического движения в соответствующем регионе (по определению (Ризниченко, 1985)). Это аналогично ситуации, описанной в известной басне И.А. Крылова, когда лебедь, рак и щука могли бы сдвинуть повозку, если бы тянули ее в одном направлении (Родная речь, 2006). Можно обратить внимание на то, что долгосрочный прогноз можно использовать для оценок максимального масштаба ожидаемых сильных событий при решении задач их краткосрочного прогноза (Широков, 1985, 2001).

## ВЫВОДЫ

1. Впервые метод фазовых траекторий применен для решения задач долгосрочного прогноза сильных извержений вулканов Тихоокеанского тектонического пояса с использованием данных о событиях XVIII–XXI веков.

2. Реализация метода позволила дать долгосрочные прогнозы извержений для восьми регионов Тихого океана и оценить их эффективность  $I$  по ретроспективным данным. Из общего числа 173 извержений лишь 20 не соответствуют схеме долгосрочного прогноза. Величина эффективности варьирует от 2.1 до 5.9, что примерно в 2-4 раза больше, чем в рамках других методологических подходов.

3. На территории России в ближайшие 20 лет извержения вулканов с объемом изверженных продуктов  $0.3 \text{ км}^3$  и более на Камчатке не ожидаются, а на Курильских островах вероятность извержений масштаба  $VEI \geq 3$  максимальна в периоды март 2011-март 2014 гг. и октябрь 2021-апрель 2024 гг. Вне этих интервалов вероятность возникновения извержений на порядок меньше.

Авторы выражают благодарность д.г.-м.н. И.В. Мелекесцеву, В.А. Рашидову и к.ф.-м.н. О.П. Руленко за внимание к работе и полезные замечания.

Работа поддержана в рамках гранта ДВО РАН 06 IIIA – 08-336 и проекта НИР Минобразования и науки 01.01.06.

## Список литературы

*Абдурахманов А.И., Фирстов П.П., Широков В.А.* Возможная связь вулканических извержений с цикличностью солнечной активности // XV Генеральная ассамблея МГСС. Тезисы докл. Симпозиум: Вулканизм и землетрясения верхней мантии. М.: Наука, 1971. С. 3-4.

*Абдурахманов А.И., Фирстов П.П., Широков В.А.* Возможная связь вулканических извержений с 11-летней цикличностью солнечной активности // Бюлл. вулканол. станций. 1976. № 52. С. 3-10.

*Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.

Большое трещинное Толбачинское извержение (1975-1976 гг., Камчатка) / Отв. ред. чл.-корр. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 638 с.

*Витинский Ю.И.* Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука, 1973. 257 с.

*Гирин О.А., Демянчук Ю.В., Мельников Д.В.* и др. Новая пароксизмальная фаза извержения вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 27 февраля 2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 1-8.

*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.

*Гусев А.А., Петухин А.Г.* О возможной синхронизации сильных землетрясений лунным 18.6-летним циклом, его долями и кратными // Вулканология и сейсмология. 1997. № 3. С. 64-79.

*Гущенко И.И.* Извержения вулканов мира. М.: Наука, 1979. 475 с.

*Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.* Вершинное извержение вулкана Ключевской (Камчатка) в 2007 г. // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-29 марта 2008 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 81-89.

*Кропоткин П.Н.* Возможная роль космических факторов в геотектонике // Геотектоника. 1970. № 2. С. 30-76.

*Кузьмин Ю.Д., Широков В.А.* О влиянии космических факторов на сейсмичность и вулканизм Камчатки // Вопросы географии Камчатки. 1990. № 10. С. 96-98.

*Ламакин В.В.* О периодичности байкальских землетрясений // ДАН. 1966. Т. 170. № 2. С. 210-213.

*Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом // Труды Лаб. вулканол. 1956. Вып. 11. 309 с.

*Ризниченко Ю.В.* Избранные труды. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.

Родная речь / Учебник для 2 класса. Ч. 1. М.: Просвещение, 2006. 223 с.

*Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.

*Серафимова Ю.К.* О связи сильных ( $M_w \geq 7.5$ ) землетрясений Камчатки с солнечной активностью // Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции 17-18 января 2006 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: «Оттиск», 2006. С. 171-177.

*Сытинский А.Д.* О зависимости глобальной и региональной сейсмичности Земли от фазы 11-летнего цикла солнечной активности // ДАН СССР. 1982. Т. 265. № 6. С. 1350-1353.

*Сытинский А.Д.* О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. 1989. № 2. С. 13-30.

*Токарев П.И.* К методике прогноза извержений вулканов Камчатки по сейсмологическим данным // Бюлл. вулканол. станций. 1977. № 53. С. 38-45.

*Токарев П.И.* Предвестники вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 108-119.

*Федотов С.А.* Об извержениях в кальдере Ака-



- демии Наук и Карымского вулкана в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 3-37.
- Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов М.: Наука, 2006. 455 с.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А.* Об извержениях, деформациях, сейсмичности Ключевского вулкана (Камчатка) в 1986-2005 гг. и механизме его деятельности // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 3-31.
- Шировов В.А.* Космос и вулканы // Человек и стихия. Л.: Гидрометеиздат, 1973. С. 26-28.
- Шировов В.А.* Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и ее долгосрочный прогноз для северо-западного участка Тихоокеанской тектонической зоны // Вулканизм и геодинамика / Отв. ред. Г.П. Авдейко, С.А. Федотов. М.: Наука, 1977. С. 103-115.
- Шировов В.А.* Влияние 19-летнего лунного прилива на возникновение больших камчатских извержений и землетрясений и их долгосрочный прогноз // Геологические и геофизические данные о БТТИ 1975-1976 гг. / Отв. ред. С.А. Федотов, Е.К. Мархинин. М.: Наука, 1978. С. 164-170.
- Шировов В.А.* Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевского (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 48-58.
- Шировов В.А.* Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996-2000 гг. с магнитудой  $M = 6-7.8$  по комплексу сейсмологических данных // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / Отв. ред. Б.В. Иванов. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 95-116.
- Шировов В.А.* О взаимосвязи перемещений географических полюсов с сильными землетрясениями и извержениями вулканов Земли // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28-31 марта 2007 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 190-201.
- Шировов В.А.* Влияние общепланетарных факторов на возникновение сильных вулканических извержений Земли и проблема их долгосрочного прогноза // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-29 марта 2008 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008а. С. 305-314.
- Шировов В.А.* Разработка новых методов долгосрочного прогноза вулканических извержений на основе изучения влияния на них общепланетарных космических факторов // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-29 марта 2008 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008б. С. 315-322.
- Шировов В.А., Серафимова Ю.К.* О связи 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северо-западной части Тихоокеанского тектонического пояса // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. № 8. С. 120-133.
- Шировов В.А., Серафимова Ю.К.* Методика прогноза сильных землетрясений с магнитудой  $M \geq 7.6$  и оценка ее эффективности для различных регионов Земли // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV междунар. конф., с. Паратунка Камч. обл., 14-17 августа 2007 г. Сборник докладов. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. С. 482-489.
- Hamilton W.L.* Tidal Cycles of Volcanic Eruptions: Fortnightly to 19 Yearly Periods // JGR. 1973. V. 78. № 17. P. 3356-3362.
- Simkin T., Siebert L.* Volcanoes of the World. Smithsonian Institution, Global Volcanism Program. Geoscience Press. Tucson. Arizona, 1994. 349 p.

**THE FORECAST OF STRONG VOLCANIC ERUPTIONS OF PACIFIC BELT FOR THE  
NEXT 20 YEARS ON THE BASIS OF APPLYING OF A METHOD OF PHASE PATHWAYS**

**V.A. Shirokov<sup>1</sup>, Yu.K. Serafimova<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

*<sup>2</sup>Kamchatkan Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

For the first time a distribution of Pacific belt strong eruptions on datas of observations XVIII-XXI of centuries was studied on the two-dimensional phase plane. The coordinates of this plane were both the phase of 19-year's lunar tide and the phase of 22-year's magnetic solar cycle. The forecast of eruptions was made on the basis of a devising by authors the method of phase pathways for eight regions Pacific belt for the next 20 years. The retrospective estimation of long-term forecast efficiency was made.