

РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ НА НИХ ПЛАНЕТАРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

В.А. Широков

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: shirokov@kscnet.ru*

Введение

Изучение причин возникновения сильных, в том числе пароксизмальных, вулканических извержений и разработка методов их прогноза относятся к числу основных направлений исследований в вулканологии. Разработка методов долгосрочного прогноза извержений и методов оценки вулканической опасности имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. Долгосрочный прогноз основан на оценке вероятности извержений интересующей нас силы в конкретные интервалы времени на десятки и сотни лет вперед [9, 10]. Вулканическое извержение определяется обычно как процесс поступления магмы и ее производных на земную поверхность. Естественной количественной мерой извержений являются масса или объем V изверженных вулканических продуктов [10].

При разработке методов долгосрочного прогноза наметились два различающихся между собой подхода. Первый основан на статистическом анализе повторяемости извержений вулканов в прошлом [7, 9, 10 и др.], а второй - на изучении связи извержений с различными космическими явлениями, такими как земные приливы, связанные, в основном, с изменениями гравитационных полей в системе Солнце-Земля-Луна, солнечная активность и т.д. (1-3, 8, 11-16 и др.). В данной работе кратко рассматриваются различные методические подходы при решении задач долгосрочного прогноза извержений. Работа является продолжением исследований, результаты которых представлены автором в другой статье настоящего сборника [16], а также опубликованы в [1-3, 11-13, 15]. В этих работах показано, что возникновение сильных извержений существенным образом зависит от различных по своей природе планетарных космических факторов, что необходимо учитывать при разработке методов прогноза извержений.

Целью данной работы является краткое описание ранее разработанных методов долгосрочного прогноза, используемых другими исследователями, а также четырех новых методических подходов к этой проблеме, которые, как будет показано далее, реализованы как для отдельно взятых вулканов или регионов, так и для Земли в целом.

Долгосрочный прогноз времени возникновения сильных вулканических извержений для отдельно взятых вулканов

В [9, 10] для извержений с объемом изверженных продуктов V или массой m выше некоторого порогового уровня оценивается среднее значение длительности цикла T между соседними по времени извержениями и на основе предположения о нормальном распределении интервалов между последовательными извержениями относительно их среднего значения T (α – среднеквадратическое отклонение величин T в годах) определяется ожидаемое время следующего извержения. Начало t_1 и конец t_2 наиболее вероятного временного интервала возникновения очередного извержения вулкана определяются по формулам:

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

где t_n - момент возникновения последнего извержения. При нормальном распределении величин T в прогнозируемый интервал длительностью 2α 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 $1/3$ или 33.3%. В этом случае отношение $I = 66.6\%/33.3\% = 2$. Эта величина и будет определять эффективность долгосрочного прогноза в соответствии с ее определением в [5]. Величина I представляет отношение средней вероятности событий в прогнозируемое время к среднему значению вероятности на интервале такой же длительности за весь период наблюдений. Для случайного прогноза в пределе $I=1$. Из-за малочисленности данных об извержениях и ненадежности каталогов извержений для отдельных вулканов, из-за сложностей определения вида распределения величин T , эффективность долгосрочных прогнозов в реальном времени существенно снижается.

В наших работах [1-3, 11-13, 15, 16] предложены способы долгосрочного прогноза извержений для отдельных регионов и вулканов, основанные на выявлении статистически значимой связи сильных извержений с 11-летней цикличностью солнечной активности и 19-летним лунным приливом. Например, с использованием метода наложения эпох для приливного цикла $T=18.6$ г. выделены 4 «активные фазы» [3, 13], для каждой из которых рассчитана вероятность возникновения извержений. Она оказалась на порядок больше, чем вне «активных фаз». Реализация подобной схемы для наиболее активных вулканов Камчатки оказалась обнадеживающей. Например, сильные извержения Ключевского вулкана за последние 20 лет происходили только в заранее рассчитанных нами «активных фазах» [см. Жаринов, настоящий сборник].

С целью увеличения объема статистики по извержениям и получения более надежных оценок вероятности возникновения будущих извержений нами в первом приближении разработаны четыре новых способа прогноза, которые описаны ниже.

Методика долгосрочного прогноза извержений для отдельных регионов

Рассмотрим этот вопрос на примере трех регионов: Камчатки, Курильских и Алеутских островов. Результаты, полученные в [16] с использованием данных о камчатских извержениях, приводят нас к выводу, что совместный анализ двух доминирующих ритмов, 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного, позволяет решать задачи долгосрочного прогноза наиболее сильных событий на основе следующей методики. Суть метода заключается в выявлении на двумерной фазовой плоскости статистически значимых «опасных фазовых окон» (кластеров) и расчете временных интервалов, в которых фазовая траектория в пределах текущего цикла Хейла пересекает «опасные окна». Подобный подход был успешно реализован при составлении долгосрочных прогнозов сильных землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса [17]. Если фазовая траектория пересекает «опасные фазовые окна», рассчитываются временные интервалы пересечений «опасных окон», в которых, как правило, с вероятностью более 0.7-0.8 ожидаются будущие извержения. Вероятность сильных событий вне «опасных окон» на порядок меньше.

В качестве примера приведем трехмерное распределение (рис. 1) с использованием метода наложения эпох извержений камчатских вулканов 1850-2007 гг. с $V \geq 0.3$ км³ в координатах: фаза Φ_1 извержений в пределах 19-летних циклов и фаза Φ_2 22-летних солнечных циклов (по горизонтали) и объемы V (по вертикали). Из рисунка видно, что на горизонтальной плоскости выделяются два компактных кластера. Гипотеза о случайном распределении событий на двумерной фазовой плоскости отвергается с уровнем доверия более 0.99 [4]. Сравним эти результаты с аналогичным распределением для сильных камчатских землетрясений.

На рис. 2 приведено распределение сильных землетрясений Камчатки 1737-2005 гг. с магнитудой $M \geq 7.6$ и глубиной очагов менее 100 км [17] и извержений 1850-2007 гг. с $V \geq 0.3$ км³ на двумерной фазовой плоскости (Φ_1, Φ_2). Выделены «опасные фазовые окна» как для землетрясений (черные кружки), так и для вулканических извержений. Отметим, что вне «опасных окон» событий нет. Обратим также внимание на то,

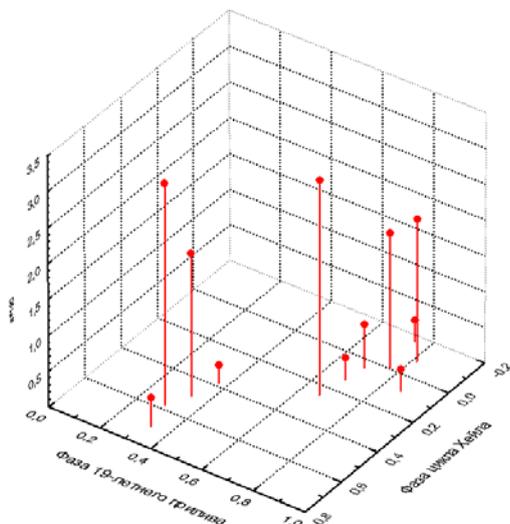
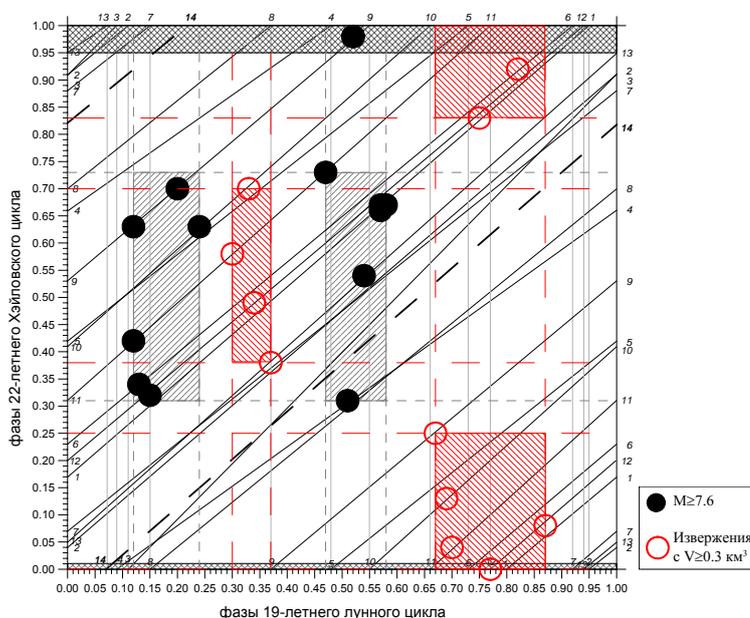


Рис. 1. Трехмерное распределение камчатских извержений 1850-2007 гг. с объемом изверженных продуктов $V \geq 0.3 \text{ км}^3$ в координатах: фаза лунного прилива 18,6 г. и фаза 22-летнего солнечного цикла Хейла (по горизонтали) и объем V (по вертикали)

Рис. 2. Распределение камчатских землетрясений 1737-2007 гг. с магнитудой $M \geq 7.6$ и глубиной очагов до 100 км (черные кружки) и вулканических извержений 1850-2007 гг. с объемом изверженных продуктов $V \geq 0.3 \text{ км}^3$ (светлые кружки) на двумерной фазовой плоскости с координатами: фаза прилива 18,6 г. (по горизонтали) и фаза 22-летнего солнечного цикла Хейла. Пояснения в тексте



что «опасные окна» для извержений и землетрясений не пересекаются между собой. Фазовая траектория для текущего цикла Хейла, начавшегося в августе 2007 г., обозначена двумя прерывистыми отрезками прямых на временном интервале 2008 – 2029 гг. (текущий цикл Хейла). Видно, что эта траектория с рассчитанными для извержений «опасными фазовыми окнами» не пересекается. Согласно нашим расчетам извержения не ожидаются и далее, до 2050 г. Для землетрясений пересечение приурочено к интервалу октябрь 2014 - март 2016 гг. Это означает, что в ближайшие 20 лет на Камчатке землетрясения с моментной магнитудой $M \geq 7.6$ ожидаются только в указанном временном интервале. Так как по ретроспективным данным прогнозу соответствуют 100% камчатских извержений, а площадь «опасных окон» равна 13.3 %, расчетная эффективность долгосрочного прогноза извержений для Камчатки $I = 100/13.3 = 7.5$.

Аналогичный анализ проведен для Курильских островов и западной части Алеутских островов (к западу от вулкана Богослов). Использовались данные об извержениях масштаба 3 и более по классификации, описанной в [18]. Для периода 2008-2029 гг. такие извержения с вероятностью около 0.8 ожидаются в период ноябрь 2010 – февраль 2014 гг. и с августа 1921 по февраль 2024 гг. Расчеты сделаны в предположении, что

длительность текущего цикла Хейла составит 22 года. Оценки для длительности цикла Хейла в диапазоне 21.0- 23.0 лишь незначительно изменяют края указанных выше временных интервалов, в которых ожидаются сильные извержения. Эффективность этого прогноза по ретроспективным данным составляет около 2.6 при суммарной площади «опасных фазовых окон» 37 %.

О возможности существования цикла вулканической активности с периодом 223 года

Рассмотрим теперь проблему долгосрочного прогноза извержений с несколько иных позиций. Анализ каталогов сильных извержений вулканов мира с $V \geq 1 \text{ км}^3$ [6, 18] позволяет сделать вывод о выраженной неравномерности распределения извержений во времени [15] для периода 1900-2007 гг. Возникает важный вопрос о том, каким образом можно объяснить резкое уменьшение числа извержений для периодов длительностью 25 и более лет. Можно предположить, что существуют более продолжительные циклы вулканической активности, которые нами здесь не рассматриваются. Если принять, что для вулканической активности к числу доминирующих относятся 19-летний и 22-летний ритмы, то нетрудно подсчитать, что величина продолжительности T_l двенадцати лунноприливных циклов с периодом 18.613 г. ($T_l=223.3$ года) и десяти солнечных циклов Хейла с периодом около 22 лет ($T_c=220$ лет) имеют близкие значения. Сравним теперь реальные цифры. Если взять 10 последних циклов Хейла, то начало первого из них соответствует эпохе 1784.7 (начало 11-летнего цикла № 4), а последнего – эпохе 2007.6. Длительность этого интервала (222.9 лет) отличается от $T_l=223.3$ г. всего на 0.4 года, т.е. не превышает 0.2%. Таким образом, можно считать, что примерно через каждые 223 года фазы 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов будут практически такими же, как 223 года назад. Это и означает наличие цикличности с периодом $T=223$ года. Обратим внимание на то, что в XIX веке максимальная активность начинается с четного 11-летнего цикла № 6 (1810 год) и продолжается как минимум в течение двух циклов Хейла, в течение которых выделилось 64% общего объема изверженных продуктов за последние 207 лет. До начала этой «активной фазы» на протяжении многих лет вулканическая активность была относительно слабой [6]. Таким образом, можно считать, что начало активизации в пределах цикла длительностью 223 года соответствует 1812 г., когда произошло извержение вулкана Тамбора с $V=150 \text{ км}^3$. Проведем сравнение величин объемов изверженных продуктов V в течение первых пяти циклов Хейла (1810-1922 гг.) с четырьмя последующими, введя соответствующее нормирование. Для этого уменьшим первую оценку величин V на 20% и получим 214 км^3 и 54 км^3 . Оценки различаются в 4 раза. Даже если исключить из каталога извержение вулкана Тамбора (1812 г., $V=150 \text{ км}^3$), то и в этом случае в первой половине 220-летнего цикла средняя продуктивность вулканов в единицу времени окажется вдвое выше, чем в последующие годы. Поскольку информация об извержениях XIX века является менее полной, чем в последующие годы, можно предположить, что в первой половине 223-летнего цикла продуктивность вулканов была примерно в 3-4 раза выше, чем в последующие годы. В таком случае находят объяснение факты заметного уменьшения числа извержений в периоды 1915-1950 гг. и 1982-2007 гг., когда произошло всего 4 извержения. Поскольку прошло уже около 200 лет после начала активизации в предполагаемом 220-летнем цикле, то наиболее вероятно, что очередной максимум активности вулканов мира ориентировочно наступит примерно в 2030 г. Нельзя, конечно, исключать варианты, для которых активизация может начаться на цикл раньше или позже, т.е. в текущем цикле или после 2050 г. Для циклов большой длительности отклонения на 20 лет вполне вероятны.

Тем не менее, наиболее вероятное время начала фазы повышенной активности вулканов мира по уровню $V \geq 1 \text{ км}^3$ соответствует началу следующего цикла Хейла, т. е. примерно 2030 г.

Долгосрочный прогноз сильных извержений, основанный на комплексном анализе планетарных космических факторов

На основе изучения связи извержений с космическими факторами в работе [16] показано, что можно привести перечень тех признаков, при реализации которых вероятность возникновения будущих извержений существенно повышается. К этим признакам нами отнесены следующие [16]:

а) направление апериодического нерегулярного смещения полюса (его вековой ход) соответствует его перемещению в диапазоне географических меридианов от 80^0 до 180^0 западной долготы;

б) максимальные амплитуды 14-месячной свободной прецессии полюса в устойчивых (по величине периода) 6-7-летних циклах превышают многолетние средние значения и от цикла к циклу возрастают, а сами колебания носят регулярный квазипериодический характер;

в) число и длительность флуктуаций, т.е. отклонений относительно среднемесячных значений чисел Вольфа W (в сторону уменьшения или увеличения), превышают средние значения. К флуктуациям относятся отскоки, превышающие среднеквадратическое отклонение относительно среднего значения чисел Вольфа за последние 12 месяцев;

г) существование доминирующего для извержений с $V \geq 1 \text{ км}^3$ 22-летнего, в среднем, солнечного цикла Хейла, связанного с изменением полярности ведущих групп солнечных пятен при переходе от одного 11-летнего цикла к другому. В первой половине цикла Хейла, т.е. в четных 11-летних циклах (по цюрихской классификации), суммарный объем V извержений 1800-2007 гг. составил 95.5%. Эта отчетливо выраженная ритмичность поступления ювенильных вулканических продуктов на поверхность Земли должна учитываться в схемах долгосрочного прогноза сильных извержений.

Если перечисленные выше признаки отсутствуют, вероятность возникновения в ближайшие годы сильных извержений уменьшается [16]. Предлагаемый подход предполагает, что необходим регулярный мониторинг перечисленных выше, а также для других выявленных статистически значимых космических факторов, которые нами в этой работе не рассматривались.

Долгосрочный прогноз сильных извержений вулканов Земли, основанный на изучении влияния на вулканическую активность 22-летнего солнечного цикла Хейла

В [16] сделан вывод, что для сильных извержений доминирующим является 22-летний цикл Хейла. Каждый цикл Хейла начинается с четного цикла. Показано, что на протяжении последних 207 лет более 95% объемов изверженных вулканических продуктов V приходятся на первую половину циклов Хейла, т.е. на четные циклы по цюрихской классификации. На рис. 3 по данным за 1800-2007 гг. приведено трехмерное распределение сильных извержений с $V \geq 3 \text{ км}^3$ в координатах: фаза цикла Хейла и географическая широта извержений (на горизонтальной плоскости) и величина V (по вертикали). Из рис. 3 видно, что в зависимости от фазы 22-летнего цикла Хейла наблюдается закономерное изменение географической широты рассматриваемых извержений. Сначала события приурочены к экваториальным широтам, затем «работают» южные широты и далее активность по величине V снижается и перемещается на северные широты. Зависимость распределения извержений по фазе 22-летнего цикла от географической широты может, естественно, использоваться для реализации схемы их прогноза на период до окончания текущего цикла. В рамках этого подхода в качестве примера составлена схема долгосрочного прогноза извержений вулканов Земли с $V \geq 1.0 \text{ км}^3$ на период до 2030 г., т.е. до окончания текущего цикла Хейла. Для соответствующих временных интервалов рассчитаны также вероятности возникновения одного или более

извержений с использованием данных за предыдущие 207 лет. Оценки вероятностей возникновения извержений учитывали цикличность с периодом 223 года. Данные сведены в таблицу.

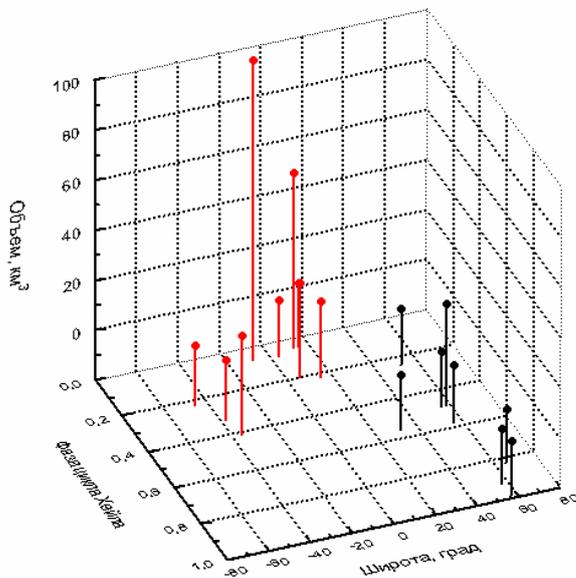


Рис. 3. Трехмерное распределение извержений вулканов мира с $V \geq 2 \text{ км}^3$ в координатах: фаза 22-летнего цикла Хейла и географическая широта (по горизонтали) и величин $V, \text{ км}^3$ (по вертикали). Пояснения в тексте

Таблица. Прогноз времени, места и объемов изверженных продуктов V для извержений вулканов Земли с $V \geq 1 \text{ км}^3$ на период до 2030 г. в предположении, что длительность текущего цикла Хейла составит 22 года

Годы	Интервал географических широт, где ожидаются извержения, градусы	Объем продуктов извержений, $V, \text{ км}^3$	Вероятность одного или более извержений
2008-2012	экваториальная зона, (-25,25)	1 - 20	$< \frac{1}{2}$
2013-2020	южное полушарие, (-50, 0)	1 - 20	$< \frac{1}{2}$
2013-2020	северное полушарие, (30,65)	1 - 10	$\frac{2}{3}$
2021-2025	(-65, 65)	1,5 - 3	близка к 0
2026-2029	северное полушарие, (45,65)	1-2	$\frac{1}{3}$
2026-2029	южное полушарие, (45-65)	1-5	близка к 0

Аналогичный прогноз можно составить для извержений с $V \geq 2 \text{ км}^3$ или с другим пороговым значением величин V .

Выводы

1. В работе рассмотрены различные методы долгосрочного прогноза извержений вулканов. Их можно разделить на два основных типа. Первый основан на статистическом анализе повторяемости извержений разной силы в прошлом. Второй основан на учете связи сильных извержений с планетарными космическими факторами.
2. Предложены четыре новые методики долгосрочного прогноза сильных извержений как для отдельных вулканов и отдельных регионов, так и для Земли в целом. Способы прогноза основаны на выявлении статистически значимой связи извержений с различными по своей природе космическими факторами. В дальнейшем представляется целесообразным осуществить комплексный долгосрочный прогноз извержений с использованием одновременно всех четырех методов прогноза.

3. Наиболее перспективными являются схемы долгосрочного прогноза извержений для отдельных регионов Тихоокеанского пояса. Эффективность этого способа прогноза оценивалась для Камчатки, Курильских и Алеутских островов. Максимальной оказалась эффективность прогноза извержений для Камчатки ($I=7.5$).
4. Основываясь на статистически значимой зависимости фазы извержений в 22-летних циклах Хейла от географической широты (коэффициент корреляции равен 0.56) и учете 223-летней цикличности составлен долгосрочный прогноз извержений вулканов Земли с $V \geq 1 \text{ км}^3$ на период до 2030 г.

Автор выражает признательность с.н.с. ИВиС ДВО РАН к.ф.-м.н. О.П. Руленко за полезные дискуссии. Работа поддержана в рамках гранта ДВО РАН № 06 III-A-08-336.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдурахманов А.И., Фирстов П.П., Широков В.А.* Возможная связь вулканических извержений с цикличностью солнечной активности // XV Генеральная ассамблея МГГС. Тезисы. Симпозиум: Вулканизм и землетрясения верхней мантии. М.: Наука, 1971. С.3-4.
2. *Абдурахманов А.А., Фирстов П.П., Широков В.А.* Возможная связь вулканических извержений с 11-летней цикличностью солнечной активности // Бюллетень вулканологических станций. 1976. № 52. С. 3-10.
3. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Широков В.А. О связи извержений вулканов с тектоническими землетрясениями Камчатки. Москва. 1980. 19 с.
4. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.
5. *Гусев А.А.* Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз и их связь с вулканизмом. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109-119.
6. *Гуценко И.И.* Извержения вулканов мира. Каталог. Москва: Наука, 1979. 476 с.
7. *Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом // Труды лабор. вулканологии. Москва. 1956. Выпуск 11. 309 с.
8. *Кропоткин П.Н.* Возможная роль космических факторов в геотектонике // Геотектоника. 1970. № 2. С. 30-76.
9. *Токарев П.И.* О долгосрочном прогнозе извержений Авачинского вулкана // Бюллетень вулканол. станций. 1971. № 47. С. 21-31.
10. *Токарев П.И.* Долгосрочный прогноз извержений вулканов // Вулканология и сейсмология. 1979. № 3. С. 77- 90.
11. *Широков В.А.* Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и ее долгосрочный прогноз для северо-западного участка Тихоокеанской тектонической зоны // Вулканизм и геодинамика. Москва: Наука, 1977. С. 103-115.
12. *Широков В.А.* Влияние девятнадцатилетнего лунного прилива на возникновение больших камчатских извержений и землетрясений и их долгосрочный прогноз // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975-1976 гг. Москва: Наука, 1978. С. 164-170.
13. *Широков В.А.* Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1985. №6. С.48-58.
14. *Широков 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. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 95-116.
15. *Широков В.А.* О взаимосвязи перемещений географических полюсов с сильными землетрясениями и извержениями вулканов Земли // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2007. С. 190-201.
16. *Широков В.А.* Влияние планетарных космических факторов на возникновение сильных извержений вулканов Земли и проблема их долгосрочного прогноза (статья в настоящем сборнике).
17. *Широков В.А., Серафимова Ю.К.* О связи 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северо-

ро-западной части Тихоокеанского пояса // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. №2. Выпуск № 8. С. 120-133.

18. *Simkin Tom and Siebert Lee*. Volcanoes of the World. Smithsonian Institution, Global Volcanism Program. Geoscience Press. Tucson. Arizona. 1994. 349 p.

PROBLEM OF THE LONGTERM FORECASTING OF VOLCANIC ERUPTIONS AND PREDICTION OF STRONG ERUPTIONS OF VOLCANOES OF THE EARTH TILL 2030

V.A. Shirokov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatky, 683006;
e-mail: shirokov@kscnet.ru*

Various methods of a longterm forecasting of strong volcanic eruptions as for separately taken volcanoes, separate regions and for the Earth as a whole are considered. It is displayed, that more perspective are the approaches based on detection of link of eruptions with various by the nature by planetary space agents. Using this approach, three versions of a longterm forecasting of strong eruptions of volcanoes of the Earth for the period till 2030 are considered.