

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ИХ СВЯЗИ С КОСМИЧЕСКИМИ РИТМАМИ

Широков В.А.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский,
e-mail: shirokov@kscnet.ru*

О моделях подготовки тектонических землетрясений

К числу наиболее разработанных моделей относятся дилатантно-диффузионная, лавинно-неустойчивого трещинообразования, неустойчивого скольжения и фазовых превращений, активной иерархически структурированной геофизической среды, самоорганизованной критичности, консолидации. Их обзор и критический анализ представлен в монографии И.П. Добровольского (1991), автора модели консолидации, в соответствии с которой наиболее контрастные и интенсивные динамические процессы происходят в фазе разрушения на заключительной стадии краткосрочной подготовки землетрясений. Ее длительность составляет примерно несколько недель, иногда месяцев или дней. Изучение отклика геофизической среды на этой стадии сейсмотектонического процесса позволяет оценить прогностическую эффективность аномалий, осуществить их диагностику, решать вопросы генезиса. Однако анализ данных по предвестниковым явлениям часто приводит к неоднозначности интерпретации получаемых результатов при использовании существующих моделей подготовки сильных землетрясений.

Считается, что до сих пор не ясны причины, приводящие к возникновению сильных тектонических землетрясений. Например, по мнению Н.В. Шебалина, в связи с отсутствием адекватной физической модели их подготовки надежное предсказание землетрясений невозможно (Шебалин, 1997). Можно провести аналогию между разрывом при землетрясении и разрушением образца горной породы. Если образец положить под пресс и увеличивать нагрузку, он, в конце концов, разрушится. Но реальные величины разрушающих напряжений в литосфере значительно меньше тех, которые, согласно расчетам, требуются для возникновения разрыва пород при землетрясении.

До сих пор не ясны причины возникновения землетрясений с глубиной очагов более 200 км. На этих глубинах для возникновения подвижки даже по уже готовому разлому требуются гигантские напряжения. Но имеющиеся оценки свидетельствуют о том, что напряжения в мантии весьма умеренные (Родкин, 2008). Многие считают привлекательной выдвинутую в 1987 г. идею развития в среде самоорганизованной критичности (СОК-гипотеза), обсуждавшуюся в работе (Добровольский, 1991). Предполагается, что сложные геодинамические системы, в частности, земная кора, самопроизвольно эволюционируют в направлении критического состояния с сильным взаимодействием соседних элементов (Родкин, 2008). В таком состоянии в системе могут развиваться события самого разного масштаба, в том числе предельной силы. Каждое отдельное движение при этом непредсказуемо, но статистически можно оценить среднюю вероятность их появления. Модель землетрясения как критического явления может считаться полезной для понимания многих предвестниковых процессов, но из этой же модели вытекает случайность и непредсказуемость землетрясений. Перспективы улучшения ранее разработанных моделей подготовки сильных событий в последние годы не обсуждались. В результате сейсмология XXI века оказалась на развилке нескольких дорог, ведущих, как считают многие ученые, в направлениях с невыясненными перспективами. Часто говорят о необходимости смены парадигмы при решении проблем геодинамики и прогноза землетрясений.

По нашему мнению, основной недостаток существующих моделей связан с тем, что в них не учитывается важное влияние на современные тектонические процессы

общепланетарных космических воздействий (Широков, 2001). Во всяком случае, в известных нам моделях подготовки землетрясений космические факторы не относятся к основополагающим.

Вопрос о том, в какой степени космические ритмы разного происхождения ответственны за возникновение тектонических землетрясений и извержений вулканов является одним из наиболее важных в науках о Земле. Хотя эта проблема является дискуссионной, однако, понятно, что перестройка глобальных и региональных тектонических напряжений должна зависеть от воздействия космических факторов. Один из первых обзоров исследований, касающихся роли космических факторов в геотектонике, приведен в работе (Кропоткин, 1970). В ней сделан вывод о том, что современные тектонические процессы являются результатом действия двух факторов – внутренней эволюции Земли как планеты и космических воздействий. Однако, как отмечалось выше, и в наиболее разработанных, и в других моделях подготовки землетрясений внутриземные процессы исследуются вне их взаимосвязи с космическими воздействиями.

Наши представления о связи космических факторов с тектоническими землетрясениями и извержениями вулканов с учетом промежуточных звеньев этой взаимосвязи в схематическом виде были представлены впервые в работе (Широков, 1977), основанной на обзоре работ многих исследователей. Сделан вывод, что в интервале периодов менее нескольких десятилетий к числу главных факторов космического происхождения относятся электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца, а также электромагнитные и гравитационные поля в системе Солнца-Луна-Земля (рис. 1). На этом рис. показано, что поле упругих напряжений Земли является функцией многих переменных, каждая из которых сложным образом меняется во времени. В общем виде задача изучения влияния космических факторов на сейсмические и вулканические процессы едва ли может быть решена, однако, на практике зачастую достаточно ограничиться изучением отклика среды на частотах, которые являются главными составляющими космических воздействий.

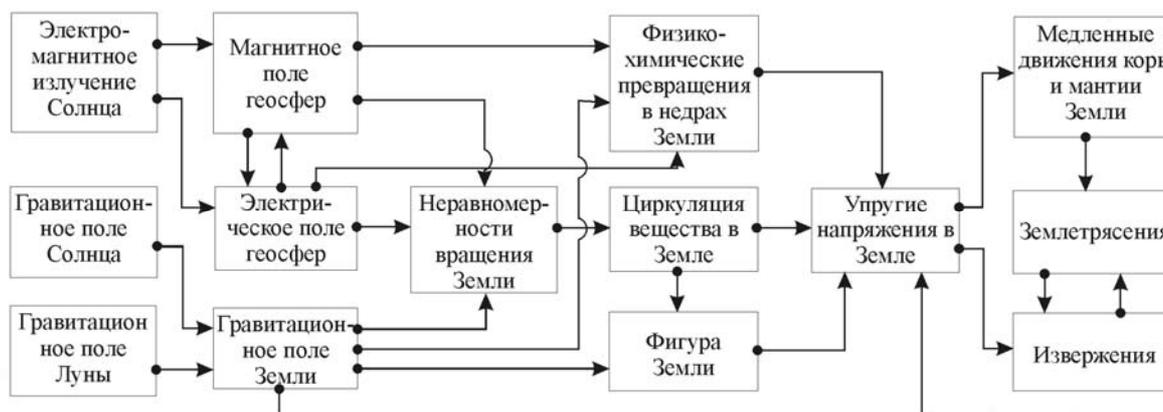


Рис. 1. Схема влияния космических факторов на возникновение сильных землетрясений и извержений вулканов с учётом промежуточных звеньев, связывающих эти явления.

Наибольший интерес представляет изучение циклических, периодических и квазипериодических ритмов, связанных с солнечной активностью, лунно-солнечными приливами и изменением положения оси вращения Земли относительно звезд: солнечные сутки, 27-суточный ритм, связанный с вращением «активных» широт Солнца вокруг своей оси, земной год, 14-месячный чандлеровский период изменений размаха колебаний полюсов, приливные ритмы с периодами около одних суток, 29.5 суток, 18.6 года, а также 11-летняя, 22-летняя и вековая цикличность солнечной активности.

На наш взгляд, перспективной является концепция, в соответствии с которой Землю следует рассматривать как единую нелинейную самоорганизующуюся колебательную систему, порождающую в определенные интервалы времени интенсивные, мозаично распределенные глобальные тектонические напряжения, являющиеся следствием влияния на сеймотектонические и вулканические процессы общепланетарных космических факторов и зависящих от них региональных и глобальных процессов взаимодействия тектонических плит. В рамках этого подхода нами предложена планетарно-региональная модель подготовки тектонических землетрясений (Широков, 2001). Основой модели является тезис о том, что краткосрочная фаза подготовки любого сильного землетрясения (например, с магнитудой $M = 7.5$ и более) существенным образом зависит от космических воздействий общепланетарного масштаба, т.е. в подготовке сильных землетрясений всегда присутствует планетарная составляющая. Зависит от космических причин, как будет показано далее, и долгосрочная подготовка землетрясений.

На возможность использования космических ритмов для прогноза землетрясений и извержений вулканов указывалось во многих работах еще в 50-80-ые годы (Абдурахманов и др., 1971, 1976; Гущенко, 1985; Ламакин, 1966; Леонов, 1979; Пийп, 1956; Сытинский, 1963, 1982, 1989; Широков, 1973, 1977, 1978, 1980, 1985; Hamilton, 1973 и др.). На основе сопоставления космических ритмов с сейсмическими и вулканическими явлениями автором был дан первый успешный среднесрочный прогноз камчатского землетрясения с $M = 7.5$ в феврале 1973 г. и побочного извержения Ключевского вулкана в 1974 г. (Широков, 1973). Нами прогнозы подразделяются на долгосрочные (время упреждения T превышает один год), среднесрочные (T менее одного года), краткосрочные (T менее месяца) и оперативные (T не превышает одной недели).

В дальнейшем на основе использования космических ритмов был разработан алгоритм М6 (Широков, 2001), с помощью которого с 1995 по 2008 гг. в реальном времени сделано 22 официально зарегистрированных краткосрочных прогноза времени, места, магнитуды и макросейсмической балльности камчатских землетрясений со временем упреждения менее 16 суток. Большинство прогнозов оказались успешными.

Далее приведены результаты исследований, которые указывают на определяющую роль общепланетарных космических факторов в процессе подготовки сильных землетрясений и вулканических извержений.

О роли космических ритмов в возникновении больших извержений вулканов Земли

Этот вопрос детально рассматривался нами в работах (Широков, 1980, 2007, 2008а, 2008б). Здесь кратко обозначим лишь основные результаты. Рассмотрим так называемые большие извержения с объемом изверженных вулканических продуктов $V \geq 0.8 \text{ км}^3$ (Гущенко, 1979 и др.). С 1800 г. по 2008 г. произошло 38 таких событий, из которых 17, т.е. почти половина, в историческое время наблюдались впервые. Таким образом, многие активные и потенциально активные вулканы переходят в состояние многовекового покоя, которое затем заканчивается крупным извержением. Статистика событий до 1800 г. является менее представительной, так как за 300-летний период 1500-1799 гг. отмечено только 21 извержение, более половины которых наблюдались в Индонезии и Исландии. Суммарный объем 38 извержений 1800-2008 гг. составляет ориентировочно 320 км^3 . Из них 33 наблюдались в Тихоокеанском вулканическом поясе, одно на Гавайских островах и четыре в Исландии. Наиболее масштабными были извержения вулканов Тамбора (Индонезия, 1812 г., $V = 150 \text{ км}^3$), Косегвина (Никарагуа, 1835 г., $V = 50 \text{ км}^3$) и Кракатау (Индонезия, 1883 г., $V = 18 \text{ км}^3$). Для извержений в качестве временного репера выбирается дата главного пароксизма или начало извержения. Рассмотрим теперь космические факторы, оказывающие значимое влияние на большие извержения вулканов Земли.

Фактор первый: вековое перемещение географических полюсов. Если из перемещений северного полюса (движения южного аналогичны) отфильтровать близкие к круговым или эллиптическим траекториям годовую и 14-месячную чандлеровскую составляющие, то останется нерегулярная аperiодическая компонента, именуемая вековым ходом полюса. Траектория векового хода рассчитывается относительно эпохи 1900 г. (время начала работы Международной службы определения широт) по данным, рассчитанным для середины каждого года на основе 20 отсчетов в год (Котляр, Ким, 1994). Векторы смещений от года к году и определяют траекторию векового хода полюса. Обнаружено, что из 21 извержения прошлого века с $V \geq 1.0 \text{ км}^3$ 19 произошли в те периоды, когда генеральное направление векового хода полюса соответствовало диапазону его перемещений вдоль меридианов от 70 до 180 градусов западной долготы (Широков, 2007, 2008а). В этом диапазоне направлений полюс перемещался примерно 58% времени. Неслучайность связи направлений перемещений полюса с моментами возникновения больших извержений значима с уровнем доверия более 0.95 (Большев, Смирнов, 1965).

Фактор второй: вариации свободных 14-месячных чандлеровских колебаний полюса. На основании сопоставления моментов возникновения больших вулканических извержений с $V \geq 1 \text{ км}^3$ с графиком изменения среднегодовых значений радиусов 14-месячных чандлеровских колебаний (радиусов полодий) относительно среднего положения полюса обнаружено, что вероятность возникновения извержений тем больше, чем выше максимальные и средние значения амплитуд радиусов полодий и чем устойчивее форма квазипериодических вариаций, имеющих средний период 6.2 года (рис. 2). Ключевые особенности графика определяют неравномерность извержений во времени, их группируемость (рис. 2). Например, после 1900 г. первый минимум активности вулканов (1915–1947 гг., 2 извержения за 33 года) приурочен к самым низким в прошлом веке амплитудам радиусов полодий, причем сами вариации носили нерегулярный, почти аperiодический характер. Наоборот, в начале прошлого века на интервале длительностью 11.6 г. (май 1902–январь 1914 гг.) произошло 7 извержений, т.е. частота извержений в единицу времени была на порядок больше, чем в 1915-1947 гг. В 1902-1913 гг. межгодовые колебания полюса имели устойчивую форму, причем в 1910 г. был зарегистрирован второй по величине за последние 107 лет максимум размаха колебаний полюса (Широков, 2008а). Второй пик активности больших извержений (1947-1956 гг.) аналогичен первому.

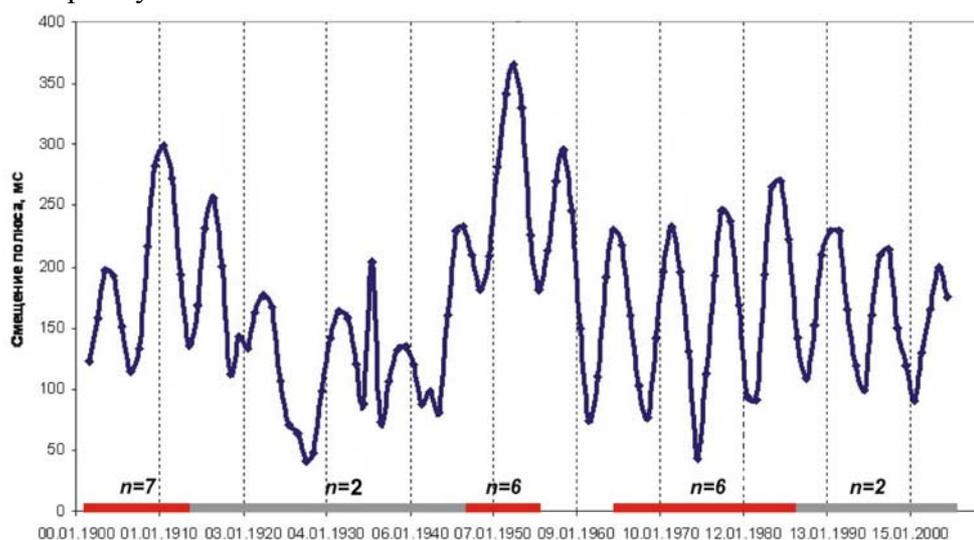


Рис. 2. Вариации среднегодовых амплитуд (радиусов полодий) 14-месячной составляющей чандлеровских колебаний географических полюсов с 1900 г. Числа над темными и светлыми полосками на оси ординат соответствуют числу попавших внутрь полосок извержений с объемом вулканических продуктов $V \geq 1 \text{ км}^3$.

Детальный анализ связи выявленного ритма со средним периодом 6.2 г. с большими извержениями и предваряющими их сильнейшими землетрясениями позволил получить статистически значимые результаты о связи этого ритма с квазипериодическими вертикальными перемещениями вещества земных недр вглубь Земли (в первой половине ритма) и к ее поверхности (во второй половине ритма). Этот процесс циклического перемещения вещества земных недр наиболее выражен в зонах субдукции Тихоокеанского тектонического пояса и является причиной возбуждения чандлеровских колебаний полюса (Широков, 2007). Предложенная нами модель возбуждения чандлеровских колебаний полюсов далее не рассматривается, так как этот вопрос выходит за рамки данной работы. Отметим, что ритм 6.2 г. связан с лунным приливом 18.6 г. так как три периода по 6.2 г. равны 18.6 г.

Фактор третий: 11-летняя и 22-летняя цикличность солнечной активности. Во многих работах выявлена связь землетрясений и извержений вулканов с 11-летней цикличностью солнечной активности (Абдурахманов и др., 1971, 1976; Серафимова, 2006; Сытинский, 1982, 1989; Широков, 1973 и др.). Однако неожиданно оказалось, что в геодинамических процессах 22-летняя цикличность играет более важную роль, чем 11-летняя (Широков, Серафимова, 2006, 2007, 2008). Далее основное внимание обращается на 22-летний цикл.

Фактор четвертый: флуктуации чисел Вольфа в 22-летних солнечных циклах. Вариации чисел Вольфа относительно среднемесячных значений принято именовать флуктуациями, если они превышают два среднеквадратических отклонения (Витинский, 1973). Показано, что суммарная длительность флуктуаций значимо различается в четных и нечетных 11-летних циклах солнечной активности. Сравнение значений флуктуационных индексов, рассчитанных для каждого 11-летнего цикла, с суммарными величинами объемов V изверженных вулканических продуктов в этих циклах показало их значимую корреляцию. Однако наиболее важный результат заключается в том, что по данным 38 больших извержений 1800-2008 гг. в четных 11-летних циклах выделилось 95.5% от общего объема (320 км^3) изверженных продуктов, хотя по длительности четные и нечетные циклы в среднем равны. Наличие значимой связи флуктуационных индексов чисел Вольфа с продуктивностью вулканов указывает на наличие отчетливо выраженной 22-летней цикличности вулканической активности. Сделаем пояснения. Первые предположения о существовании 22-летнего цикла в пятнообразовательной деятельности Солнца были сделаны в конце XIX века Вольфом, но лишь после открытия в 1913 г. Хейлом закона изменения полярности магнитных характеристик Солнца реальность выделения этого цикла получила надежное физическое обоснование (Витинский, 1973). По данным измерений Хейла при переходе от любого 11-летнего цикла к следующему полярность ведущих групп солнечных пятен в каждом из полушарий Солнца меняет знак на противоположный, причем полярность в разных полушариях имеет разный знак. В связи с этим цикл Хейла чаще именуется магнитным. Длительность циклов Хейла характеризуется большей устойчивостью, если за их начало брать эпохи минимумов четных 11-летних циклов, что и сделано в данной работе. За последние 300 лет среднее значение длительности циклов Хейла составляет 21.8 г. С начала прошлого века цикл характеризуется наибольшей устойчивостью, так как отклонения длительности циклов от среднего за этот период значения (21.3 г.) не превышают 3.5%.

Фактор пятый: лунный прилив с периодом 18.6 года. Вопрос о связи сильных извержений вулканов Тихоокеанского пояса, а также извержений вулканов Камчатки с лунным приливом 18.6 года рассматривался нами детально в работах (Широков, 1977, 1978). Для этих двух выборок обнаружена статистически значимая приуроченность событий к двум непересекающимся «активным» фазам землетрясений и извержений, причем «активные» фазы землетрясений опережают «активные» фазы извержений в среднем на 3 года. Выявленные закономерности успешно использовались для

долгосрочного прогноза сильных событий (Гусев, Петухин, 1997; Широков, 1977, 1978, 2001 и др.).

Фактор шестой: многолетние (56-летний и 223-летний) космические ритмы. Обнаружены статистически значимые ритмы с указанными выше периодами, проявляющиеся для землетрясений (Гусев, Петухин, 1997) и для больших извержений вулканов Земли (Широков, 2008б). Первый цикл является утроенным значением лунного прилива 18.6 г., а второй равен 12 периодам этого прилива. 223-летний цикл одновременно равен десяти солнечным циклам Хейла. Это означает, что примерно каждые 223 года фазы 18.6-летнего и 22-летнего циклов становятся одинаковыми (Широков, 2008б). Согласно нашим расчетам, 56-летний ритм отчетливо проявляется не только для землетрясений, но и для больших извержений. Например, все 5 камчатских извержений за последние 200 лет с объемом изверженных продуктов $V \geq 1 \text{ км}^3$ (1854, 1907, 1956, 1964, 1975 гг.) лежат в узком диапазоне фаз 56-летнего ритма, занимающем примерно третью часть приливного цикла. Нетрудно подсчитать, что очередное большое извержение на Камчатке можно ожидать в период 2012-2031 гг. Однако, согласно нашему долгосрочному прогнозу вулканические извержения Камчатки с $V \geq 0.3 \text{ км}^3$ ни в текущем, ни в следующем 22-летнем цикле Хейла, т.е. примерно до 2052 г., не ожидаются (Широков, 2008; Широков, Серафимова, 2008). Этот прогноз является более эффективным, так как основан на совместном анализе двух космических ритмов. Поэтому вероятность больших извержений в 2012-2031 гг. практически равна нулю. Тем не менее, 56-летняя цикличность для вулканических извержений статистически значима. «Опасная активная фаза» 223-летнего цикла для больших извержений вулканов Земли начинается примерно в 2030 г., поэтому можно допустить, что очередное большое извержение на Камчатке может произойти в период 2068-2087 гг. (2012 г. + 56 лет = 2068 г.; 2031 г. + 56 лет = 2087 г.).

Использование космических ритмов для решения задач прогноза сильных событий

Прогноз времени и географической широты места больших извержений вулканов Земли на ближайшие 20 лет. Эта задача была решена на основе обнаружения зависимости широты места больших извержений Земли от фазы 22-летнего цикла Хейла (Широков, 2008б). Выявленная связь служит дополнительным подтверждением общепланетарной природы подготовки сильнейших извержений вулканов Земли и их зависимости от космических ритмов. В работе (Широков, 2008б) дан прогноз больших вулканических извержений на ближайшие 20 лет. Отметим, что в работе (Пийп, 1956) впервые для пароксизмальных извержений вулкана Ключевского обнаружена цикличность с периодом 20 лет, близким к исследуемому нами ритму 22 года.

Совместное использование двух космических ритмов (лунного прилива 18.6 г. и 22-летнего цикла Хейла) для решения задач долгосрочного прогноза землетрясений и извержений. В работе (Широков, Серафимова, 2006) предложен метод фазовых траекторий, позволяющий на основе совместного использования двух указанных выше ритмов осуществлять долгосрочный прогноз сильных землетрясений в различных регионах Земли. Этот метод применен и для вулканических извержений (Широков, 2008б; Широков, Серафимова, 2008). В качестве примера приведем с использованием метода наложения эпох трехмерное распределение (рис. 3) извержений камчатских вулканов 1850 – 2007 гг. с $V \geq 0.3 \text{ км}^3$ в координатах фаза 19-летнего и фаза 22-летнего циклов (по горизонтали) и объемы извержений V (по вертикали). На горизонтальной плоскости выделяются два компактных статистически значимых кластера (рис. 3). Поскольку траектория текущего цикла Хейла, начавшегося в декабре 2007 г., не пересекает «опасные» фазовые окна (кластеры), это означает, что до конца текущего цикла Хейла (примерно 2030 г.) извержения с $V \geq 0.3 \text{ км}^3$ на Камчатке не ожидаются. На основе применения метода фазовых траекторий даны прогнозы сильных извержений для 8

регионов мира на ближайшие 20 лет и сделаны оценки их эффективности (Широков, Серафимова, 2008) .

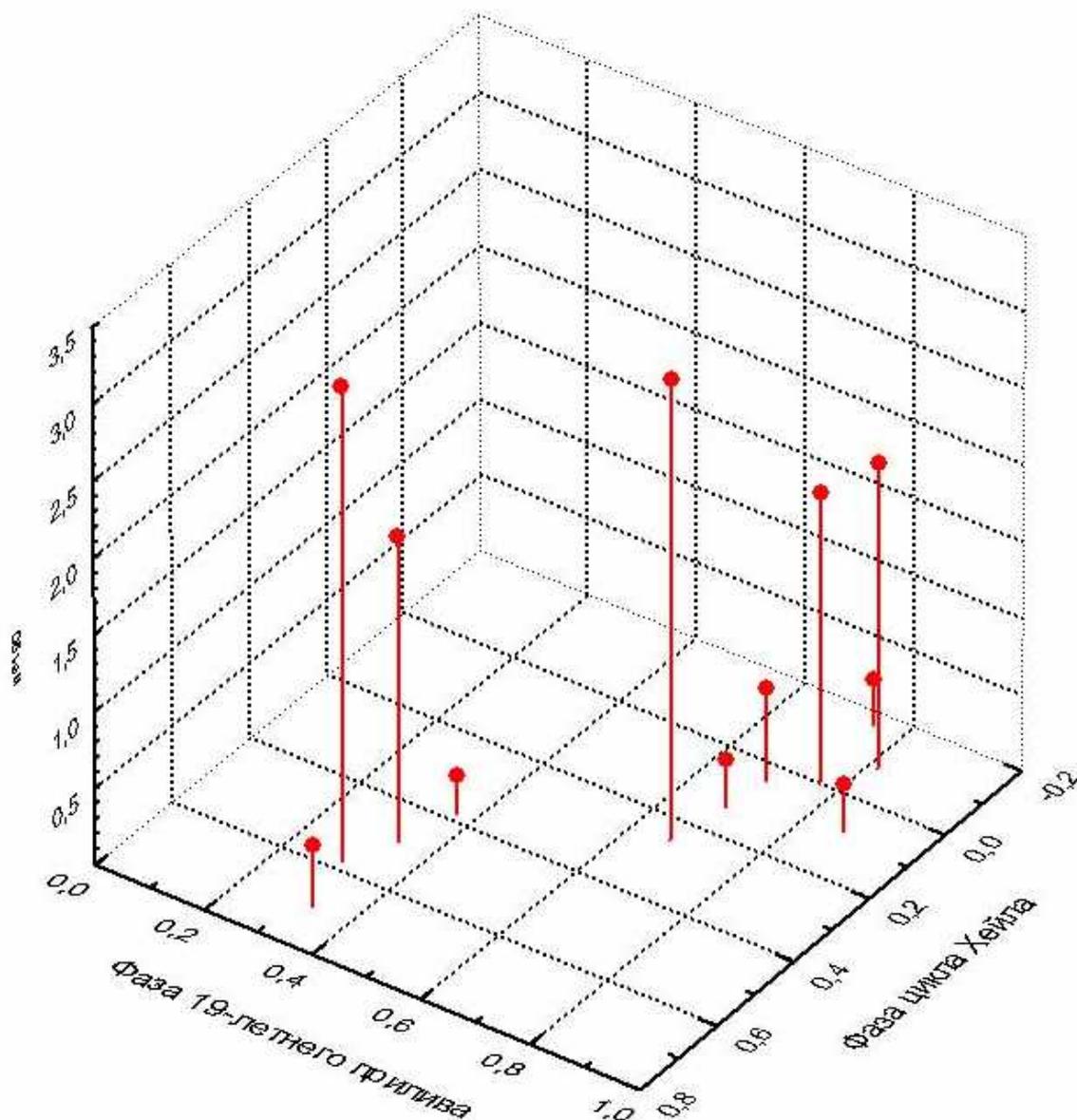


Рис. 3. Трёхмерное распределение извержений вулканов Камчатки 1854-2007 гг. с объемом изверженных продуктов $V \geq 0.3 \text{ км}^3$ в координатах: фаза 19-летнего лунного прилива, фаза 22-летнего солнечного цикла Хейла (по горизонтали) и объёмы V (по вертикали). Пояснения в тексте.

Подведем промежуточный итог. Приведенные выше результаты могут рассматриваться в качестве обоснования планетарно-региональной модели подготовки сильных вулканических извержений. В соответствии с этой моделью их подготовка, как видно из представленных выше результатов, зависит от различных по своей природе космических ритмов. В рамках этой модели сделаны долгосрочные прогнозы сильных извержений для Земли в целом и для ее отдельных регионов. Эффективность прогнозов, в определении А.А.Гусева (1974), по ретроспективным данным в несколько раз больше эффективности других известных нам методов прогноза (Широков, Серафимова, 2008).

Проблема «удаленных» предвестников при решении задач оперативного прогноза землетрясений

В соответствии с нашим подходом общепланетарные космические факторы являются причиной практически одновременной краткосрочной мозаичной перестройки полей тектонических напряжений в различных регионах Земли (Широков, 2001). В такой ситуации возникает проблема диагностики близких (в так называемой зоне подготовки будущего землетрясения) и «удаленных» краткосрочных предвестников в геофизических полях разной природы. Под «удаленными» имеются ввиду предвестники, регистрируемые на расстояниях от очагов землетрясений от 2 000 км и более, т.е. как правило, за пределами так называемой зоны подготовки сильных землетрясений (Добровольский, 1991). С другой стороны, если во многих регионах мира практически одновременно в тензочувствительных пунктах наблюдений будут выявлены предвестниковые аномалии, это может служить указанием начавшейся краткосрочной или оперативной подготовки сильного землетрясения. Такого типа удаленные («ложные» в рамках известных моделей подготовки землетрясений) краткосрочные и оперативные предвестники могут использоваться для прогноза времени готовящегося в мире сильного землетрясения, без определения, как правило, места его возникновения (если не выявлены форшоковая активизация и другие региональные или локальные предвестники в зоне подготовки землетрясения). Выявление статистически значимых эффектов подобного рода позволит глубже понять природу регистрируемых аномалий и поставит нас перед необходимостью детальной разработки адекватных моделей подготовки сильных землетрясений.

Глобальные возмущения различных геофизических полей перед сильными землетрясениями отмечались во многих регионах мира. В качестве примера можно привести аномальные сейсмогравитационные колебания (Линьков и др., 1990), многочисленные случаи аномальных вариаций кажущегося электрического сопротивления на Гармском полигоне, имеющих аналогичную форму перед близкими и удаленными землетрясениями (Сидорин, 1992 и др.). При измерении наклонов земной поверхности в Молдавии выявлено несколько десятков случаев аномальных наклонов, наблюдавшихся как перед близкими землетрясениями зоны Вранча, так и перед удаленными сильными мировыми землетрясениями (Карпатское ..., 1990).

Учитывая эффект «удаленных» предвестников и ключевую роль общепланетарных космических факторов в процессе деформирования зон подготовки сильных землетрясений (Широков, 1977, 1978, 1980), была предложена планетарно-региональная модель подготовки сильных землетрясений (Широков, 2001). В соответствии с этой моделью заключительная стадия их подготовки связана с относительно кратковременной (как правило, менее месяца) глобальной перестройкой полей тектонических напряжений для Земли в целом, вызванной влиянием космических факторов, которые рассматриваются как необходимое условие возникновения сильных землетрясений. Региональный сейсмический отклик на общепланетарные процессы является частью сейсмического отклика для Земли в целом. Это означает, что в возникновении сильных, с магнитудой примерно 7.5 и более, землетрясений всегда присутствует общепланетарная составляющая.

Основываясь на этом подходе, в работе (Широков, 2001) на примере северного фланга Курило-Камчатской зоны субдукции описана и апробирована методика краткосрочного, со временем упреждения менее двух недель, прогноза времени, места и силы землетрясений с магнитудой $M \geq 6$ по сейсмологическим данным (Широков, 2001). Анализировались как региональные (алгоритм M6), так и мировые землетрясения. Оказалось, что в 50% случаев разность во времени спрогнозированных камчатских землетрясений с $M \geq 6$ и сильных ($M \geq 7.5$) мировых землетрясений составляла менее одной недели. На основе этого подхода в 1995-2008 гг. в реальном времени было сделано 22 официально зарегистрированных краткосрочных прогноза, 12 из которых оправдались

по всем основным параметрам (время, место, магнитуда и балльность). В четырех случаях по одному из параметров ошибка прогноза не превысила 15%. Лишь в трех случаях после сделанных прогнозов землетрясений с $M \geq 5$ в регионе не было. В 16 случаях прогнозируемые камчатские землетрясения с $M = 5.4-7.1$ происходили не позже, чем через 16 суток после даты объявления времени тревоги. Так как прогнозы основывались на учете влияния космических факторов, можно считать, что их роль на заключительной стадии подготовки землетрясений является определяющей.

Камчатскими исследователями разработаны методы краткосрочного и оперативного прогноза землетрясений по данным различных видов геофизических наблюдений. По данным работ (Купцов, 2005; Руленко 2000, 2003; Руленко и др., 1992, 1996; Фирстов, Широков, 2005; Широков, Фирстов, 2004 и др.) перед камчатскими землетрясениями с $M \geq 5$ выявлены краткосрочные и оперативные предвестниковые аномалии.

В Камчатском регионе неоднократно выявлялись оперативные предвестниковые аномалии за часы–сутки до сильных землетрясений в электричестве приземного воздуха (Руленко, 2000, 2003; Руленко и др., 1992, 1996). Выявлены два типа предвестников и показано, что тензочувствительность аномалий электрического поля позволяет выявить предвестники, начиная с уровня приливных эффектов.

В работе (Широков, Руленко, 2007) разработана модифицированная методика расчета скорости Z сеймотектонического движения, по определению Ю.В. Ризниченко (1985), в которой учитывается солнечносуточная составляющая сейсмичности. При сопоставлении параметра Z с электрическим полем в приземном воздухе по наблюдениям в июне–октябре 2006 г. выявлена статистически значимая корреляция ($r = 0.65$) рассматриваемых параметров. Это служит дополнительным подтверждением влияния солнечного ритма на процессы в двух геосферных оболочках.

Приведем конкретные примеры применения в реальном времени разрабатываемого нами подхода, основанные на использовании космических ритмов. На основе разработанной методики ГЛОБАС (глобальная активизация сейсмичности) были сделаны оперативные прогнозы мировых землетрясений (без определения их местоположения) с использованием, главным образом, сейсмологических данных. 7 мая 2008 г. в 2 часа по Гринвичу автором был дан официально зарегистрированный (в Камчатском филиале Российского экспертного совета) прогноз возникновения в течение двух ближайших суток землетрясения с $M \geq 7.2$, место которого не прогнозировалось. С этим прогнозом в тот же день был ознакомлен директор ИВиС ДВО РАН академик Е.И. Гордеев. С 7 до 13 часов UT, с перерывами, автором прогноза производилось слежение за мировой сейсмичностью по данным оперативного каталога NEIC Геологической службы США. С 9 до 11 часов UT была зарегистрирована форшоковая активизация (5 землетрясений с $M = 3.8-4.9$) в районе о-ва Хоккайдо, что указывало на возможность возникновения ожидаемого землетрясения в районе Японии. За последующими форшоками слежение не велось в связи с поздним ночным временем. 7 мая в районе Хоккайдо, спустя 14 часов после сделанного прогноза, произошло землетрясение с $M = 6.8$, которое предварялось за 7 часов двадцатью форшоками с $M = 3.8-6.2$. Расхождение с прогнозом по магнитуде события составило 0.4 единицы M , т.е. около половины порядка по энергии землетрясения. Можно также отметить, что спустя 5 суток после события с $M = 6.8$ произошло катастрофическое Сычуаньское землетрясение 12 мая с $M = 8$. В этом случае сработал типичный сценарий, неоднократно отмечавшийся нами для Камчатского региона (Широков, 2001), при котором сильное землетрясение (в данном случае Сычуаньское) и более слабое событие в другом регионе ($M = 6.8$ на Хоккайдо) зарегистрированы на интервале менее одной недели. Следующий оперативный прогноз землетрясения с $M \geq 6.8$ на ближайшие 5 суток, основанный на методике ГЛОБАС, был официально зарегистрирован 14 ноября 2008 г. Землетрясение в районе Индонезии с $M = 7.3$ произошло спустя двое суток и 17 часов после сделанного прогноза. Форшоковая активизация не наблюдалась. Тестирование

методики ГЛОБАС проводится нами эпизодически. За последние 2 года было сделано несколько удачных прогнозов в реальном времени. В двух случаях после сделанных прогнозов событий с $M \geq 7$ не было. Перед сильными землетрясениями с $M \geq 7$ форшоковая активизация наблюдается достаточно редко, в 5-10 % случаев, поэтому определить место ожидаемого события в рамках методики ГЛОБАС удается редко.

Выводы

1. С целью разработки моделей краткосрочной подготовки сильных землетрясений и вулканических извержений предлагается следующая концепция. Земля рассматривается как единая нелинейная самоорганизующаяся колебательная система, порождающая на непродолжительных временных интервалах (как правило, менее месяца) интенсивные, мозаично распределенные глобальные тектонические напряжения, являющиеся следствием влияния на геотектонику общепланетарных космических факторов и зависящих от них процессов взаимодействия тектонических плит. В интервале периодов до нескольких сотен лет к числу основных факторов космического происхождения, влияющих на геотектонические процессы, относятся солнечная активность, электромагнитные и гравитационные поля в системе Солнце-Земля-Луна.

Космические воздействия ритмической природы должны рассматриваться в качестве ключевых факторов при разработке моделей подготовки сильных событий (Широков, 1977, 1985, 2001, 2007, 2008а, 2008б).

2. В соответствии с представленным выше методологическим подходом предложена планетарно-региональная модель подготовки сильных землетрясений, в соответствии с которой заключительная стадия подготовки сильных землетрясений связана с относительно кратковременной (как правило, менее месяца) глобальной перестройкой полей тектонических напряжений для Земли в целом, вызванной влиянием космических факторов и процессами взаимодействия тектонических плит (Широков, 2001). Считается, что в возникновении сильных, с магнитудой примерно 7.5 и более, землетрясений всегда присутствует общепланетарная составляющая (Широков, 2001). Аналогичная модель предложена и для сильных вулканических извержений.

3. Анализ влияния на сильные события различных космических ритмов позволил разработать в рамках планетарно-региональной модели новые подходы к решению задач долгосрочного прогноза землетрясений и вулканических извержений. На этой основе разработаны шесть новых методов долгосрочного прогноза землетрясений и извержений, а также метод краткосрочного прогноза землетрясений по сейсмологическим данным (Широков, 2001, 2008а, 2008б; Широков, Серафимова, 2006). Выявлены 223-летний и 56-летний циклы для извержений вулканов Камчатки и мира. В ближайшие 20 лет камчатские землетрясения с моментной магнитудой $M \geq 7.7$ и глубиной очагов до 100 км ожидаются только в период октябрь 2014 – март 2017 гг. (Широков, Серафимова, 2006). Очередное извержение с объемом продуктов $V \geq 0.30 \text{ км}^3$ ожидается не ранее 2050 г. а с $V \geq 1.0 \text{ км}^3$ не ранее, чем 2068 г.

4. Разработан метод фазовых траекторий (МФТ), основанный на совместном изучении влияния на землетрясения и извержения двух космических ритмов. В рамках метода сделаны прогнозы землетрясений и извержений для 16 регионов Земли на ближайшие 20 и более лет (Широков, Серафимова, 2006, 2007, 2008). Эффективность долгосрочных прогнозов по ретроспективным данным в несколько раз превышает соответствующее значение эффективности других методов долгосрочного прогноза.

Шесть землетрясений, произошедших в мире с ноября 2006 г. с $M \geq 7.7$, соответствуют сделанному в 2006 г. долгосрочному прогнозу событий в реальном времени (Широков, Серафимова, 2006). Вне площадей выделенных по методу МФТ «опасных» кластеров в 2007-2008 гг. землетрясений прогнозируемого энергетического уровня в рассматривавшихся регионах Тихоокеанского тектонического пояса не происходило.

5. Разработана методика долгосрочного прогноза времени и географической широты места извержений вулканов Земли с объемом продуктов $V \geq 1.0 \text{ км}^3$, основанная на выявленной зависимости широты места извержений от фазы 22-летнего цикла солнечной активности. Дан прогноз извержений с объемом продуктов $V \geq 1.0 \text{ км}^3$ на ближайшие 20 лет (Широков, 2008б).

6. Разработана методика оперативного и краткосрочного прогноза мировых землетрясений (ГЛОБАС), основанная, главным образом, на данных мировой сейсмичности и изучении связи событий с космическими ритмами. На основе этой методики за последние 2 года сделан ряд успешных прогнозов землетрясений с $M \geq 6.8$ в реальном времени без указания места их возникновения. В двух случаях ожидаемых событий не было.

7. Предложенные методы прогноза могут использоваться для других сейсмоактивных регионов мира.

Автор выражает благодарность д.г.-м.н. И.В. Мелекесцеву, к.ф.-м.н. О.П. Руленко и Ю.К. Серафимовой за содействие в проведении работы и ценные замечания.

Работа выполнена в рамках гранта ДВО РАН 06 III А-08-336.

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.А., Фирстов П.П., Широков В.А. Возможная связь вулканических извержений с 11-летней цикличностью солнечной активности // Бюлл. вулкан. станций. М.: Наука, 1976. № 52. С. 3-10.

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

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

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.

Гущенко И.И. Цикличность извержений вулканов мира // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 27-48.

Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: Наука, 1991. 189 с.

Карпатское землетрясение 1986 г. // Под редакцией А.В. Друмя и др. Кишинев: Штиинца, 1990. 335 с.

Котляр П.Е., Ким В.И. Положение полюса и сейсмическая активность Земли. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1994. 126 с.

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

Купцов А.В. Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке // Физика Земли. 2005. № 10. С. 1-7.

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

Леонов В.Л. О возможности сопоставления вулканической и солнечной активности на примере Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1979. № 6. С. 62-66.

Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Осипов К.С. Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений // ДАН СССР. 1990. Т. 313. № 5. С. 1095-1098.

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

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

Родкин М.В. Прогноз непредсказуемых катастроф // Вокруг света. 2008. №6. С. 88-100.

Руленко О.П. Некоторые особенности проявления аномалий электрического поля в приземной атмосфере перед землетрясениями // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / Отв. ред. Б.В. Иванов. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 75-81.

Руленко О.П. Тензочувствительность предсейсмических отрицательных аномалий электрического поля в приземном воздухе // Сборник трудов Пятой Международной конференции по атмосферному электричеству. Т.2. Владимир: «Транзит ИКС», 2003. С. 82-85.

Руленко О.П., Дружин Г.И., Вершинин Е.Ф. Измерение электрического поля перед камчатским землетрясением 13.11.1993 г., $M = 7.0$ // Докл. РАН. 1996. Т. 348. №6. С. 814-816.

Руленко О.П., Иванов А.В., Шумейко А.В. Краткосрочный атмосферно-электрический предвестник камчатского землетрясения 6.03.1992 г., $M = 6.1$ // Докл. РАН. 1992. Т. 236. № 6. С. 980-982.

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.

Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.

Сытинский А.Д. Современные тектонические движения как одно из проявлений солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 1963. Т. III. № 1. С. 26-43.

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.

Фирстов П.П., Широков В.А. Динамика молекулярного водорода и ее связь с геодинамическими процессами на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне по данным наблюдений в 1999–2003 гг. // Геохимия. 2005. № 11. С. 1151-1160.

Шебалин Н.В. Сильные землетрясения. М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. 542 с.

Широков В.А. Космос и вулканы // Человек и стихия. Л.: Гидрометеиздат, 1973. С. 26-28.

Широков 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.

Широков 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.

Широков В.А. О связи извержений вулканов с тектоническими землетрясениями Камчатки // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Петропавловск-Камчатский. 1980. 19 с.

Широков В.А. Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевского (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 48-58.

Широков В.А. Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996-2000 гг. с магнитудой $M = 6-7.8$ по комплексу сейсмологических и геофизических данных // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / Отв. ред. Б.В. Иванов. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 95-116.

Широков В.А. Влияние космических факторов на возникновение сильных извержений вулканов 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.

Широков В.А. Разработка новых методов долгосрочного прогноза вулканических извержений на основе изучения влияния на них 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.

Широков В.А., Руленко О.П. Новая методика исследования и сопоставления вариаций скорости сеймотектонического движения и динамики электрического поля в приземном воздухе // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV междунар. конф., с. Паратунка Камч. обл., 14-17 авг. 2007 г. Сб. докл. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. С. 211-217.

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

Широков 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 авг. 2007 г. Сб. докл. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. С. 482-489.

Широков В.А., Серафимова Ю.К. Прогноз сильных извержений вулканов Тихоокеанского тектонического пояса на ближайшие 20 лет на основе применения метода фазовых траекторий // Вестник КРАУНЦ Науки о Земле. 2008. № 2. Выпуск № 12. С. 201-210.

Широков В.А., Фирстов П.П. О возможности краткосрочного прогноза землетрясений Земли с $M \geq 7$ по данным изменений индекса геомагнитной возмущенности // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: III междунар. конф., с. Паратунка Камч. обл., 16-21 августа 2004 г. Сб. докл. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2004. Ч. I. С. 142-150.

Широков В.А., Фирстов П.П., Широкова Н.В. Разработка методов краткосрочного прогноза землетрясений, цунами и извержений вулканов Камчатки по сейсмологическим и геофизическим данным // Отчет по НИР за 2001-2005 гг., гос. рег. № 01.200.010561. Науч. рук. В.А. Широков. Петропавловск-Камчатский. 2006. 85 с.

Hamilton W.L. Tidal Cycles of Volcanic Eruptions: Fortnightly to 19 Yearly Periods // JGR. 1973. V. 78. № 17. P. 3356-3362.