

УДК 551.21

СРЕДНЕ- И КРАТКОСРОЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ НА КАМЧАТКЕ (1956-2012 гг.)

© 2013 В.В. Иванов

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 68300;
e-mail: victor@kscnet.ru*

Описаны методы мониторинга и методики прогнозирования извержений вулканов на Камчатке, работа экспертных советов, дана сводка успешных прогнозов, приведены примеры «пропусков цели» и «ложных тревог» за последние 57 лет (с 1956 по 2012 гг.). Дано подробное изложение обстоятельств, связанных с наиболее важными прогнозами. За эти годы Камчатской вулканологической станцией, Институтами вулканологии, вулканической геологии и геохимии, вулканологии и сейсмологии ДВО РАН было выдано 29 успешных прогнозов. В том числе среднесрочные прогнозы пароксизмальных извержений вулканов Безымянного и Шивелуча, эффективные краткосрочные прогнозы извержений Плоского Толбачика, Ключевского, Карымского и Шивелуча. Около двух десятков успешных прогнозов было выдано Камчатским филиалом ГС РАН. Вместе с тем, отмечено большое количество «пропусков цели» и «ложных тревог». Анализируются причины сравнительно низкой эффективности прогнозирования и намечаются возможные пути ее повышения.

Ключевые слова: вулканическое извержение, вулканическая опасность, прогноз извержений, вулканическое землетрясение.

ВВЕДЕНИЕ

Вулканизм является широко распространенным на Земле природным процессом. На суше насчитывается примерно 550 действующих и 950 потенциально активных многоактных вулканов, а также значительное количество активных полей одноактного вулканизма. Количество молодых вулканов морского дна точно неизвестно, но есть оценки, что оно превышает 1 млн. (Siebert et al., 2010). Общеизвестна созидательная роль вулканизма (Cas, 2005). С другой стороны, сильные извержения могут представлять значительную опасность для близлежащего населения и инфраструктуры, особенно в густонаселенных районах. Массовые выбросы вулканических аэрозолей и газов в атмосферу оказывают влияние на климат; воздействию вулканов в той или иной степени подвержено около 25% населения планеты (Вахтер, 2005). Протяженные пепловые шлейфы сильных эксплозивных извержений опасны для двигателей воздушных судов (Miller, Casadevall, 1999). Наиболее эффективными мерами, уменьшающими

ущерб от извержений, являются детальное вулканическое районирование (выделение опасных зон) и краткосрочный прогноз места, времени, энергии и опасности извержений (Новейший..., 2005, разд. 2.6 и 2.8; Токарев, 1977, 1979; Blong, 1999; McNutt, 1996; Sparks, 2003). Заблаговременное предупреждение о готовящемся извержении также позволяет ученым более детально и безопасно изучить это природное явление с самого начала, что имеет важное научное и прикладное значение. Условия безопасности при проведении исследований крайне важны, о чем свидетельствует трагическая гибель группы вулканологов на вулкане Галерас в 1991 г., в составе которой был И.А. Меняйлов, сотрудник Института вулканологии ДВО РАН (ИВ ДВО РАН), специалист по газовым методам прогноза (Кораль-Гомес, Меняйлова, 1993). Несмотря на развитие в последние годы новых видов и систем наблюдения, обработки данных, изучения глубинного строения, свойств горных пород, моделирования процессов и отдельные успехи, прогнозирование вулканических извержений и сейчас – серьезная научная и техническая проблема, пока являю-

щаяся нерешенной (Sparks, 2003; Tilling, 1989; Tokarev, 1985; Zobin, Jiménez, 2008). Поскольку вулканизм тесно связан с тектоникой, понимание природы сейсмичности невозможно без понимания природы вулканизма. Поэтому можно надеяться, что изучение вулканизма, разработка методов мониторинга и прогноза вулканических извержений будет способствовать прогрессу в прогнозировании сильных землетрясений.

На Камчатке широко проявлен как базальтовый, так и кислый вулканизм, а также происходят извержения с промежуточным составом продуктов (Влодавец, Пийп, 1957; Действующие..., 1991). Здесь выявлено около 7100 вулканических образований с возрастом от 2-2.5 млн. лет назад до современных, различной степени сохранности: многоактных вулканов, шлаковых конусов, кальдер, кратеров и т.д. (Новейший..., 2005, с. 115). Согласно новым уточненным данным, на Камчатке насчитывается 20 действующих и 14 потенциально активных многоактных вулканов, а также 10 современных и голоценовых прочих вулканических образований (региональных зон шлаковых конусов, полей ареального базальтового вулканизма, полей концентрированного многовыходного экструзивного вулканизма и кальдер) (Мелекесцев, 2006; Новейший..., 2005, с. 189-190). В том числе: три крупнейших магмати-

ческих центра планеты (Шивелуч, Ключевской и Плоский Толбачик) с расходом вулканических продуктов от 20 до 60 млн. т в год (Мелекесцев и др., 1991). В XX веке на полуострове произошло четыре больших (катастрофических) извержения вулканов с объемами изверженных продуктов ($1 < V < 10 \text{ км}^3$): Ксудача в 1907 г., Безымянного в 1955-56 гг., Шивелуча в 1964 г., Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975-1976 гг. (БТТИ), а также несколько десятков умеренных ($0.1 < V < 1 \text{ км}^3$) и более слабых ($V < 0.1 \text{ км}^3$) извержений (Действующие..., 1991). В силу высокой и разнообразной вулканической активности Камчатку можно рассматривать как важный научный полигон для изучения активного вулканического процесса и отработки методов мониторинга и прогноза.

Все большие и многие умеренные извержения на Камчатке включали сильные или пароксизмальные взрывные фазы, во время которых образовывались протяженные пепловые шлейфы, сильные пеплопады, пирокластические и грязевые потоки, представляющие реальную опасность для близлежащего населения, инфраструктуры и авиасообщения (Алидибирова и др., 1988; Горшков, Богоявленская, 1965; Иванов, 2003б; Малышев, 2000; Озеров и др., 1996; Токарев, 1967; Токарев и др., 1984; Федотов, 1996; Хубуная и др., 1995) (рис. 1). Общая площадь опас-



Рис. 1. Пепловое облако во время сильной взрывной фазы извержения вулкана Безымянный 9 мая 2006 г. Абсолютная высота облака достигала 15 км. Справа внизу – вулкан Ключевской (4850 м над у.м.). Вид из пос. Ключи. Фото Ю.В. Демянчука.

ных вулканических зон на Камчатке оценивается примерно в 18 тыс. км² (Мархинин и др., 1962), что составляет 6.8% от площади Камчатского полуострова, равной 270 км². Наиболее опасные зоны, как правило, расположены в безлюдных или малонаселенных районах полуострова. Однако на Камчатке имеется ряд факторов, значительно увеличивающих площадь зон вулканической опасности. Во-первых, выпадения токсичного вулканического пепла при эксплозивных извержениях захватывают значительные территории. Во-вторых, наличие снежного покрова на склонах вулканов в течение большей части года значительно увеличивает вероятность образования протяженных грязевых потоков при отложении горячих пирокластических, лавовых потоков и сильных пеплодах. В-третьих, в последние десятилетия значительно увеличился вулканический риск для авиации от пепловых облаков извержений вулканов Камчатки. Это произошло в связи с глобализацией и увеличением объема авиаперевозок грузов и пассажиров из Юго-Восточной Азии в Америку, проходящих через Камчатку и прилегающие акватории (Гирина, Гордеев, 2007; Кирьянов, 1992; Monitoring..., 2013). По данным П.И. Токарева, на Камчатке угрозу населению и народному хозяйству представляют главным образом следующие извержения и вулканы:

1. Все катастрофические извержения вулканов на территории Камчатки.

2. Умеренные и небольшие извержения вулканов Авачинской группы, Авачинский, Корякский (г. Елизово, г. Петропавловск-Камчатский, Елизовский аэропорт); Северной группы, Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Толбачик (пос. Ключи, Козыревск, Майское, военные полигоны); вулканов района Мутновской ГЕОТЭС, Горелый и Мутновский; вулканов Южной Камчатки района Паужетской ГЕОТЭС, вулканы Камбальный и Кошелева.

Развитие систем и методов мониторинга и краткосрочного прогноза вулканических извержений на Камчатке способствует снижению вулканического риска на полуострове и развитию международной научной кооперации. Для этих целей на Камчатке используются визуальные, сейсмологические, газогидрохимические, геодеформационные, геоморфологические, акустические, электромагнитные, а также фото- и видео методы, как наземные, так и аэрокосмические (Дрознин, Дубровская, 2010; Фирстов, 2003; Чебров и др., 2012). Регулярные вулканологические наблюдения на полуострове начались после организации Камчатской вулканологической станции (1935 г.) в пос. Ключи Камчатской области. Сейсмологические наблюдения начались в 1915 г., регулярные на вулканах Ключевской группы (по инициативе Б.И. Пийпа) – с 1946 г.,

детальные региональные – с 1961 г. (Горельчик, 2001; Токарев, 1966; Федотов, 1987). С 1976 г. ведется радиотелеметрическая передача сейсмологических данных, а с 1996 г. их цифровое накопление и обработка в реальном масштабе времени (Гаврилов и др., 1981; Гордеев и др., 2013; Чебров и др., 2012).

Успехи в прогнозировании вулканических извержений зависят в значительной степени от наличия надежных методик, среди которых можно указать следующие: краткосрочного прогнозирования времени начала извержений андезитовых вулканов и побочных кратеров базальтовых вулканов (Токарев, 1977, 1979), долгосрочного прогноза времени и масштаба извержений на основании учета влияния космических факторов и неравномерности вращения Земли (космофизический метод), а также среднесрочного прогноза на основании появления групп землетрясений в верхней мантии (Широков, 1978а, 1978б; Широков, Серафимова, 2008). Ряд методик газогидрохимического прогноза был разработан И.А. Меняйловым и Л.П. Никитиной (Меняйлов, Никитина, 1967; Меняйлов, 1976). В.А. Широковым (1985) также была разработана методика прогноза побочных извержений Ключевского вулкана, основанная на комплексном применении долго-, средне-, и краткосрочных предвестников. Можно полагать, что использование комплекса данных всегда являлось необходимым условием каждого успешного прогноза. Анализ многочисленных пометок в научных журналах из архива П.И. Токарева показывает, что кроме основных сейсмологических данных для прогноза извержения какого либо вулкана им тщательно анализировались и использовались все имеющиеся сведения о вулкане, характере его предыдущей и текущей активности, морфологии центрального кратера и т.д.

С 1978 г. координация прогнозных работ на вулканах Камчатки осуществляется Советом по прогнозу землетрясений и извержений вулканов ИВ ДВО РАН, где проводится обсуждение, систематизация прогнозных заключений и выдача официальных прогнозов. Регулярная еженедельная работа совета началась в 1985 г. С 1994 г. – это Общий совет ИВ ДВО РАН и Камчатской опытно-методической сейсмологической партии (КОМСП) ГС РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов (председатель акад. С.А. Федотов, заместители д.г.-м.н. Н.И. Селиверстов и д.г.-м.н. А.В. Кирюхин) (Федотов, 2008). В связи с переименованием институтов в настоящее время он называется Советом по прогнозу Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН) и Камчатского филиала ГС РАН (КФ ГС РАН). Экспертная

оценка состояния и развития сейсмической и вулканической активности на Камчатке с февраля 2006 г. проводится также Камчатским филиалом Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, сейсмической опасности и риска (руководители акад. Е.И. Гордеев и к.т.н. В.Н. Чебров). С 1998 по 2005 гг. эти функции выполняло Камчатское отделение Федерального центра прогнозирования землетрясений (Чебров и др., 2009). С 1993 г. оценкой текущей ситуации на вулканах Камчатки и выдачей прогнозов извержений и их опасности для авиapolетов занимается группа КВЕРТ (Гирина, Гордеев, 2007; Кирьянов и др., 2001).

Краткий обзор результатов по успешным прогнозам извержений вулканов Камчатки за 1972-2002 гг. был дан в работе (Новейший..., 2005, разд. 5.5). Сделан вывод, что в предыдущие годы на Камчатке были разработаны апробированные методики прогноза больших и наиболее опасных извержений. Указывалось на сложность прогнозирования извержений вулканов, представляющих собой «открытые системы» и на важность прогнозов развития уже начавшихся извержений.

В настоящей работе приводится более полный анализ состояния работ по прогнозу вулканических извержений на Камчатке. Во-первых, охвачен более длительный временной интервал с 1956 по 2012 гг., что позволило включить успешные прогнозы гигантских извержений вулканов Безымянного 1956 г., Шивелуча в 1964 г. и ряда умеренных извержений Безымянного вулкана в 2000-2012 гг. Во-вторых, приводится подробная таблица всех известных успешных прогнозов за последние 57 лет, а также детальное описание связанных с ними малоизвестных и, на наш взгляд, весьма поучительных обстоятельств. В третьих, впервые даются примеры «пропусков цели», «ложных тревог, анализируются причины сравнительно низкой эффективности прогнозирования и намечаются возможные пути ее повышения.

В статье не представлены прогнозы извержений, которые были сделаны сотрудниками КОМСП (КФ) ГС РАН. С момента образования в 1994 г. группой его экспертов было сделано около двух десятков успешных прогнозов. На основании предложенного С.Л. Сенюковым алгоритма прогноза по роям слабых вулканических землетрясений и термоаномалиям по спутниковым данным, был выдан ряд успешных прогнозов времени начала сильных взрывных фаз извержений вулкана Безымянный (Сенюков, 2013). Были сделаны успешные прогнозы развития вершинных извержений андезибазальтового Ключевского вулкана, которые были основаны на выявленном соотношении между извержениями вулканов Ключевской и Безымянный,

а также прогнозы времени начала извержения андезитового вулкана Кизимен в 2010-2013 гг. Подробные сведения об этих прогнозах можно найти в работе (Сенюков, 2013).

За последние почти шесть десятилетий на Камчатке накоплен большой опыт прогнозирования, обобщение которого будет способствовать совершенствованию методов и систем мониторинга, снижению вулканического риска на полуострове и в других вулканических районах мира. В определенной степени это позволит также оценить достигнутый в настоящее время уровень понимания магматических и вулканических процессов, систем мониторинга и возможность прогнозирования этих опасных природных процессов.

УСПЕШНЫЕ ПРОГНОЗЫ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ (1955-2012 гг.)

Нами анализировались *краткосрочные* (с заблаговременностью до 1 мес.) и *среднесрочные* (с заблаговременностью от 1 мес. до 1 года) успешные прогнозы вулканических извержений, как имеющие наибольшее практическое значение. Вулканическое районирование и долгосрочные прогнозы на основании геологических методов не рассматривались; данные по ним можно найти в книге (Новейший..., 2005, разд. 2.6 и 2.8). Под *началом извержения* обычно понималось регулярное поступление на дневную поверхность жидких, пластичных или твердых раскаленных магматических продуктов, безотносительно вне или внутри кратеров вулканов это происходило. Фумарольная активность не считалась извержением. Под газовыми гидротермальными извержениями вулканов Эбеко, Горелого и Мутновского понималось поступление в атмосферу значительных количеств вулканических газов. Под *прогнозом* понималось сообщение, в котором, как минимум, указывался конечный интервал времени начала ожидаемого извержения, его сильной взрывной фазы или оценка продолжительности извержения. Условно к прогнозам относились также сообщения с *открытой датой*. Последние выдавались тогда, когда наблюдались явные предвестники готовящегося вулканического события, но время его начала оценить было невозможно из-за отсутствия данных о предвестниках предыдущих извержений подобного типа. Кроме временных интервалов, в прогнозных заключениях могли указываться другие прогнозируемые параметры, например, максимальные ожидаемые высоты подъема, длины пепловых шлейфов, степень вулканической опасности и т.д. Прогнозы подразделялись на *прогнозы начала изверже-*

ний и прогнозы развития идущих извержений (Новейший..., 2005, разд. 5.5). Рассматривались только те прогнозы, которые документально подтверждались записками руководству научных учреждений, прогнозными заключениями в советы по прогнозу или в группу КВЕРТ, научными отчетами, статьями, опубликованными до начала извержений. В исключительных случаях, в качестве подтверждений принимались недокументированные сообщения руководству институтов или органам местной исполнительной власти, если на их основе были приняты решения о заблаговременных выездах экспедиций на готовящиеся извержения или объявлен режим повышенной готовности (подтверждение прогноза «по факту»). Авторами прогноза (экспертами) считались исследователи, подавшие прогнозное сообщение, безотносительно, куда оно подавалось. Успешными считались прогнозы, которые оправдались, как минимум, по времени.

В таблице представлены сведения о 29 известных успешных прогнозах, выданных камчатскими вулканологами с 1956 по 2012 гг. В число прогнозов были включены три прогноза с открытой датой. Для каждого прогноза представлены следующие данные: название вулкана, автор прогноза, вид прогноза (средне- или краткосрочный, начала или развития извержения), прогнозируемые параметры, метод прогноза, его оправдываемость и ссылки на литературу. Среднесрочные прогнозы делались газогидрохимическим, аэропловым, космофизическим и сейсмологическим методами, а также на основании анализа временной группировки извержений (Гавриленко и др., 2007, 2009; Кирсанов и др., 1973; Сторчеус, 2007; Токарев, 1964; Чирков, 1971; Широков, 1973; Menyailov et al., 1985). Все краткосрочные прогнозы начала извержений были сделаны сейсмологическим методом (Иванов, 2003а, 2003б; Токарев, 1976, Федотов, 1996). Ряд успешных прогнозов развития извержений вулкана Безымянный (его сильных взрывных фаз) был сделан на основе морфологических изменений активного лавового купола, появления автоэксплозивных лавин на нем и моделирования деформационно-экструзивного процесса (Малышев, 2000), а также по появлению термоаномалий и вулканических землетрясений, которые сопровождали начальные экструзивные фазы извержений (Гирина, 2012). Таким образом, сейсмологический метод в настоящее время можно считать основным методом мониторинга и прогноза на Камчатке (Tokarev, 1963, 1985; Zobin, 2011).

Всего за эти годы было сделано 16 прогнозов начала извержений и 13 прогнозов их развития. Из 16 прогнозов начала извержений среднесрочных было 9, краткосрочных — 4 и с открытой

датой — 3. Из 13 прогнозов развития извержений был один среднесрочный, 11 краткосрочных и один с открытой датой. Достижением можно считать среднесрочные прогнозы пароксизмальных фаз извержений вулканов Безымянного 30.III.1956 и Шивелуча в 1964 г. (Горшков, Богоявленская, 1965; Токарев, 1964) (таблица). Выдающийся результат — успешный краткосрочный прогноз П.И. Токаревым времени начала и места БТТИ в 1975-1976 гг., опубликованный в областной газете за неделю до начала извержения (Токарев, 1976) (рис. 2). Еще ряд успехов: среднесрочные прогнозы извержений вулканов: Ключевского в 1974 г. (Кирсанов, Пономарев, Штейнберг, 1973; Широков, 1973), Карымского в 1996 г. (Иванов, 2003б; Сторчеус, 2007), Шивелуча, Эбеко, Мутновского и Горелого газогидрохимическим методом (Гавриленко и др., 2007, 2009; Меняйлов, 1976); краткосрочные прогнозы: появления III-го конуса БТТИ в 1975 г. (Токарев и др., 1984), извержений вулканов Карымского 1-2.I.1996 (Федотов, 1996), Шивелуча в 1993 г. (Горельчик и др., 1995) и в 2001 г. (Иванов, 2003а), Безымянного в 1959-1960 гг. и в 2001-2012 гг. (Гирина, 2012; Токарев, 1966).

Приведем описание некоторых представленных в таблице успешных прогнозов и связанных с ними предвестников, которые, по нашему мнению, представляют значительный интерес, но недостаточно освещены в научной литературе.

Извержение Безымянного вулкана началось в 1955 г. и сопровождалось мощным роем вулканических землетрясений. В начале 1956 г., несмотря на снижение активности извержения, Г.С. Горшков предвидел высокую вероятность сильного взрыва, о чем им было письменно сообщено руководству Усть-Камчатского района Камчатской области. Пароксизмальный взрыв произошел 30.III.1956 (рис. 3). Сила извержения соответствует вулканическому эксплозивному индексу VEI = 4-5 и относится к классу «катастрофических» (Newhall, Self, 1982). К сожалению, документальных свидетельств этого прогноза не сохранилось, и мы полагаемся на данные, приведенные в книге, опубликованной через несколько лет после извержения (Горшков, Богоявленская, 1965, с. 69).

В 1964 г. на основании майского роя вулканических землетрясений на Шивелуче, П.И. Токарев в своей статье указывал на ожидаемое извержение вулкана «в ближайшие годы, возможно и в 1964 году» (Токарев, 1964, с. 44). Номер со статьей был подписан к печати 20.II. 1964, то есть уже после извержения, однако, он был сдан в набор 1.9.1964, то есть за полтора месяца до извержения, которое началось 12.XI.1964 (Токарев, 1967). Это неопровержимо доказывает факт средне- и долгосрочного предупреждения

СРЕДНЕ- И КРАТКОСРОЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ

Таблица. Успешные официальные средне- и краткосрочные прогнозы вулканических извержений (1956-2012 гг.)

Дата прогноза	Прогнозная оценка		Методы прогноза	Оправдываемость прогноза		Ссылки
	На период времени	Сила, характер ожидаемого извержения		Дата начала извержения	Сила, характер извержения	
1	2	3	4	5	6	7
Вулкан Шивелуч						
Токарев П.И. (средне- и долгосрочный прогноз)						
VII.1964	«В ближайшие годы, возможно и 1964 г.»	Межпароксизмальное	Сейсмологический; повторяемость извержений	12.XI.1964	Пароксизмальное, V ~ 1.5 км ³	(Токарев, 1964)
Оправдался через 2.5 мес. по времени начала; ошибка в масштабе извержения						
Меняйлов И.А., Никитина Л.П. (средне- и долгосрочный)						
XII.1992	1993-1995 гг.	Межпароксизмальное	Геохимический	IV.1993	Межпароксизмальное	Отчет ¹
Оправдался через 4 мес. по времени начала и масштабу						
Группа экспертов: Гарбузова В.Т., Жданова Е.Ю., Кирсанов И.Т., Разина А.А., Слезин Ю.Б., Широков В.А. – рук. группы (прогноз развития извержения)						
8.IV и 14.IV.1993	«В ближайшее время» (с открытой датой)	Сильное взрывное, опасный радиус 15 км	Сейсмологический	7-8.IV – экструживная фаза, 22.IV.1993 – главная взрывивная фаза	Умеренное экструживно-взрывивное	(Горельчик и др., 1995), Бюллетень ²
Оправдался через две недели и по масштабу извержения						
Иванов В.В., эксперт Общего совета по прогнозу ИВ ДВО РАН и КФ ГС РАН (краткосрочные прогнозы начала извержения и его главной взрывивной фазы)						
23.IV.2001	«В течение первых недель»	Умеренное экструживно-взрывивное (пепловые шлейфы H ≤ 20 км, L ≤ 2000 км)	Сейсмологический, с учетом данных по аналогичному извержению 1993 г.	30.IV – экструживная фаза, 19-22.V.2001 – главная взрывивная фаза	Умеренное экструживно-взрывивное (шлейфы H _{max} = 20 км, L _{max} = 1000 км)	(Иванов, 2003а, 2003б)
19.V.2001 в 10 час. камчатского времени	В течение текущих суток	Сильная взрывивная фаза, подобная 22.IV.1993	Сейсмологический	19.V. 2001 17 час. 30 мин камчатского времени	Сильная взрывивная фаза	
Оправдались по времени начала экструживной и гл. взрывивной фаз, масштабу и характеру извержения						
Вулкан Ключевской						
Широков В.А. (средне- и долгосрочный)						
X.1973	1974-1975 гг.	Побочное или вершинное	Космофизический (19-летний земной прилив)	23.VIII.1974	Побочное им. IV ВВС	(Широков, 1973)
Оправдался через 10 мес. по времени начала извержения						

¹ Отчет ИВ ДВО РАН по ГНТП № 16 «Безопасность населения и народно-хозяйственных объектов» за 1992 г., с. 21.

² Бюллетень камчатского полигона по прогнозу за 1993 г., № 2, с. 80-81.

Таблица. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7
Кирсанов И.Т., Пономарев Г.П., Штейнберг Г.С. (средне- и долгосрочный)						
V-VII.1973	1974-1975 гг.	а) вершинное; б) побочное в Ю-В секторе на Н = 2-2.4 км над у.м.	Ритмика извержений; закономерное расположение побочных кратеров	23.VIII.1974	Побочное им. IV ВВС	(Кирсанов и др., 1973)
Оправдался через 1 год по времени начала; ошибка по месту прорыва						
Токарев П.И. – время начала; Горельчик В.И., Гарбузова В.Т. – место (краткосрочный)						
4.III.1983	0-5 суток	Побочное на С-В склоне, V = 0.05 км ³ , длительно- стью 2 мес.	Сейсмологи- ческий, морфоло- гический (состояние верш. кратера)	8.III.1983	Побочное на С-В склоне, V = 0.02 км ³ , длительность 3.3 мес.	(Токарев, 1983; Горельчик, 1985)
Оправдался через 4 дня по времени начала и месту прорыва						
Двигало В.Н. (прогноз развития извержения)						
17.IX.1994	С открытой датой	Усиление вершинного извержения до пароксиз- мального	Аэровизуаль- ный	1.X.1994	Пароксизмаль- ная фаза извержения	(Устн. сообщ. зам. дир. Г.А. Карпова)
Оправдался по характеру извержения						
Вулкан Безымянный						
Горшков Г.С. (среднесрочный прогноз развития извержения)						
I-II.1956	В течение ближайших месяцев	«Сильный взрыв, опасная зона р. Хапицы»	Сейсмологи- ческий, с учетом опыта подобных извержений в мире	30.III.1956	Пароксиз- мальная фаза, V ~ 3 км ³	(Горшков, Богояв- ленская, 1965)
Оправдался через 1 мес. по времени начала, характеру извержения и опасности						
Токарев П.И. (краткосрочные прогнозы развития извержения)						
26.X.1959	В течение недели	«Взрывное извержение»	Сейсмологи- ческий	30.X.1959	Сильная взрыв- ная фаза	(Токарев, 1966)
8.IV.1960	В течение недели	«Взрывное извержение»	Сейсмологи- ческий	13-14. IV.1960	Сильная взрыв- ная фаза	(Токарев, 1966)
Оправдались через 5 дней по времени начала и характеру извержения						
Малышев А.И. (краткосрочный прогноз)						
XII.1984	С открытой датой	Сильное экс- трузивно-экс- пловивное	Морфологи- ческий, с учетом опыта предыдущих извержений	12.VI.1985 и 15.X.1985	Сильное экструзивно, экспловивно- эффузивное (V = 0.05км ³)	(Алиди- биров и др., 1988; Малышев, 2000)
Малышев А.И. (краткосрочные прогнозы развития извержений)						
24.VI.1985	«В ближай- шие дни»	Сильная экс- пловивная фаза	Появление автоэкспло- зивных лавин	29.VI.1985	Сильная экспловивная фаза	(Малышев, 2000)
9.XII.1986	21.XII.1986	Экспловивная фаза	Модель деформац- онно- экструзивного процесса	17-18. XII.1986	Слабая экспловивная фаза, затем излияние ЛП	
Первый прогноз через 5 дней оправдался по времени начала, прогнозы оправдались по характеру извержения						

СРЕДНЕ- И КРАТКОСРОЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ

Таблица. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7
Гирина О.А. (краткосрочные прогнозы развития извержений)						
27.VII. и 3.VIII.2001	27.VII- 10.VIII.2001	Эксплозивная фаза (H = 5-10 км)	Сейсмологи- ческий и спутниковый (термоано- малии)	6.VIII.2001	Эксплозивная фаза, пепловый шлейф (H ~ 10 км)	Сообщение ³
10.V.2007	«Извержение возможно в любое время» (с открытой датой)	Эксплозивная фаза (H = 10 км)	То же	11.V.2007	Эксплозивная фаза, пепловый шлейф (H = 4 км)	Сообщение ⁴
20 и 24.V.2010	21.V- 10.VI.2010	Эксплозивная фаза	То же	31.V.2010	Эксплозивная фаза, пепловый шлейф (H = 8-10 км)	Сообщение ⁵
8.III.2012 (02:02 UTC)	В течение 24 часов	Эксплозивная фаза (H = 13км)	То же	8.III.2012, 21:27 UTC	Пепловый шлейф (H = 8 км)	Сообщение ⁶
Оправдались через 1-9 дней по времени начала, силе и характеру извержения						
Толбачинский дол						
Токарев П.И. (краткосрочный прогноз)						
30.VI. 1975	В течение 5 суток	Извержение центрального кратера или побочного прорыва	Сейсмологи- ческий	6.VII.1975	Северный прорыв БТТИ	(Токарев, 1976; Токарев и др., 1984)
2.VII. 1975	В течение одной недели	Побочное извержение, с указанием его места				
Успешно оправдался через 4 суток по времени начала и месту; ошибка по масштабу извержения						
Федотов С.А. (краткосрочный прогноз развития извержения)						
2.VIII.1975 (16 час 30 мин., камчат- ского времени)	В ближай- шее время	Усиление активности I-го конуса Северного прорыва БТТИ	На основании образова- ния нового эруптивного центра в основании I-го конуса	2.VIII.1975 (~23 час. камчат- ского времени)	Сильная взрыв- ная активность из Северной бокки I-го конуса БТТИ	(Токарев и др., 1984)
Оправдался по времени начала и характеру извержения						
Степанов В.В., эксперт Полевого совета на БТТИ – время начала, Гарбузова В.Т. – место (краткосрочный прогноз развития извержения)						
16.VIII.1975	В течение первых суток	Новый про- рыв на идущем извержении	Сейсмологи- ческий	17.VIII.1975	III-й конус Северного прорыва БТТИ	(Токарев и др., 1984)
Оправдался через 1.5 дня по времени начала и месту извержения						
Вулкан Карымский						
Чирков А.М. (средне- и долгосрочный прогноз)						
IV.1970	«В ближай- шие годы»	Извержение	Содержание Rn ²²²	10.V.1970	Умеренное эксплозивно- эффузивное	(Чирков, 1971)
Оправдался через 1 мес. по времени начала						

³⁻⁶ Сообщения группы КВЕРТ от 2001, 2007, 2010 и 2012 гг., соответственно (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van>)

Таблица. Окончание

1	2	3	4	5	6	7
Двигало В.Н., Дубровская И.К. (долгосрочный прогноз)						
X.1993	«В ближайшие годы»	Извержение	Аэрометод (термоаномалии и новые фумаролы в центре активного кратера)	2.I.1996	Умеренное эксплозивно-эффузивное извержение	Отчет ⁷
Оправдался через 2 года и 3 мес. по времени начала						
Сторчеус А.В., эксперт Общего совета по прогнозу ИВ ДВО РАН и КФ ГС РАН (среднесрочный прогноз)						
7.IV.1995 13.IV.1995 (еженедельно продлевался вплоть до начала извержения)	«В первые недели»	Сильное извержение Карымского (шлейф $H \leq 10$ км, $L \leq 1000$ км, пирокластические потоки)	Сейсмологический, анализ пре-дистории	2.I.1996	Умеренное эксплозивно-эффузивное извержение Карымского; и моногенное извержение в озере	(Сторчеус, 2007; Иванов, 2003б)
Как продолженный прогноз оправдался по времени начала, характеру извержения Карымского вулкана; одновременно начавшееся извержение в Карымском озере не прогнозировалось						
Федотов С.А. (краткосрочный прогноз)						
1.I.1996 (~22 часа камчатского времени)	«В ближайшие часы и первые дни»	Извержение Карымского, пароксизмальное или сильное эксплозивное	Сейсмологический	«В ночь с 1 на 2 января 1996 г.» (А.Г. Коваленков)	То же	(Федотов, 1996)
Оправдался через 2-5 часов по времени начала; одновременно начавшееся извержение в Карымском озере не прогнозировалось						
Вулкан Горелый						
Гавриленко Г.М. (среднесрочный прогноз)						
XI.2009	«В течение одного года»	Извержение в центральном активном кратере, подобное извержениям 1980-х гг.	Гидрохимический, гидродинамический (уровень озера), спутниковый	VI.2010	Газовое извержение в центральном активном кратере	(Гавриленко и др., 2009)
Оправдался через 7 мес. по времени начала, месту и характеру извержения						
Вулкан Мутновский						
Гавриленко Г.М. (среднесрочный прогноз)						
X.2006	«В течение Полугода»	Фреатическое извержение в Активной воронке, подобное извержениям в 2000 и 2003 гг.	Гидрохимический	IV.2007	Фреатическое извержение в Активной воронке	(Гавриленко и др., 2007)
Оправдался через 6 мес. по времени начала, месту и характеру извержения						
Вулкан Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова)						
Меняйлов И.А.						
XII.1984	С открытой датой	Фреатическое извержение	Геохимический, геотермальный	X.1987	Фреатическое извержение в Сев. кратере и СВ фумарольном поле	(Menyailov et al., 1985)
Оправдался по характеру извержения						

⁷ Отчет ИВ ДВО РАН по ГНТП № 18 «Глобальные изменения природной среды...» за 1993 г., разд. 1.2.1.4 «Дистанционные наблюдения за состоянием вулканов», с. 30.

о близком извержении вулкана, который был сделан П.И. Токаревым за несколько месяцев до извержения.

Умеренные экструзивно-эксплозивные извержения Шивелуча в 1993-1994 гг. и в 2001 г. также были успешно предсказаны, поскольку предварялись изменениями в составе вулканических газов и роями вулканических землетрясений.



Рис. 2. Извержение I конуса Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 23 июля 1975 г. Фото Н.П. Смелова.

В результате многолетнего геохимического мониторинга вулканических газов вулкана Шивелуч И.А. Меняйлов и Л.П. Никитина предвидели извержение этого вулкана в 1993-1995 гг.⁸ Этот средне- и долгосрочный прогноз успешно реализовался в апреле 1993 г.

8 апреля 1993 г. группой экспертов Института вулканической геологии и геохимии (ИВГиГ) ДВО РАН (рук. В.А. Широков) был дан прогноз сильной эксплозивной фазы этого извержения Шивелуча (время здесь и далее камчатское = UTC + 12 час.). Прогноз основывался на факте появления с 7 на 8 апреля 1993 г. свечения на его лавовом куполе. Это означало начало экструзивной фазы извержения, т.е. речь шла о прогнозе развития идущего извержения. Точное время эксплозивной фазы не могло быть определено из-за отсутствия данных о предвестниках аналогичных извержений этого вулкана, поэтому прогноз был дан с формулировкой «в ближайшее время». Прогноз был заблаговременно доведен до сведения комиссии по чрезвычайным ситуациям Камчатской области, администраций г. Ключи и Ключи-20 (Горельчик и др., 1995).

Краткосрочный прогноз времени начала умеренного извержения Шивелуча в 2001 г. базировался на анализе параметров предваряющего роя местных вулканических землетрясений, частота и энергетический класс которых с начала апреля 2001 г. быстро нарастали (рис. 4). Учитывая, что большие извержения на вулкане

⁸ Отчет ИВ ДВО РАН по ГНТП № 16. Декабрь 1992 г. С. 21



Рис. 3. Гигантское облако извержения вулкана Безымянный (его пароксизмальной фазы 30 марта 1956 г.). Высота облака достигала 35-38 км. В левом нижнем углу просматриваются скромные по сравнению с высотой облака постройки вулканов Ключевской, Камень и Безымянный. Вид из окрестностей пос. Козыревск ($\Delta = 42$ км). Фото И.В. Ерова, любезно предоставлено В.А. Шамшиным.

имеют место сравнительно редко, один раз в 100-150 лет (Мелекесцев и др., 2003, 2004), в 2001 г. ожидалось умеренное извержение, подобное предыдущему извержению 1993-1994 гг. Это позволило для прогнозирования применить закономерности в поведении сейсмичности, выявленные для предыдущего извержения, что было существенным преимуществом. Поэтому, прогнозная оценка была более точной (Иванов, 2003а). 23 апреля 2001 г. В.В. Ивановым в Общий совет по прогнозу ИВ ДВО РАН и КОМСП ГС РАН было выдано сообщение «О возможном извержении вулкана Шивелуч по сейсмологическим данным». В сообщении давался анализ активности вулкана, краткосрочный прогноз времени начала и основных параметров будущего извержения. На основе этого заключения в начале мая 2001 г. был произведен заблаговременный выезд полевого отряда в г. Ключи для изучения извержения и дано официальное

предупреждение командованию Ключевского военного гарнизона. Прогноз успешно реализовался через неделю с началом экструзивной фазы извержения (Федотов и др., 2001). Начало этой фазы было определено по появлению 29.4.2001 (время UTC) термоаномалии на вулкане по спутниковым данным (рис. 4а).

Утром 19 мая 2001 г. по Камчатской вулканостанции был объявлен режим усиленного наблюдения за вулканом Шивелуч, в связи с ожидаемой на нем сильной взрывной фазой, которая началась в этот же день в 16 часов 30 мин. местного времени и продолжалась в течение примерно 6 часов (рис. 5). Эксплозивный индекс извержения $VEI = 3-4$. Это можно рассматривать как неофициальный краткосрочный прогноз развития извержения (Иванов, 2003б). Прогноз основывался на прекращении к 16 мая роя местных вулканических землетрясений (рис. 4) и начавшемся

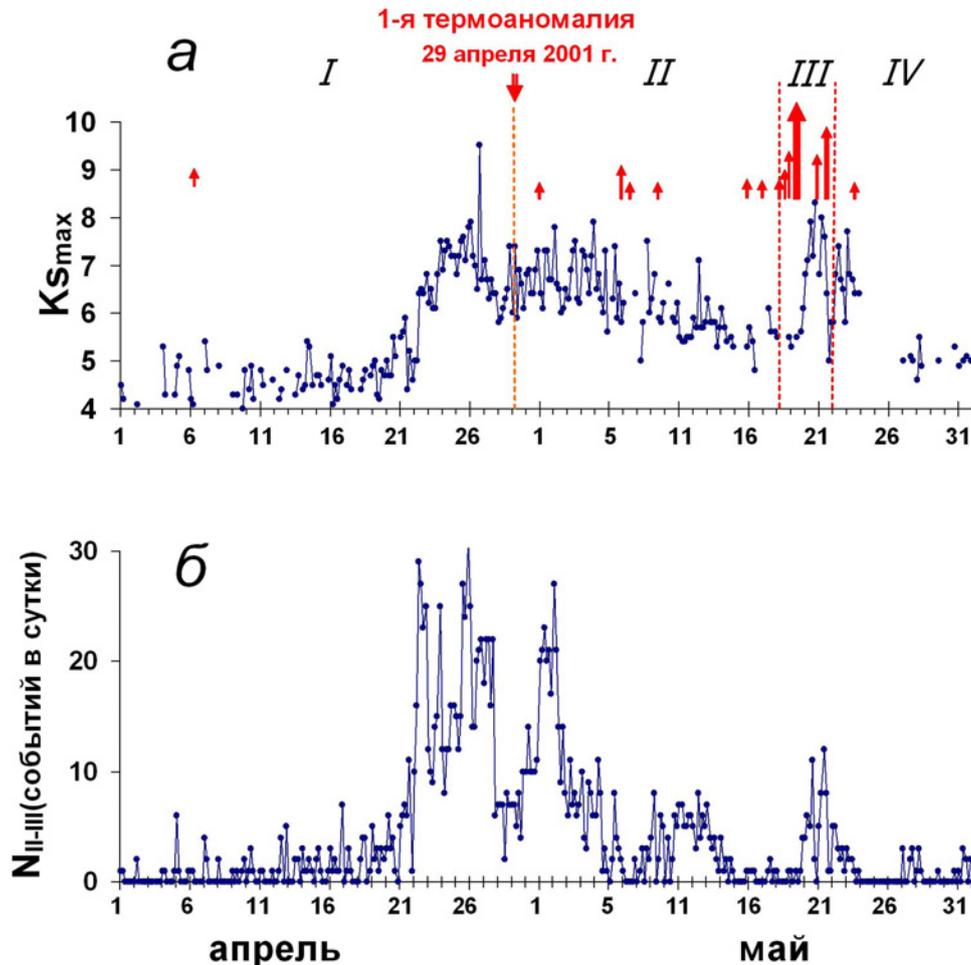


Рис. 4. Сейсмический режим вулкана Шивелуч в апреле – мае 2001 г.: *а* и *б* – максимальный энергетический класс вулканических землетрясений II-III типов (K_{smax}) (*а*) и их количества (N_{II-III}) по четырехчасовым интервалам (*б*). Фазы: I – подготовки извержения, II – начальная экструзивная, III – главная эксплозивная, IV – умеренного экструзивно-эксплозивного извержения. Стрелками показаны отдельные взрывы или взрывные извержения. Появление термоаномалии 29.IV.2001 по спутниковым данным считалось началом экструзивного этапа извержения. Время UTC = камчатское летнее - 13 час. Построено по данным каталога землетрясений КФ ГС РАН.



Рис. 5. Главная эксплозивная фаза извержения вулкана Шивелуч 19 мая 2001 г. Слева: вид из г. Ключи ($\Delta = 46$ км). На переднем плане видны нерестовое озеро, р. Камчатка и жилые дома г. Ключи. Фото автора. Справа: Вид из пункта, расположенного на расстоянии около 20 км от вулкана. Материалы видеосъемки любезно предоставлены Ю.В. Демянчуком.

18 мая 2001 г. постепенном увеличении амплитуд вулканического дрожания (график здесь не приводится). Последний факт указывал на ускорение роста активного лавового экструзивного купола вулкана. Поведение предвестников было аналогичным случаю сильной взрывной фазы на вулкане 22 апреля 1993 г. (Хубуная и др., 1995). Извержению предшествовала сравнительно длительная пауза в извержениях (7,4 года) и постепенное нарастание взрывной активности на лавовом куполе, начавшееся за несколько лет до извержения. Это позволяло предполагать, что за длительное время покоя в результате гравитационной дифференциации летучих в верхней части магматического очага вулкана образовалась т.н. «газовая шапка». Поэтому наблюдаемые с 16 мая явления были интерпретированы как предвестники, указывающие на подход к поверхности земли большой порции глубокой, более горячей, сравнительно маловязкой и газонасыщенной магмы, способной вызвать сильное эксплозивное извержение (Иванов, 2003а и б). Подчеркнем, что в отличие от пароксизмального извержения 12.11.1964 главная эксплозивная фаза извержения 19.5.2001 на Шивелуче начиналась плавно и была менее мощной.

Извержение Карымского вулкана, начавшееся в 1996 г. было успешно предсказано как в долго- и среднесрочном, так и в краткосрочном варианте (рис. 6). Это позволило изучить его с самого начала. Вулкан Карымский находился в покое с октября 1982 г. Первые признаки его активизации были обнаружены в

августе 1993 г. по результатам аэрофотосъемок в видимом и инфракрасном диапазонах, на основе которых был выдан долгосрочный прогноз возможного извержения вулкана (В.Н. Двигало и И.К. Дубровская)⁹

В среднесрочном варианте извержение Карымского вулкана было предсказано А.В. Сторчеусом, экспертом Общего совета ИВ ДВО РАН и КОМСП ГС РАН по прогнозу, на основании анализа особенностей 9-месячного предваряющего роя вулканических землетрясений с магнитудами $M \leq 3$. Эпицентры землетрясений происходили в кальдере, занятой Карымским озером и частично в районе Карымского вулкана. Первые прогнозы 7 и 13 апреля 1995 г. выдавались А.В. Сторчеусом на первые недели – месяцы. Поскольку рой продолжался, в дальнейшем прогноз еженедельно продлевался вплоть до начала извержения 2 января 1996 г. (Иванов, 2003б; Сторчеус, 2007). В это время автор настоящей статьи являлся руководителем ВТНК «Прогноз и механизм вулканических извержений» ИВ ДВО РАН и по должности подписывал прогнозные заключения совместно с А.В. Сторчеусом. Однако выделение прогностических признаков и идея прогнозного заключения принадлежала А.В. Сторчеусу, что, безусловно, позволяет считать его автором указанного прогноза.

⁹ Отчет ИВ ДВО РАН за 1993 г. по Проекту 1.2.1 Государственной научно-технической программы России «Глобальные изменения природной среды и климата». Разд. 1.2.1.4 «Дистанционные наблюдения за состоянием вулканов». С. 30.



Рис. 6. Начальная фаза извержения Карымского вулкана 3 января 1996 г. Вид с вулкана Двор. Фото Н.П. Смелова.

31 декабря 1995 г. в Кроноцком заливе вблизи Карымского вулканического центра произошло землетрясение с магнитудой $M = 5.8$. 1 января 1996 г. в 18 часов в пределах самого вулканического центра начался новый, гораздо более мощный рой вулканических землетрясений. Землетрясения происходили южнее Карымского вулкана, вплоть до вулкана Жупановские Востряки, охватывая область размерами в плане 15×25 км (Федотов, 1996). В телефонограмме, переданной В.В. Ящуком в 18 час. 15 мин. в МЧС Камчатской области, было сказано: «Отмечена сейсмическая активизация Карымского. Возможно начало извержения». Сейсмическая активность быстро нарастала. В 21 час. 59 мин. того же дня в Карымском центре произошло землетрясение с $M = 6.7$ по оперативным данным. Оно было самым сильным, зарегистрированным под вулканами Камчатки почти за 50 лет сейсмологических наблюдений (Федотов, 1996). Вечером 1 января директор ИВ ДВО РАН академик С.А. Федотов оперативно отслеживал ситуацию, информировал по телефону руководство комиссии по чрезвычайным ситуациям Камчатской области о

развитии событий, указывал на повышенную вероятность сильного землетрясения и извержения вулкана, представляющих опасность для г. Петропавловска-Камчатского и ставил вопрос о необходимости облета эпицентральной зоны и района Карымского вулкана. Этот краткосрочный прогноз успешно реализовался через несколько часов (по данным А.Г. Коваленкова извержение Карымского началось в ночь с 1 на 2 января 1996 г.). Облет района был совершен во второй половине дня 2 января 1996 г. после обнаружения пепловых облаков, идущих в Карымском районе извержений (по данным Производственно-диспетчерской службы Елизовского аэропорта, сообщение В.Н. Плоцкого). Ученые ИВ ДВО РАН и КОМСП ГС РАН смогли увидеть редкое природное явление – одновременное извержение из двух центров: вершинное Карымского вулкана и подводное в Карымском озере. Извержение в озере было кратковременным и происходило 2-3 января 1996 г. Ситуация развивалась настолько стремительно, что счет шел на часы и минуты. Это объясняет отсутствие каких-либо документальных подтверждений краткосрочного прогноза, и мы полагаемся на сведения, приведенные в работе (Федотов, 1996). Вылет вертолета МЧС в новогодний день на вулкан, очевидно, может служить подтверждением большой работы по его подготовке, которую проводил С.А. Федотов накануне извержения вечером 1 января. Это подтверждает «по факту» сделанный им краткосрочный прогноз извержения Карымского вулкана.

Аналогичное подтверждение «по факту» имел успешный прогноз возможной сильной взрывной фазы на Ключевском вулкане, который был сделан В.Н. Двигало по аэровизуальным данным, полученным 17 сентября 1994 г. во время облета вулкана на самолете ТУ-154 отряда подготовки космонавтов. На основании устного прогнозного заключения, переданного в этот же день руководству ИВ ДВО РАН, в конце сентября этого же года был произведен заблаговременный вылет полевого отряда в г. Ключи для изучения извержения. Пароксизмальная фаза извержения произошла 1 октября 1994 г. Сила извержения соответствовала вулканическому взрывному индексу $VEI = 3-4$ (рис. 7) (Озеров и др., 1996).

Важными видами прогнозов являются заключения о малой вероятности вулканического извержения, несмотря на наблюдаемые предвестники. В марте-апреле 1983 г. в районе потухших вулканов Асачинской группы развивался рой землетрясений, по развитию похожий на рой землетрясений, предвещающие побочные извержения вулканов. Последние извержения вулканов этой группы были ~1.5-2 тыс. лет назад



Рис. 7. Пароксизмальная фаза вершинного извержения Ключевского вулкана 1.Х.1994. Верхняя кромка облака достигала абсолютной высоты 20 км. Вид с «домика гляциологов на 1800». Фото Н.П. Смелова.

и не исключалась вероятность их извержения в будущем. Судя по достаточно большой энергии землетрясений (магнитуда $M \leq 4.0$), длительному интервалу покоя, извержение могло быть большим или катастрофическим. П.И. Токарев оперативно отслеживал ситуацию и на основании характера землетрясений и глубины их очагов сделал заключение, что эти события связаны с интрузиями магмы на глубине и не предвещают извержения (Токарев, 1984).

Заметим, что успешный прогноз описанных выше извержений полигенных андезитовых вулканов был обязан наличию явно выраженных предвестников, в первую очередь сейсмологических. Наличие предвещающих извержение вулканических землетрясений свидетельствует о разрушении горных пород, окружающих питающие каналы вулканов под действием значительных избыточных напряжений от заполняющих их магм. Это однозначно указывает, что первые порции магм, поднимавшихся перед указанными извержениями, имели очень большую вязкость. Извержение Безымянного вулкана в 1955-1956 г. произошло после почти тысячелетнего периода покоя (Горшков, Богоявленская, 1965). Извержения Шивелуча в 1964 г., в 1993-1994 гг., в 2001 г., Карымского в 1996 г. произошли после сравнительно длительных (6-29) летних интервалов покоя. За это время вязкая магма в пита-

ющих каналах вулканов, вероятно, охладилась, дегазировала и отвердела, образовав т.н. «лавовые пробки». Подъем новых порций магмы происходил в условиях *закрытых систем*, порождая значительные избыточные напряжения и землетрясения. Здесь закрытость системы понимается по отношению к магме, но не по отношению к отделяющимся от нее летучим, которые могут диффундировать по образующимся в «лавовых пробках» трещинам и выделяться в атмосферу.

«ПРОПУСКИ ЦЕЛИ», «ЛОЖНЫЕ ТРЕВОГИ» И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ

Однако указанные выше прогнозы — это только отдельные успехи. За эти годы было много «пропусков цели», «ложных тревог» и больших ошибок в оценке масштаба извержений. Среди нескольких побочных извержений Ключевского вулкана, начиная с начала на нем детальных сейсмологических наблюдений в 1959 г., было предсказано всего одно (Токарев, 1983). Вершинное извержение Авачинского вулкана в 1991 г. не предвещалось роем вулканических землетрясений и потому не ожидалось (Токарев и др., 1992). На Карымском вулкане с начала непрерывных сейсмологических наблюдений (10.1970) было предсказано всего одно извержение, начавшееся 2 января 1996 г., а одновременное

с ним моногенное извержение в Карымском озере 2-3 января 1996 г. оказалось неожиданным (Иванов, 2003б). Ни одно вершинное извержение Ключевского вулкана не было предсказано в краткосрочном варианте (Иванов, 2011). Не было предсказано масштабное побочное извержение Плоского Толбачика, начавшееся 28.11.2012 (Gorgeev et al., 2013). Много было ложных тревог. Например, в апреле 1974 г. на основании развития роя вулканических землетрясений ожидалось побочное извержение Ключевского вулкана, однако в заданное время оно не произошло, а случилось в августе этого же года. «Ложной тревогой» оказался прогноз сильной взрывной фазы на вулкане Шивелуч 17.7.2001.

Проблематичным остается прогнозирование масштаба будущих и идущих извержений. Таким образом, несмотря на ряд эффективных прогнозов, в целом эффективность прогнозирования оказалась сравнительно невысокой. Следовательно, несмотря на развитие систем, и методов наблюдений, прогнозирование извержений вулканов на Камчатке и в настоящее время представляет собой актуальную проблему.

Анализ предвестников извержений различных типов на Камчатке позволяет сделать вывод, что существует три основных причины сравнительно низкой эффективности прогнозирования. Во-первых, это отсутствие предвестников или их слабая выраженность (Иванов, 2011). Во-вторых, наличие значительной непредсказуемости в поведении магматических систем (Слезин, 1998; Sparks, 2003). И только, в-третьих, недостаточность системы наблюдений, понимания природы магматических процессов и недостатки методик прогнозирования. Проиллюстрируем это на некоторых характерных примерах.

Недостаточность системы наблюдений, понимания природы магматических процессов (отсутствие опытных экспертов) и недостатки методик прогнозирования. Несмотря на имеющиеся методики прогноза, налаженную систему ежесуточной передачи оперативных сейсмологических данных в г. Петропавловск – Камчатский по радиосвязи, предсказанием пароксизмального извержения андезитового вулкана Шивелуч 12.XI.1964 в краткосрочном варианте никто не занимался. К сожалению, в это время автор методики П.И. Токарев находился в командировке, и его на Камчатке не было (сообщение М.Ф. Бобкова). Главные события предвещающего извержения роя имели место 1-11 ноября 1964 г., т.е. в течение последних 10 дней до извержения (Токарев, 1967, 1981).

Несмотря на успешный в целом краткосрочный прогноз извержения вулкана Шивелуч в 2001 г. (Иванов, 2003а), отсутствие видимости

вулкана с 1 по 11 мая и низкая точность определения глубины очагов вулканических землетрясений сетью сейсмостанций КОМСП ГС РАН вызывали определенные сомнения в сроках начала извержения (Иванов, 2003б).

17 июля 2001 г. на основании факта длительного (в течение одной недели) нарастания амплитуды вулканического дрожания и характера выжимаемой экструзии, в дирекцию ИВ ДВО РАН поступило прогнозное заключение от вулканологического отряда в г. Ключи о «высокой вероятности в ближайшие часы-сутки на вулкане Шивелуч сильной эксплозивной фазы», которое не оправдалось. Проведенный нами ретроспективный анализ показывает, что к началу июля 2001 г. в результате сильных эксплозивных извержений 19-22 мая и 1-2 июля магма вулкана Шивелуч значительно дегазировалась. После этого ожидать на нем сильных взрывных извержений не было оснований. Состояние магматической системы вулкана существенно изменилось, неучет этого обстоятельства и привел к «ложной тревоге».

Трещинное Толбачинское извержение, начавшееся 27 ноября 2012 г. (Gordeev et al., 2013) не было предсказано, поскольку общепринятые методики анализа сейсмического режима заблаговременно не показывали явно выраженных предвестниковых аномалий. Ретроспективный анализ сейсмичности более совершенной методикой статистической оценки уровня сейсмичности (Салтыков, 2011) показал, что сейсмическая активизация в Толбачинском районе началась с июля 2013 г. (Салтыков и др., 2012).

Слабая выраженность предвестников или их отсутствие. Такое поведение имеет место, когда относительно маловязкие магмы поднимаются перед извержениями по длительно действующим центральным питающим каналам. Это характерно для вершинных извержений вулканов Ключевского, Авачинского и Карымского с основным или промежуточным составом вулканических продуктов. Подъем таких магм в каналах происходит относительно свободно и не сопровождается заметными роями вулканических землетрясений (Иванов, 2011; Токарев и др., 1992). Вероятно, при этом во вмещающей среде не возникает значительных избыточных напряжений и деформаций (условия *открытой системы*).

Условия открытой системы также наблюдаются перед некоторыми пароксизмальными и рядом сильных взрывных фаз на андезитовых вулканах. Как мы указывали выше, это связано с тем, что взрывоопасная магма относительно маловязкая в силу ее глубинности, более высокой температуры, газонасыщенности и ее подъем в питающем канале не порождает

заметных предвестников. Известно, что землетрясения предвещающего роя прекратились за несколько дней до пароксизмального взрыва на вулкане Безымянный 30.III.1956 (Горшков, Богоявленская, 1965). Аналогичная картина наблюдалась перед главной взрывной фазой на вулкане Шивелуч 19.V.2001 (Иванов, 2003а, 2003б). Две последующих наиболее сильных взрывных фазы на вулкане Шивелуч 27.02.2005 и 27.10.2010 не предвещались роями вулканических землетрясений и оказались неожиданными (Жаринов, Демянчук, 2013, с. 51). На вулкане Безымянный из-за снижения вязкости магм в последние три десятилетия произошла смена режима извержений с экструзивно-эксплозивного на преимущественно эффузивно-эксплозивный (Алидибирова и др., 1988). Энергия землетрясений, предвещающих сильные взрывные фазы на этом вулкане резко уменьшилась, возможность прогнозирования их появилась лишь с понижением порога регистрации землетрясений сетью сейсмостанций и с использованием термальных спутниковых данных (Гирина, 2012; Сеньюков, 2013).

Дополнительные сложности прогнозирования открытых систем возникают в случае относительно быстрого подъема основных магм в центральных питающих каналах вулканов. Такие извержения возникают без каких – либо предвестников, внезапно. Примером служат извержения вулканов Авачинского в 1991 г., Ключевского в 1994 и 2005 гг. За непродолжительное время подъема магмы к поверхности, выделившиеся из нее летучие в виде свободной газовой фазы, не успевают заметно всплыть, объединения газовых пузырьков не происходит. Крупные газовые структуры в магме не образуются, что резко снижает скорость ее дегазации. Вот почему предвещающая извержение эмиссия газов через центральный кратер выражена слабо или отсутствует. По этой же причине не выражены связанные с дегазацией магмы близповерхностные сейсмические сигналы (Иванов, 2011; Токарев и др., 1992). Следовательно, можно ожидать, что сейсмические, термальные и газогидрохимические предвестники таких извержений будут проявлены в очень небольшой степени или отсутствовать вовсе.

В ряде случаев мощное вулканическое дрожание во время идущих извержений маскирует слабые сейсмические сигналы на других вулканах, в связи с чем прогнозирование последних по сейсмологическим данным становится сильно затруднено или невозможно. Например, дрожание во время длительных вершинных извержений Ключевского вулкана сильно мешает выделению слабой сейсмичности на Безымянном вулкане.

Наличие непредсказуемости в поведении магматических систем. Известно, что около 30% роев вулканических землетрясений на вулканах Ключевском и Толбачинском не заканчиваются побочными извержениями; в ряде случаев магма внедряется в дайки, но не достигает поверхности земли (Широков, 1985). Непредсказуемость поведения магматических систем выражается также в том, что для роев, которые заканчиваются побочными извержениями, однозначных закономерностей в поведении их параметров, увы, не наблюдается. Проведенный нами анализ (здесь не приводится) показывает, что отмечается значительный разброс, как в величинах длительности предвещающих роев, так и в характере их развития для различных побочных извержений. Это приводит к тому, что, несмотря на предложенную методику прогноза (Токарев, 1977) среди нескольких побочных извержений Ключевского вулкана с начала детальных сейсмологических наблюдений на нем (1959 г.), было предсказано всего одно в 1983 г. (Токарев, 1983). Одновременное с извержением Карымского вулкана моногенное базальтовое извержение в Карымском озере 2-3.1.1996, также не ожидалось (Иванов, 2003б). Не было предсказано побочное извержение Плоского Толбачика, начавшееся 28.11.2012, поскольку в отличие от ряда других случаев (Токарев, 1977) явный рой вулканических землетрясений начался всего за двое суток до начала извержения и самые сильные землетрясения роя происходили в последние часы перед ним (Салтыков и др., 2012; Gorgeev et al., 2013).

Значительная неопределенность связана с определением моментов пароксизмальных фаз извержений андезитовых и дацитовых вулканов. Гигантский направленный взрыв на вулкане Безымянном 30.3.1956 произошел после пяти месяцев извержения, которое началось 21.10.1955 как чисто эксплозивное, а затем сменилось длительной экструзивной фазой (Горшков, Богоявленская, 1965). Аналогичная картина имела место перед пароксизмальным взрывом 18.5.1980 на дацитовом вулкане Сент-Хеленс (The 1980 eruptions..., 1981). Напротив, пароксизмальное извержение вулкана Шивелуч 12.11.1964 началось внезапно без заметной поверхностной вулканической активности. Поэтому предсказывать сильные взрывные фазы на андезитовых вулканах пока проблематично. Например, извержение вулкана Сент-Хеленс в 1980 г. ожидалось по сейсмическим данным, однако предсказать его пароксизмальную фазу 18.5.1980 не удалось, что привело к человеческим жертвам (The 1980 eruptions..., 1981). К сожалению, ограниченный объем статьи не позволяет остановиться на этом вопросе более детально.

Было много «ложных тревог», о которых обычно не упоминают в литературе. Например, в апреле 1974 г. на основании развития роя вулканических землетрясений ожидалось побочное извержение Ключевского вулкана, однако, в заданное время оно не произошло, а случилось в августе этого же года в соответствии со среднесрочным прогнозом В.А. Широкова (1973).

Проблематичным остается прогнозирование масштаба будущих и идущих извержений. Лишь небольшое число прогнозных заключений в приведенной выше таблице включало оценки масштаба извержения. П.И. Токарев в начале июля 1975 г. прогнозировал умеренное побочное извержение в Толбачинской ареальной зоне шлаковых конусов продолжительностью до 3 мес. (Токарев, 1976), однако произошло на порядок более масштабное извержение (Токарев и др., 1984). Оно было необычно мощным и длилось около 2 лет, что явилось полной неожиданностью для вулканологов.

Из сказанного выше следует, что прогнозирование вулканических извержений представляет собой чрезвычайно сложную проблему. В первую очередь это связано с прогнозированием извержений вулканов, представляющих собой открытые системы, для которых предвестники извержений выражены слабо или вовсе отсутствуют. Дополнительные сложности связаны с внутренне присущей магматическим системам неопределенностью в их поведении. Все это происходит в условиях недостаточной изученности вулканов и происходящих в них процессов.

ВЫВОДЫ

1. Начиная со второй половины XX столетия, на Камчатке были развиты разнообразные системы инструментальных наблюдений на действующих вулканах, имеющие целью изучение активного вулканического процесса, мониторинга и прогноза вулканических извержений. Основным методом мониторинга является сейсмологический метод. За эти годы были изучены предвестники извержений как кислых, так и основных вулканов, как вершинных, так и побочных, предложены методики мониторинга, долго-, средне-, краткосрочного прогноза, их комплексирования, накоплен значительный опыт прогнозирования. П.И. Токаревым создана научная школа сейсмологического прогноза. Работают экспертные советы по прогнозу сильных землетрясений и извержений вулканов, которые координируют поисковые работы в этих направлениях.

2. С 1956 по 2012 гг. Камчатской вулканостанцией, ИВ, ИВГиГ и ИВиС ДВО РАН было выдано 29 успешных средне- и краткосрочных прогнозных заключений. Среди них среднесрочные про-

гнозы пароксизмальных извержений вулканов Безымянного 1955-56 гг. и Шивелуча в 1964 г., краткосрочные прогнозы Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975 г., побочного извержения вулкана Ключевского в 1983 г., вершинных извержений вулканов Карымского в 1996 г., Шивелуча в 2001 г. и Безымянного в 2001-2012 гг. Экспертами КОМСП (КФ) ГС РАН было выдано около двух десятков успешных прогнозных заключений. Успешные прогнозы способствовали снижению вулканического риска для населения, инфраструктуры, авиации и позволили ученым изучить эти уникальные природные явления с самого начала.

3. Однако за эти годы отмечено большое количество «пропусков цели» и «ложных тревог». Сравнительно низкая эффективность прогнозирования объясняется, во-первых, отсутствием предвестников или слабой их выраженностью для целого ряда извержений. Во-вторых, непредсказуемостью поведения магматических систем, которая внутренне им присуща. И, в-третьих, недостатками систем мониторинга, недостаточным пониманием природы магматических процессов подготовки извержения и недостатками методик прогнозирования. Слабая выраженность или полное отсутствие сейсмологических предвестников наблюдаются, когда относительно маловязкие магмы поднимаются по готовым центральным питающим каналам (случай «открытых систем»). Это характерно как для вершинных извержений вулканов с основным составом продуктов, так и для многих сильных или пароксизмальных взрывных фаз на андезитовых вулканах. Непредсказуемость имеет место, когда магма внедряется в земную кору, образуя новые дайки; наблюдаются явные рои вулканических землетрясений, но побочного извержения не происходит, магма не доходит до поверхности земли. Большая непредсказуемость характерна также для моментов сильных и пароксизмальных взрывных фаз на андезитовых вулканах. Поэтому, несмотря на явно выраженные предвестники, выявить надежные закономерности в их поведении не удастся, что создает значительные трудности для краткосрочного прогнозирования.

4. Повышение эффективности прогнозирования вулканических извержений на Камчатке, по нашему мнению, возможно по следующим трем направлениям:

А) Обобщение обширного камчатского и мирового опыта по изучению предвестников, механизму извержений, процессов в магматических питающих системах вулканов, развитию систем наблюдений и прогнозированию. Необходимо было бы специально проанализировать факторы, приводящие к непредсказуемости поведения магматических систем.

Б) Развитие новых видов, систем и методов мониторинга в рамках программы комплексного мониторинга вулканов Дальневосточного региона (Чебров и др., 2012). В частности, путем создания систем для выделения более слабых сейсмических сигналов на вулканах, представляющих собой «открытые магматические системы» (Иванов, 2011; Сенюков, 2013). Важным для изучения вулканических процессов и прогнозирования на Камчатке представляется продолжение исследований вулканов в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах спутниковыми и аэро методами (Гирина, 2012; Дрознин, Дубровская, 2009; Мельников, 2008). Поскольку спутниковые данные высокого разрешения приобретаются за границей и стоят немалых денег, существенный прогресс здесь, по нашему мнению, может быть достигнут только в будущем при налаживании соответствующих отечественных систем.

В) Разработка более надежных методик прогнозирования. Перспективным представляется использование методики статистической оценки уровня сейсмичности (Салтыков, 2011; Салтыков и др., 2012). Важно более широкое использование в практике комплексирования краткосрочных методик прогноза со средне- и долгосрочными методиками, базирующимися на анализе общепланетарных и космических факторов и мониторинге геодинамической обстановки в регионе и в Мире (Широков, 1978а, 1978б, 1985; Широков, Серафимова, 2008). Решение прогнозных задач невозможно без более детального изучения глубинного строения, свойств горных пород и моделирования магматических и вулканических процессов (Мороз и др., 1993; Озеров, 2010; Федотов, 2006).

Автор выражает признательность В.И. Андрееву, А.В. Викулину, В.Т. Гарбузовой, О.А. Гириной, В.Н. Двигало, Ю.В. Демянчуку, В.А. Дрознину, И.К. Дубровской, Г.А. Карпову, М.А. Магуськину, А.И. Малышеву, Я.Д. Муравьеву, А.Ю. Озерову, Г.П. Пономареву, П.П. Фирстову и Г.С. Штейнбергу за предоставление исходных материалов, консультации и дискуссии. Особая благодарность В.А. Широкову и И.В. Мелекесцеву за многочасовые многочисленные полезные обсуждения рассматриваемых в статье прогнозных вопросов.

Список литературы

Алидибиров М.А., Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т. и др. Извержение вулкана Безымянный в 1985 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 3-17.

Влодавец В.И., Пийп Б.И. Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюлл. вулканологических станций. 1957. №25. С. 5-95.

Гавриленко Г.М., Мельников Д.В., Зеленский М.Е., Тавиньо Л. Многолетний гидрохимический мониторинг вулкана Мутновский (Камчатка) и фреатическое извержение вулкана в апреле 2007 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. 9. С. 127-132.

Гавриленко Г.М., Мельников Д.В., Овсянников А.А. Современное состояние термального озера в активном кратере вулкана Горелый (Камчатка) // Материалы Всероссийской научной конференции к 100-летию Камчатской экспедиции Русского географического общества 1908-1910 гг. 23-27 сентября 2008 г. Петропавловск-Камчатский, 2009. С. 86-95.

Гаврилов В.А., Чебров В.Н., Малкин А.П., Яцук В.В. Петропавловская радиотелеметрическая сеть сбора сейсмометрической информации: опыт эксплуатации и перспективы развития // Тезисы научной сессии МССС «Сейсмичность, сейсмический прогноз и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке». Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО РАН, 1981. С. 62-63.

Гирина О.А. О предвестнике извержений вулканов Камчатки, основанном на данных спутникового мониторинга // Вулканология и сейсмология. 2012. № 3. С. 14-22.

Гирина О.А., Гордеев Е.И. Проект KVERT – снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил // Вестник ДВО РАН. 2007. № 2. С. 100-109.

Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Федотов С.А. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961-2011 гг., основные результаты // Вулканология и сейсмология, 2013. № 1. С. 3-17.

Горельчик В.И. К истории развития сейсмологических исследований на вулканах Камчатки // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 341-351.

Горельчик В.И. Сейсмическая активность Ключевского вулкана в период подготовки и развития прорыва Предсказанный в марте-июне 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 71-87.

Горельчик В.И., Гарбузова В.Т., Дрознин Д.В. и др. Вулкан Шивелуч: Глубинное строение и прогноз извержения по данным детальной сейсмичности 1962-1994 гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 54-75.

Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955-1963 гг. М.: Наука, 1965. 172 с.

Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Под ред. С.А. Федотова и Ю.П. Масуренкова. М.: Наука, 1991. Т. 1. 302 с.; Т. 2. 415 с.

- Дрознин В.А., Дубровская И.К.* Тепловизионные исследования вулканов Камчатки в 2008-2009 гг. // Тезисы 2-й региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», Петропавловск-Камчатский, 11-17 октября. 2009. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 38-42.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.* Крупные explosive извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) с частичным разрушением экструзивного купола 28 февраля 2005 г. и 27 октября 2010 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 48-62.
- Иванов В.В.* Прогноз большого экструзивного извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) и его мощной взрывной фазы в апреле-мае 2001 г. // Материалы II-го Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии 9-12 сентября 2003 г. Екатеринбург: 2003а. С. 925-931.
- Иванов В.В.* Прогнозы крупных извержений вулканов на Камчатке и их оправдываемость // Вестник ДВО РАН. 2003б. № 5. С. 97-108.
- Иванов В.В.* Сейсмологические предвестники вершинных извержений Ключевского вулкана на Камчатке (на примере вулканического дрожания). Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2011. 13 с.
- Кирсанов И.Т., Пономарев Г.П., Штейнберг Г.С.* Некоторые закономерности извержений Ключевского вулкана // Бюлл. вулканологических станций. 1973. № 49. С. 93-98.
- Кирьянов В.Ю.* Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 16-36.
- Кирьянов В.Ю., Чубарова О.С., Сеньюков С.Л. и др.* Группа по обеспечению безопасности полетов от вулканических пеплов (КВЕРТ): 8 лет деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 408-423.
- Кораль-Гомес К., Меньяйлова И.И.* Вулкан Галерас (Колумбия). Извержение 14 января 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1993. № 5. С. 3-14.
- Малышев А.И.* Жизнь вулкана. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УРО РАН, 2000. 261 с.
- Мархинин Е.К., Сирин А.Н., Тимербаева К.М., Токарев П.И.* Опыт вулcano-географического районирования Камчатки и Курильских островов // Бюл. вулканол. ст. 1962. № 32. С. 52-70.
- Мелекесцев И.В.* Действующие и потенциально активные вулканы Курило-Камчатской островной дуги в начале XXI в.: этапы исследований, определение термина «действующий вулкан», будущие извержения и вулканическая опасность // Вестник КРАУНЦ. 2006. № 2. Вып. 7. С. 15-35.
- Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирсанова Т.П. и др.* 300 лет жизни Камчатских вулканов: Молодой Шивелуч (анализ динамики и последствий эруптивной активности в XVII-XX веках). Часть I. 1650-1964 гг. // Вулканология и сейсмология. 2003. № 5. С. 3-19.
- Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирсанова Т.П. и др.* 300 лет жизни Камчатских вулканов: Молодой Шивелуч (анализ динамики и последствий эруптивной активности в XVII-XX веках). Часть II. 1965-2000 гг. // Вулканология и сейсмология. 2004. № 1. С. 5-24.
- Мелекесцев И.В., Хренов А.П., Кожьямяка Н.Н.* Тектоническое положение и общий очерк вулканов Северной группы и Срединного хребта // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 74-78.
- Мельников Д.В.* Применение данных OMI/Aura для задач мониторинга извержений вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 371-375.
- Меньяйлов И.А.* Зависимость состава вулканических газов от состояния вулканической активности и геохимический прогноз извержений // Бюлл. вулканологических станций. 1976. № 52. С. 42-48.
- Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И., Зубин М.И., Федорченко И.А.* Поиск предвестников землетрясений и извержений вулканов в геофизических полях на Камчатке // Разработка концепции мониторинга природно-технических систем. Т. 2. Методика и результаты геодинамического мониторинга природно-технических объектов. М.: ИФЗ РАН, 1993. С. 236-248.
- Новейший и современный вулканизм на территории России. Гл.2. Отв. ред. Н.П. Лаверов. ИФЗ РАН. М.: Наука, 2005. 604 с.
- Озеров А.Ю.* Механизм базальтовых взрывов (экспериментальное моделирование) // Вулканология и сейсмология. 2010. № 5. С. 3-19.
- Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дрознин В.А. и др.* Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября - 2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. № 5. С. 3-16.
- Меньяйлов И.А., Никитина Л.П.* О поведении серы и хлора в фумарольных газах перед усилением активности вулканов // Вулканизм и геохимия его продуктов. М.: Наука, 1967. С. 72-81.

- Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53-59.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.* Об аномалии сейсмического режима, предвзявшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. 2012. № 2. Вып. 2. С. 16-19.
- Сенюков С.Л.* Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке. LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 144 с.
- Слезин Ю.Б.* Механизм вулканических извержений (стационарная модель). М.: Научный мир. 1998. № 2. 127с.
- Сторчеус А.В.* Рой длиннопериодных вулканических землетрясений, предвзявших извержение Карымского вулкана в 1996 г. // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога 28-31 марта 2007 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2007. С. 75-82.
- Токарев П.И.* Рой землетрясений вулкана Шивелуч в мае 1964 г. // Бюлл. вулканологических станций. 1964. № 38. С. 41-44.
- Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118 с.
- Токарев П.И.* Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. и его предвестники // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1967. № 9. С. 11-22.
- Токарев П.И.* Предсказание места и времени начала большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // ДАН СССР. 1976. Т. 229. № 2. С. 439-442.
- Токарев П.И.* К методике прогноза извержений вулканов Камчатки по сейсмологическим данным // Бюлл. вулканологических станций. 1977. № 53. С. 38-45.
- Токарев П.И.* Долгосрочный прогноз извержений вулканов // Вулканология и сейсмология. 1979. № 3. С. 77-90.
- Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
- Токарев П.И.* Прогноз побочного извержения вулкана Ключевского в марте 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 3-8.
- Токарев П.И.* Асачинский рой землетрясений и его природа (Камчатка, март-апрель, 1983) // Вулканология и сейсмология. 1984. № 3. С. 3-13.
- Токарев П.И., Гаврилов В.А., Иванов В.В.* Сейсмичность и сейсмический режим Авачинского вулкана до и во время январского извержения в 1991 г. // Вулканизм, структуры и рудообразование. Тезисы VII Всесоюзного вулканологического совещания, Иркутск, июнь 1992 г. Петропавловск-Камчатский, 1992. С. 34.
- Токарев П.И., Федотов С.А., Степанов В.В.* Прогноз начала и развития извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка, 1975-1975. Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. С. 373-388.
- Федотов С.А.* К 25-летию детальных сейсмологических исследований на Камчатке и Командорских островах, XI.1961 - X.1986: История, развитие и задачи // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 3-10.
- Федотов С.А.* Пробуждение // Поиск. 20-26 января 1996. № 3-4 (349-350). С. 15.
- Федотов С.А.* К 30-летию Совета Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН И Камчатского ГС РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов // Вулканология и сейсмология 2008. № 6. С. 78-80.
- Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука. 2006. 455 с.
- Федотов С.А., Двигало В.Н., Жаринов Н.А., Иванов В.В. и др.* Извержение вулкана Шивелуч в мае-июле 2001 г. // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С. 3-15.
- Фирстов П.П.* Вулканические акустические сигналы диапазона 0.5-10 Гц в атмосфере и их связь с эксплозивным процессом. Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный педагогический университет, 2003. 90 с.
- Хубуня С.А., Жаринов Н.А., Муравьев Я.Д., Иванов В.В. и др.* Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3-19.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. и др.* Развитие системы комплексного инструментального мониторинга вулканов Дальневосточного региона // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 4. С.40-54.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Десять лет деятельности Камчатского филиала РЭС по прогнозу землетрясений: достижения, проблемы, перспективы // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии 22-27 сентября 2009 г. Петропавловск-Камчатский, 2009. С. 677-680.
- Чирков А.М.* О содержании Rn222 в гидротермах Камчатки // ДАН СССР. 1971. Т. 199. № 1. С. 202-203.
- Широков В.А.* Космос и вулканы // Человек и стихия, ежегодник. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. С. 26-28.
- Широков В.А.* Влияние 19-летнего лунного прилива на возникновение больших кам-

- чатских извержений и землетрясений и их долгосрочный прогноз // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975-1976 гг. М.: Наука. 1978а. С. 164-170.
- Широков В.А.* Связь извержений вулканов Камчатки с землетрясениями верхней мантии // Бюлл. вулканологических станций. 1978б. № 54. С. 3-8.
- Широков В.А.* Некоторые вопросы методики комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевской (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 48-58.
- 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. 2008. № 2. Вып. 12. С. 154-163.
- Baxter P.* Human impacts of volcanoes // Volcanoes and the environment. (Ed. by J Marti' and G.G.J. Ernst). Cambridge University Press, Cambridge, 2005. P. 273-303.
- Blong R.J.* Volcanic hazards and risk management // Encyclopedia of volcanoes. Ed. by H. Sigurdsson. Academic press. 1999. P. 1215-1228.
- Cas Ray A.F.* Volcanoes and the geological cycle // Volcanoes and the environment. Cambridge University Press, Cambridge, 2005. P. 121-151.
- Gordeev E.I., Muravyev Ya.D., Samoylenko S.B. et al.* First results from the 2012-2013 Tolbachik fissure eruption // Bull. Volcanological Society of Japan. 2013. № 2. SP-1 – SP-8.
- McNutt S.R.* Seismic monitoring of volcanoes: A review of the state-of-the-art and recent trends // Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards // Ed. by Scarpa, R., R. Tilling, Chapter 3, Springer-Verlag. Berlin, 1996. P. 99-146.
- Menyailov I.A., Nikitina L.P., Shapar V.N.* Results of geochemical monitoring of the activity of Ebeko volcano (Kurile Islands) used for eruption prediction // Journal of geodynamics. 1985. V. 3. P. 257-274.
- Miller T.P., Casadevall T.J.* Volcanic ash hazards to aviation // Encyclopedia of Volcanoes. Ed. by H. Sigurdsson. Academic Press, 1999. San Diego, PP. 915-930.
- Monitoring of Volcanoes in the North Pacific: Observations from Space. Dean K., Dehn J. (eds). Springer - Praxis Press. 2013. 500 p.
- Newhall C.A., Self S.* The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of the explosive magnitude for historical volcanism // JGR. 1982. V. 87. P. 1231-1238.
- Siebert L., Simkin T., Kimberly P.* Volcanoes of the World. 3-d edition. Smithsonian Institution, University of California press. W., D.C.: 2010. 551 p.
- Sparks R.S.J.* Forecasting volcanic eruptions // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V. 210. P. 1-15.
- The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington. U.S. Geological Survey Prof. Paper 1250. Ed. by P.W. Lipman, D.R. Mullineaux. 1981. 844 p.
- Tilling R.I.* Volcanic hazards and their mitigation: Progress and problems // Reviews of Geophysics. May 1989. V. 27, Iss. 2, P. 237-269.
- Tokarev P.I.* On possibility of forecasting of Bezymianny volcano eruptions according to seismic data // Bulletin of volcanology. 1963. V. 26. P. 379-386.
- Tokarev P.I.* The prediction of large explosions of andesitic volcanoes // Journal of geodynamics. 1985. V. 3. P. 219-244.
- Zobin V.M.* Introduction to volcanic seismology. Elsevier. Amsterdam. 2011. 474 p.
- Zobin V.M., Jiménez Z.* Some regularity in the process of re-awakening of andesite and dacite volcanoes: specific features of the 1982 El Chichón volcano, México reactivation // Journal of volcanology and geothermal research. 2008. V. 175. P. 482-487.

СРЕДНЕ- И КРАТКОСРОЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ
**MID- AND SHORT TERM FORECASTS OF VOLCANIC ERUPTIONS
IN KAMCHATKA (1956-2012)**

V.V. Ivanov

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, e-mail: victor@kscnet.ru

The article provides description for methods and techniques of monitoring and prediction of volcanic eruptions, activity of expert councils, summary on successful forecasts, examples of undetected events and false alerts over the period 1956-2012 in Kamchatka. During the past 57 years the Kamchatka Volcano Observatory, the Institutes of Volcanology, Volcanic Geology and Geochemistry, and Volcanology and Seismology Far East Branch of the Russian Academy of Sciences issued 29 successful forecast, including mid-term forecasts of paroxysmal volcanic eruptions at Bezymianny in 1956 and Shiveluch in 1964 and spectacular short-term eruption forecasts for Plosky Tolbachik, Klyuchevskoy, Karymsky and Shiveluch. Also about 20 successful forecasts were issued by the Kamchatka Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences. At the same time, considerable amount of undetected events and false alerts were registered as well. That is why the article presents analysis of low forecast efficiency and proposes possible methods to increase it.

Keywords: volcanic eruptions, volcanic hazard, eruption forecast, volcanic earthquakes.