

УДК 550.34

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ КОРЯКСКОГО И КЛЮЧЕВСКОГО (КАМЧАТКА) НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ МИРОВЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ 2008-2009 гг.

© 2009 В.А. Широков¹, И.И. Степанов², И.К. Дубровская³

¹Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: shirokov@emsd.ru

²Александровская опытно-методическая экспедиция, г. Александров, 601650;
e-mail: stepanovi@mail.ru

³Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: rik@kscnet.ru

Впервые на примере действующих камчатских вулканов Корякского и Ключевского исследовалась связь во времени вулканических землетрясений (ВЗ) и сильных мировых тектонических землетрясений (ТЗ) с магнитудой $M_w \geq 6.3$ на заключительной, менее недели, стадии их подготовки, независимо от места возникновения ТЗ и их глубины. Показано, что в 2009 г. частота возникновения ВЗ Корякского вулкана за трое суток до мировых ТЗ в целом была аномально высокой. В 12 случаях из 18 ВЗ за трое суток до ТЗ сигнализировали о готовящихся в мире сильных сейсмических событиях. В 2008-2009 гг. подобные эффекты, характерные также для Ключевского вулкана, в комплексе с другими предвестниковыми аномалиями, в том числе с использованием данных деформационных наблюдений, успешно использовались в реальном времени для прогноза сильных мировых ТЗ со временем упреждения до шести суток.

Ключевые слова: модель подготовки землетрясений, предвестник, вулкан, прогноз землетрясений.

ВВЕДЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА

В настоящей работе используются такие термины, как *оперативные прогнозы и предвестники землетрясений*. Подразумевается, что речь идет о прогнозе по двум параметрам (время и магнитуда) и о прогнозе и предвестниках со временем упреждения менее недели. *Время упреждения прогноза* – время от начала периода «тревоги» до прогнозирувавшегося события, если оно произошло (Прогностика..., 1990). Если имеется ввиду прогноз землетрясения по трем параметрам (время, магнитуда, место), это поясняется. Дадим определение и введенного нами термина *успешный прогноз (времени и магнитуды) землетрясений*. Для проверки эффективности разрабатываемых методик оперативного прогноза времени и магнитуды мировых тектонических землетрясений (ТЗ) введено понятие «*качество прогноза Q*» (Широков, 2009в). Величина Q представляет отношение среднего интервала

между последними по времени землетрясениями ко времени упреждения. Последнее событие, имеющее магнитуду $M_{\text{прог}}$, проверяется на качество прогноза (берутся 5 предыдущих событий с $M \geq M_{\text{прог}}$ отдельно для глубин до 50 км и более 50 км). Вероятность P случайного прогноза для пуассоновского потока событий $P = 1 - e^{-1/Q}$. При $Q = 3.5$ получим $P = 0.25 = 1/4$, т.е. в таких случаях в среднем будет оправдываться только один из четырех прогнозов, поэтому успешными именуется прогнозы (по времени и магнитуде) с качеством прогноза $Q \geq 3.5$.

Отметим, что все сделанные в реальном времени прогнозы землетрясений, о которых далее пойдет речь, официально регистрировались в Камчатском филиале Российского экспертного совета по прогнозированию землетрясений и оценке сейсмической опасности (КФ РЭС).

Целью работы является исследование связи во времени между вулканическими землетрясениями (ВЗ) и сильными мировыми ТЗ с магнитудой $M \geq 6.3$ на примере камчатских вулканов

Корякского и Ключевского (рис. 1), независимо от местоположения и глубины очагов ТЗ, на заключительной, менее недели, стадии их подготовки. При наличии значимой связи вулканических и тектонических землетрясений решается задача использования ВЗ в качестве оперативных предвестников времени возникновения ТЗ.

Целенаправленное изучение сейсмического отклика отдельных вулканов на заключительной стадии (часы-дни) подготовки сильных мировых ТЗ, независимо от их местоположения и глубины очагов, насколько нам известно, до сих пор не проводилось. Во многом это связано с тем, что в существующих моделях подготовки ТЗ считается, что заключительная стадия формирования очагов землетрясений происходит в течение дней-недель, реже месяцев до главного события, причем вдали от области очага будущего землетрясения «перемещения блоков и плит не испытывают возмущений, вызванных подготовкой землетрясения» (Добровольский, 1991, с. 73). Таким образом, в рамках существующих моделей считается, что геофизический, в том числе сейс-

мический, отклик проявляется на относительно небольших расстояниях от очага, сравнимых с его несколькими размерами (Добровольский, 1991; Соболев, 1993 и др.). В рамках нашего подхода расстояния между ТЗ и ВЗ не принимаются во внимание, так как могут быть любыми.

К числу наиболее разработанных моделей подготовки тектонических землетрясений относятся дилатантно-диффузионная, лавинно-неустойчивого трещинообразования, неустойчивого скольжения и фазовых превращений, самоорганизованной критичности, консолидации (Добровольский, 1991; Соболев, 1993 и др.). Критический обзор различных моделей сделан Добровольским (1991). Например, в модели самоорганизованной критичности заложена идея эволюции очагов землетрясений самого разного масштаба, включая сильнейшие события, и делается вывод о принципиальной непредсказуемости момента возникновения землетрясений в краткосрочном масштабе времени (Добровольский, 1991; Родкин, 2008). Существенно, что ни в одной из известных нам моделей практически не обсуждается вопрос о влиянии на зону их подготовки, включающую очаг будущего землетрясения, общепланетарных космических воздействий, что, на наш взгляд, является недостатком этих моделей (Широков, 2009б).

При изучении процессов подготовки тектонических землетрясений необходимо учитывать, что ядро и оболочки нашей планеты находятся под влиянием геофизических полей не только собственно Земли, но и других тел и полей Солнечной системы. Как считают многие исследователи (Кропоткин, 1970; Ламакин, 1966; Сытинский, 1989; Широков, 1977, 2001, 2008а, 2008б, 2009а, 2009б, 2009в; Широков, Серафимова, 2006, 2009 и др.), изучение современных сейсмотектонических и геофизических процессов, генезиса землетрясений и вулканических извержений невозможно без учета роли космических факторов. Критические обзоры исследований по этой проблеме приведены в работах (Кропоткин, 1970; Сытинский, 1989; Широков, 1977 и др.).

В последние годы нами ведутся исследования, в соответствии с которыми Земля рассматривается как единая самоорганизующаяся открытая колебательная система, порождающая в определенные, достаточно короткие, интервалы времени интенсивные, мозаично распределенные глобальные тектонические напряжения, оказывающие значимое влияние на геотектонику (Широков, 2001, 2007; 2008а, 2008б; 2009б, 2009в; Широков, Дубровская, 2009). Представления о связи космических факторов с землетрясениями и извержениями вулканов с учетом промежуточных звеньев этой взаимос-



Рис. 1. Карта-схема расположения камчатских вулканов.

вязи в схематическом виде впервые были представлены в работе (Широков, 1977). В ней сделан вывод, что определяющими факторами в системе Солнце-Земля-Луна для характерного времени в несколько десятков-сотен лет являются гравитационные и электромагнитные эффекты, а также меняющаяся со временем солнечная активность. Позднее отмечено, что космические факторы поддерживают энергетику земных процессов, оказывая значимое влияние на взаимодействие тектонических плит, что приводит к крупномасштабным перемещениям земных масс в литосфере и мантии Земли и движениям ее ядра (Широков, 2007). Сеймотектонические и геофизические процессы вблизи границ взаимодействия тектонических плит, землетрясения и извержения вулканов являются лишь индикаторами этого процесса.

На основе изучения роли космических факторов в геотектонике предложена планетарно-региональная модель подготовки тектонических землетрясений (Широков, 2001, 2007; 2008б; 2009а, 2009б), в соответствии с которой общепланетарные космические факторы, имеющие ключевое значение на всех стадиях подготовки ТЗ, влияют на геодинамические процессы в различных регионах Земли. Поэтому при подготовке мировых ТЗ сейсмический отклик может проявляться на любых расстояниях от очагов готовящихся землетрясений (Широков, 2001, 2007; 2008а, 2008б; 2009а, 2009б, 2009в). На основе этого подхода разработана методика краткосрочного прогноза камчатских землетрясений (алгоритм М6), а также сделаны долгосрочные прогнозы сильных землетрясений и вулканических извержений на ближайшие 20 и более лет для 20 регионов Тихоокеанского, Альпийско-Гималайского тектонических поясов и, для крупных извержений – прогноз для Земли в целом (Широков, 1977, 1978а, 2001, 2008а, 2008б, 2009а, 2009б; Широков, Серафимова, 2006, 2009 и др.).

Проблема прогноза сильных ТЗ имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение, поэтому предварим наше исследование кратким историческим экскурсом. Наиболее активно проблемой прогноза землетрясений с 60-х годов прошлого столетия занимались в США, Японии, СССР, Китае (Родкин, 2008; Сидорин, 1992; Соболев, 1993 и др.). В США и Японии исследования велись в рамках широко-масштабных национальных проектов, планы которых представлены в работах иностранных авторов (Предвестники..., 1968). В Советском Союзе были созданы комплексные геофизические полигоны на базе Опытно-методических сейсмологических партий. В наиболее сеймоопасных районах Китая появились сети геофизических наблюдений и народные наблюдатели,

сообщавшие о необычном поведении животных и других аномальных явлениях (Родкин, 2008). В 1975 году китайским ученым удалось предсказать разрушительное Хайченгское землетрясение, перед которым в течение нескольких месяцев наблюдались необычно быстрые движения земной поверхности и другие аномальные явления, данные о которых поступали также от непрофессиональных наблюдателей. 4 февраля 1975 г. в середине дня после серии местных слабых толчков была объявлена общая тревога, послужившая началом эвакуации людей из зданий. В 19 часов 36 минут местного времени произошло сильное землетрясение, разрушившее 90 % всех сооружений города Хайченг. Из 600 тысяч горожан погибли около 2 тысяч человек. Но без плановой эвакуации число погибших могло превысить сто тысяч человек (Родкин, 2008).

Этот первый пример успешного прогноза и эвакуации людей вселил в исследователей вполне оправданный оптимизм. Казалось, что для решения задачи краткосрочного прогноза достаточно иметь непрерывные наблюдения за различными геофизическими полями вблизи мест подготовки землетрясений и разработать более совершенные методы оперативной обработки поступающей информации. 28 июля 1976 года в Китае произошло разрушительное Таншаньское землетрясение, во время которого погибло более ста тысяч человек (Родкин, 2008). Надежды на выявление предвестников, аналогичных Хайченгскому землетрясению, на других полигонах не оправдывались, поэтому в отношении возможности разработки надежного метода прогноза землетрясений стало складываться скептическое отношение, особенно в странах, где имелись наиболее совершенные сети наблюдений. В 90-х годах прошлого века в США и Японии работы по прогнозу землетрясений в рамках национальных проектов, продолжавшиеся почти 30 лет, были прекращены (Родкин, 2008).

В настоящей работе изучение взаимосвязи ВЗ с сильными ТЗ проводилось на основе каталогов ВЗ Камчатки Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН (<http://www.emsd.ru>) и каталогов ТЗ Геологической службы США (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/centeqsww/Quakes/quakes_all.php). В работе используется Гринвичское время. Рассматриваемые сильные мировые ТЗ в каталоге Геологической службы США даются в шкале моментных магнитуд M_w , но индекс w опускается.

Ранее были разработаны методика краткосрочного, со временем упреждения менее двух недель, прогноза времени, места и магнитуды M камчатских землетрясений с $M \geq 6$ (Широков, 2001) и методика оперативного (с упреждением менее недели) прогноза времени и магнитуды

сильных мировых ТЗ (Широков, 2009в) ГЛОБАС (ГЛОБальная Активизация Сейсмичности), которые тестируются в реальном времени, соответственно, с декабря 1995 г. и января 2008 г. Обе методики основаны на комплексном использовании сейсмологических и космофизических данных. Среди комплекса различных прогностических параметров один основан на слежении за сейсмическим откликом Ключевского и Корякского вулканов (иногда и других вулканов Камчатки), что позволяет в благоприятных случаях уменьшить время упреждения при прогнозе сильных ТЗ. Сделанные по методике ГЛОБАС прогнозы мировых ТЗ для периода январь 2008 - апрель 2009 гг. оказались успешными, причем среднее время упреждения для землетрясений с $M = 6.0 - 7.5$ составило трое суток при максимальном значении 6 суток (Широков, 2009в).

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

28 декабря 2008 г. на Камчатке началось продолжающееся до настоящего времени извержение Корякского вулкана (Мелекесцев, 1980), предварявшееся в течение 10 месяцев вулканическими землетрясениями с глубиной очагов до 40 км (Гордеев и др., 2009; Селиверстов, 2009а). Имеющаяся в районе вулкана сеть сейсмостанций КФ ГС РАН позволяет в оперативном ежесуточном режиме осуществлять слежение за сейсмичностью вулкана на основе определений основных параметров ВЗ.

Для проверки гипотезы о связи времени

возникновения ТЗ и ВЗ были составлены их каталоги за период с 28.12.2008 (начало извержения Корякского вулкана) до 10.08.2009 гг. Для этого периода времени имеются однородные оценки моментных магнитуд мировых ТЗ. Наиболее сильное, из 30-ти ТЗ с магнитудой $M \geq 6.3$, имеет $M = 7.8$, т.е. события перекрывают 2 порядка по энергии. Используемые ВЗ Корякского вулкана энергетических классов $K \geq 4.9$ (при максимальном значении $K = 8.3$) перекрывают по энергии три порядка.

Так как для ТЗ характерно группирование, проведена процедура выделения групп (кластеров) с целью создания каталога ТЗ, состоящего из одиночных событий и первых событий кластеров. В работе (Широков, 1978б) в качестве простейшего варианта предлагается к кластерам ТЗ относить такие соседние события, которые отстоят друг от друга менее, чем на половину среднего интервала между последовательными событиями t_{cp} каталога. В нашем случае величина $0.5t_{cp}$ равна 76 часам. Для выделения кластеров выбран пороговый интервал длительностью 80 часов. После выделения кластеров был составлен каталог основных ТЗ (табл. 1), включающий 9 одиночных землетрясений и 9 первых землетрясений кластеров. Кластеры содержат по два (7 случаев), три (1 случай) и четыре (1 случай) события. 8 из 9 кластеров имеют длительность не более трех суток и четырех часов. Таким образом, из 30 землетрясений 21 событие относится к кластерам, что составляет 70%. На наш взгляд, возникновение неслучайных кластеров небольшой длительности (в нашем случае до 80 часов) можно

Таблица 1. Каталог мировых тектонических землетрясений с моментной магнитудой $M \geq 6.3$, являющихся одиночными землетрясениями или первыми событиями в кластерах для периода с 1 января до 4 августа 2009 г. (данные NEIC GS USA).

Дата	Время	Широта	Долгота	Н(км)	M	N_1	N_2	T, часы
03.01.2009	19:43:50	-0.41	132.88	17	7.6	1	1	17
15.01.2009	7:27:20	-22.35	170.63	27	6.7	1	0	2
18.01.2009	14:11:48	-30.2	-177.95	33	6.4	1	0	3
11.02.2009	17:34:50	3.88	126.4	22	7.2	2	0	19
18.02.2009	21:53:45	-27.42	-176.33	25	6.9	2	0	22
28.02.2009	14:33:06	-60.53	-24.8	15	6.3	0	1	-
06.03.2009	10:50:29	80.32	-1.85	9	6.5	1	1	10
12.03.2009	23:23:34	5.69	-82.77	9	6.3	1	1	3
16.03.2009	14:15:56	3.81	126.55	35	6.3	0	0	-
01.04.2009	3:54:58	-3.52	144.1	10	6.4	0	1	-
15.04.2009	20:01:34	-3.12	100.47	20	6.4	2	1	41
16.05.2009	0:53:52	-31.52	-178.79	54	6.5	1	1	28
28.05.2009	8:24:45	16.72	-86.23	10	7.3	2	1	67
02.06.2009	2:17:03	-17.76	167.95	15	6.3	0	1	-
23.06.2009	14:19:22	-5.16	153.78	64	6.7	0	1	-
01.07.2009	9:30:10	34.16	25.47	19	6.4	2	1	37
13.07.2009	18:05:01	24.06	122.2	17	6.3	0	2	-
03.08.2009	17:59:56	29.04	-112.9	10	6.9	1	0	16

Примечание: Н – глубина очагов землетрясений; N_1, N_2 – числа вулканических землетрясений, происходивших, соответственно, до или после тектонических землетрясений, T – время тревоги.

связывать с теми кратковременными (несколько суток) глобальными процессами планетарного масштаба, когда тектонические напряжения в недрах Земли становятся аномально большими.

Нами условно принято, что для ВЗ кластер формируется из последовательных событий, интервалы между которыми не превышают 12 часов. Анализ показал, что в 2009 г. зарегистрировано 37 одиночных ВЗ и 11 кластеров с числом событий в них два (4 случая), три (4 случая), четыре (1 случай), 8 (1 случай) и 12 (1 случай). Лишь для одного из 11 кластеров его длительность превышает сутки (1.3 суток). Таким образом, каталог ВЗ состоит из 48 основных событий.

На рис. 2 в качестве примера приведены распределения во времени ВЗ относительно ТЗ

в период с 29.12.2008 по 23.02.2009 г. Показано, что ВЗ и ТЗ объединяются во взаимосвязанные группы, причем заметна тенденция близкого расположения по времени большинства ВЗ и ТЗ относительно друг друга.

Сравнительный анализ распределения во времени основных ТЗ и ВЗ основывался на анализе распределения ВЗ на симметричном временном интервале (-6.0, 6.0) суток относительно ТЗ, принимаемых за нулевые реперы. В тех случаях, когда между ближайшими по времени ТЗ интервал был меньше 12 суток, временной интервал (-6.0, 6.0) симметрично укорачивался. Затем данные по всем реперам и ВЗ объединялись, чтобы получить итоговое распределение.

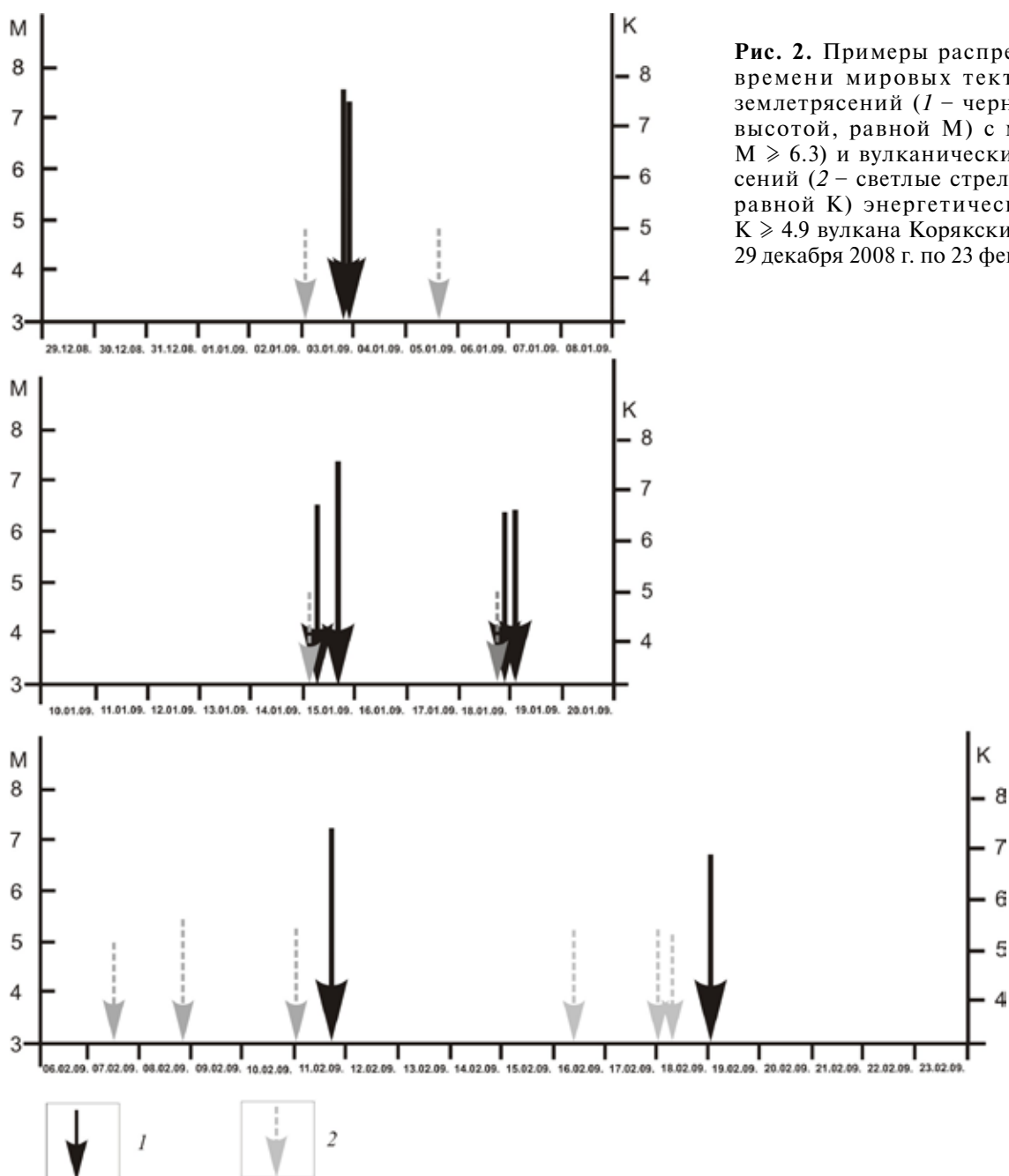
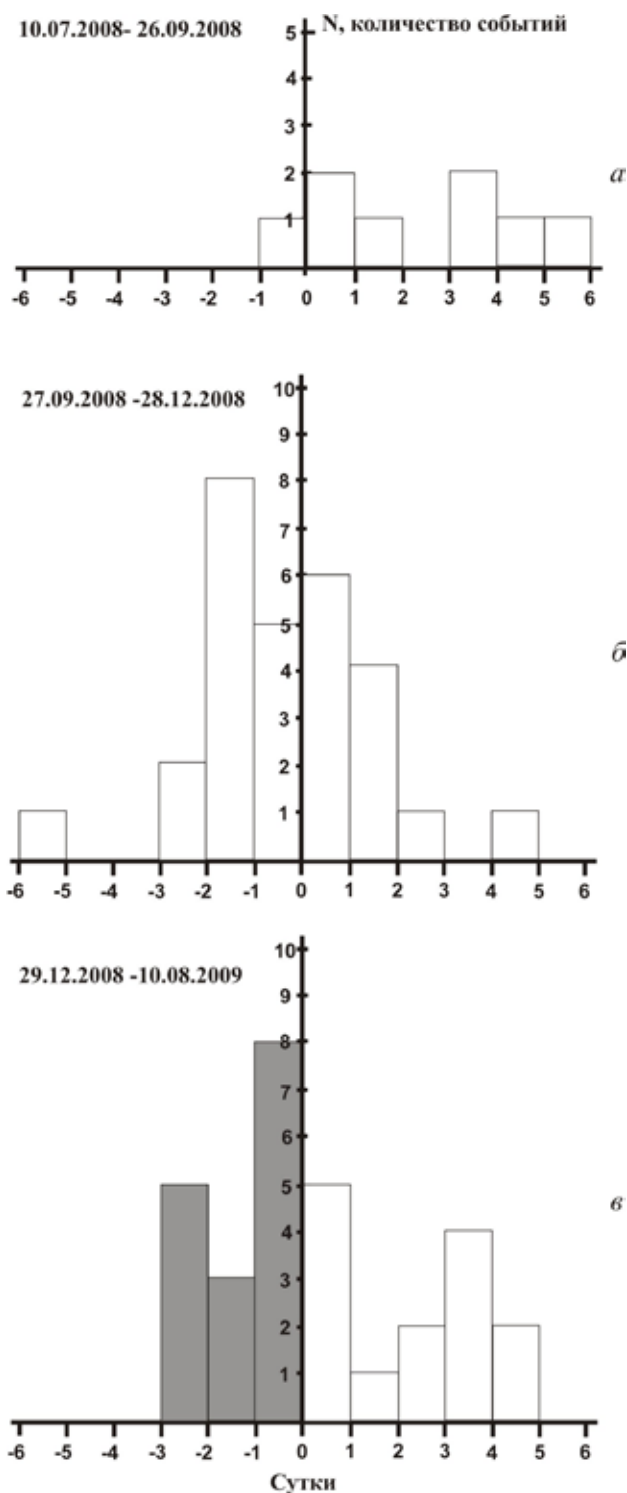


Рис. 2. Примеры распределения во времени мировых тектонических землетрясений (1 – черные стрелки высотой, равной M) с магнитудой $M \geq 6.3$ и вулканических землетрясений (2 – светлые стрелки высотой, равной K) энергетического класса $K \geq 4.9$ вулкана Корякский в период с 29 декабря 2008 г. по 23 февраля 2009 г.

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сейсмический отклик Корякского вулкана в период извержения. На рис. 3в приведена гистограмма итогового распределения основных ВЗ вулкана Корякский относительно совмещенных друг с другом нулевых реперов ТЗ в окнах длительностью одни сутки для периода 28.12.2008 – 10.08.2009 гг. Обратим внимание на то, что частота возникновения ВЗ на трехсуточном интервале до нулевых реперов в 8 раз выше, чем



в остальных 9 интервалах. Гипотеза о равномерности распределения ВЗ на 12-суточном интервале отвергается с уровнем значимости менее 0.02 (Большев, Смирнов, 1965). Поскольку 16 ВЗ из 30-ти приурочены к трехсуточному интервалу до землетрясений-реперов, выявленный эффект может иметь прогностическое значение.

Распределение числа ВЗ на интервалах (-6, 6) суток до (N_1) и после (N_2) каждого из 18 землетрясений-реперов представлено в табл. 1. Очевидно, что в 12 случаях из 18 ВЗ происходили до моментов возникновения ТЗ. При этом в семи случаях события отмечены до и после реперов, в пяти случаях – только до реперов и в пяти – только после реперов. Лишь в одном случае из 18 до и после репера ВЗ не было.

Главный вывод состоит в том, что основные ВЗ с $K \geq 4.9$ в 67% случаев могут рассматриваться в качестве предвестников ТЗ. Однако, чтобы оценить эффективность I прогноза времени возникновения ТЗ (Гусев, 1974), необходимо описать и применить алгоритм прогноза, рассчитав долю «тревожного времени» ($T_{\text{трев}}$) относительно всего периода наблюдений и долю «спрогнозированных» ТЗ ($D_{\text{прог}}$) от их общего числа. При этом $I = D_{\text{прог}} / T_{\text{трев}}$. Для получения пробных оценок эффективности прогноза алгоритм был следующим. После каждого основного ВЗ давался прогноз на трое суток и если происходило ТЗ, то прогноз продлевался на трое суток после произошедшего ТЗ (в расчете на возможное появление следующих событий кластеров). В этом варианте величина I примерно равна 1.9. Напомним, что для случайного прогноза эффективность в пределе равна единице (Гусев, 1974). Применять такую методику прогноза в качестве независимой в реальном времени едва ли оправдано из-за большого количества «ложных тревог». В связи с этим выявленный эффект связи ВЗ камчатских вулканов и ТЗ Камчатки и мира при тестировании алгоритма Мб и методики ГЛОБАС уже более 10 лет используется в комплексе с другими прогностическими параметрами, имеющими относительно небольшой процент «ложных тревог» (Широков, 2001, 2009б, 2009в).

Рис. 3. Гистограммы суммарного распределения вулканических землетрясений вулкана Корякский энергетического класса $K \geq 4.9$ на интервалах от 6 суток до и 6 суток после моментов возникновения тектонических землетрясений-реперов с $M \geq 6.3$: а – за период с 10.07 по 26.09.2008 г.; б – за период с 27.09 по 28.12.2008 г.; в – за период с 29.12.2008 г. по 10.08.2009 г. Зачернена часть гистограммы, соответствующая статистически значимому максимуму числа вулканических землетрясений, происходивших за трое суток до тектонических землетрясений.

Сейсмический отклик Корякского вулкана в период сейсмической подготовки извержения. Исследовалось распределение основных ТЗ и ВЗ по описанной выше методике за период с 10.07 по 27.12.2008 г., т.е. до начала извержения вулкана. В качестве реперов, как и в 2009 г., брались основные ТЗ с $M \geq 6.3$. Оказалось, что итоговые распределения ВЗ значительно различаются для интервала 10.07-26.09 2008 г. и после него (рис. 3а, рис. 3б). Если накануне извержения в интервале (-3, 3) суток отмечено 26 из 28 событий (рис. 3б), причем их большая часть произошла до нулевого репера ($N = 15$), то во втором случае до нулевого репера зарегистрировано только одно ВЗ (рис. 3а). Можно предположить, что такое заметное различие связано с перестройкой регионального и планетарного полей сейсмоструктурных напряжений, так как начало второго интервала (27 сентября 2008 г.) практически совпадает с началом наиболее мощного в 2008 г. кластера сильных мировых ТЗ, выделенного нами для Земли в целом (29.09-09.12 2008 г. (Широков, Дубровская, 2009)). А начало первого интервала приурочено к наиболее сильному для Камчатки за последние полвека глубокому землетрясению 5 июля 2008 г. с $M = 7.7$ и глубиной $H = 630$ км.

Сравнение сейсмического отклика вулкана Корякского для трех следующих друг за другом временных интервалов в период 07.2008-08.2009 г. позволяет предположить, что характер отклика зависит от геодинамических процессов планетарного и регионального масштаба и в разные интервалы времени может существенно различаться. Поэтому возможности использования ВЗ для прогноза времени возникновения сильных мировых ТЗ в разное время могут зависеть от различных геодинамических факторов.

Использование сейсмического отклика Ключевского вулкана для прогноза мировых тектонических землетрясений в реальном времени. Сейсмический отклик был изучен по данным ВЗ энергетического класса $K \geq 4.0$ с глубиной очагов 15-35 км с целью сопоставления во времени ВЗ с сильными мировыми ТЗ. Специфика исследуемой зоны Ключевского вулкана состоит в том, что ВЗ на глубинах 15-35 км под вулканом происходят регулярно и достаточно часто, что не характерно для других камчатских вулканов (Горельчик, Сторчеус, 2001; Селиверстов, 2009б). На рис. 4а приведены кривая N ежедневных чисел ВЗ за период 1-15 мая и ТЗ с $M \geq 6.8$. Видно, что с 1 по 9 мая 2008 г. величина N к концу срока возросла более чем в 30 раз. После этого число ВЗ резко уменьшилось. На фазе роста кривой N в мире произошли 2 землетрясения: 7 мая с $M = 6.9$ в Японии и 9 мая с $M = 6.8$ в районе о-вов Микронезии, к западу от Филиппин. Сычуаньское землетрясение (Китай) с $M = 7.9$ произошло

через трое суток после максимума кривой N .

С использованием сейсмического отклика в рамках методики ГЛОБАС 7 мая за 15 часов до произошедшего в Японии землетрясения с $M = 6.9$ был дан прогноз сейсмических событий с $M \geq 7.2$ на ближайшие двое суток без указания места их возникновения (Широков, 2009в). За 12 часов до землетрясения начал регистрироваться рой форшоков из компактного участка вблизи о. Хоккайдо (Япония) на глубинах менее 40 км. За ним проводилось слежение в реальном времени. За 6 часов с начала возникновения роя произошло 5 событий с $M = 4.4-4.9$ и несколько более слабых. Ошибка прогноза по магнитуде составила 0.3 M . Время упреждения - 15 часов. Качество прогноза для этого землетрясения $Q = 28$, т.е. прогноз считается успешным. Обычно сильнейшие события происходят после максимума кривой числа землетрясений. В данном случае сильнейшим было Сычуаньское землетрясение с $M = 7.9$, для которого прогноз в реальном времени не был сделан.

В период с 29.09 по 30.11.2009 г. в мире произошла серия из шести сильных землетрясений с $M > 7.0$, в том числе 4 события с $M = 7.5-8.1$ (рис. 4б, 4в). В 2009 г. первый оправдавшийся по всем трем параметрам прогноз ТЗ был сделан в реальном времени для землетрясения 1 апреля с $M = 6.4$, $H = 10$ км, произошедшего в районе Индонезии. Прогноз места события был дан при отсутствии форшокового роя. Время тревоги составило 4 суток 14 часов. После этого до начала сентября прогнозы мест возникновения ТЗ в КФ РЭС не подавались. С 7 сентября 2009 г. до конца месяца (затем прогноз ежемесячно продлевался) В.А. Широковым впервые был дан прогноз по разрабатываемой методике «ГЛОБАС плюс», ориентированной только на прогноз мест возникновения событий. Были указаны две потенциально опасные зоны с радиусами тысяча км (область взаимодействия Индо-Австралийской плиты с Тихоокеанской и Евразийской плитами) и район северной Японии (от 35° с.ш. до 40° с.ш.). Отметим, что оценки мест будущих событий оказались удачными: 14 из 15-ти землетрясений с $M \geq 6.6$ в период с середины сентября до конца ноября 2009 г. произошли вблизи указанных мест с ошибками не более 800 км, что составляет всего 4 % от половины длины окружности Земли.

При конкретных прогнозах по ГЛОБАС делались иногда дополнительные уточнения оценок мест ожидаемых событий. В результате для всех шести землетрясений с $M > 7.0$ (табл. 2 и рис. 4б, 4в) были сделаны успешные оперативные прогнозы по всем трем параметрам. Ошибки по местоположению очагов ТЗ такой магнитуды не превышали 600 км, что в масштабах Земли совсем немного.

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ

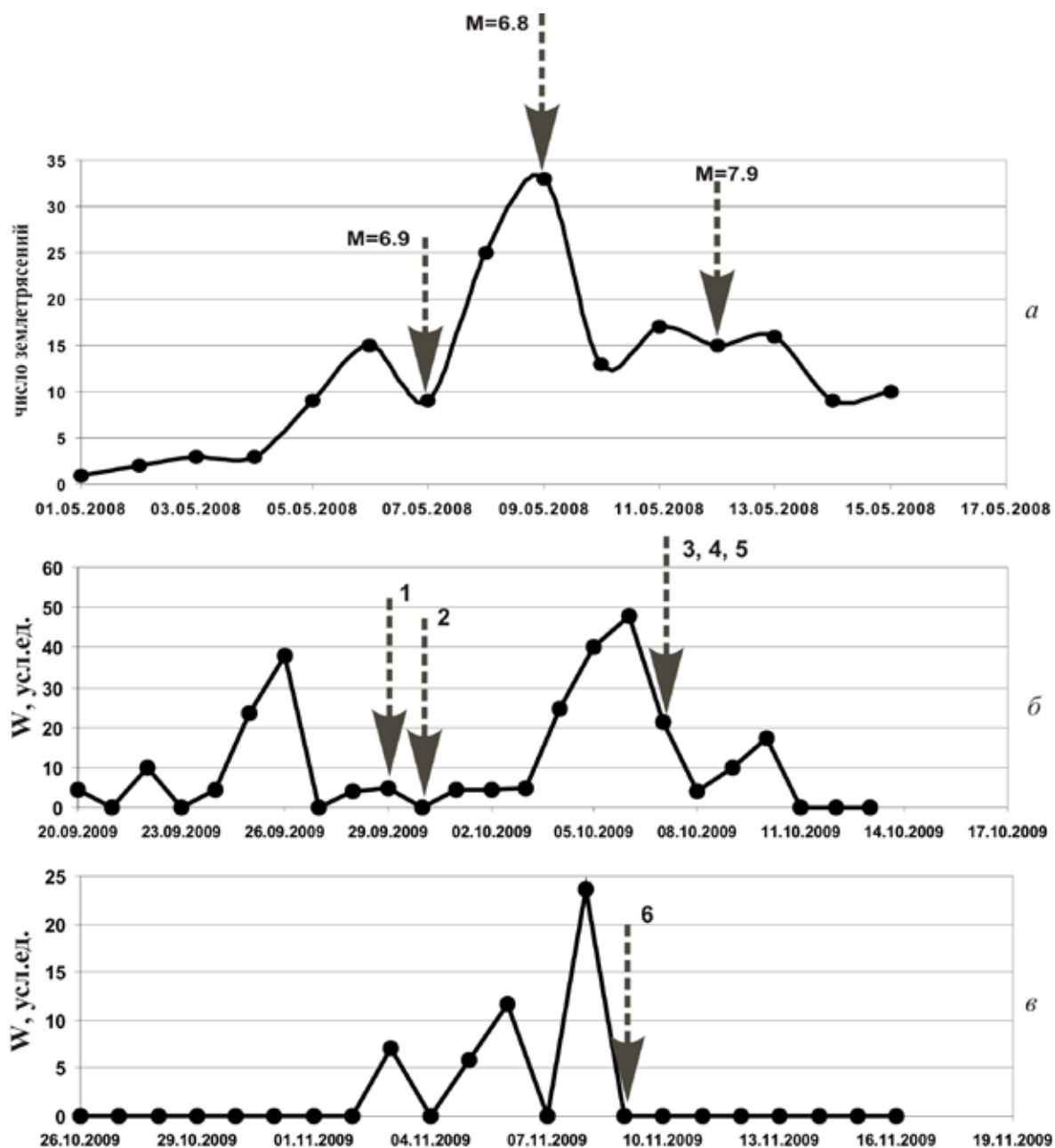


Рис. 4. Сейсмический отклик вулкана Ключевской по параметрам N и W ($N \times K_{\max}$) в сопоставлении с мировыми тектоническими землетрясениями с $M \geq 6.8$ (а) и $M \geq 7.3$ (б, в). Номера событий у стрелок на рис. 4б, в соответствуют табл. 2. N – ежедневное число землетрясений, K_{\max} – максимальный энергетический класс ВЗ в соответствующие сутки.

Таблица 2. Каталог мировых землетрясений с моментной магнитудой $M \geq 7.0$ за период сентябрь-ноябрь 2009 г. Прогноз времени, места и магнитуды этих землетрясений давался в реальном времени со временем упреждения T .

№ п/п	мес	день	час	мин	широта	долгота	Н, км	М	регион	T , сут.
1	09	29	17	48	-15.49	-172.10	18	8.1	о-ва Самоа	2.7
2	09	30	10	16	-0.72	99.87	81	7.5	о-в Суматра	3.0
3	10	07	22	03	-13.01	166.51	45	7.7	Меланезия	3.0
4	10	07	22	18	-12.52	166.38	35	7.8	Меланезия	3.0
5	10	07	23	13	-13.09	166.50	31	7.4	Меланезия	3.1
6	11	09	10	44	-17.21	178.41	585	7.3	о-ва Фиджи	0.3

Примечание: порядковые номера событий соответствуют их номерам на рис. 4б, 4в; Н – глубина очагов землетрясений.

С целью уменьшения времени упреждения оперативных прогнозов ТЗ И.И. Степановым и В.А. Широковым с мая по ноябрь проводилась апробация совместного тестирования в реальном времени методик ГЛОБАС, «ГЛОБАС плюс» (с сентября) и методики, основанной на данных деформационных наблюдений, проводившихся И.И. Степановым в г. Александрове Владимирской области. Преимуществом последней методики является малое время упреждения ТЗ, отчитываемое после максимума отчетливо выраженных аномалий (<http://kamtime.ru/node/385>, <http://kamtime.ru/node/435>). В результате комплексного тестирования среднее время упреждения сделанных прогнозов составило, в среднем, двое суток.

Землетрясение 29 сентября с $M = 8.1$ (событие № 1, рис. 4б и табл. 2), самое сильное в 2009 г., привело к жертвам от цунами более трехсот человек на островах Самоа. Ошибка по магнитуде – 0.5M, по месту – 600 км. Время упреждения не превысило трех суток (табл. 2). Укажем, что по деформационным наблюдениям время упреждения составило 17 часов. Максимум кривой W (этот параметр представляет произведение двух величин: суточного числа ВЗ энергетического класса $K \geq 4.0$ и их максимального значения K за сутки) наблюдался за трое суток до землетрясения.

Прогноз от 27.09.2009 г. полностью соответствовал по своим параметрам землетрясению 30 сентября с $M = 7.5$, ожидавшемуся в северо-западной части Индонезии, где оно и произошло ($H = 80$ км), приведя к гибели более трех тысяч человек (событие № 2, рис. 4б и табл. 2). Сильнее всех пострадали жители практически полностью разрушенного г. Паданг (о. Суматра) с населением 840 тысяч человек. Время тревоги – трое суток.

Серия из трех взаимосвязанных землетрясений 7 октября с $M = 7.4-7.8$ (события № 3-5, рис. 4б) произошла через сутки после максимума кривой W. Но аномальные эффекты начались раньше (что позволило также дать прогноз землетрясения 4 октября с $M = 6.6$). Ошибка прогноза по месту была менее 300 км. Время упреждения прогноза – трое суток.

Для землетрясения 9 ноября (событие № 6, рис. 4в) прогноз места события был дан за 6 часов 15 минут до землетрясения. Максимум параметра W был отмечен 8 ноября. Ошибка прогноза по месту землетрясения составила около 500 км.

Таким образом, полученные результаты указывают на отчетливо выраженный сейсмический отклик вулкана Ключевского, связанный с готовившимися в мире сильными ТЗ. Они происходили, как правило, менее, чем через четверо суток после максимумов кривых N и W (рис. 4, табл. 2). Во многих случаях за счет сейсмического отклика время упреждения ТЗ минимизирова-

лось. В то же время следует признать, что при решении проблемы оценки мест возникновения тектонических землетрясений получены только первые предварительные результаты.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обнаруженное явление более частого возникновения ВЗ за несколько дней до сильных мировых тектонических землетрясений, т.е. на заключительной, оперативной стадии их подготовки, на наш взгляд, связано с тектоническими процессами общепланетарного масштаба, вызванными воздействием планетарных космических факторов. Сейсмический отклик вулканов Корякского и Ключевского проявляется в большинстве случаев за трое суток до возникновения мировых ТЗ, независимо от их местоположения и глубины очагов. Подобного рода сейсмический отклик и предопределяет возможность использования его для оперативного прогноза времени возникновения сильных мировых ТЗ. Используя это явление в комплексе с другими предвестниками, появляется возможность в благоприятных случаях давать прогнозы сильных мировых ТЗ со временем упреждения около трех и менее суток (Широв, 2009б, 2009в). Судя по полученным данным, можно предположить, что тектонические напряжения в недрах Земли за несколько дней до возникновения сильных ТЗ становятся максимальными. Вследствие этого в мире и происходят сильные землетрясения (одиночные или в виде кластеров) в тех местах, где события уже подготовлены. Наиболее ярко деформационные явления должны, на наш взгляд, проявляться на границах тектонических плит. В этот период синхронно могут регистрироваться аномальные предвестниковые эффекты в геофизических полях разной природы, в том числе в районе вулканов, хотя распределение напряжений в недрах планеты может быть мозаичным. Сейсмический отклик камчатских вулканов на заключительной стадии подготовки ТЗ не является чем-то исключительным. Это скорее типичное явление, которое может иметь свои специфические черты в разных регионах, для разных вулканов и в разные периоды наблюдений.

Таким образом, оперативный прогноз времени и магнитуды сильных мировых тектонических землетрясений в реальном времени, без указания места их возникновения, является решаемой задачей.

ВЫВОДЫ

1. Впервые на примере Камчатки выявлена статистически значимая связь во времени вулканических землетрясений отдельных дей-

ствующих вулканов (Ключевской и Корякский) и сильных мировых тектонических землетрясений на заключительной, менее недели, стадии их подготовки, независимо от места возникновения ТЗ с $M_w \geq 6.3$ и их глубины. На примере Корякского вулкана показано, что в 2009 г. частота возникновения ВЗ с энергией $E \geq 10^{4.9}$ Дж за трое суток до ТЗ в среднем была значимо выше, чем в остальные дни. В 12 случаях из 18 ВЗ менее чем за трое суток до событий сигнализировали о готовящихся в мире сильных ТЗ. Предвестниковые ВЗ характерны и для Ключевского вулкана, причем время упреждения, как правило, было менее четырех суток.

2. Показано, что сейсмический отклик на вулканах целесообразно использовать в реальном времени для оперативного прогноза времени возникновения сильных мировых ТЗ со временем упреждения менее недели в комплексе с другими методами прогноза. Этот подход успешно реализован в методике ГЛОБАС комплексного оперативного прогноза времени и магнитуды сильных мировых ТЗ (Широков, 2009б, 2009в). Разрабатываемая методика «ГЛОБАС плюс» оказалась достаточно эффективной для прогноза мест возникновения ТЗ.

3. В соответствии с планетарно-региональной моделью подготовки землетрясений, ее заключительная стадия связана с «глобальной перестройкой полей тектонических напряжений для Земли в целом, вызванной влиянием космических факторов и процессами взаимодействия тектонических плит» (Широков, 2009б, с. 250). Поэтому сейсмический отклик отдельных вулканов, проявляющийся независимо от расстояния до готовящихся мировых ТЗ, может проявляться в других регионах мира и иметь, на наш взгляд, свою специфику для каждого вулкана. Сейсмический отклик чаще всего проявляется с небольшим опережением, но почти синхронно с сильными мировыми ТЗ. Поскольку выявленные нами предвестниковые аномалии проявляются в оперативном масштабе времени, можно предположить, что тектонические напряжения в недрах Земли за несколько дней до возникновения сильных ТЗ становятся максимальными. Полученные результаты могут рассматриваться в качестве подтверждения планетарно-региональной модели подготовки тектонических землетрясений (Широков, 2001, 2009б).

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности КФ ГС РАН за ежедневно получаемые высококачественные оперативные каталоги вулканических землетрясений.

- Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.
- Гордеев Е.И., Дроздин В.А., Дубровская И.К. и др.* Корякский вулкан: современное состояние и активизация 2008-2009 гг. // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии, 22-27 сентября 2009 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. Т. 2. С. 588-594.
- Горельчик В.И., Сторчеус А.В.* Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / Отв. ред. Б.В. Иванов. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 373-389.
- 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.
- Добровольский И.П.* Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: Наука, 1991. 189 с.
- Кропоткин П.Н.* Возможная роль космических факторов в геотектонике // Геотектоника. 1970. № 2. С. 30-76.
- Ламакин В.В.* О периодичности байкальских землетрясений // ДАН. 1966. Т. 170. № 2. С. 210-213.
- Мелекесцев И.В.* Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 224 с.
- Предвестники землетрясений / Под ред. Е.Ф. Саваренского М.: Мир, 1968. 213 с.
- Прогностика, терминология / Под ред. Сифорова Е.В. Выпуск 109. М.: Наука, 1990. 19 с.
- Родкин М.В.* Прогноз непредсказуемых катастроф // Вокруг света. № 6. 2008. С. 88-92.
- Селиверстов Н.И.* Активизация вулкана Корякский на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009а. № 1. Вып. 13, с. 7-9.
- Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2009б. 191 с.
- Сидорин А.Я.* Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
- Сытинский А.Д.* О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. № 2, 1989. С. 13-30.
- Широков В.А.* Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и ее долгосрочный прогноз для северо-западного

- участка Тихоокеанской тектонической зоны // Вулканизм и геодинамика. 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 БГТИ 1975-1976 гг. М.: Наука, 1978а. С. 164-170.
- Широков В.А.* Связь извержений вулканов Камчатки с землетрясениями верхней мантии // Бюл. вулканол. станций. № 54. М.: Наука, 1978б. С. 3-8.
- Широков В.А.* Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996-2000 гг. с магнитудой $M = 6-7.8$ по комплексу сейсмологических данных // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / Отв. ред. Б.В. Иванов. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 95-116.
- Широков В.А.* О взаимосвязи перемещений географических полюсов с сильными землетрясениями и извержениями вулканов Земли // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. 28-31 марта 2007 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 190-201.
- Широков В.А.* Влияние общепланетарных космических факторов на возникновение сильных вулканических извержений Земли и проблема их долгосрочного прогноза // Материалы 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 планетарных космических факторов // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. 27-29 марта 2008 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008б. С. 315-322.
- Широков В.А.* Об общепланетарной природе процессов подготовки катастрофического Суматринского землетрясения 26 декабря 2004 г., $M_w = 9.0$ // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии, 22-27 сентября 2009 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009а. С. 681-684.
- Широков В.А.* Разработка моделей подготовки сильных землетрясений и вулканических извержений на основе изучения их связи с космическими ритмами // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии, 22-27 сентября 2009 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009б. С. 241-253.
- Широков В.А.* Тестирование методики оперативного прогноза сильных мировых землетрясений (ГЛОБАС) в реальном времени в период январь 2008-апрель 2009 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Вторая региональная научно-техническая конференция. 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2009в. С. 104.
- Широков В.А., Дубровская И.К.* О сейсмодетекторной природе роев вулканических землетрясений, связанных с подготовкой и ходом извержения Корякского вулкана 2008-2009 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Вторая региональная научно-техническая конференция. 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2009. С. 105.
- 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. Вып. № 8. С. 120-133.
- Широков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогноз сильных землетрясений и вулканических извержений для отдельных регионов Тихоокеанского тектонического пояса на ближайшие 20 лет // Материалы Всероссийской конференции, посвященной «100-летию Камчатской экспедиции Русского географического общества 1908-1910 гг.». 22-27 сентября 2008 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 254-264.

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ
**SEISMIC RESPONSE OF THE ACTIVE KORYAKSKY AND KLYUCHEVSKOY
VOLCANOES AT THE FINAL STAGE OF PREPARATION OF STRONG
WORLD TECTONIC EARTHQUAKES (2008-2009 MONITORING DATA)**

V.A. Shirokov¹, I.I. Stepanov², I.K. Dubrovskaya³

¹The Kamchatkan Branch of the Geophysical Service of the Russian Academy of Science

²Aleksandrovskaya experimental and methodological expedition

³The Institute of Volcanology and Seismology Far-East Branch of the Russian Academy of Sciences

This is the first paper presenting the case study for the active Koryaksky and Klyuchevskoy Volcanoes that shows the temporal relationship between the volcanic earthquakes (the volcanic EQ) and strong tectonic earthquakes (the tectonic EQ) in the world with $M_w \geq 6.3$ at the final stage (less than a week) of their preparation (regardless the epicenters and depths of the tectonic EQ). The article shows that in 2009 the volcanic EQ at Koryaksky Volcano occurred 3 days prior to the tectonic EQ in the world and their number was in general anomalously high. 12 of 18 volcanic EQ alerted about the strong world events 3 days prior to the tectonic EQ. In 2008-2009 such effects typical for Klyuchevskoy Volcano as well, were used along with the other forecasting anomalies (including the deformation monitoring) for real-time forecast of the strong tectonic EQ in the world with the delay time equal to 6 days.

Keywords: a pattern of preparing of earthquakes, a precursor, a volcano, forecast for earthquakes.