

УДК 551.21.03

**ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ В МАЕ–ИЮЛЕ 2001 г.**

© 2001 г. С. А. Федотов, В. Н. Двигало, Н. А. Жаринов, В. В. Иванов, Н. И. Селиверстов, С. А. Хубуная, Ю. В. Демянчук, И. А. Марков, Л. Г. Осипенко, Н. П. Смелов

*Институт вулканологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006*

Поступила в редакцию 20.08.2001 г.

Дано описание и представлены первые результаты изучения начальной стадии извержения вулкана Шивелуч в мае–июле 2001 г. Происходили рои землетрясений, образование трех новых больших андезитов лавовых куполов, крупные взрывы и другие связанные явления. Приведены сведения о проявлениях активности вулкана в предшествующий извержению период. Представлены результаты визуальных и сейсмологических наблюдений, проведенных во время подготовки извержения и его начальной стадии, результаты изучения динамики извержения по данным аэрофотосъемки и геодезических наблюдений, данные обследования пирокластических и грязевых потоков, наблюдавшихся во время начальной стадии извержения.

**ВВЕДЕНИЕ**

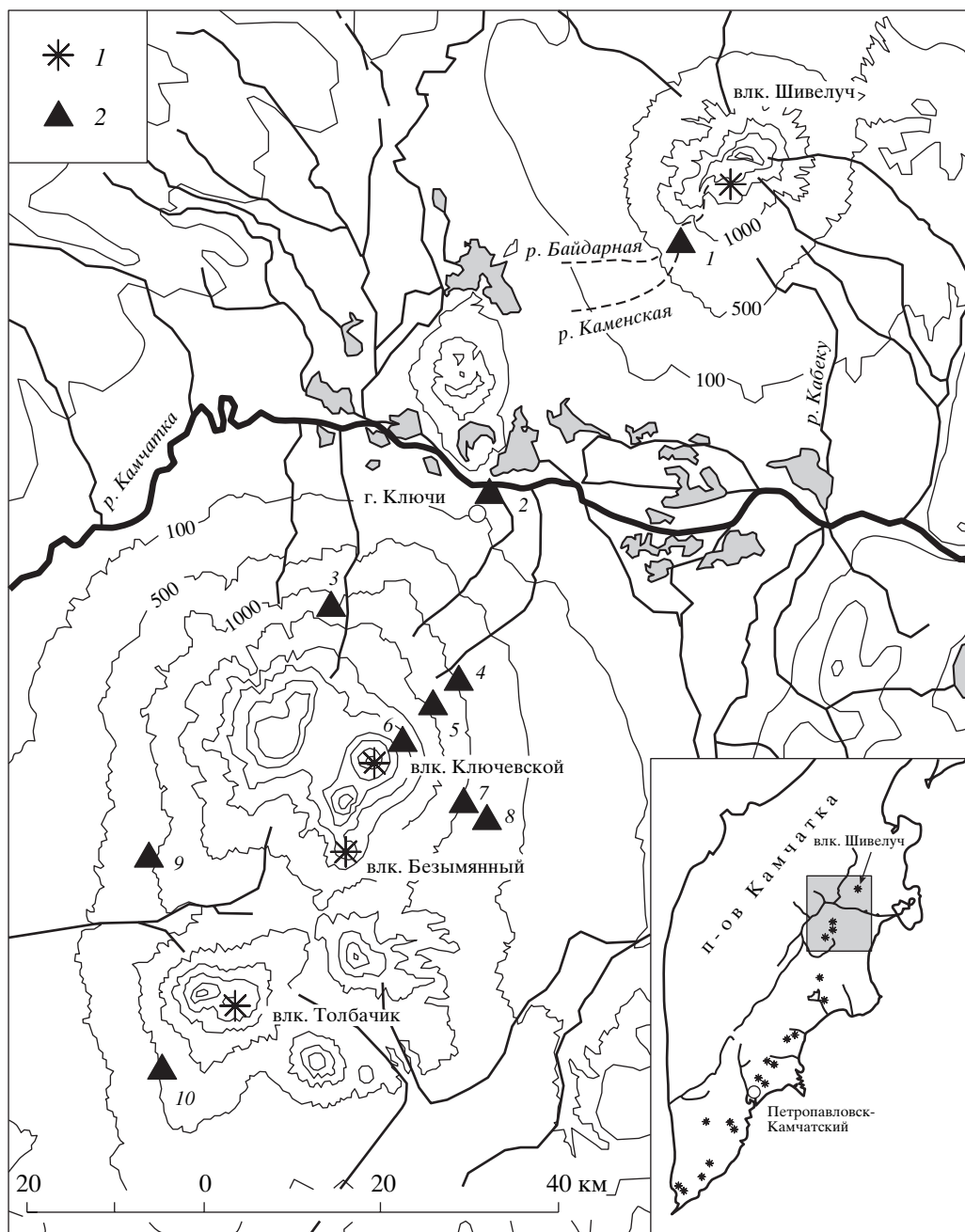
Вулкан Шивелуч расположен в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Он относится к Северной группе вулканов (рис. 1), представленной крупнейшими и наиболее активными вулканами региона. Это самый северный, второй по величине расхода изверженных продуктов, один из самых активных и опасных вулканов Камчатки [6]. Извержения вулкана Шивелуч характеризуются выжиманием куполов вязкой газонасыщенной андезитовой лавы и сопровождаются мощными вулканическими взрывами, выбросами большого количества пепла на высоту до 15–20 км, образованием пирокластических потоков, обломочных лавин и мощных грязевых потоков (лахаров), стремительно сходящих по склонам вулкана. Извержения такого типа представляют наибольшую опасность для людей, инженерных сооружений, коммуникаций, сельскохозяйственных животных и растительного мира в окрестностях вулкана, поэтому детальное изучение и прогноз таких извержений является одной из наиболее актуальных задач вулканологии.

Катастрофические эксплозивные извержения вулкана Шивелуч случались приблизительно раз в столетие. В XIX и XX веках такие извержения отмечались в 1856 и 1964 гг. [1, 6]. В период между катастрофическими, с интервалом около 7–15 лет, отмечаются межпароксизмальные извержения, в основном – экструзивные, с относительно умеренными по силе эксплозивными фазами. После 1964 г. такие извержения вулкана Шивелуч происходили дважды: в 1980–1981 [2, 4, 5] и 1993–1995 гг. [3, 8, 9]. Межпароксизмальные извержения, несмотря на меньшие масштабы проявлений эксплозивной деятельности, представляют серьезную опасность для людей, коммуникаций, жи-

вотных и растительности в радиусе до 25–30 км от вулкана.

Извержению вулкана Шивелуч в 2001 г. предшествовала сейсмическая подготовка, начавшаяся в марте в виде роя слабых сейсмических событий. 21–22 апреля интенсивность роя резко возросла, при этом изменившийся характер сейсмических событий указывал на подъем магмы, ее внедрение в постройку вулкана и возможность начала извержения в ближайшие недели. На основании этого 23 апреля Общим советом Института вулканологии ДВО РАН и КОМСП ГС РАН по прогнозу землетрясений и вулканических извержений был дан прогноз начала извержения, который в дальнейшем полностью подтвердился. Одновременно началась подготовка к изучению предстоящего извержения. В первых числах мая в г. Ключи был направлен вулканологический отряд Института вулканологии, сотрудники которого, совместно с сотрудниками Камчатской вулканостанции, начали наблюдения за две недели до главной эксплозивной фазы извержения. В июне 2001 г., в связи с началом извержения, была создана экспедиция “Шивелуч-2001” Института вулканологии, силами которой проведены дальнейшие исследования. В данном сообщении изложены предварительные результаты изучения начальной стадии извержения вулкана Шивелуч (за период май–июль 2001 г.).

**Хронология периода, предшествовавшего извержению 2001 г.** Последнее извержение вулкана Шивелуч происходило в 1993–1995 гг. [3, 8, 9]. Экструзивная фаза этого извержения закончилась в январе 1995 г. В результате экструзивный купол, образованный при извержении 1980–1981 гг., по данным В.Н. Двигало, увеличился на 182.4 млн. м<sup>3</sup> (с 16.8 до 199.2 млн. м<sup>3</sup>). Затем на вулкане некоторое время наблюдалось затишье. С 1997 г. на



**Рис. 1.** Схема района Северной группы вулканов Камчатки: 1 – действующие вулканы; 2 – телеметрическая сеть сейсмических станций: 1 – SVL, Шивелуч; 2 – KLY, Ключи; 3 – KRS, Крестовский; 4 – PDK, Подкова; 5 – CIR, Цирк; 6 – LGN, Логинов; 7 – ZLN, Зеленая, 8 – APH, Апахончич; 9 – KPT, Копыто; 10 – KMN, Каменистая.

сейсмических записях появляются единичные землетрясения I–IV типов (здесь и далее классификация вулканических землетрясений дана по П.И. Токареву [7 и др.]). С 1998 г. изредка регистрировались вулканические дрожания и наблюдались парогазовые выбросы, иногда – с наличием пепла. Два таких выброса были отмечены визуально 30 мая и 3 сентября 1998 г. В 1999 г. количество выбросов увеличилось до восьми. 23 сентября 1999 г. наблюдалось кратковременное из-

менение высоты экструзивного купола на 5–7 м (подъем с последующим опусканием). Вслед за этим последовала серия парогазовых выбросов: 3, 8, 10 и 27 октября, 1 и 24 ноября. В 2000 г. увеличилось как количество, так и энергия землетрясений II–III типов. При этом количество взрывов возросло до 16. Один из наиболее мощных взрывов произошел 29 августа. Верх эруптивной колонны во время этого взрыва поднялся на высоту более 12 км над уровнем океана, а сопутству-

ющее вулканическое дрожание достигало величины  $A_{ср}/T \sim 1.2$  мкм/сек.

С начала 2001 г. количество взрывов с выбросами пепла продолжало увеличиваться. Выбросы наблюдались 2, 10 и 25 января. В феврале отмечена интенсивная фумарольная деятельность над центральной и юго-восточной частями экструзивного купола. В период с 29 марта по 4 апреля произошла серия взрывов в западной части купола (сектор к западу от вулкана был покрыт слоем пепла). Пепловые выбросы продолжались в апреле: 5 и 8 ( $H > 4$  км), и с 19 по 25 ( $H \sim 2-3$  км). С 12 по 18 апреля число землетрясений II–III и IV типов было в пределах первого десятка. Начиная с 19 апреля на вулкане начали отмечаться взрывные землетрясения. Возможно, в это время происходили одиночные пепловые выбросы, но вулкан был закрыт для визуальных наблюдений.

**Развитие извержения вулкана Шивелуч в мае–июле 2001 г. по визуальным и сейсмологическим данным.** Визуальные наблюдения за развитием извержения в мае–июле 2001 г. были сильно осложнены крайне неблагоприятными погодными условиями и высокой фумарольной активностью в кратерной зоне. Поэтому значительная часть информации о ходе извержения получена по сейсмологическим данным. Использовались данные регистрации вулканических землетрясений сетью радиотелеметрических сейсмических станций Камчатской опытно-методической сейсмологической партии Геофизической службы РАН. Расположение этих станций в пределах Северной группы вулканов Камчатки показано на рис. 1.

Развитие во времени сейсмической активности вулкана Шивелуч за период с 1 марта по 25 июля 2001 г. показано на рис. 2. Из рис. 2а видно, что в марте ежесуточное количество вулканических землетрясений II–III типов под вулканом Шивелуч начало монотонно увеличиваться, сейсмичность приобрела характер роя.

22 апреля началась резкий рост числа и энергии вулканических землетрясений II–III типа. Эти события происходили под вулканом на небольших глубинах – до нескольких километров. В конце апреля – начале мая 2001 г. уже отмечалось от 200 до 400 землетрясений в сутки, из них от 5 до 30 – с энергетическим классом  $K_s > 6$ .

23 апреля Общим советом по прогнозу землетрясений и вулканических извержений Института вулканологии ДВО РАН и КОМСП ГС РАН был дан официальный краткосрочный прогноз времени начала извержения, ожидаемого объема изверженного материала, характера и опасности извержения для населения и авиации. Извержение ожидалось в течение первых (от 1 до 3) недель со дня подачи прогноза.

Начиная с 29 апреля 2001 г. на вулкане Шивелуч резко возросли продолжительность и интенсив-

ность вулканического дрожания (ВД) (рис. 2б–2г). По-видимому, в это время в кратере вулкана началось выжимание андезитовой магмы на поверхность с образованием новых экструзивных куполов. Судя по опубликованным на сайте Аляскинской вулканологической обсерватории результатам обработки инфракрасных спутниковых снимков, с этого же времени на вулкане Шивелуч начали фиксироваться устойчивые термоаномалии.

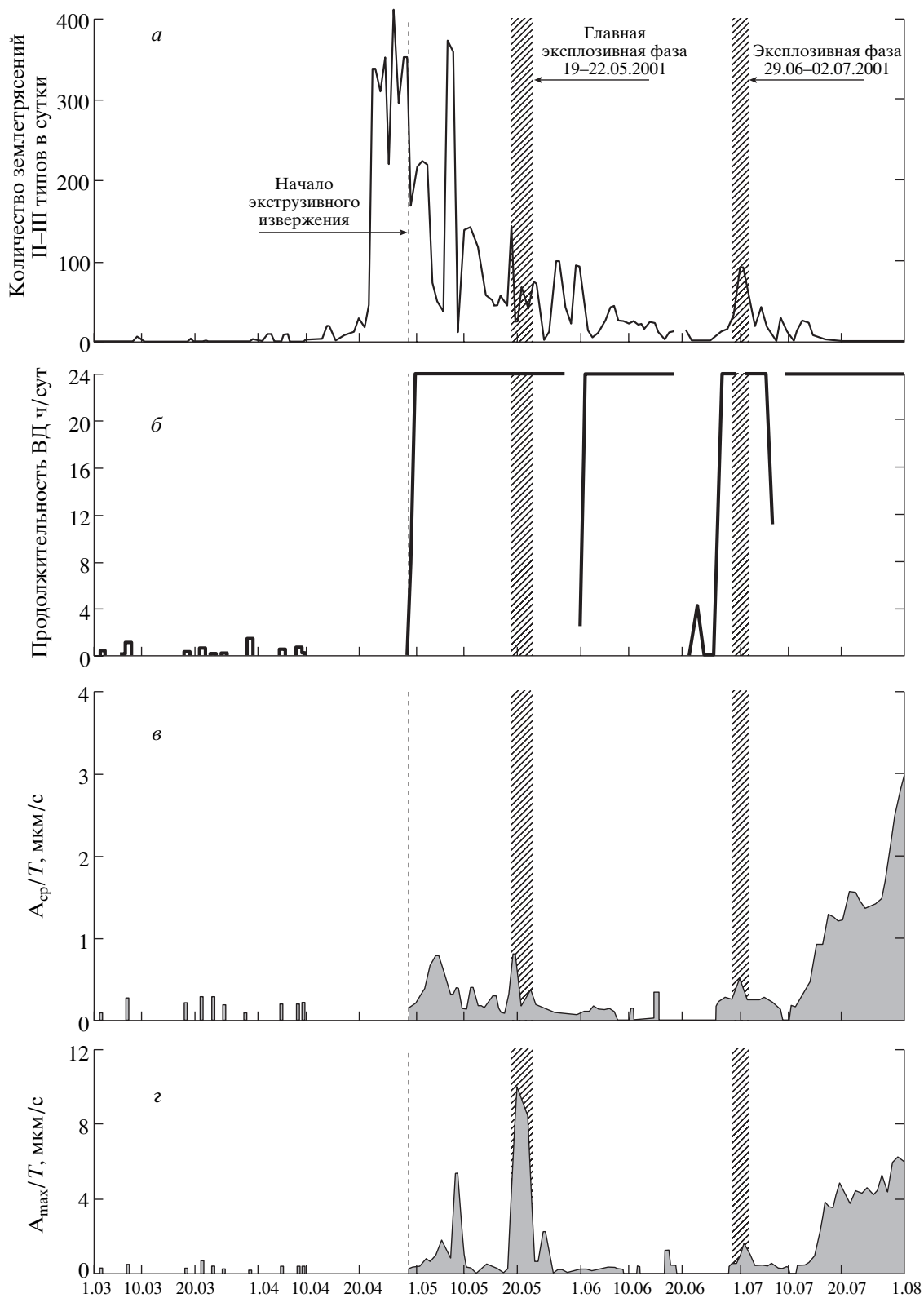
1 мая на вулкане визуально наблюдался парогазовый выброс с наличием пепла на высоту около 3 км над куполом. 2 мая отмечено значительное изменение сейсмического режима вулкана: появление вулканических землетрясений IV типа. 7 мая на протяжении 1.5 ч наблюдалась серия пепловых выбросов с высотой эруптивных колонн до 2.5–3.0 км и формирование небольших пирокластических потоков протяженностью до 1.5–2.0 км в юго-западном направлении. Пепловые выбросы предварялись и сопровождалась вулканическим дрожанием и взрывными землетрясениями. При этом наблюдался спад количества и энергии землетрясений II–III типов.

12 мая видимость в районе кратера вулкана несколько улучшилась и был обнаружен (В.Н. Двигало) новый экструзивный купол, выросший за западным склоном старого купола вулкана Шивелуч. Было проведено первое инструментальное измерение высоты нового купола. Стало очевидно, что экструзивное извержение вулкана Шивелуч уже началось, и прогноз времени его начала успешно оправдался.

16 мая, при финансовой поддержке администрации Камчатской области, был выполнен облет вулкана на вертолете МИ-8 и проведена его перспективная и плановая аэрофотосъемка. Было обнаружено, что в северном секторе кратера вулкана Шивелуч по периферии старого купола появилась цепочка экструзивных новообразований.

С 14 по 18 мая визуально наблюдались слабые пепловые выбросы, формирование небольших пирокластических потоков и раскаленных лавин. В этот же период отмечен очередной спад количества и энергии вулканических землетрясений. Регистрировались лишь небольшое количество слабых землетрясений и вулканическое дрожание. Необходимо отметить, что подобное “сейсмическое затишье” под вулканом Шивелуч наблюдалось в апреле 1993 г., непосредственно перед главной эксплозивной фазой извержения 1993–1995 гг. [8].

С 18 на 19 мая отмечено резкое увеличение уровня вулканического дрожания (до 3–4 мкм/с). Утром и днем 19 мая наблюдались пепловые выбросы на высоту до 2 км над куполом и образование пирокластических потоков. В 17:05 (время местное) в кратере вулкана, в районе новообразованных экструзий, начали происходить мощные



**Рис. 2.** Сейсмическая активность в районе вулкана Шивелуч за период с 1 марта по 1 августа 2001 г. по данным сейсмостанции “Шивелуч”. Данные оперативной обработки КОМСП ГС РАН и ВТНК ПИМИ ИВ ДВО РАН: *a* – количество землетрясений II–III типов за сутки; *б* – продолжительность вулканического дрожания (ч/сут); *в* – средняя интенсивность вулканического дрожания (отношение средней амплитуды  $A_{cp}$  к периоду  $T$  вулканического дрожания, мкм/с); *г* – максимальная интенсивность вулканического дрожания (отношение максимальной амплитуды  $A_{max}$  к периоду  $T$  вулканического дрожания, мкм/с).



**Рис. 3.** Пароксизмальная фаза извержения вулкана Шивелуч 19 мая 2001 г. Снимок сделан с Камчатской вулканостанции (г. Ключи, 46 км от вулкана) в 18 ч 20 мин местного времени Ю.В. Демянчуком.

взрывы. Уровень вулканического дрожания увеличился до значений порядка 10 мкм/с. В 17:24 отмечены первые пирокластические потоки в долине р. Байдарной (рис. 1). Видимая длина потоков была близка к 2.5 км. С 17:41 мощные вулканические взрывы следовали практически непрерывно. Формирующаяся эруптивная колонна постепенно расширялась. В 17:58 весь склон выше горизонтали 1200–1300 м, а затем и вся постройка вулкана накрылись эруптивной тучей. В это время ширина эруптивной колонны была соизмерима с шириной основания постройки. В 18:02 мин верх эруптивной колонны достиг нижней кромки облачности (около 10 км над уровнем океана) и через несколько минут скрылся из поля зрения за облачностью. Этот период развития извержения проиллюстрирован на рис. 3. Эруптивная колонна постепенно сносилась на северо-запад, и в 18:30 стала видна восточная часть старой постройки вулкана Шивелуч. Над р. Байдарной и это время стояла сплошная белая стена, фиксирующая зону распространения пирокластических потоков. Их длина превысила 8–10 км (при последующем обследовании установлено, что максимальная протяженность пирокластических потоков достигала 18 км). Пирокластические потоки распространялись, в основном, по долинам “сухих” рек Байдарной, Каменской и Кабеку (рис. 1). К 19 часам ме-

стного времени извержение начало постепенно ослабевать. Стала видна центральная часть старой постройки вулкана. Уровень вулканического дрожания постепенно снизился до значений порядка 2–3 мкм/с.

Пароксизмальная фаза извержения 19 мая продолжалась около 2 ч. В г. Ключи и пос. Усть-Камчатск выпадения пепла не отмечалось, так как эруптивное облако было снесено в северо-западном направлении, и в этом же направлении была ориентирована ось пеплопада. В 20 км к западу от вулкана (в стороне от оси пеплопада) выпало пепла до 2.5 кг/м<sup>2</sup>, при этом в пепле отмечались частицы размером до первых миллиметров. Верхняя часть эруптивной колонны была снесена тропосферными потоками на северо-восток, и через 10–12 ч. после пароксизма, судя по опубликованным в Интернет спутниковым данным, пепловые облака фиксировались уже над подводным хребтом Ширшова, в 400–500 км к северо-востоку от вулкана.

Вечером 19 мая на сейсмограммах станции “Шивелуч” отмечено появление многочисленных высокочастотных землетрясений, связанных, вероятно, с обрушениями стенок каньона р. Байдарной под воздействием мощных лахаров, образовавшихся в результате массового таяния снега после прохождения пирокластических потоков.

20 мая картер вулкана был закрыт плотными пеплогазовыми облаками, происходили сравнительно небольшие взрывы с выбросами пепла на высоту 2–3 км над куполом. Утром 21 мая, в 7:25 местного времени, в кратере вулкана Шивелуч произошел мощный одиночный взрыв. Пепловое облако после этого взрыва поднялось на высоту около 13 км. Еще более мощный взрыв произошел в ночь с 21 на 22 мая. Как и 19 мая, эруптивная колонна при ночном взрыве 22 мая имела поперечный размер, сопоставимый с размером всей постройки вулкана Шивелуч. В эруптивной колонне сверкали молнии. Пепловое облако от этого ночного взрыва поднялось на высоту более 20 км. Его поперечный размер при этом составлял около 140 км. В районе пеплового облака по его периферии образовались облака типа цирусов. Взрывы 21–22 мая предварялись и сопровождались резким всплеском количества и энергии вулканических землетрясений и уровня вулканического дрожания. Можно полагать, что период 19–22 мая 2001 г. соответствовал главной эксплозивной фазе извержения вулкана Шивелуч.

Вулканическими взрывами 19–22 мая были в значительной мере разрушены новообразованные лавовые купола и частично разрушен старый купол вулкана Шивелуч, образованный в ходе извержений 1980–1981 и 1993–1995 гг. Затем последовала серия более слабых взрывов, которые в конце мая прекратились. Несмотря на значительные разрушения, рост новообразованных экструзивных куполов продолжался.

В период с 29 июня по 2 июля 2001 г. на вулкане Шивелуч произошла еще одна серия вулканических взрывов с выбросами пепла на максимальную высоту (1 июля) до 10 км над уровнем моря и частичным разрушением новообразованных куполов. Но эта эксплозивная фаза извержения по мощности и сейсмической выраженности значительно уступала предшествовавшей (19–22 мая).

17 июля 2001 г. сейсмический режим вулкана качественно изменился. Началось монотонное увеличение уровня вулканического дрожания (рис. 2в, г). К концу июля средние значения уровня вулканического дрожания превысили в 2,5 раза величины, которые наблюдались перед главной эксплозивной фазой извержения 19 мая 2001 г. При этом ежесуточное число вулканических землетрясений постоянно снижалось (рис. 2а). Вероятнее всего, высокий уровень вулканического дрожания объясняется сменой режима течения магмы в канале вулкана со “старт–стопного”, сопровождаемого отдельными землетрясениями, на непрерывное течение, сопровождаемое вулканическим дрожанием.

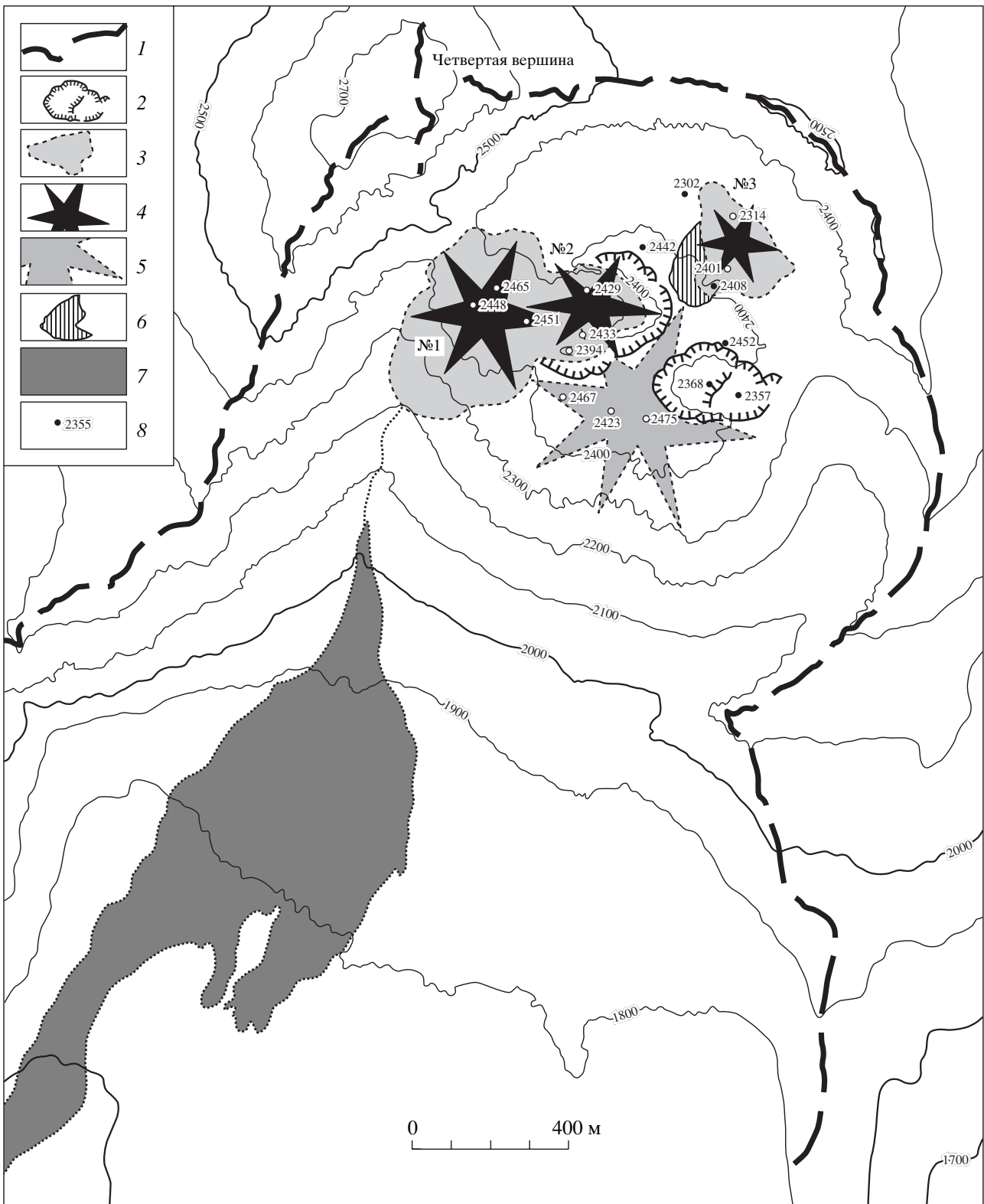
На основании анализа представленных на рис. 2б–г графиков уровня вулканического дрожания можно полагать, что поступление свежей

магмы на поверхность и, соответственно, формирование экструзий на вулкане Шивелуч происходило без перерыва с 29 апреля до конца рассматриваемого периода. В то же время эксплозивная активность вулкана, характеризующаяся всплесками амплитуды вулканического дрожания, заметно проявлялась лишь в сравнительно кратковременные интервалы: 7 мая, 19–22 мая, 29 июня–2 июля 2001 г. По визуальным и сейсмологическим данным в эти периоды времени отмечались вулканические взрывы.

**Результаты плановой аэрофотосъемки вулкана Шивелуч, выполненной 16 мая 2001 г.** В результате фотограмметрической обработки аэрофотоснимков, полученных при плановой аэрофотосъемке 16 мая 2001 г., была составлена топографическая карта активного кратера вулкана Шивелуч в масштабе 1 : 10000. По этой карте определены количественные характеристики всех новообразований, возникших в кратере в период его последней активизации и сохранившихся ко времени аэрофотосъемки. Это эксплозивные воронки (кратеры), экструзивные купола и поле отложений пирокластических потоков и обломочных лавин. На рис. 4 представлена схема кратера вулкана Шивелуч с упомянутыми новообразованиями по состоянию на 16 мая 2001 г., составленная на основе полученной топографической карты.

Появлению первых порций свежей лавы на поверхности (как и на предыдущем этапе формирования внутрикратерного купола вулкана Шивелуч) предшествовала активная эксплозивная подготовка в период с 1997 по 2001 г. Точное число центров эксплозивной деятельности, динамику ее развития и общее количество вынесенного в этот период резургентного материала установить по данным единственной за последние шесть лет аэрофотосъемки невозможно. Но наиболее активные центры эксплозий легко определяются по полученным аэрофотоснимкам и составленной топографической карте при их сопоставлении с материалами предыдущей аэрофотосъемки вулкана, которая была произведена 1 октября 1995 г.

Анализ полученных данных показал, что наиболее активная эксплозивная деятельность была приурочена, прежде всего, к участкам, на которых произошло выжимание новых экструзий № 1–3 (рис. 4). Причем, если в районе куполов № 1 и № 3 явных следов этой деятельности уже нет (они перекрыты свежим лавовым материалом), то купол № 2 выжимается точно по центру эксплозивной воронки, элементы которой сохранились. Размеры этой воронки в плане 370 × 270 м. Возможно, она образована двумя слившимися эксплозивными воронками. Среднюю глубину воронки можно оценить примерно в 60 м (ее дно перекрыто лавой купола № 2). Воронка возникла на границе двух экструзивных блоков купола 1993–1995 гг.



**Рис. 4.** Схема кратера вулкана Шивелуч по состоянию на 16 мая 2001 г. по данным фотограмметрической обработки аэрофотоснимков: 1 – контуры кратера 1964 г.; 2 – взрывные воронки; 3 – поверхности, занятые новыми экструзиями; 4 – новые экструзивные купола; 5 – старый экструзивный купол (образованный в ходе извержений 1980–1981 и 1993–1995 гг.); 6 – область над куполом № 3, преобразованная взрывами и деформациями; 7 – новообразованное поле отложений пирокластических потоков и обломочных лавин; 8 – абсолютные отметки экстремальных точек поверхности куполов и взрывных воронок (м).



Кроме этой воронки, существует еще одно новое углубление размером  $320 \times 190$  м в восточной части старого купола. Это углубление образовано тремя слившимися взрывными воронками, также возникшими на границе экструзивных блоков купола 1993–1995 гг. Глубина наиболее крупной из них (верхней) около 100 м. Нижняя воронка этой цепочки в основном уже засыпана и выделяется только по фрагменту гребня в ее северной части. Общий объем вещества купола 1993–1995 гг., вынесенного из этих двух взрывных образований к 16 мая 2001 г., составил 3.4 млн. м<sup>3</sup>.

Дешифрирование снимков позволило выявить три новых экструзивных купола, выжатых в кратере вулкана Шивелуч в период с 29 апреля 2001 г. (рис. 4).

Купол № 1, наиболее крупный, был выжат на поверхность сквозь осыпную мантию западного склона старого купола 1995 г. Эта часть купола хорошо видна из г. Ключи, что и позволило визуально обнаружить новую выжимку 12 мая, сразу при улучшении видимости в районе вулкана после недели непогоды. К 16 мая наиболее высокий обелиск купола № 1 (в северной части его короны) достиг абсолютной отметки 2462 м. Наибольшая высота нового купола от поверхности кратера 1995 г. составила 140 м. Средний диаметр короны купола 350 м. Морфология вершины купола необычна – она напоминает рельеф режущей части бурового инструмента. Встречаются отдельные обелиски до 30 м высотой и до 20 м в диаметре. В северной части купола обнаружен необычный, ранее не наблюдавшийся, обелиск цилиндрической формы. Диаметр этого обелиска 70 м, а высота над поверхностью осыпи – 80 м.

Осыпная мантия купола № 1, по состоянию на 16 мая, формировалась, в основном, на его юго-западном склоне и практически отсутствовала в западной и восточной частях. Нижняя отметка мантии – 2198 м. Размеры купола по основанию мантии –  $550 \times 350$  м. Объем купола № 1 на 16 мая – 8.9 млн. м<sup>3</sup>.

Купол № 2 (на 16 мая невидимый из г. Ключи) выжат в упомянутом выше взрывном кратере (рис. 4). Диаметр короны купола 220 м. В западной части этот купол частично перекрыт лавой купола № 1 – более высокого и более активного на момент съемки. Самый высокий обелиск купола № 2 (в его южной части) достиг высоты 2433 м. Средняя высота короны над дном воронки – около 40 м. Осыпной мантии практически нет. Объем купола № 2 от поверхности взрывной воронки, в которой он выжат, на 16 мая составил 1.4 млн. м<sup>3</sup>.

Купол № 3 начал выжиматься в северной части кратера сквозь осыпную мантию купола 1993–1995 гг. На момент съемки этот купол только появился на поверхности и представлен фрагментами

двух групп телескопически выжатых обелисков, южные части которых скрыты в осыпи. В плане эта структура похожа на елочку. Высота обелисков от 30 до 70 м над окружающей поверхностью. Нижние обелиски подобны упомянутому выше цилиндрическому обелиску на куполе № 1 и имеют тот же диаметр – 70 м. Отметка высшей точки купола – 2408 м. Обелиски окружены осыпной мантией, заканчивающейся в атрио на высоте 2302 м.

С юго-запада к куполу № 3 примыкает площадка, поверхность которой преобразована взрывами и деформациями при внедрении лавы. Эта площадка ориентирована в сторону купола № 2 и как бы замыкает активное направление, вдоль которого происходит выдавливание лавы. Размер купола № 3 по осыпной мантии  $320 \times 200$  м, объем – 1.2 млн. м<sup>3</sup>.

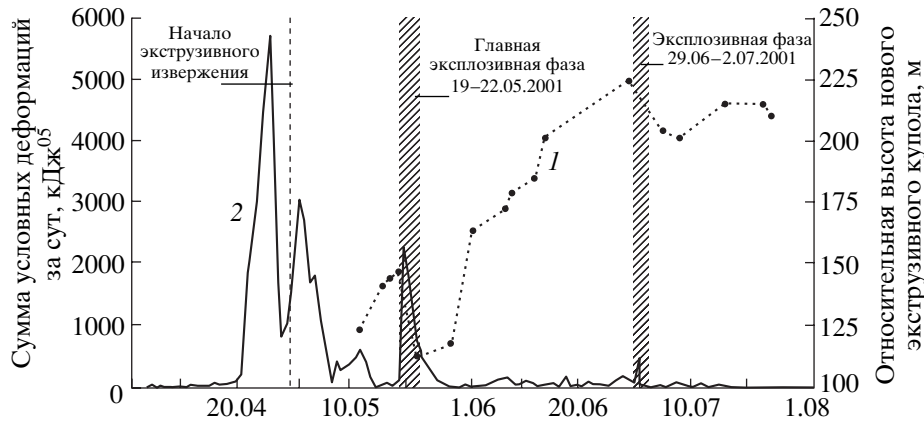
Кроме взрывных воронок и экструзивных куполов, по данным аэрофотосъемки выявлено также новообразованное поле отложений пирокластических потоков и обломочных лавин. Это поле формировалось, вероятно, с 7 мая, после первых сильных взрывов, сопровождавших рост купола № 1. По данным дешифрирования снимков объем этих отложений на 16 мая 2001 г. составил 3.1 млн. м<sup>3</sup>. Площадь поля отложений – 518800 м<sup>2</sup>. Фронтальные лавины поля спустились до отметки 1600 м.

**Динамика роста экструзивного купола по данным геодезических наблюдений и перспективной аэрофотосъемки.** Со времени обнаружения нового экструзивного купола (с 12 мая 2001 г.) из г. Ключи выполнялось тригонометрическое нивелирование для слежения за изменением его высоты и, соответственно, получения данных о динамике экструзивного извержения.

На рис. 5 представлены график изменения относительной высоты новообразованного экструзивного купола в мае–июле 2001 г. (1), а также график изменения суточных значений условных деформаций под вулканом Шивелуч по сейсмологическим данным (2). Условные деформации вычислялись в соответствии с работой [7] как корень квадратный из суммарной за сутки энергии землетрясений и в данном случае приведены для сопоставления динамики роста купола с сейсмической активностью под вулканом.

Судя по полученным данным, максимальное изменение высоты нового экструзивного купола наблюдалось в период с 22 мая по 29 июня. Оно составило 112 м. При этом средняя скорость изменения высоты купола в указанный период времени составила около 3 м/сут. В ходе взрывных извержений 19–22 мая и 29 июня – 2 июля происходило частичное разрушение нового купола и понижение его верхней отметки. После прекращения взрывов рост вершины купола вновь возобновлялся. Максимальная высота нового ку-





**Рис. 5.** Динамика изменения высоты экструзии и условных деформаций под вулканом Шивелуч: 1 – геодезические измерения максимальной отметки новообразованных экструзий относительно поверхности кратера 1995 г. (в м, значения по правой шкале); 2 – условные суточные деформации под вулканом Шивелуч по землетрясениям II–III типов (в кДж<sup>0,5</sup>, значения по левой шкале).

пола (224 м относительно поверхности кратера 1995 г.) была зафиксирована 29 июня, непосредственно перед эксплозивной фазой 29 июня–2 июля 2001 г.

20 июля 2001 г. был выполнен облет вулкана Шивелуч на вертолете МИ-8. По условиям полета плановая аэрофотосъемка не выполнялась. Были проведены лишь визуальные наблюдения, а также перспективная фото- и видеосъемка вулкана. По результатам выполненных наблюдений было установлено, что экструзивные новообразования, представленные ранее отдельными куполами, слились в единый экструзивный массив, а новообразованное поле отложений пирокластических потоков и обломочных лавин значительно увеличилось в размерах и его верхняя часть непосредственно примыкает к экструзии.

На рис. 6а, б представлены видеоснимки кратера вулкана Шивелуч, полученные при облетах 16 мая (рис. 6а) и 20 июля (рис. 6б) Н.А. Жариновым и Ю.В. Демянчуком. На снимках видно, что новый экструзивный купол за период с 1 мая по 20 июля значительно увеличился в размерах и по высоте заметно превзошел старый купол 1980–1995 гг. Несмотря на сильные разрушения во время эксплозивных фаз, высота новой экструзии (относительно поверхности кратера 1995 г.) за прошедший между съемками период времени увеличилась на 75 м, от 140 до 215 м, то есть более чем в 1.5 раза. Суммарный объем экструзий на 16 мая составлял около 11.5 млн. м<sup>3</sup>. Если допустить, что объем всего экструзивного массива менялся пропорционально кубу его высоты, на 20 июля этот объем можно грубо оценить величиной порядка 35–40 млн. м<sup>3</sup>. Напомним, что при извержениях 1980–1981 и 1993–1995 гг. прирост экструзивного купола вулкана Шивелуч составлял, соответствен-

но, 20.7 и 182.4 млн. м<sup>3</sup>, т.е. на конец июля 2001 г. данное извержение по масштабам развития экструзивного процесса уже заметно превзошло извержение 1980–1981 гг.

**Предварительные результаты маршрутного обследования вулкана Шивелуч.** В период извержения участниками экспедиции “Шивелуч-2001” было выполнено три пеших маршрута на вулкан Шивелуч: 24–25 мая (непосредственно после завершения главной эксплозивной фазы извержения), 23–24 июня (незадолго до второй эксплозивной фазы) и 9 июля (после завершения второй эксплозивной фазы извержения). Основная цель этих маршрутов – получение данных о составе изверженных пород, изучение отложений пирокластических и грязевых потоков, выяснение последствий прохождения этих потоков на склонах и у подножия вулкана. Ниже приведены краткие сведения по результатам проведенных наблюдений.

Мощные пирокластические потоки наблюдались 19 мая в руслах “сухих” рек Байдарной, Каменской и Кабеку (рис. 1). При маршрутном обследовании этих районов установлено, что наиболее мощный пирокластический поток протяженностью до 18 км прошел по долине р. Байдарной.

Отложения пирокластического потока 19 мая в долине р. Байдарной имели максимальную мощность до 8 м. Крупные (размером более нескольких см) обломки в отложениях потока были представлены двумя резко различающимися по количественному соотношению и внешнему виду составляющими: обломками купола (единичные находки) и пемзовидными обломками ювенильного материала (подавляющая часть крупнообломочного материала). Обломки купола – плотные,



**Рис. 6.** Кратер вулкана Шивелуч по состоянию на 16 мая (а) и 20 июля (б) 2001 г. по данным перспективной аэровидеосъемки. Видеоснимки Н.А. Жаринова и Ю.В. Демянчука: 1 – старый купол вулкана Шивелуч; 2 – новообразованная экструзия; 3 – новообразованное поле отложений пирокластических потоков, обвальных и обломочных лавин.

серые, раскристаллизованные андезиты с многочисленными трещинами остывания. Ювенильный материал – светло-серые (до белого) полуокатанные и окатанные обломки пористых пемзовидных андезитов с вкрапленниками плагиоклаза и амфибола. Крупные и мелкие обломки пород погружены в пеплово-песчаную пирокластическую массу заполнителя серого цвета. Поверхность отложений пирокластического потока напоминала валунно-галечный пляж (рис. 7а), при этом большинство крупных обломков было приурочено к поверхности потока, а более мелкие обломки хаотично распределены в средней и нижней частях потока. Размер обломков на поверхности – от нескольких сантиметров до первых метров. Крупные обломки в момент изучения были горячими, из трещин выделялся газ со слабым запахом сернистого газа. На поверхности отложений пирокластического потока часто наблюдались прогретые парящие площадки. Наиболее прогретыми были участки с повышенной мощностью отложений. В отложениях потока постоянно фиксировались черные обугленные остатки древесины (рис. 7а).

29–30 июня, во время второй эксплозивной фазы извержения, по руслам рек Байдарной, Каменской и Кабеку прошли небольшие пирокластические потоки. При последующем обследовании этого района обнаружены пепловые отложения в виде тонкой белой пыли, которая покрыла отложения потоков 19 мая и борта “сухих” рек тонким слоем (до 1 см). Даже небольшой ветер вызывал появление белых смерчей, которые на расстоянии напоминали парогазовые выходы над пирокластическим потоком.

Пирокластические потоки, образованные 19 мая, привели к интенсивному таянию снега и образованию мощных грязевых потоков (лахаров). Лахары спустились по руслам “сухих рек” Байдарной, Каменской и Кабеку (Бекеш) на расстоянии до 30 км от растущего купола вулкана Шивелуч. В 13 км от растущего купола, на выходе из каньона Байдарного (где его ширина около 200 м), мощность лахара составляла 4–6 м с заплесками до 10 м. У юго-западного подножия вулкана, на расстоянии 18–20 км от растущего купола мощность лахара достигала 2–2.5 м при высоте заплесков до 3–4 м (рис. 7б). После прохождения лахаров в лесу образовались многочисленные завалы из поваленных деревьев. Лахар, спустившийся по реке Байдарной, повредил дорогу на участке протяженностью около 10 км. В долине р. Каменской лахар залил лес и прошел всего в 200 м от дома лесничего. Лахар, спустившийся по долине р. Кабеку (Бекеш), повредил автомагистраль Ключи–Усть-Камчатск, в том числе, вывел из строя два моста этой автомагистрали. Это привело к нарушению автомобильного сообщения между указанными населенными пунктами, кото-



а



б

**Рис. 7. а** – отложения пирокластического потока, прошедшего 19 мая 2001 г. по долине р. Байдарной, в 13 км от активного купола вулкана Шивелуч (фото С.А. Хубуная); **б** – следы прохождения грязекаменного потока в 18 км к юго-западу от активного купола вулкана Шивелуч (фото В.В. Иванова).

рое в полной мере было восстановлено лишь к концу июня.

**Заключение.** В данном сообщении представлены предварительные результаты изучения лишь начальной стадии извержения вулкана Шивелуч.

В настоящее время (к моменту сдачи рукописи в печать) извержение продолжается, и окончательные заключения и выводы возможны лишь после его завершения. Все же на основании уже полученных данных, независимо от дальнейшего сценария развития данного извержения, представляется возможным отметить, по крайней мере, две его особенности.

Во-первых, в отличие от извержения 1993–1995 гг. экстремизм деятельности данного извержения проявилась не в приросте уже образованного купола, а в формировании новых экстрезий.

Во-вторых, сейсмическая активность под вулканом Шивелуч в период подготовки и в процессе данного извержения была значительно выше, чем в 1980–1981 и 1993–1995 гг. С учетом данного извержения намечается тенденция закономерного нарастания интенсивности сейсмических явлений, связанных с межпароксизмальными извержениями вулкана Шивелуч по мере заполнения его кратера экстрезией. Напомним, что извержение 1980–1981 гг. (первое после катастрофического извержения 1964 г.) вообще не предварялось и не сопровождалось заметными сейсмическими событиями [4]. Во время подготовки и в ходе следующего извержения 1993–1995 гг. количество землетрясений под вулканом достигало 250–300 в сутки, а максимальный энергетический класс – значения 7.0 [8], при этом период относительно высокой сейсмической активности продолжался около двух недель. Начавшееся в 2001 г. извержение предварялось и сопровождалось всплеском сейсмической активности общей продолжительностью не менее шести недель, при этом количество сейсмических событий достигало 300–400 в сутки, а максимальный энергетический класс составил 9.5. Примечательно, что при сейсмической подготовке катастрофического извержения 1964 г., когда кратер вулкана был практически полностью заполнен экстрезиями, отмечались землетрясения с энергетическим классом до 12 включительно [7].

В заключении представляется целесообразным привести краткую информацию о ходе извержения по состоянию на 20 августа (на дату сдачи рукописи в печать).

Интенсивное непрерывное вулканическое дрожание на вулкане Шивелуч, начавшееся 17 июля 2001 г., по данным В.Т. Гарбузовой и В.К. Лемзикова, продолжалось без перерывов до 15 августа. При этом максимальный уровень вулканического дрожания ( $A_{max}/T$ ) с 1 по 15 августа менялся незначительно, в пределах от 6.12 до 6.31, а средний уровень ( $A_{cp}/T$ ) – изменялся в более широких пределах, от 1.54 до 5.38 мкм/с, и составил в среднем за указанный период 3.7 мкм/с. Вулканические землетрясения II–IV типов в это время практически не отмечались. 15 августа произошло существ-

венное изменение сейсмического режима: интенсивное непрерывное вулканическое дрожание резко прекратилось и сменилось слабым спазматическим дрожанием с уровнем  $A_{max}/T = 0.2 - 0.3$  и  $A_{cp}/T = 0.1 - 0.15$  мкм/с, т.е. практически достигло фоновых значений. Одновременно стали регистрироваться землетрясения II–IV типов в количестве 50–100 событий за сутки с максимальным энергетическим классом до 6.4–6.8. По-видимому, отмеченное изменение сейсмического режима связано с очередным изменением режима течения магмы в канале вулкана, в данном случае, с непрерывного на “старт-стопный” или новыми внедрениями магмы под постройкой вулкана.

С 1 по 18 августа визуальные наблюдения и геодезические измерения высоты купола были невозможны из-за неблагоприятных погодных условий. Кратер вулкана открылся на некоторое время лишь 19 августа. Проведенное в это время тригонометрическое нивелирование показало, что новый экстрезивный купол за время от последнего измерения (23 июля) “выросли на 7.5 метров. В кратере вулкана за это время произошли заметные морфологические изменения, связанные с продолжающимся экстрезивным извержением, но их количественная оценка может быть сделана лишь по данным плановой аэрофотосъемки.

Новое межпароксизмальное извержение вулкана Шивелуч является значительным даже для этого вулкана-гиганта. Средний расход изверженных продуктов Шивелуча составляет в голоцене 25–30 млн. т в год [6 и др.]. Объем трех новых андезитовых куполов 16 мая 2001 г. накануне главных взрывов был равен 11.5 млн. м<sup>3</sup>, а объем пирокластических потоков – 3.1 млн. м<sup>3</sup>. Объем новых куполов на 20 июля 2001 г. оценивается величиной 35–40 млн. м<sup>3</sup>. Судя по этим цифрам, расход магмы в мае–июле 2001 г. примерно в 15 раз превосходил средний расход Шивелуча за такой промежуток времени, а количество магмы, поднявшейся к поверхности, превысило то, которое образуется в его магматической питающей системе в течение трех лет. В магматической питающей системе Шивелуча может находиться еще более 300 млн. м<sup>3</sup> избыточной магмы, накопленной после катастрофического извержения 1964 г.

Совершенно необходимо продолжать всестороннее изучение происходящего извержения вулкана Шивелуч и его развития, продуктов извержения, исследовать механизм связанных с ним процессов. Предстоит сопоставление с данными о предыдущих извержениях Шивелуча и исходных процессах на таких вулканах, как Безымянный, Сент-Хеленс, Усу и другие.

Авторы статьи приносят искреннюю благодарность сотрудникам, участвовавшим в изучении извержения и способствовавшим проведению работ: Г.Е. Богоявленской, Г.А. Карпову, С.В. Ушакову,

А.А. Коневу, В.В. Осадчему, А.В. Сокоренко, Ю.А. Озерову, В.Т. Гарбузовой, С.С. Чабышевой, В.И. Голубову, Н.И. Реутовой, Ю.В. Карпухиной, В.Е. Быкасову, М.В. Демянчук, Н.А. Напыловой.

Авторы выражают глубокую признательность губернатору Камчатской области М.Б. Машковцеву, который своевременно финансировал оплату вертолетного времени при облете 16 мая 2001 г., а также пилотам авиакомпании “Ксудач”, выполнившим полет над вулканом во время его извержения.

Работы проводились при поддержке Договора ИВ-2 с ИГЕМ РАН и грантов РФФИ № 99-05-65371, 00-07-90203, 00-15-98609.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков Г.С., Дубик Ю.М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3–37.
2. Двигало В.Н. Рост купола в кратере вулкана Шивелуч в 1980–1981 гг. по фотограмметрическим данным // Вулканология и сейсмология. 1984. № 2. С. 104–109.
3. Жаринов Н.А., Богоявленская Г.Е., Хубуная С.А., Демянчук Ю.В. Новый эруптивный цикл вулкана Шивелуч – 1980–1993 гг. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 99–106.
4. Иванов Б.В., Чирков А.М., Дубик Ю.М. и др. Состояние вулканов Камчатки и Курильских островов в 1980 г. // Вулканология и сейсмология. 1981. № 3. С. 99–106.
5. Иванов Б.В., Андреев В.Н., Богоявленская Г.Е. и др. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 1981 г. // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 103–108.
6. Мелекесцев И.В., Вольнец О.Н., Ермаков В.А., Кирсанова Т.П., Масуренков Ю.П. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 84–103.
7. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
8. Федотов С.А., Хубуная С.А., Жаринов Н.А. и др. Извержения вулканов Шивелуч и Ключевской в 1993 г. и их влияние на окружающую среду // Геология и геофизика. 1995. № 8. С. 117–131.
9. Хубуная С.А., Жаринов Н.А., Муравьев Я.Д. и др. Извержение вулкана Шивелуч в 1993 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 3–19.

### Eruption of Volcano Shiveluch in May–July 2001

S. A. Fedotov, V. N. Dvigalo, N. A. Zharinov, V. V. Ivanov, N. I. Seliverstov,  
S. A. Khubunaya, Yu. V. Demyanchuk, I. A. Markov, L. G. Osipenko, N. P. Smelov

*Institute of Volcanology, Far East Division, Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

The description and the first results of the study of the initial stage of Shiveluch volcano eruption in May–July 2001 are presented. Earthquake swarms formation of three new big andesitic lava domes large explosions and other related events have taken place. The information on volcanic activity of Shiveluch in the period preceding this eruption is given also. Here are results of visual and seismological observations made during preparation of this eruption and its initial stage, results of the eruption dynamic study according to the data of aerial survey and geodetic observations, research data of pyroclastic and mudflows formed during the initial stage of this eruption.