

УДК 551.21

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ОБРУШЕНИЯ ВУЛКАНОВ АВАЧИНСКИЙ И КОРЯКСКИЙ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ – ГЛАВНАЯ ОПАСНОСТЬ ДЛЯ ГОРОДОВ ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ И ЕЛИЗОВО

© 2025 г. А. Б. Белоусов*, М. Г. Белоусова

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия
*e-mail: belousov@mail.ru

Поступила в редакцию 12.11.2024 г.

После доработки 05.08.2025 г.

Принята к публикации 25.08.2025 г.

Показано, что крупномасштабные обрушения вулканических построек объемом более 0.01 км^3 являются широко распространенным природным явлением и закономерным этапом, через который проходят практически все вулканы. В результате обрушений формируются разрушительные обломочные лавины, которые распространяются на большие расстояния. Во многих случаях они также провоцируют сильные эксплозивные извержения. Приведены данные об отложениях крупномасштабного обрушения (обломочной лавине) Авачинского вулкана объемом 12 км^3 , на которых построена большая часть города Петропавловск-Камчатский. Выполнено новое радиоуглеродное датирование отложений, подстилающих обломочную лавину, которое показало, что это обрушение произошло 16.5 тыс. ^{14}C лет назад (л.н.). С учетом общих закономерностей проявления крупномасштабных обрушений вулканических построек сделан вывод, что современные постройки вулканов Авачинский и Корякский потенциально к ним готовы. Рассмотрены возможные сценарии будущих обрушений, которые показывают, что их обломочные лавины могут достичь населенных пунктов Петропавловска-Камчатского и Елизово. Результаты моделирования позволяют обновить до современного уровня карты вулканической опасности, существующие для этого района.

Ключевые слова: крупномасштабное обрушение, обломочная лавина, Камчатка, Авачинский вулкан, Корякский вулкан, подковообразный кратер, вулканическая опасность, цунами

DOI: 10.7868/S3034513825060067

ВВЕДЕНИЕ

Перемещения горных пород под действием сил гравитации (разнообразные оползни и обвалы) широко распространены на поверхности Земли и других планетах земной группы [Voight, 1978]. Объем породы, перемещаемой в ходе одного события, может достигать десятков и даже сотен кубических километров. Установлено, когда этот объем превышает значение около 0.01 км^3 [Siebert, Reid, 2023], происходит принципиальное изменение механизма движения горной массы: обрушившаяся

порода испытывает интенсивное дробление и превращается в быстро движущуюся грубо-обломочную лавину с аномально низким коэффициентом внутреннего и базального трения. Такие лавины перемещаются на расстояния, значительно превышающие те, на которые распространяются обрушения меньшего объема. Это свойство является фундаментальным и проявляется независимо от состава пород, топографии пути распространения лавины и других локальных характеристик района обрушения. Особые свойства обрушений объемом более 0.01 км^3 дали основание выделить их

в отдельную категорию: “крупномасштабные обрушения”, а образующиеся отложения получили название “отложения обломочных лавин” [Hsu, 1975].

Необходимо отметить, что данная терминология еще не устоялась (строго не определена) и, как в отечественной, так и англоязычной научной литературе, термины, используемые для описания начального периода крупномасштабного движения горной породы под действием гравитации: обрушение, обвал и оползень (failure, collapse, landslide) не отражают каких-либо специфических особенностей движения, а просто используются как синонимы. Аналогично (как синонимы) используются термины для обозначения последующего распространения раздробленной породы: обломочная, обвальная, каменная и дальнотранспортная лавины [Roverato et al., 2021].

Из-за своих характеристик (большие объемы, скорости распространения и проходимые расстояния) обломочные лавины представляют серьезную опасность для населения тех мест, где возможны крупномасштабные обрушения горных пород, так как в зоне их прохождения происходит быстрое и полное разрушение всех элементов инфраструктуры, а земная поверхность оказывается покрытой толстым слоем (десятки—сотни метров) грубообломочного материала. Каких-либо методов защиты от этого природного явления не существует, кроме выявления обвалоопасных территорий с ограничением их застройки и заблаговременной эвакуации населения при прогнозе возможного обрушения.

Поворотным моментом в исследовании крупномасштабных обрушений и обломочных лавин стало открытие того факта, что этому явлению часто подвержены постройки вулканов как действующих, так и потухших [Siebert, 1984].

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ОБРУШЕНИЯ НА ВУЛКАНАХ

Впервые процесс крупномасштабного обрушения вулканической постройки наблюдался и был детально изучен в 1980 г. в ходе извержения вулкана Сент Хеленс (США) [Voight et al., 1981]. В результате оползня объемом 2.5 км³ на вершине вулканического конуса образовался подковообразный кратер размером 2 × 3 км

и обломочная лавина, которая распространилась по подножью вулкана со скоростью до 80 м/с на расстояние до 23 км. Обрушение резко уменьшило литостатическое давление на магматическую и гидротермальную системы вулкана, что спровоцировало его сильное эксплозивное извержение.

Отложения обломочной лавины вулкана Сент Хеленс имели набор характерных геологических и морфологических признаков, которые стали эталонными [Voight et al., 1981; Glicken, 1996] и впоследствии позволили выявлять аналогичные события в геологической истории других вулканов. Оказалось, что отложения крупномасштабных вулканических обрушений (обломочных лавин) были и ранее хорошо известны геологам-вулканологам, однако им приписывалось иное происхождение [Siebert, 1984]. В большинстве случаев они ошибочно интерпретировались как отложения ледников (морены) или грязевых потоков (лахары). В СССР они наиболее часто трактовались как отложения направленных взрывов, так как были впервые описаны Г.С. Горшковым (под названием “агломерат направленного взрыва”) среди продуктов катастрофического направленного взрыва вулкана Безымянный 1956 г. [Горшков, 1957]. Г.С. Горшков полагал, что вулканы способны производить взрывы, сопоставимые по мощности со взрывами атомных зарядов, и при этом значительная часть вулканического конуса выбрасывается направленно по баллистической траектории, перемещаясь (перелетая) по воздуху на расстояния в десятки километров. Этот же механизм Г.С. Горшков предложил для объяснения генезиса сходных грубообломочных покровов, сформированных при извержениях вулканов Шивелуч 1964 г., Севергина 1933 г. и ряда других [Горшков, Богоявленская, 1967; Горшков, Дубик, 1969]. Несмотря на то, что для реализации механизма таких колоссальных вулканических взрывов на выброс не находилось геологически обоснованного источника энергии [Адушкин и др., 1984], теория Горшкова получила широкое признание в СССР.

После опубликования данных о генезисе и литологических характеристиках обломочной лавины вулкана Сент Хеленс по всему миру начались поиски аналогичных отложений,

и к настоящему времени в четвертичном периоде (за последние 2.6 млн лет) выявлено более 1000 случаев крупномасштабных обрушений на более чем 600 вулканах [Roverato et al., 2021]. В СССР информация о крупномасштабных обрушениях вулканов и связанных с ними обломочных лавинах была встречена с глубоким скептицизмом, так как теория Г.С. Горшкова о катастрофических взрывах на выброс прочно укоренилась в сознании отечественного вулканологического сообщества. Вместо принятия установленного генезиса отложений обломочных лавин в результате крупномасштабных вулканических оползней некоторые геологи-вулканологи СССР встали на путь отрицания существования этого природного явления, и либо продолжали настаивать на “взрывном” генезисе отложений обломочных лавин [Мелекесцев и др., 1991], либо предлагали некое гипотетическое сочетание взрывов и обвалов в их происхождении [Мелекесцев, 2001]. Эта ситуация не позволяла выполнять на современном уровне оценку вулканической опасности для населенных пунктов Камчатки, так как в созданных картах и в рекомендациях местным властям не учитывалась возможность крупномасштабных обрушений вулканических построек, например [Базанова и др., 2001].

Положение стало постепенно меняться после того, как А.Б. Белоусовым и М.Г. Белоусовой было выявлено полное тождество литологических и морфологических характеристик отложений эталонной обломочной лавины вулкана Сент Хеленс и отложений “агломерата направленного взрыва” вулканов Безымянный 1956 г., Шивелуч 1964 г., Севергина 1933 г., Авачинский и др. [Belousov, Bogoyavlenskaya, 1988; Belousov, 1995, 1996; Belousov et al., 1999; Belousova, Belousov, 1995; Белоусова, 1994]. В частности, оказалось, что крупномасштабные обрушения с образованием обломочных лавин происходили восемь раз в голоценовой истории вулкана Шивелуч, включая обрушение 1964 г., а на вулкане Севергина (остров Харикотан, Курильские острова) их было не менее четырех, включая обрушение 1933 г. Геологические выводы А.Б. и М.Г. Белоусовых были поддержаны геофизиками, которые показали отсутствие сигналов, соответствующих катастрофическим взрывам на выброс на записях сейсмических и акустических волн извержений

вулканов Безымянный 1956 г. и Шивелуч 1964 г. ([Фирстов, 1996], неопубликованный доклад П.И. Токарева).

Необходимо с сожалением отметить, что через некоторое время после опубликования результатов работ Белоусовых, в России маятник качнулся в другую сторону и было опубликовано несколько статей, где к крупномасштабным обрушениям, наряду с реальными, было отнесено несколько событий, не имеющих к ним отношения. Так, на вулкане Шивелуч в работе [Ponomareva et al., 2007], в дополнение к восьми реальным обрушениям [Belousov et al., 1999], было добавлено еще три, которые или были событиями с объемом менее установленного для крупномасштабных обвалов порогового значения 0.01 км^3 , или отложениями совершенно другого генезиса (пирокластические потоки). В статье [Ponomareva et al., 2006] к отложениям обломочных лавин причислена экструзия (крупный глыбовый лавовый поток) вулкана Дикий Гребень, а в статье [Мелекесцев, 2005] потухший вулкан Сопка Средняя, Ключевской группы вулканов, описан как перемещенная обвалом часть вулкана Крестовский (Ближний Плоский).

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБРУШЕНИЙ / ОБЛОМОЧНЫХ ЛАВИН И СОПУТСТВУЮЩИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

Анализ накопленной к настоящему времени обширной глобальной информации [Roverato et al., 2021] позволил выделить основные черты крупномасштабных обрушений на вулканах и связанных с ними обломочных лавин. Выяснилось следующее.

1. Это природное явление не является редким в геологическом и даже историческом масштабе времени: только в XX веке произошло 16 крупномасштабных обрушений вулканической постройки [Siebert, Reid, 2023]. Три из них, объемом более 0.1 км^3 (в 10 раз крупнее минимального установленного порога крупномасштабных обрушений) произошли на вулканах Курило-Камчатского региона: Севергина 1933 г., Безымянный 1956 г. и Шивелуч 1964 г. [Belousova, Belousov, 1995; Belousov, Belousova,

1996; Белоусов, Белоусова, 1997; Belousov et al., 1999].

2. Обрушениям подвержены вулканические постройки любого состава и внутренней структуры, а также практически любой высоты и крутизны склонов, расположенные в разных геодинамических обстановках. Они могут происходить не только на действующих вулканах, но и на потухших, как было, например, на камчатских вулканах Камень 1200 л.н. [Брайцева и др., 1990] и Бакенинг 8000–8500 ^{14}C л.н. [Мелекесцев и др., 1998]. Обрушениям, в целом, способствуют такие факторы, как гидротермальное изменение пород вулканической постройки, ее неравномерная эрозия, обводненность, а также наличие малопрочных пород (например, рыхлой пирокластики) и активных разломов в фундаменте вулкана.

3. Обрушения на потухших вулканах провоцируются сильными местными тектоническими землетрясениями. Их причины и последствия сходны с крупномасштабными невулканическими обвалами. Обрушения на активных вулканах, как правило, провоцируются деформациями и сейсмичностью, связанной с внедрениями в постройку магматического вещества, при этом наиболее часто они связаны с внедрениями вязких магм кислого состава и сопровождаются резким усилением вулканической деятельности, как непосредственно в момент обрушения, так и на протяжении длительного времени после него. Характер спровоцированной вулканической деятельности зависит от свойств внедрившейся магмы (в первую очередь, от ее газонасыщенности), а также от глубины и формы ее залегания в момент обрушения. При этом интенсивность этой вулканической деятельности зависит от величины уменьшения литостатического давления на магматическую и гидротермальную системы вулкана и пропорциональна объему обрушения. Наиболее катастрофическим проявлением эксплозивной деятельности, вызванным крупномасштабным обрушением, является направленный взрыв с образованием разрушительной пирокластической волны. Направленные взрывы происходят, когда крупномасштабное обрушение асимметрично снимает литостатическое давление с близповерхностного, частично раскристаллизованного, магматического тела

(купола или криптокупола), расположенного в постройке вулкана [Belousov et al., 2007].

4. Направление обрушения задается многими факторами, среди которых основными являются морфология и структура постройки вулкана, прочностные свойства слагающих пород, наличие ориентированных роев даек, особенности строения фундамента вулкана (положение геологических контактов и разломов) и др. Влияние структуры фундамента проявляется в том, что в ряду из нескольких сближенных вулканических построек соседствующие вулканы часто обрушиваются в одном направлении. На некоторых вулканах обрушения происходят многократно, при этом направления предшествующих и повторных событий часто совпадают. Например, постройка вулкана Молодой Шивелуч в Голоцене испытала семь крупномасштабных обрушений (5700, 3700, 2600, 1600, 1000, 600 ^{14}C л.н. и в 1964 г.), все они произошли в южном направлении, которое было задано самым первым обрушением вулкана Старый Шивелуч около 10 тыс. л.н. Образовавшиеся при этом обломочные лавины последовательно наслаивались одна на другую и составили значительную часть разреза южного подножья вулкана [Belousov et al., 1999]. На вулкане Севергина (о. Харимкотан) в голоцене было четыре крупномасштабных обрушения, два из которых произошли в восточном (1100 ^{14}C л.н. и 1933 г.) и два — в северо-западном (2000 ^{14}C л.н. и еще одно более древнее) в направлениях [Belousova, Belousov, 1995].

5. На многочисленных (около 300) примерах установлено, что вулканические обломочные лавины распространяются на расстояния (L), в среднем в 10 раз превышающие высоту вулкана над его основанием (H): т.е., $H/L = 0.1$ [Dufresne et al., 2021]. При этом объем обрушения составляет, как правило, около 0.25 объема обрушившегося вулканического конуса.

6. Если обломочная лавина распространяется по слаборасчлененному подножью вулкана, ее отложения покрывают площадь, имеющую форму конуса выноса или веера, выходящего из ворот подковообразного кратера (цирка), сформированного обрушением. В случаях сильно расчлененного подножья лавина распространяется вдоль наиболее крупных и глубоких долин водотоков, полностью заполняя их, и перехлестывает в соседние долины в местах

резких поворотов. Высота перехлестывания зависит от скорости лавины в месте поворота и может достигать нескольких сотен метров.

7. Многие обломочные лавины с удалением от вулкана трансформируются в лахары, а при вхождении в крупные водоемы вызывают разрушительные цунами, что еще больше увеличивает опасность этого природного явления.

8. Деятельность вулкана, продолжающаяся после обрушения, приводит к тому, что в образовавшемся подковообразном кратере постепенно формируется новый вулканический конус, который со временем (в некоторых случаях достаточно быстро) может заполнить всю полость кратера. Так, например, произошло на вулкане Безымянный, кратер которого после обрушения и извержения 1956 г. к настоящему времени оказался полностью занят новым, сложно построенным конусом [Shevchenko et al., 2020]. После формирования нового конуса вулкан потенциально готов к следующему обрушению.

Перечисленные выше закономерности очень просты и позволяют с высокой степенью достоверности прогнозировать районы, подверженные опасности крупномасштабных вулканических обрушений / обломочных лавин и провоцируемых ими катастрофических извержений. Использование этих закономерностей

позволяет дополнить до современного уровня имеющиеся оценки вулканической опасности для населенных пунктов Камчатки (например, [Базанова и др., 2001]), которые были сделаны на основе данных о рядовых, относительно слабых извержениях, и не учитывали принципиальную возможность крупномасштабных обрушений на вулканах.

ОПАСНОСТЬ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОБРУШЕНИЙ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ

Исходя из географической близости населенных пунктов к крупным вулканическим постройкам, очевидно, что опасности катастрофических вулканических обрушений на Камчатке подвержены города Петропавловск-Камчатский и Елизово с многочисленными прилегающими поселками, находящиеся у подножья активной Авачинско-Корякской группы вулканов (рис. 1), а также пос. Ключи, который расположен недалеко от вулкана Ключевской. В данной статье мы сконцентрировались на вулканах Авачинско-Корякской группы, так как они извергают магмы большей вязкости, чем вулкан Ключевской, и поэтому наиболее подвержены обрушению постройки, что впервые было показано в работе [Belousov, Belousova, 2004].



Рис. 1. Вулканы Авачинско-Корякской группы: Корякский (слева), Авачинский и часть Козельского (справа), 2009 г. От вершины Корякского вулкана в восточном направлении распространяется газо-пепловый шлейф извержения. В нижней части снимка видны строения северной окраины г. Петропавловска-Камчатского. Здесь и далее — фото А.Б. Белоусова.

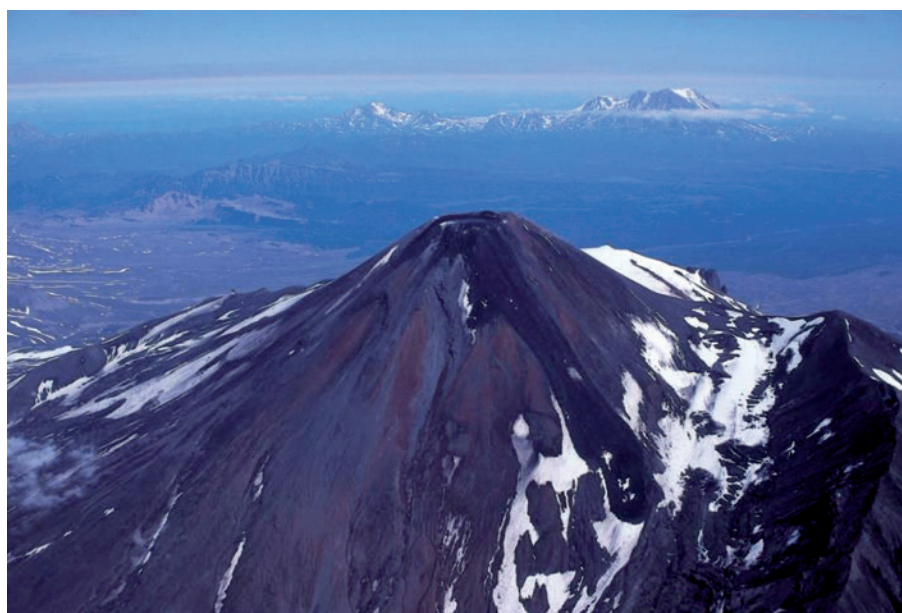
КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ВУЛКАНОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АВАЧИНСКОГО ВУЛКАНА

Вулкан Авачинский, с абсолютной высотой 2741 м и высотой постройки над основанием 2200 м, расположен в 23 км от г. Петропавловска-Камчатского с населением около 180 тыс.

человек. Постройка вулкана состоит из древнего пьедестала (так называемой соммы) с подковообразным кратером размером 4.5×4 км, широко открытым на юго-запад в сторону г. Петропавловска-Камчатского (рис. 2а). В кратере древней постройки расположен молодой конус с относительной высотой 700 м. Вершинный кратер молодого конуса имеет диаметр около 400 м. С этим



(a)



(б)

Рис. 2. Постройка Авачинского вулкана.

а — в подковообразном кратере древнего основания, сформированном крупномасштабным обрушением 16.5 тыс. ^{14}C л.н., расположен молодой конус. Справа, у подножья молодого конуса, на выходе из подковообразного кратера видна гора Монастырь — последний “торева” блок крупномасштабного обрушения. Съемка с вертолета, вид с запада, 2012 г.; б — молодой конус Авачинского вулкана. Его вершинный кратер заполнен лавой 1991 г., которая перелилась через юго-восточную кромку кратера и образовала глыбовый поток до подножья конуса. На заднем плане — вулканы Дзензур (слева) и Жупановский (справа). Съемка с вертолета, вид с юга, 2003 г.

кратером связаны все исторические извержения вулкана. Вулкан Авачинский до 1945 г. был одним из самых активных в Курило-Камчатском регионе. В XVIII–XX вв. он извергался 14 раз, последнее магматическое извержение вулкана произошло в 1991 г. Состав изверженных пород — андезиты и андезибазальты, среднее содержание SiO_2 56.3 вес. % [Масуренков и др., 1991].

Для Авачинского вулкана характерны как эксплозивные извержения с выбросом большого количества пирокластического материала, так и излияния лав. В 1945 г. произошло сильное плининское извержение вулкана

[Пийп, 1951], во время которого было выброшено 0.25 км^3 пемзовидной тефры и значительно углублен кратер его молодого конуса (до 170 м). В ходе последнего магматического извержения 1991 г. кратер молодого конуса до краев заполнился лавой, которая перелилась на юго-восточный склон вулкана, сформировав глыбовый лавовый поток длиной 1600 м (см. рис. 26) [Иванов и др., 1995]. В 2001 г. лавовая пробка 1991 г. была рассечена трещиной растяжения северо-западного простирания, которая на отдельных участках достигала ширины 3–5 м (рис. 3а). Трещина пересекала северо-западную



(а)



(б)

Рис. 3. Трещина 2001 г., пересекающая лавовую пробку 1991 г., в кратере молодого конуса Авачинского вулкана. а — вид трещины с поверхности лавового поля, 2005 г.; б — фумарольная деятельность вдоль трещины в кратере. Съемка с вертолета, вид с запада, 2005 г.

кромку кратера и вышла на внешнюю, привершинную часть склона молодого конуса (см. рис. 3б). Раскрытие трещины сопровождалось фреатическим взрывом с выбросом большого количества резургентной пирокластики. Максимальный размер глыб лавовой пробки, выброшенных взрывом, достигал 2–3 м. Образование трещины, вероятно, было вызвано сочетанием гравитационной нагрузки лавовой пробки 1991 г. и ростом в ней внутрипорового давления в процессе остывания и дегазации лавового материала.

КРУПНОМАСШТАБНОЕ ОБРУШЕНИЕ И ОБЛОМОЧНАЯ ЛАВИНА ДРЕВНЕЙ ПОСТРОЙКИ АВАЧИНСКОГО ВУЛКАНА

Важнейшим событием в истории Авачинского вулкана было образование крупного подковообразного кратера в результате крупномасштабного обрушения (см. рис. 2а, табл. 1). С этим событием также связано образование обширного холмистого поля грубообломочных отложений, протянувшегося на юго-запад от вулкана. Веерообразный (в плане) покров этих отложений начинается в “воротах” подковообразного кратера и, постепенно расширяясь, спускается к побережью Авачинской бухты (рис. 4), где их толщина в береговом обрыве достигает 30–40 м. На этих отложениях построена большая часть г. Петропавловска-Камчатского, включая Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. К этим отложениям принадлежат многочисленные угловатые глыбы плотных андезитовых лав поперечником до 3 м, часто встречающиеся вокруг Института на бульваре Пийпа и на прилегающих территориях. По данным бурения, толщина отложений в пределах города достигает 170 м (см. табл. 1). Наиболее удаленная (32 км) от вулкана, юго-западная часть покрова протягивается до приустьевой части современного русла реки Авача.

Отложения представлены рыхлым, уплотненным, грубообломочным материалом (рис. 5, 6).

Обломки пород неокатаны (остроугольные) андезитового и андезибазальтового состава. Отложения плохо сортированы: коэффициент сортировки Инмана около 3 фи (σ) единиц [Inman, 1952; Walker, 1971] (табл. 2, см. рис. 5). Различия в гранулометрическом составе отражают различия в степени дробления исходных пород обрушившейся постройки вулкана. На отдельных участках отложения подверглись вторичному изменению, слабо сцементированы и иногда ожелезнены.

В структурном плане материал сложен плотно упакованными, резко очерченными линзами пород древней постройки Авачинского вулкана (фрагментами лавовых потоков и слоев вулканокластики) (см. рис. 6), которые были сильно раздроблены при перемещении, но не полностью перемешаны (см. рис. 6б, 6в). Линзы неправильной формы, размером метры – десятки метров, имеют четкие, извилистые очертания и различаются степенью дробления, составом и цветом слагающих пород. Наименее раздробленные (наиболее грубообломочные) разности содержат обломки пород размером до 30–40 см, иногда до 1–3 м. В пределах каждой линзы все обломки одного состава и цвета и различаются только размером, многие обломки имеют отдельность типа “пазл” (jigsaw puzzle) и разбиты микротрещинами. Цвет соседствующих линз может быть серым, серо-голубым, розоватым, бурым, серовато-желтым, в зависимости от состава, степени окисления и характера гидротермального изменения исходной породы (см. рис. 6б, 6в). Описанный материал представляет собой классическую “блоковую” фацию отложений обломочной лавины, впервые описанную в отложениях обломочной лавины вулкана Сент Хеленс [Glicken, 1996].

В основании этих отложений, в береговом обрыве Авачинской бухты, вдоль контакта с подстилающими прибрежно-морскими отложениями (галечники с органическим илистым заполнителем), обнажается серо-коричневый, относительно гомогенный и мелкозернистый (песчаный) слой толщиной 10–40 см.

Таблица 1. Морфологические характеристики отложений обломочной лавины Авачинского вулкана

Сброшенная высота (Н), км	Пройденный путь (L), км	H/L	Площадь, км ²	Толщина, м	Объем, км ³	Размеры кратера, км
3	32	0.1	400	20–170	12	4 × 4.5

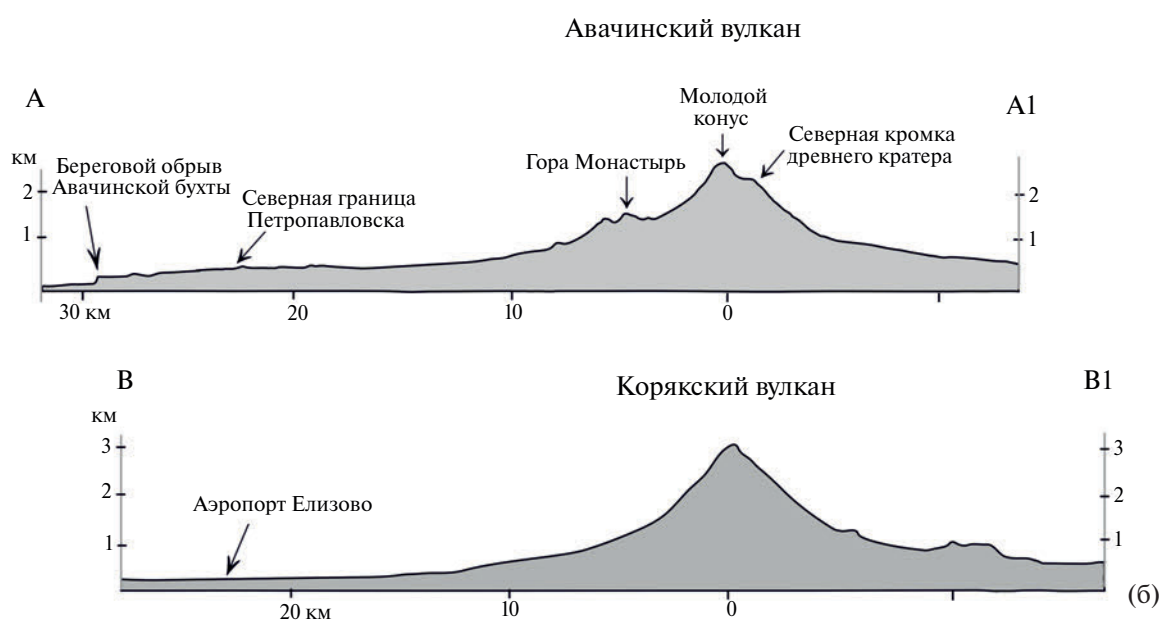
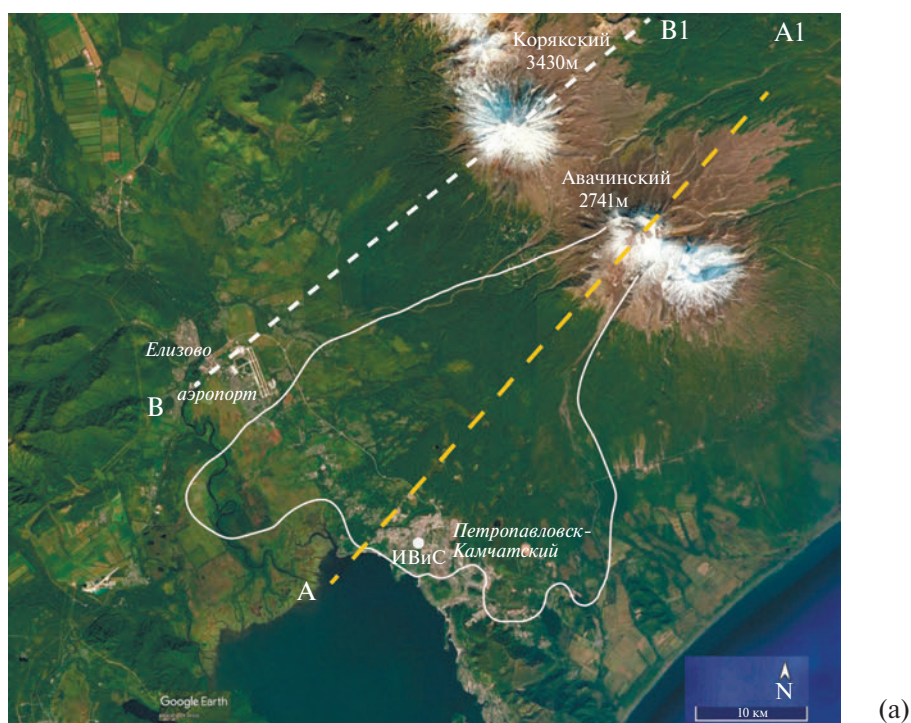


Рис. 4. Схема распространения отложений обломочной лавины 16.5 тыс. ^{14}C л.н. вулкана Авачинский (белый контур). а – граница обломочной лавины определена на основании дешифрирования космических снимков на топооснове Google Earth, с учетом имеющихся отдельных редких обнажений. Пунктирными линиями показано положение топографических профилей через постройки вулканов (ИВиС – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН); б – топографические профили через постройки вулканов Авачинский (А–А1) и Корякский (В–В1) в направлении прошлых и будущих крупномасштабных обвалов.

На отдельных участках этот слой заметно литифицирован (превращен в плотный песчаник). Это классическая базальная фация обломочных лавин, образовавшаяся, когда материал вышележащей блоковой фации подвергся интенсивной сдвиговой деформации и перемешиванию в процессе движения обломочной лавины [Glicken, 1996].

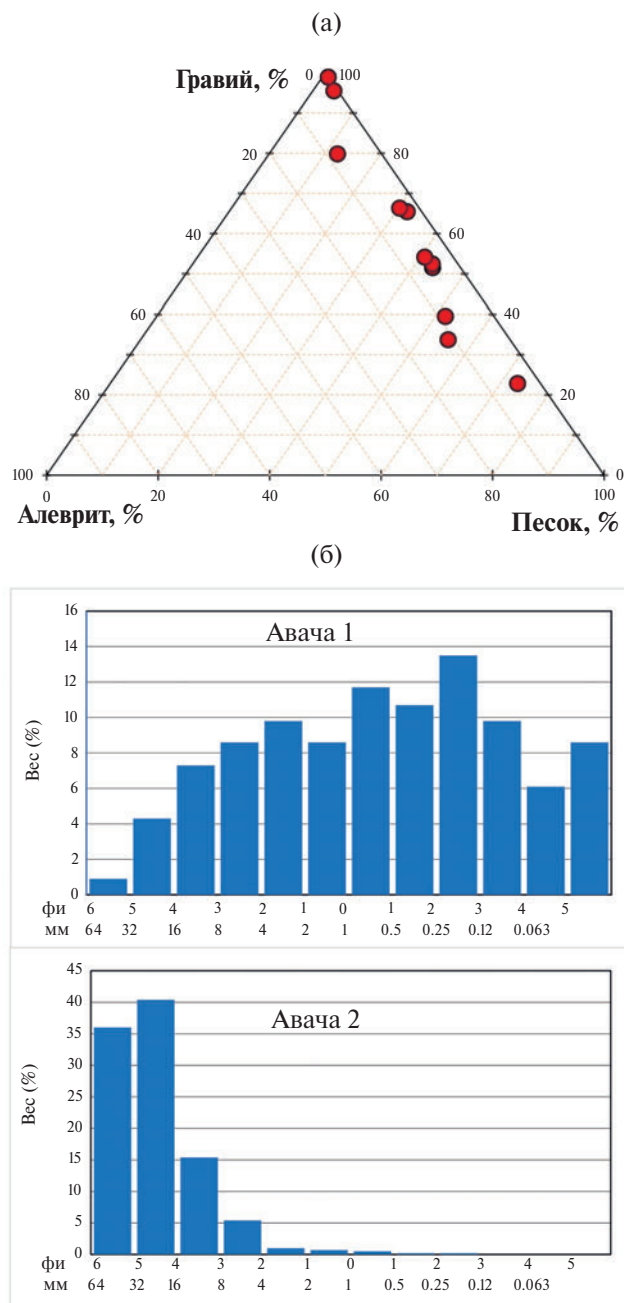


Рис. 5. Гранулометрический состав блоковой фации отложений обломочной лавины вулкана Авачинский (по данным ситового анализа).

а – треугольная диаграмма содержания алевритовой (<0.063 мм), песчаной (0.063–2 мм) и гравийной (2–64 мм) фракций 11 образцов из разных линз (“блоков”) лавины; б – примеры гистограмм гранулометрического состава отложений: Авача 1 – сильно раздробленный материал, Авача 2 – слабо раздробленный материал.

Первое радиоуглеродное определение возраста этих отложений (30–34 тыс. л.н.) было получено при анализе органического материала из подстилающих прибрежно-морских

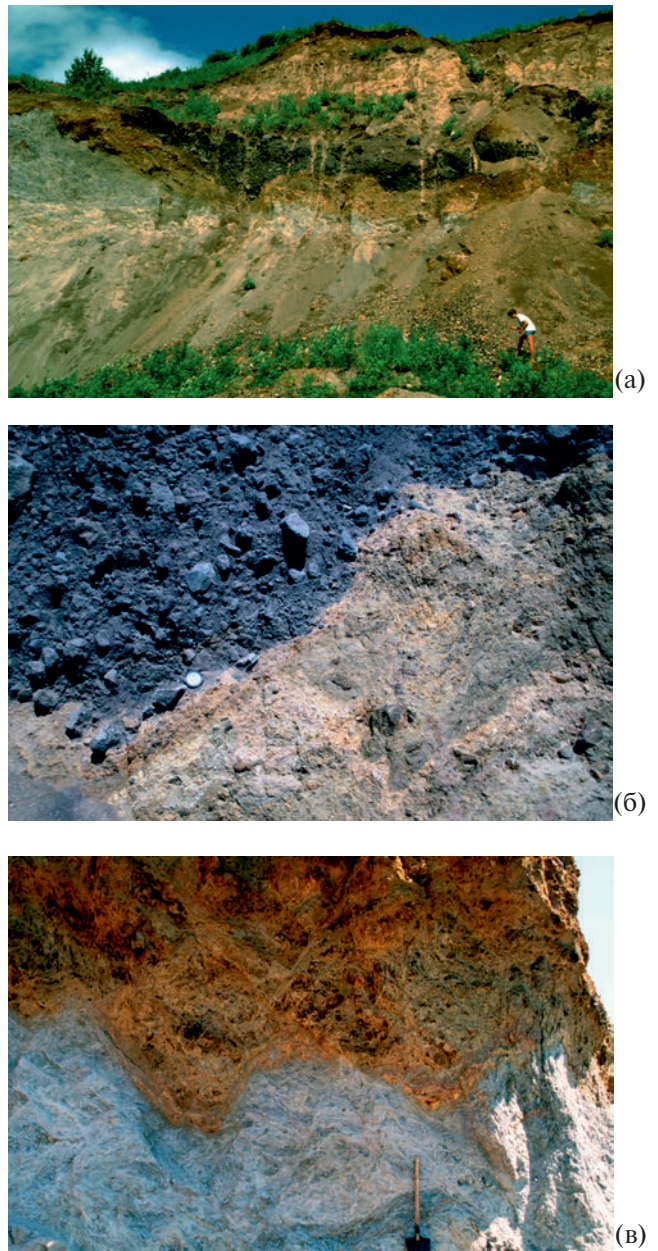


Рис. 6. Обнажения блоковой фации отложений обломочной лавины 16.5 тыс. ^{14}C л.н. вулкана Авачинский в береговом обрыве Авачинской бухты.

а – в верхней части обрыва высотой около 10 м видны разноцветные субгоризонтальные линзы (“блоки” по [Glicken, 1996]) отложений обломочной лавины – сильно раздробленные, интенсивно деформированные фрагменты обвалившейся части постройки древней Авачи; б, в – характер контактов линз (“блоков”) блоковой фации обломочной лавины, состоящей из материала древней постройки вулкана Авачинский. Для масштаба – крышка от фотоаппарата на границе блоков разного цвета (б) и лопата (в).

лагунных отложений, обнажающихся в береговом обрыве Авачинской бухты [Мелекесцев и др., 1991]. Датирование было выполнено в Геологическом институте РАН Л.Д. Сулержицким.

Таблица 2. Гранулометрические характеристики отложений обломочной лавины Авачинского вулкана, полученные в результате ситового анализа

Гранулометрические характеристики	Медианный диаметр (мм)	Коэффициент сортировки (фи)	Гравий: 2–64 мм (%)	Песок: 0.063–2 мм (%)	Алеврит: <0.063 мм (%)
Диапазон значений	0.6–40	0.6–3.8	2.4–98.9	1.1–79.2	0–12.2
Среднее значение	(20)	(3.1)	(52.5)	(43)	(4.5)

Примечание. Проанализировано 15 образцов весом 5–10 кг. Коэффициент сортировки – по [Inman, 1952].

По новым данным, полученным для тех же отложений в том же месте методом AMS (акселераторная масс-спектрометрия), возраст этой толщи составляет 16550 ± 110 л.н. [Belousova, Belousov, 2011] (табл. 3). Указанная разница в возрасте, вероятно, обусловлена несовершенством метода радиоуглеродного анализа, примененного при первом датировании.

Описанный покров грубообломочных отложений первоначально был интерпретирован как ледниковая морена [Маренина и др., 1962], а позднее – как “агломерат направленного взрыва”, т.е., как материал, выброшенный гигантским взрывом Авачинского вулкана [Мелекесцев и др., 1991]. Подковообразная морфология кратера и литологические характеристики грубообломочных отложений, аналогичные эталонным отложениям обломочной лавины вулкана Сент Хеленс, однозначно указывают на происхождение этой толщи в результате крупномасштабного обрушения древнего конуса Авачи [Белоусова, 1994]. Объем этого обрушения составлял около 12 км^3 [Апрелков, 1964].

С этим обрушением также связано образование особой структуры, расположенной в брешах (воротах) подковообразного кратера. Эта ступенчатая возвышенность, размером в плане $2 \times 3 \text{ км}$, абсолютной высотой 1600 м и относительной около 500 м, состоит из нескольких наклонных блоков деформированной древней постройки Авачинского стратовулкана (рис. 7а). В разрезе блоков видно разбитое многочисленными трещинами и разломами, полого наклонное напластование лав и пирокластического материала толщиной 300 м (см. рис. 7б, 7в).

Происхождение этой возвышенности, обозначенной на старых картах как гора Монастырь, а на новых картах – плато Фигурное, было дискуссионным. Ранее она трактовалась как результат опускания южной части древнего Авачинского вулкана по тектоническим разломам [Заварицкий, 1935] или как эрозионный остаток разрушенного древнего вулкана Монастырь [Масуренков и др., 1985]. По нашим данным, эта структура представляет собой так называемый “торева” блок (термин по [Wadge et al., 1995]) – последний из серии оползневых блоков крупномасштабного обрушения Авачинского вулкана (рис. 8). Этот блок, имеющий объем 0.75 км^3 , не трансформировался в обломочную лавину, а задержался на его склоне. Такое часто происходит при крупномасштабных обрушениях (например, на вулкане Шивелуч в 1964 г. [Belousov et al., 1999]). Сходная с нашей интерпретация происхождения этого блока предложена в статье [Мелекесцев и др., 1991], однако в ней Монастырь описан не как последний, а как первый оползший блок, а весь остальной покров обломочной лавины ошибочно интерпретирован как выброшенный гигантским взрывом.

До настоящего времени не обнаружено каких-либо ювенильных пирокластических отложений, непосредственно перекрывающих или подстилающих эту обломочную лавину, поэтому остаются открытыми вопросы: что спровоцировало обрушение древнего Авачинского вулкана и как оно сочеталось с его эруптивной активностью? Исходя из опыта исследований подобных отложений на других вулканах, можно предположить, что катастрофическому

Таблица 3. Новое датирование отложений обломочной лавины Авачинского вулкана

Место датирования	Номер образца	Тип материала	Возраст ^{14}C	Дополнение
Радиоуглеродная лаборатория, Познань, Польша	Poz-35798	Органические осадки	16550 ± 110 л.н.	Некалиброванный

Примечание. Координаты места отбора образца: $53^{\circ}03'40.4'' \text{ N}$, $158^{\circ}34'38.4'' \text{ E}$.



(a)



(б)



(в)

Рис. 7. Гора Монастырь (плато Фигурное) — последний оползневой блок (“торева”) в воротах древнего подковообразного кратера у подножья молодого конуса Авачи. а — вид с вертолета на ступенчатую поверхность его плато, состоящего из нескольких наклонных оползневых блоков. В нижней части снимка — подножье молодого конуса Авачи, 2024 г.; б, в — в склоне горы Монастырь обнажается разбитое трещинами и разломами напластование лав и пирокластики древнего конуса Авачи. Вид с северо-запада, 1999 г. (б); часть склона горы Монастырь с человеком — для масштаба (в).

обрушению Авачи 16.5 тыс. ^{14}C л.н. предшествовал период медленных, постепенно нарастающих деформаций постройки (так называемый “крип”), который был инициирован

одним из извержений вулкана, произошедших за некоторое время до обрушения. В подобных случаях обычно не удается найти пирокластических отложений, непосредственно ассоциированных с отложениями обломочной лавины [Belousov et al., 2024].

Тот факт, что отложения лавины достигают побережья Авачинской бухты, где залегают на прибрежных галечниках, говорит о том, что в момент отложения лавина вошла в воду древней Авачинской бухты. Это могло вызвать цунами на ее берегах, однако отложения этого палеоцунами пока не обнаружены.

БУДУЩЕЕ КРУПНОМАСШТАБНОЕ ОБРУШЕНИЕ АВАЧИНСКОГО ВУЛКАНА

В настоящее время молодой конус Авачинского вулкана, расположенный в подковообразном кратере, образованном 16.5 тыс. ^{14}C л.н., имеет относительную высоту 700 м над древним кратером с крутизной склонов от 15° до 30° и объем 5 км^3 . Размеры, морфология и строение вулкана позволяют предположить, что этот конус потенциально способен испытать крупномасштабное обрушение. Такой сценарий (обрушение молодого конуса, расположенного в древнем подковообразном кратере) реализовывался на нескольких аналогичных по морфологии и истории развития вулканах мира.

Например, вулкан Ламингтон (Папуа — Новая Гвинея) до 1951 г. имел постройку, сходную по морфологии и геологической структуре (но несколько меньшую по размерам) с современной постройкой Авачинского вулкана: Ламингтон имел открытый на север древний подковообразный кратер размером 1.3 км, который образовался 20 тыс. л.н. в результате обрушения объемом 0.5 км^3 [Belousov et al., 2020]. После этого в кратере был сформирован молодой конус. В 1951 г. в ходе подготовки нового извержения этот конус обвалился также в северном направлении с образованием обломочной лавины объемом $0.02\text{--}0.04 \text{ км}^3$. Это обрушение спровоцировало сильное эксплозивное извержение с формированием разрушительной пирокластической волны, покрывшей площадь 230 км^2 . В результате этого извержения погибло около 4000 человек [Taylor, 1958].

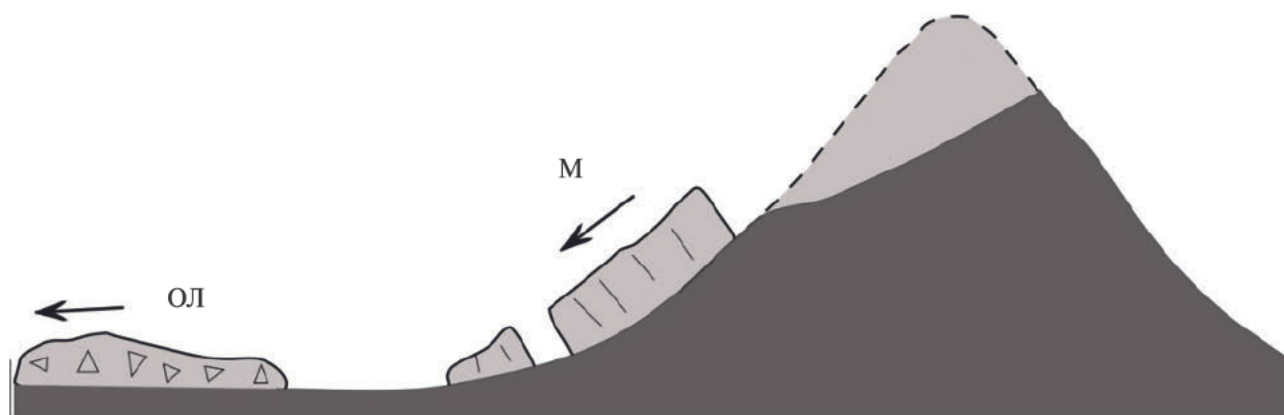


Рис. 8. Схема механизма крупномасштабного обрушения вулкана Авачинский 16.5 тыс. ^{14}C л.н. Первые обрушившиеся блоки интенсивно дробятся и образуют обломочную лавину (ОЛ); последний блок тормозится и останавливается вскоре после начала движения, формируя "торева" блок – структуру горы Монастырь (М). Перемещенная часть постройки показана светло-серым цветом.

Аналогично, на вулкане Севергина (о. Харимкотан, Курильские острова) после крупномасштабного обрушения в восточном направлении 1100 ^{14}C л.н. в образовавшемся подковообразном кратере сформировался небольшой молодой конус/купол, который обвалился в 1933 г. в процессе подготовки нового извержения. Обломочная лавина имела объем 0.4 км^3 и прошла расстояние более 7 км до побережья Тихого океана, вызвав волну цунами. Обрушение спровоцировало сильное плинианское извержение с выпадением большого количества грубой пемзовидной тефры [Belousova, Belousov, 1995].

Обрушения и последующие извержения вулканов Ламингтон и Севергина могут служить моделью будущего крупномасштабного обрушения (и связанного с ним извержения) молодого конуса вулкана Авачинский. На основе этой модели можно предположить, что обрушению подвергнется часть молодого конуса Авачинского вулкана объемом около 1 км^3 (20% объема конуса) (табл. 4). Образовавшаяся обломочная лавина распространится в юго-западном направлении на расстояние около 23 км, достигнув северной окраины г. Петропавловска-Камчатского (рис. 9). Вполне вероятно, что с обрушением будет также связано образование крупного лахара, который распространится на еще большее расстояние, увеличив область разрушений. Будущее обрушение Авачинского вулкана может спровоцировать эксплозивное извержение, характер и сила которого будут зависеть от положения и свойств магмы в момент

обрушения. Состав магм, извергаемых Авачинским вулканом, позволяет предположить, что это извержение может сопровождаться формированием разрушительной пирокластической волны, как это было на вулкане Ламингтон в 1951 г., или произойти в форме плинианского извержения, как это было на вулкане Севергина в 1933 г.

БУДУЩЕЕ КРУПНОМАСШТАБНОЕ ОБРУШЕНИЕ КОРЯКСКОГО ВУЛКАНА

Вулкан Корякский представляет собой крутосклонный (до 35°), рассеченный барранкосами, правильный конус высотой 3456 м (рис. 10). Все его исторические извержения были слабыми и умеренными фреатомагматическими эксплозиями с выбросом тонкозернистого пепла андезибазальтового состава. В XX веке известны слабые вершинные извержения 1926, 1956–1957 и 2008–2009 гг. [Иванов, 2010] (см. рис. 1). Начиная с 1957 г., интенсивная фумарольная деятельность наблюдается на долгоживущей трещине, расположенной на высоте около 3000 м на северо-западном склоне вулкана [Сирин, Тимербаева, 1959]. По геологическим данным в голоцене вулкан изливал протяженные глыбовые лавовые потоки [Маренина и др., 1962].

В отличие от Авачинского вулкана в геологической истории Корякского вулкана не было крупномасштабных обрушений вулканической постройки. Однако геологическое строение, а также морфология Корякского вулкана и древнего конуса Авачинского вулкана

Таблица 4. Параметры предполагаемых будущих крупномасштабных обрушений (обломочных лавин) вулканов Авачинский и Корякский

Вулканы	Сброшенная высота (Н), км	Пройденный путь (L), км	H/L	Площадь, км ²	Объем, км ³
Авачинский	2.5	23	0.1	80	1
Корякский	3.4	33	0.1	400	12

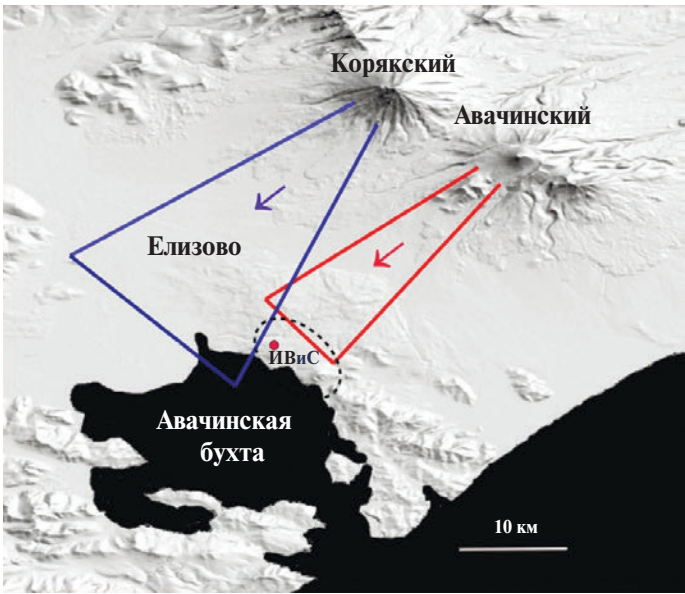


Рис. 9. Схема распространения обломочных лавин возможных будущих крупномасштабных обрушений вулканов Авачинский и Корякский. Параметры обрушений приведены в табл. 4. Области разрушений от возможных сопутствующих явлений — взрывных извержений, лахаров и цунами в схему не включены. Пунктиром показана граница г. Петропавловска-Камчатского, ИВиС — место расположения Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

(до обрушения 16.5 тыс. ¹⁴С л.н.) весьма сходны, поэтому, учитывая данные о закономерностях крупномасштабных обрушений, имеются все основания предполагать, что в будущем на Корякском вулкане возможно обрушение постройки с параметрами, аналогичными обрушению Авачинского вулкана 16.5 тыс. ¹⁴С л.н. (см. табл. 4), которое, вероятно, также произойдет в юго-западном направлении (см. рис. 9) и будет иметь объем около 12 км³. Образовавшаяся обломочная лавина на нерасчлененном подножии вулкана покроет область в форме веера (конуса выноса) площадью около 400 км². Толщина грубообломочных отложений на этой площади будет от первых метров до десятков сотен метров в местах локального понижения рельефа. Максимальное расстояние, которое пройдет обломочная лавина, легко оценить, используя зависимость между относительной высотой конуса вулкана Н и пробегом L (расстоянием, которое проходит обломочная лавина).

Это расстояние обычно в 10 раз превышает высоту вулкана над его основанием, и можно предположить, что будущая лавина Корякского вулкана способна пройти более 30 км. Численное моделирование лавины с близкими параметрами показало, что она распространится за 280 с на расстояние 28 км со средней скоростью 100 м/с [Адушкин и др., 1984]. При таком сценарии город Елизово, а также соседние дачные поселки, аэропорт и федеральная трасса до г. Петропавловска-Камчатского окажутся в зоне полного разрушения. Похожие оценки, но для обрушения меньшего объема, приведены в статье [Долгая, Бергаль-Кувикас, 2024]. Вполне вероятно, что с обрушением будет также связано образование крупного лахара, который распространится на еще большее расстояние, увеличив область разрушений. Эта обломочная лавина, так же, как и лавина Авачи 16.5 тыс. ¹⁴С л.н., может достигнуть северо-западного побережья Авачинской бухты. Если



Рис. 10. Правильный, рассеченный барранкосами конус постройки Корякского вулкана. Слева потухшие вулканы Ааг и Арик, 2002 г. Вид с юго-запада, на переднем плане взлетная полоса аэропорта Елизово — вероятная зона воздействия обломочной лавины будущего крупномасштабного обрушения.

это произойдет, возможно образование крупного цунами в Авачинской бухте, которое приведет к разрушениям на ее берегах.

Будущее крупномасштабное обрушение Корякского вулкана может произойти во время одного из его рядовых магматических извержений (или в процессе его подготовки). В этом случае обрушение спровоцирует эксплозивное извержение, сила и характер которого будут зависеть от свойств, глубины и формы залегания магмы в постройке вулкана в момент обрушения. Учитывая, что вулкан Корякский извергает относительно слабо дифференцированные магмы (в основном, андезибазальтового состава), можно предположить, что прогнозируемое обрушение не спровоцирует катастрофическую эксплозию с разрушительной пирокластической волной, аналогичную взрывам на вулканах Безымянный (Камчатка) и Сент Хеленс (США). Более вероятным сценарием является плининское (субплининское) извержение с выпадением большого количества тефры

и образованием пирокластических потоков. После обрушения возможно формирование лавовых потоков, а также долговременная активизация деятельности в пределах образовавшегося подковообразного кратера с формированием нового центрального конуса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Накопленные к настоящему времени данные о закономерностях проявления и развития крупномасштабных обрушений вулканических построек и их отложениях (обломочных лавинах) позволили сделать вывод о принципиальной возможности в будущем таких событий на вулканах Авачинский и Корякский. Полученные оценки возможных параметров будущих обрушений и связанных с ними обломочных лавин показывают большую опасность этих событий для населенных пунктов Петропавловска-Камчатского и Елизово. Эти данные позволяют обновить до современного уровня имеющиеся карты вулканической опасности,

которые были созданы ранее без учета этого разрушительного природного явления. Возможность крупномасштабных обрушений вулканов Авачинский и Корякский и связанная с ними опасность диктуют необходимость непрерывного мониторинга деформаций построек этих вулканов, как во время извержений, так и в межэруптивных периоды. Особое внимание следует уделить состоянию трещин, которые пересекают привершинные области обоих вулканов. Наличие этих трещин может указывать на уже начавшиеся медленные деформации (“крип”) построек вулканов, которые обычно предшествуют обрушениям. Имеющиеся данные по спутниковой радарной интерферометрии показывают, что весь юго-западный склон вулкана Корякский испытывает медленное опускание относительно его северных склонов [Долгая, Бергаль-Кувикас, 2024], и что только в период последнего извержения 2008–2009 гг. его склоны сместились на 25 см [Михайлов и др., 2021]. Главный вопрос не в том, “произойдут ли в будущем крупномасштабные обрушения построек вулканов Авачинский и Корякский”, а в том — “когда они произойдут”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарности Рафаэлю Пари (Raphael Paris, Университет Блеза Паскаля, Франция) за помощь в определении радиоуглеродного возраста отложений основания обломочной лавины Авачинского вулкана и сотруднику ИВиС Виктору Николаевичу Двигало за полезные консультации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВиС ДВО РАН, тема НИР № FWME-2024-0008.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адушкин В.Д., Гостинцев Ю.А., Фирстов П.П. О природе воздушных волн при сильных эксплозивных извержениях // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 3–11.

Апрелков С.Е. О древнем извержении Авачинского вулкана и изменении русла реки Авача // Вопросы географии Камчатки. 1964. С. 108–109.

Базанова Л.И., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пузанков М.Ю. Потенциальная опасность от извержений Авачинского вулкана // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. 2001. С. 390–407.

Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Гигантские обрушения на вулканах в XX-ом веке // Природа. 1997. № 11. С. 70–81.

Белоусова М.Г. Отложения крупномасштабных обрушений вулканических построек / Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1994. 17 с.

Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Богоявленская Г.Е., Максимов А.П. Вулкан Безымянный: история формирования и динамика активности // Вулканология и сейсмология. 1990. № 2. С. 3–22.

Горшков Г.С. Извержение сопки Безымянной (предварительное сообщение) // Бюлл. вулканолог. станций. 1957. С. 1–41.

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

Горшков Г.С., Дубик Ю.М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3–37.

Долгая А.А., Бергаль-Кувикас О.В. Моделирование потенциального обвала на вулкане Корякский и оценка вулканопасности для Елизовско-Петропавловской агломерации (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2024. № 3. С. 70–85.

Заварицкий А.Н. Вулкан Авача на Камчатке и его состояние летом 1931 г. // Труды ЦНИГРИ. 1935. № 35. С. 3–36.

Иванов Б.В., Флеров Г.Б., Масуренков Ю.П., Кирьянов В.Ю., Мелекесцев И.В., Таран Ю.А., Овсянников А.А. Динамика и состав продуктов извержения Авачинского вулкана в 1991 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 5–27.

Иванов В.В. Активизация вулкана Корякский (Камчатка) в конце 2008 – начале 2009 гг.: оценки выноса тепла и водного флюида, концептуальная модель подъема магмы и прогноз развития активизации // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 2010. С. 24–38.

Маренина Т.Ю., Тимербаева К.М., Сирин А.Н. Корякский вулкан на Камчатке // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. 1962. С. 67–130.

Масуренков Ю.П., Егорова И.А., Пузанков М.Ю. Авачинская группа вулканов // Активные вулканы и гидротермальные системы Камчатки. Путеводитель

- научных экскурсий. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 107–134.
- Масуренков Ю.П., Егорова И.А., Пузанков М.Ю., Балеста С.Т., Зубин М.И. Вулкан Авачинский // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 244–273.
- Мелекесцев И.В. Новейшие гигантские эксплозивно-обвальные лавины катастрофических извержений вулкана Шивелуч на Камчатке: детерминированность и возможные причины // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 215–234.
- Мелекесцев И.В. Сопка Средняя (Ключевская группа вулканов, Камчатка) — гигантский аллохтон, а не самостоятельный вулкан // Вулканология и сейсмология. 2005. № 3. С. 9–14.
- Мелекесцев И.В., Дирксен О.В., Гирина О.А. Гигантский эксплозивно-обвальный цирк и обломочная лавина на вулкане Бакенинг (Камчатка, Россия) // Вулканология и сейсмология. 1998. № 3. С. 12–24.
- Мелекесцев И.В., Литасова С.Н., Сулержицкий Л.Д. О возрасте и масштабе катастрофических извержений типа направленного взрыва вулкана Авачинский (Камчатка) в позднем плейстоцене // Вулканология и сейсмология. 1991. № 2. С. 3–11.
- Михайлов В.О., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Смирнов В.Б. О связи активизации вулкана Корякский в 2008–2009 гг. с глубинными магматическими процессами // Физика Земли. 2021. № 6. С. 3–9.
- Сирин А.Н., Тиммербаева К.М. Извержение Корякского вулкана в начале 1957 г. // Бюлл. вулканолог. станции. 1959. № 28. С. 3–20.
- Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и прошлом // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. 1956. № 11. 310 с.
- Фирстов П.П. Реконструкция динамики катастрофического извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. на основании данных о волновых возмущениях в атмосфере и вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 48–63.
- Belousov A. The Shiveluch volcanic eruption of 12 November 1964 — explosive eruption provoked by failure of the edifice // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1995. V. 66. P. 357–365.
- Belousov A. Pyroclastic deposits of March 30, 1956 directed blast at Bezymianny volcano // Bull. Volcanol. 1996. V. 57. P. 649–662.
- Belousov A., Belousova M. Large scale landslides on active volcanoes in XXth century — examples from Kurile-Kamchatka region (Russia) // Landslides. Rotterdam: Balkema, 1996. P. 953–957.
- Belousov A., Belousova M. Large-scale collapses of Avachinsky and Koryaksky volcanoes: major volcanic hazard in Kamchatka, Russia // IAVCEI General Assembly. Chile. 2004.
- Belousov A., Belousova M., Hoblitt R., Patia H. The 1951 eruption of Mount Lamington, Papua New Guinea: Devastating directed blast triggered by small-scale edifice failure // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2020. V. 401. P. 106947.
- Belousov A., Belousova M., Listanco E. Late Holocene edifice collapse and eruptions of Iriga volcano, Philippines: integrated data from subaerial and lacustrine deposits // Bull. Volcanol. 2024. V. 85(7). P. 40.
- Belousov A., Belousova M., Voight B. Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in the Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia // Bull. Volcanol. 1999. V. 61. P. 324–342.
- Belousov A.B., Bogoyavlenskaya G.E. Debris avalanche of the 1956 Bezymianny eruption // Kagoshima International Conference on Volcanoes, Japan. 1988. P. 460–462.
- Belousov A., Voight B., Belousova M. Directed blasts and blast-currents: A comparison of the Bezymianny 1956, Mount St Helens 1980, and Soufriere Hills, Montserrat 1997 eruptions and deposits // Bull. Volcanol. 2007. V. 69. P. 701–740.
- Belousova M., Belousov A. Prehistoric and 1933 debris avalanches and associated eruptions of Harimkotan Volcano (Kurile islands) // Periodico di Mineralogia. 1995. V. 64. P. 99–100.
- Belousova M., Belousov A. Tsunamigenic volcanic landslides of Kurile-Kamchatka arc // EGU General Assembly. Geophysical Research Abstracts. 2011. V.13. EGU2011–11665–3.
- Dufresne A., Siebert L., Bernard B. Distribution and geometric parameters of volcanic debris avalanche deposits // Volcanic debris avalanches: From collapse to hazard. 2021. P. 75–90.
- Hsu K. Catastrophic Debris Streams (Sturzstorms) Generated by Rockfalls // Geol. Soc. Am. Bull. 1975. V. 86. № 1. P. 129–140.
- Glicken H. Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano, Washington // US Geol. Surv. 1996. V. 96. P. 677.
- Inman D.L. Measures for describing the size distribution of sediments // J. Sediment. Res. 1952. V. 22. № 3. P. 125–145.
- Ponomareva V., Kyle P., Pevzner M., Sulerzhitsky L., Hartman M. Holocene eruptive history of Shiveluch volcano, Kamchatka peninsula, Russia // Amer. Geophys. Union. 2007. V. 172. P. 263–282.

- Ponomareva V.V., Melekestsev I.V., Dirksen O.V.* Sector collapses and large landslides on Late Pleistocene–Holocene volcanoes in Kamchatka, Russia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2006. V. 158. № 1–2. P. 117–138.
- Rockslides and avalanches / Ed. B. Voight. N. Y.: Elsevier, 1978. V. 1. 833 p.
- Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., Walter T.R., Mania R., Maccaferri F., Svirid I.Y., Belousov A.B., Belousova M.G.* The rebirth and evolution of Bezymianny volcano, Kamchatka after the 1956 sector collapse // *Communications Earth & Environment.* 2020. V. 1(1). P. 15.
- Siebert L.* Large volcanic debris avalanches: characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1984. V. 22. № 3–4. P. 163–197.
- Siebert L., Reid M.* Lateral edifice collapse and volcanic debris avalanches: A post-1980 Mount St. Helens perspective // *Bull. Volcanol.* 2023. V. 85. № 11. P. 61.
- Taylor G.* The 1951 eruption of Mount Lamington, Papua // Australia, Bureau of Mineral Resources. 1958. V. 38. 117 p.
- Voight B., Glicken H., Janda R.L., Douglass P.M.* Catastrophic rockslide avalanche of May 18 / Eds P.W. Lipman, D.R. Mullineaux // *The 1980 eruptions of Mount St. Helens.* Washington: US. Geological Survey Professional Paper, 1981. V. 1250. P. 347–378.
- Volcanic Debris avalanches: From collapse to hazard (*Advances in Volcanology*) / Eds M. Roverato, A. Dufresne, J. Procter. Switzerland: Springer Nature, 2021. 370 p.
- Wadge G., Francis P.W., Ramirez C.F.* The Socompa collapse and avalanche event // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1995. V. 66. № 1–4. P. 309–336.
- Walker G.P.L.* Grain-size characteristics of pyroclastic deposits // *The Journal of Geology.* 1971. V. 79. № 6. P. 696–714.

LARGE SCALE COLLAPSES OF AVACHINSKY AND KORYAKSKY VOLCANOES AND THE ASSOCIATED CATASTROPHIC ERUPTIONS – THE MAIN DANGER FOR CITIES OF PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY AND ELIZOVO

A. B. Belousov*, M. G. Belousova

*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

*e-mail: belousov@mail.ru

It is well known that large scale collapses of volcanic edifices (with volume more than 0.01 km³) are common natural phenomenon and usual stage in geological history of many volcanoes. Volcanic collapses produce high-velocity, devastating debris avalanches, which travel long distances. In many cases, large scale collapses also provoke strong explosive eruptions. We report geological data about deposits of a large scale edifice collapse (debris avalanche) of Avachinsky volcano with volume 12 km³. A major part of the city of Petropavlovsk-Kamchatsky is built on top of this debris avalanche deposit. We also report a new determination of the radiocarbon age of the organic-rich deposit underlying the avalanche deposit, which indicates that Avachinsky volcano collapsed 16500 ¹⁴C years BP. We presume that modern edifices of Avachinsky and Koryaksky volcanoes are potentially ready for future large scale collapses. The considered scenarios of possible future collapses show that the resulted debris avalanches will be able to reach the cities Petropavlovsk-Kamchatsky and Elizovo. The results of our investigations allow to upgrade the existing maps of volcanic hazards for this area.

Keywords: large scale edifice collapse, debris avalanche, Kamchatka, Avachinsky volcano, Koryaksky volcano, horseshoe-shaped crater, volcanic hazard, tsunami