

УДК 551.21

БОГОЯВЛЕНСКАЯ Г. Е., БРАЙЦЕВА О. А., МЕЛЕКЕСЦЕВ И. В.,  
КИРЬЯНОВ В. Ю., МИЛЛЕР С. Д.

### КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ТИПА НАПРАВЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ НА ВУЛКАНАХ СЕНТ-ХЕЛЕНС, БЕЗЫМЯННЫЙ, ШИВЕЛУЧ

Катастрофические извержения на андезитовых вулканах (наиболее опасные для людей) происходят достаточно редко и практически мгновенно. Чем крупнее катастрофа, тем реже и внезапнее она происходит. В силу этих причин непосредственное наблюдение и детальное изучение катастрофических извержений очень важно. Но удается это сделать крайне редко. Самые крупные извержения последнего столетия такого типа — Безымянный в 1956 г., Шивелуч в 1964 г. — происходили внезапно; катастрофические взрывы не были предсказаны, и вулканологам непосредственно наблюдать их не удавалось. Последнее извержение этого типа произошло в 1980 г. в шт. Вашингтон (США) на вулкане Сент-Хеленс, и, хотя само событие не было предсказано геологической службой США, американским вулканологам удалось наблюдать процесс взрыва и детально изучить как характер извержения, так и его последствия.

В настоящей статье кратко рассматриваются катастрофические извержения трех наиболее изученных вулканов — Сент-Хеленс, Безымянный и Шивелуч. Для этой цели нами приводится сводка данных по каждому извержению на основе опубликованных материалов [4, 9, 10, 14, 16, 17, 28] с добавлением некоторых вновь полученных результатов, а затем дается сравнительное рассмотрение этих извержений.

#### Извержение вулкана Сент-Хеленс 1980 г.

Вулкан Сент-Хеленс в Каскадных горах северо-запада США находился в покое с 1857 г. До извержения он представлял собой правильный стратовулкан с абсолютной высотой 2975 м (относительная высота 1450 м). Вершинный кратер был заполнен снегом, на склонах имелись ледники.

Изучение истории вулканизма Каскадных гор за последние 4500 лет [20] показало, что вулкан Сент-Хеленс был наиболее активным вулканом в этот отрезок времени. Деятельность его выражалась в извержениях тефры и пирокластических потоков, образовании андезитовых и дацитовых экструзий, а в последние 2500 лет — в излиянии андезитовых лавовых потоков и образовании экструзий на склонах вулкана и в вершинном кратере.

Последний крупный эруптивный цикл был зафиксирован 500—300 лет назад, он характеризовался извержением пирокластических и лавовых потоков и образованием экструзивного купола, запечатавшего кратер. Последующие более слабые извержения вулкана происходили в 1802—1804, 1844—1847, 1854 — 1857 гг. [21].

Эруптивная деятельность вулкана Сент-Хеленс в 1980 г. может быть разделена на три стадии: 1) докульминационная, характеризующаяся

интенсивной сейсмической активностью, деформацией постройки и фреатическими извержениями; 2) кульминационная, включающая образование обломочной лавины, направленный взрыв и плинианскую деятельность; 3) посткульминационная - рост экстрезивного купола в кратере вулкана.

**Докульминационная стадия.** После 123-летнего периода покоя в марте 1980 г. под вулканом были зарегистрированы землетрясения количество и интенсивность которых быстро росли [19]. Извержение началось 27 марта образованием вершинного кратера и слабыми периодическими эксплозиями с выбросом небольших количеств резургентного пепла и обломков пород вулкана. Периодические паровые извержения происходили в апреле и между 11 и 14 мая. В апреле вершинный кратер достиг размера 300x500 м. В кратере и на склонах вулкана происходили обвалы и образовывались снежные лавины. В апреле и мае сейсмическая активность упала.

В этот же период (в апреле-мае) на северном склоне вулкана ниже границы кратера начались быстрые и значительные деформации - до 2 м в сутки, что свидетельствовало о подъеме магмы в канале с образованием криптокупола в теле постройки [23]. Северный склон вулкана, включая молодой купол Гоат Рок, покрылся трещинами. Интенсивная сейсмическая активность вызвала снежные лавины и небольшие грязевые потоки на склонах вулкана.

**Кульминационная стадия.** Пароксизмальное извержение началось утром 18 мая. Вулкан был спокоен, никаких предвестников катастрофы не было. В 8 ч. 32 мин. местного времени произошло землетрясение с магнитудой +5 [19].

Наблюдатели, летавшие в это время над вершиной вулкана увидели, что в кратере произошли небольшие обвалы со стенок а затем несколько секунд спустя, северный склон на границе кратера и поднятия стал сползать вниз и через 26 с сместился на 700 м. Образовавшаяся обломочная лавина скатилась вниз (скорость 50-100 м/с), прошла 8 км подпрудила озеро, подняв его уровень на 60 м, повернула в р. Норс Форк Таулт и заполнила ее на расстоянии 23 км [19] (рис. 1) Лавина представляла собой слабо нагретую смесь песка, обломков взорванной постройки, снега и воды ( $T=50-70^{\circ}\text{C}$ ).

В отложениях обломочной лавины выделено семь различных порций соответствующих разным частям разрушенной постройки вулкана [27]. Средняя мощность отложений 45 м, они покрыли площадь 60 км<sup>2</sup>. Общий объем отложений обломочной лавины составил 2,8 км<sup>3</sup> рельеф поверхности обвальных отложений беспорядочно холмистый с высотой холмов до 30 м. Далее от лавины на расстояние 120 км прошли, разрушая мосты, дороги и лесосеки, грязевые потоки со скоростью 15-40 м/с.

Через 26 с после начала сползания произошел направленный взрыв. Быстрое уничтожение части вулкана при обвале северного склона явилось причиной резкой декомпрессии криптокупола, сформированного внутри вулканической постройки [22]. Мгновенное расширение и отделение вулканических газов вызвало гигантский направленный взрыв который произошел на месте обвала. Взрывная волна со скоростью до 200 м/с уничтожила весь лес на расстоянии до 10 км от вершины вулкана, далее на расстоянии 10-28 км лес повален и поломан в краевых частях зоны взрыва деревья стоят, но высушены (см. рис. 1).

Слой обломков и пепла объемом 0,2 км<sup>3</sup> отложился на площади 600 км<sup>2</sup> [21]. Отложения состоят на 50% из ювенильных дацитов и юванного криптокупола, смешанных с породами старой постройки. Мощность отложений невелика (от 1 м близ вулкана до 1 см в красных частях), они лежат на хребтах и в пониженных частях рельефа. Температура отложений направленного взрыва 70—277°C [18].

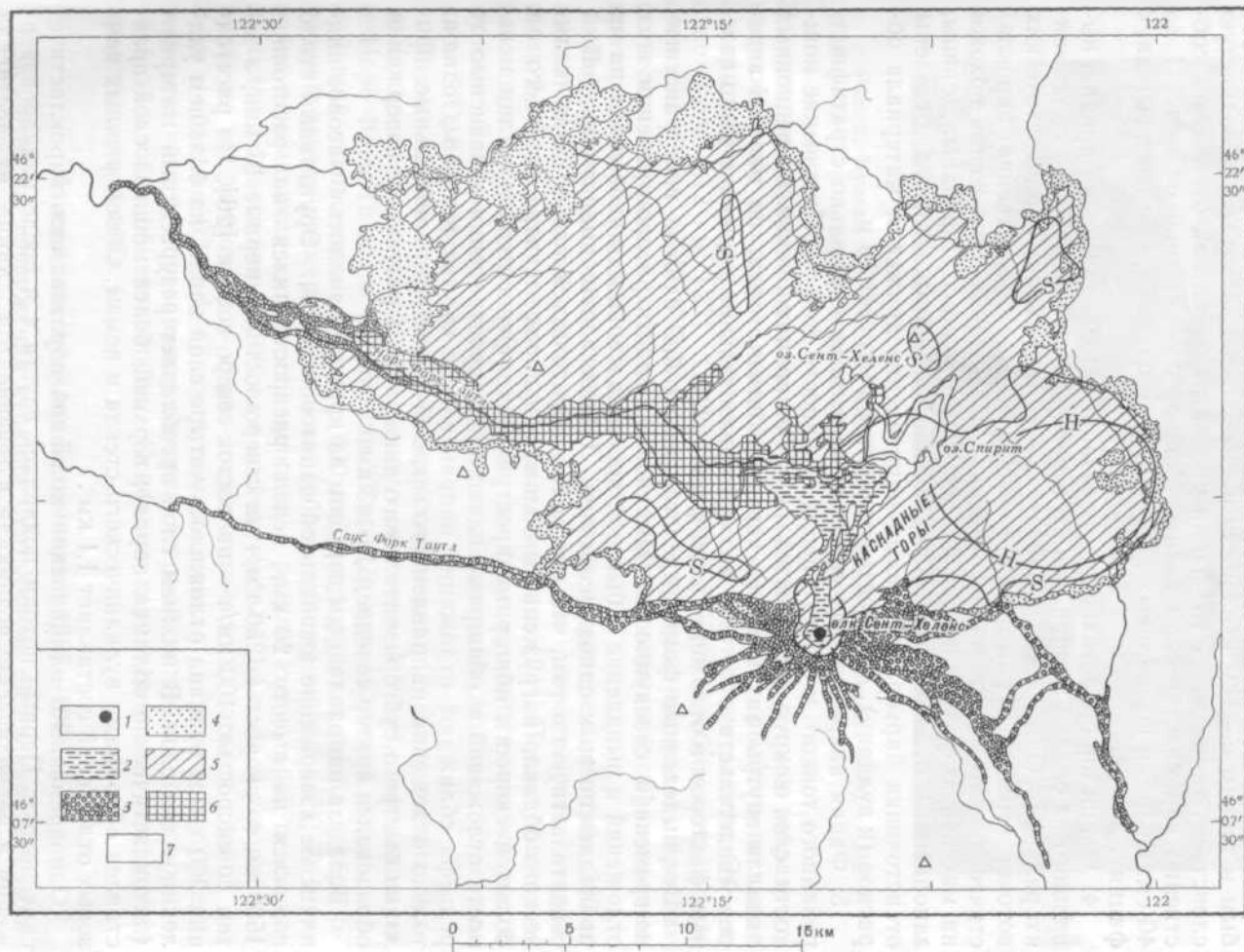


Рис. 1. Геологическая карта вулкана Сент-Хеленс после пероксизмального извержения 1980 г. [28]. 1 — экструзивный купол; 2 — отложения пирокластических потоков; 3 — грязевые потоки; 4 — зона растительности, высушенная направленным взрывом; 5 — область растительности, уничтоженная направленным взрывом; 6 — отложения обломочной лавины; 7 — отложения до 1980 г. (Я и S — зоны воздействия температур направленного взрыва соответственно в  $300 + 50^\circ$  и  $350 + 50^\circ$ )

Изучение отложений направленного взрыва позволило выделить пять главных фаций (снизу вверх).

1. Базальная фация, состоящая из несортированных обломков, лапилли, пепла. Отличительной ее особенностью являются многочисленные включения древесины и почвы. Мощность отложений 10—40 см.

2. Массивная фация перекрывает, иногда замещает базальную и является более тонкозернистой. Отложения представляют собой обломки пород и лапилли, погруженные в основную массу грубого пепла. Они содержат больше тонкого пепла, чем базальная фация. Обломки древесины редки. Серые ювенильные дациты более обильны.

3. Фация пирокластической волны представлена почти целиком грубым и тонким пеплом и лапилли и имеет параллельную или волнистую слоистость типа дюн. Эта фация рассматривается как отложения собственно пирокластической волны. Мощность отложений от менее 1 до 40 см. Обломки ювенильных дацитов более обильны, чем в первых двух фациях.

4. Фация пирокластического потока, образованная из материала, выпавшего из облака направленного взрыва и отложившегося в понижениях рельефа. Она классифицируется как отложения пирокластических потоков взрыва [22] в отличие от более поздних собственно пирокластических потоков плинианской стадии извержения. Отложения похожи на массивную фацию, но обычно несколько хуже сортированы. Долины, заполненные отложениями пирокластического потока взрыва, отделены от источника барьерами; иногда направление движения материала обратное (к вулкану). Мощность отложений достигает 10 м.

5. Фация аккреционных лапилли состоит из нормально стратифицированного тонкого и грубого пепла. Мощность до 6 см. Увеличение мощности слоя вокруг неровностей рельефа, проникновение аккреционных лапилли внутрь автомашины через разбитые стекла, по мнению авторов, свидетельствует о том, что субгоризонтальное движение было важным фактором в отложении этой фации [22].

Все выделенные фации представляют собой единую пространственно-временную совокупность. Одинаковая область распространения этих отложений и выпадение в быстрой последовательности указывают на их принадлежность к одному событию. Общие черты выделенных фаций свидетельствуют о том, что они могли образоваться только из вулканического облака, нагруженного обломками пород и пересекающего на большой скорости обширные пространства. Относительно малая мощность отложений и обширные площади распространения независимо от рельефа сближают отложения направленного взрыва и тефры, однако только отложения направленного взрыва имеют дополнительные признаки быстрого субгоризонтального движения. В результате извержения образовался кратер сечением 1,5х3 км.

Вслед за направленным взрывом из кратера началось 9-часовое плинианское извержение ювенильной дацитовой пемзы. Эруптивный столб поднялся на высоту 20 км, пепел распространился на расстояние 1500 км со скоростью 250 км/ч на северо-восток в первые 13 мин, а затем со скоростью 100 км/ч — на восток-северо-восток [26]. На расстоянии 200 км от вулкана отложилось четыре слоя пепла, на большем удалении — два слоя. В нижнем слое преобладает резургентный материал (литокластические обломки пород); верхний, более мощный слой представлен обломками вулканического стекла и пемзы. Объем рыхлых пемзовых отложений составляет 1,1 км<sup>3</sup>.

Одновременно с плинианской колонной образовались пирокластические потоки. Первые потоки появились спустя 4 ч после начала извержения и периодически возникали в течение 5 ч, длина их достигала 8,0 км [25]. Температура отложений около кратера 750–850° [18].

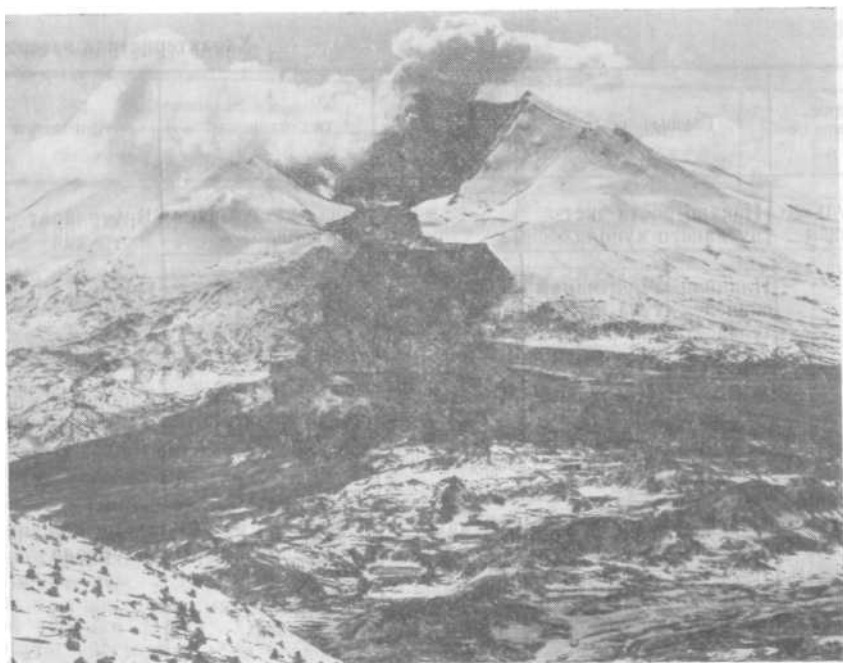


Рис. 2. Вулкан Сент-Хеленс после катастрофического взрыва 1980 г. На переднем плане отложения обломочной лавины

У подножья вулкана отложения пирокластических потоков образуют веерообразные покровы, языки которых состоят из рыхлого песчано-алевритового материала с обломками пемзы и плотного дацита. Объем отложений  $0,12 \text{ км}^3$  [25]. Состав продуктов — роговообманково-гиперстеновый дацит ( $63\% \text{ SiO}_2$ ). Последующее промывание водой пирокластических отложений дало вторичные паровые взрывы с образованием кратерных воронок до 20 и в диаметре.

**Посткульминационная стадия.** С 12 июня в кратере диаметром 300 м начал расти лавовый купол (рис. 2). Вначале скорость роста купола была 2—3 м в сутки, через 7 дней она снизилась [24]. Последующие извержения происходили периодически на фоне продолжающегося роста купола. Состав лав — гиперстен-роговообманковые дациты с содержанием  $\text{SiO}_2$  61—64%.

Таким образом, главные события извержения: 1) обвал склона вулкана, давший обломочную лавину, объемом  $2,8 \text{ км}^3$ , заполнившую р. Норс Форк Татл на расстоянии 23 км; 2) направленный взрыв, покрывший отложениями площадь  $600 \text{ км}^2$  к северу от вулкана и образовавший кратер размером  $1,5 \times 3 \text{ км}$  (объем отложений  $0,2 \text{ км}^3$ ); 3) 9-часовая плинианская активность вулкана, в результате которой пепел отложился на расстоянии 1500 км к востоку (объем  $1,1 \text{ км}^3$ ), а у подножья вулкана сформировалась серия пирокластических потоков длиной до 8 км и объемом  $0,1 \text{ км}^3$ ; 4) посткульминационная деятельность вулкана, выразившаяся в образовании внутрикратерной экструзии и периодической эксплозивной активности. Основные характеристики извержения представлены в табл. 1.

#### **Извержение вулкана Безымянный 1955—1956 гг.**

За 25 лет до извержения вулкана Сент-Хеленс на вулкане Безымянном в 1956 г. произошел катастрофический направленный взрыв, проявивший удивительные черты сходства со взрывом на вулкане Сент-Хеленс.

## Характеристика извержения

Стадия извержения	Главные события	Длительность события	Тип отложений	Тип залегания	
Посткульминационная	Начало роста экструзивного купола		Лава экструзивного купола	Внутрикратерная экструзия	
Кульминационная	Плинианская деятельность	Эруптивная туча высотой 20 км	9 ч	Тефра	Пирокластический чехол
		Извержение пирокластических потоков	Минуты	Отложения пирокластического потока	Заполнение понижений рельефа
		Направленный взрыв; образование кратера 1,5Х3 км	Секунды	Отложения направленного взрыва	Плащ песчаного материала
		Обвал	26 с.	Отложения обвальной лавины	Беспорядочно-холмистый рельеф
Докульминационная	Эксплозивная активность; деформация постройки вулкана	1,5 мес.	Тефра	Пирокластический чехол	
	Сейсмическая подготовка	28 дней			

Вулкан Безымянный — один из самых незаметных вулканов Ключевской группы, находился в покое примерно 1000 лет [5] и на памяти человека не извергался [6]. Абсолютная высота вулкана до извержения — 3085 м, относительная — от 700 м на севере до 1200 м на юге. На вершине вулкана находился плохо выраженный кратер, заполненный небольшим внутренним конусом [9].

На южном склоне вулкана и у его подножья имеется больше 10 разновозрастных экструзивных куполов. Подножие вулкана сложено отложениями пирокластических потоков, связанных с извержениями последних 2000 лет. Молодые лавовые потоки того же возраста хорошо видны на южном склоне массива, более древние лавовые потоки сохранились на северо-восточном склоне вулкана.

Новый цикл эруптивной активности вулкана, продолжающийся до настоящего времени, начался катастрофическим извержением 1955—1956 гг. Для этого извержения выделяются следующие стадии: 1) докульминационная, для которой характерны интенсивная сейсмическая активность, эксплозивная деятельность вулканского типа, деформация привершинной части вулканической постройки; 2) кульминационная, включающая направленный взрыв с разрушением вершины вулкана,

вулкана Сент-Хеленс в 1980 г.

Характер отложений		Температура момент отложения, С	Мощность, м	Площадь, км <sup>2</sup>	Объем, км <sup>3</sup>
литология	вещественный состав				
Роговообманково-пироксеновые дациты, пироксеновые дациты		700—800		—	0,2
Грубый и тонкий пепел	Ювенильный материал с примесью резургентного в нижнем слое	100			1,1
Песчано-алевритовый материал со сглаженными обломками пемзовидных дацитов	Ювенильный материал (роговообманково-пироксеновые дациты)	700—800	10—20	—	0,12
Пять выделенных стратиграфических фаций (базальная, массивная, пирокластической волны, нестратифицированного пирокластического потока и пепла с аккреционными лапилли) представляют собой обломки пород, лапилли, погруженные в основную массу грубого и тонкого пепла. Содержание ювенильной составляющей в обломках — 50%, в заполнителе варьирует от 35 до 65%		70—277	1,0—0,01	600	0,2
Крупноглыбовый агломерат с песчано-алевритовым заполнителем	В отложениях выделено семь фаций, соответствующих комплексам пород разрушенной постройки	50—70	45	60	2,8
Тонкий и грубый пепел	Резургентный материал породы старой постройки вулкана				

плинианскую деятельность с массовым выносом ювенильной пирокластики (тефра, пирокластические потоки); 3) посткульминационная — рост экструзивного купола в кратере вулкана.

**Докульминационная стадия.** 29 сентября 1955 г. было зарегистрировано первое землетрясение под вулканом Безымянным. В октябре количество землетрясений быстро росло — 9 октября они насчитывались десятками, а с 19 октября — сотнями. 11 октября гипоцентр землетрясений был определен под вулканом Безымянным [6].

Извержение началось 22 октября сильными эксплозиями вулканского типа с образованием вершинного кратера. Вулканская деятельность с извержением больших количеств пепла продолжалась в течение ноября [9]. В декабре, январе и феврале 1956 г. эксплозивная активность уменьшилась, периодически происходили небольшие паровые и пепловые выбросы. Размер кратера достигал в это время 500—600 м. Тефра докульминационной стадии извержения представлена серыми грубыми (вулканические пески) и тонкими пеплами, ее общий объем составил 0,4—0,5 км<sup>3</sup>.

Одновременно с эксплозивной деятельностью начался подъем восточного склона вулкана. Обнажился и приподнялся примерно на 100 м

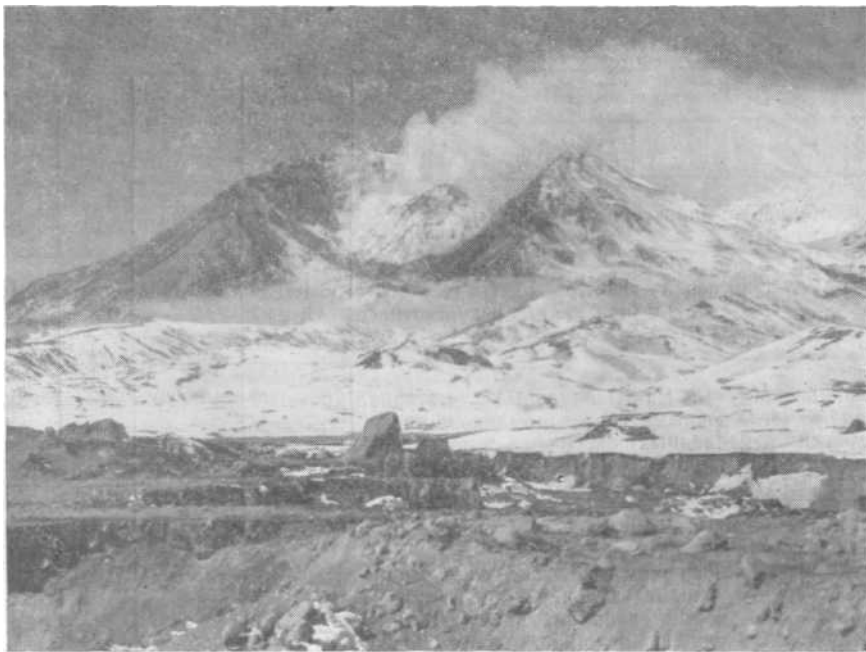


Рис. 3. Вулкан Безымянный после катастрофического извержения 1956 г. (на переднем плане отложения пирокластического потока)



Рис. 4. Отложения агломерата направленного взрыва (НВ) и пирокластического потока (ПП) вулкана Безымянный

старый купол, являющийся частью древнего дацитового вулкана, расположенного в восточной части массива. Общая продолжительность докульминационной стадии составила 5 месяцев.

**Кульминационная стадия.** 30 марта 1956 г. на вулкане произошел направленный взрыв, уничтоживший вершину вулкана и его восточный склон. На месте вершины образовался громадный кратер размером 1,5x2,8 км и глубиной 700 м. Он занял не только вершину, но и весь юго-восточный склон до самого подножия. Высота постройки уменьшилась более чем на 200 м (рис. 3).

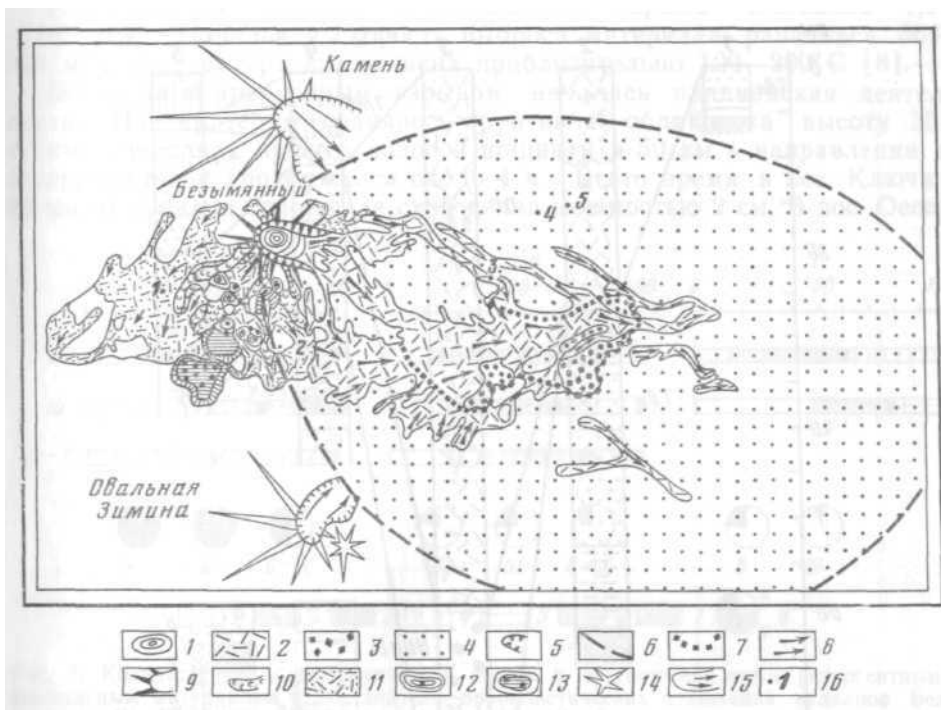


Рис. 5. Схематическая карта вулканических образований извержения вулкана Безымянный в 1955—1956 гг. 1 — внутрикратерная экстрюзия; 2 — пирокластические потоки; 3 — агломерат направленного взрыва; 4 — песок направленного взрыва; 5 — кратер 1956 г.; 6 — зона отложений песка направленного взрыва; 7 — зона агломерата направленного взрыва; 8 — направление пирокластических потоков; 9 — постройка вулкана; 10 — лавовые потоки; 11 — пирокластические потоки; 12 — экстрюзивные купола; 13 — экстрюзия типа «түюя»; 14 — вулканические постройки; 15 — граница обвала; 16 — точки разрезов, показанные на рис. 6

Область, захваченная взрывом, имеет форму овала площадью около 500 км<sup>2</sup>. Граница этой площади достаточно резко выражена и выделяется не только по взрывным отложениям, но и по зоне поврежденной древесной и кустарниковой растительности [8, 9].

Во время направленного взрыва большая часть материала взорванной постройки выбрасывалась компактной массой и откладывалась в пределах узкого сектора подножия вулкана, покрыв площадь > км<sup>2</sup> и образовав поля островершинного холмисто-котловинного рельефа с относительными превышениями от 1—2 до 10—15 м (рис. 4). Материал распространялся независимо от подстилающего рельефа: он выстилал понижения и речные долины, одновременно залегая на возвышенностях и крутых склонах. Отложения представлены несортированным грубообломочным агломератом — песчано-алевролитовым материалом с большим количеством щебня и глыб, максимальный размер которых достигал 1—1,5 м [12]. Преобладали обломки лав, слагающих старую постройку вулкана. Мощность отложений—10—15 м, объем—0,8 км<sup>3</sup>. Эти отложения названы нами агломератом направленного взрыва и сопоставимы с отложениями обломочной лавины на вулкане Сент-Хеленс. Однако следует подчеркнуть различия в характере процесса, вызвавшего образование этих отложений: разрушение постройки вулкана обвалом на Сент-Хеленс и взрывом на вулкане Безымянном.

Описанные отложения отмечаются лишь в осевой части направленного взрыва (рис. 5). На остальной площади, охваченной взрывом, отложился слой раскаленного материала, мощность которого составляла от 60—70 см вблизи вулкана до 1 см в краевой части. Эта фация взрыв-

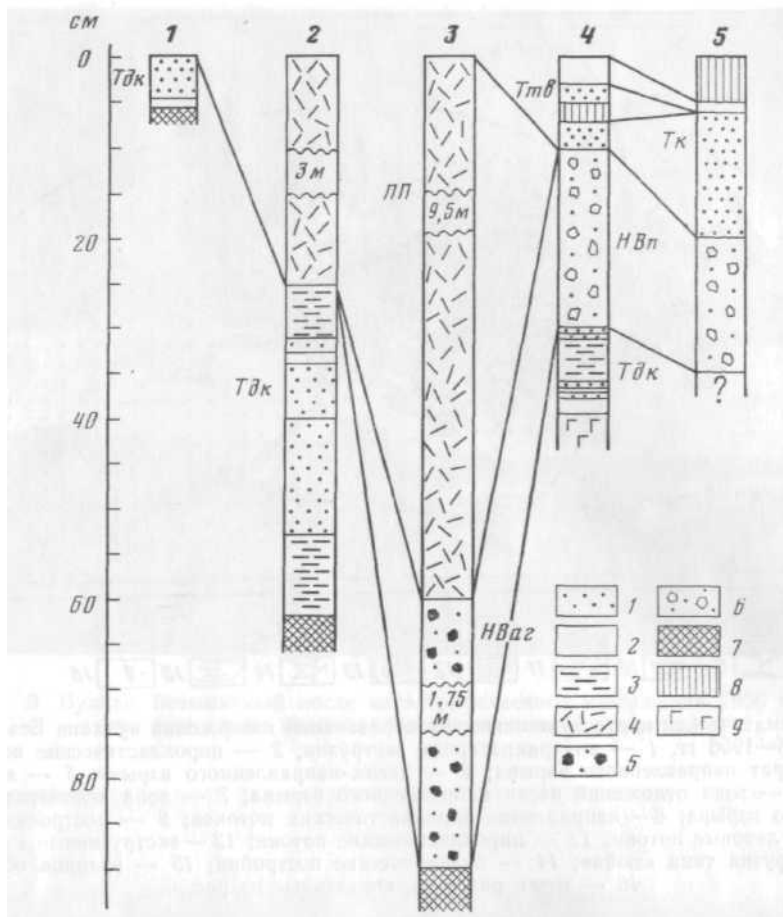


Рис. 6. Стратиграфические соотношения между типами отложений извержения вулкана Безымянный в 1955—1956 г. 1 — грубый пепел; 2 — тонкий пепел; 3 — тонкий стратифицированный пепел; 4 — отложения пирокластического потока; 5, 6 — отложения направленного взрыва (5 — агломерат, 6 — песок с обломками); 7 — почва; 8 — супесь; 9 — базальт; ПП — отложения пирокластического потока; HВаз — агломерат направленного взрыва; HВп — песок направленного взрыва; Тκ — тефра кульминационного взрыва; Тдк — тефра докульминационная; Ттв — тефра вулкана Толбачик извержения 1975 г.

ных отложений была названа [8, 7] «песком направленного взрыва» (рис. 6) и является эквивалентом «отложений направленного взрыва» вулкана Сент-Хеленс [22]. Она представлена песчаным и алевролитовым материалом с рассеянным вулканическим гравием и сравнительно мелкими обломками размером от 1—2 до 20 см в поперечнике. В «песке направленного взрыва» повсеместно содержатся обломки серых ювенильных андезитов (10% общего объема). Объем материала составил  $0,2 \text{ км}^3$ .

Общий объем материала направленного взрыва, включающий фации агломерата направленного взрыва и «песка направленного взрыва», составляет около  $1 \text{ км}^3$ . В составе отложений обеих фаций присутствует как резургентный материал — старые породы взорванной постройки вулкана, так и ювенильная составляющая — серые пористые роговообманковые андезиты. Изучение заполнителя обеих фаций показало его большое сходство, в обоих случаях преобладает резургентный материал (рис. 7), доля ювенильного материала составляет 10—15%.

Кинетическая энергия направленного взрыва составила  $1,2 \times 10^{17}$  Дж. Начальная скорость выброса материала равнялась 360—500 м/с, температура его оценена приблизительно 100—200° С [8].

Вслед за направленным взрывом началась плинианская деятельность. Над кратером поднялось эруптивное облако на высоту 35—40 км — пеплопад прошел полосой шириной в 50 км в направлении на северо-восток и продолжался около 4 ч. В это время в пос. Ключи в 40 км от вулкана отложился слой пепла мощностью 2 см. В пос. Оссора

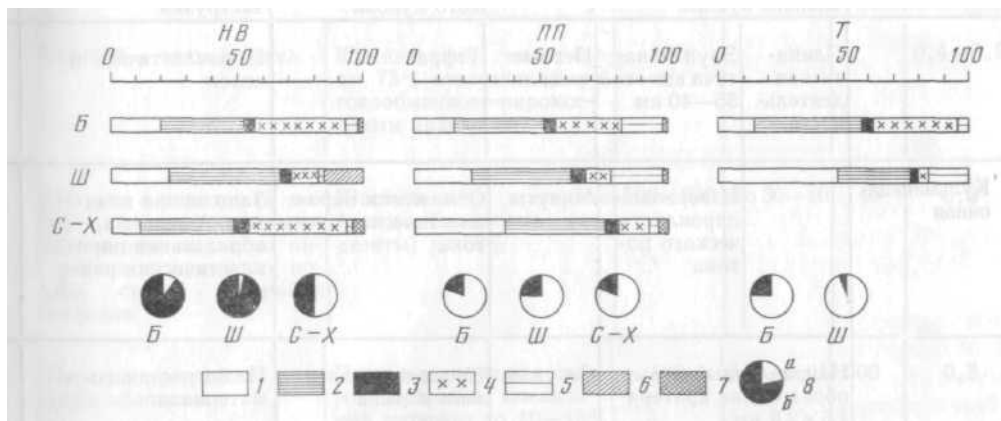


Рис. 7. Количественно-минералогический состав и соотношения между резургентным и ювенильным материалом в заполнителе пирокластических отложений вулканов Безьямянный (Б), Шивелуч (Ш) и Сент-Хеленс (С-Х). 1 — вулканическое стекло; 2 — плагиоклаз; 3 — рудные минералы; 4 — обломки пород; 5 — зеленая роговая обманка; 6 — бурая роговая обманка; 7 — пироксен; 8 — соотношения ювенильного и резургентного материала: а — ювенильный, б — резургентный (фракция 2 мм); НВ — направленный взрыв; ПП — пирокластический поток, Т — тефра

(400 км от вулкана) мощность пепла составила 0,1 см. Объем выпавшего пепла — 0,4—0,5 км<sup>3</sup>.

Количественно-минералогический состав пепла представлен на рис. 7. Пепел содержит вулканическое стекло, плагиоклаз, зеленую роговую обманку, рудные минералы и обломки пород. Все частицы имеют оскольчатую форму, что свидетельствует о том, что они образовались в результате дробления как раскристаллизованной магмы, затвердевшей в подводящем канале, так и старой постройки вулкана. Это дало основание Г. С. Горшкову, Г. Е. Богоявленской [8, 9] и И. И. Гушенко [11] назвать их резургентными. Определение таким термином пепла в целом не позволяет оценить долю ювенильного материала (закристаллизованных в канале порций расплава) и собственно резургентного (материала постройки). Специальное изучение пепла под бинокляром (фракция 0,5—2 мм) дало возможность разделить ювенильный материал, представленный светло-серыми слабопористыми обломками андезитов, и резургентный материал — темно-серые угловатые обломки старой постройки. Среди породообразующих минералов и стекла по тому же признаку выделился свежий и старый материал. Проведенный анализ показал, что ювенильный материал в пепле кульминационной стадии составил около 75%.

Одновременно с образованием эруптивного облака началось извержение пирокластических потоков, заполнивших долины рек подножья вулкана. По долине р. Сухой Хапицы поток прошел на расстоянии 18 км [1].

Максимальная видимая мощность отложений составила 35—40 м. Объем материала пирокластических потоков в 1956 г. был оценен в 1 км<sup>3</sup>, оценки, сделанные позднее [13, 14], дали величины 0,7—0,8 км<sup>3</sup>.

### Характеристика извержения вулкана

Стадия извержения	Главные события		Длительность события	Тип отложения	Тип залегания
Посткульминационная	Начало роста экструзивного купола			Лавы экструзивного купола	Внутрикратерная экструзия
Кульминационная	Плинианская деятельность	Эруптивная туча высотой 35—40 км	Первые часы	Тефра	Пирокластический чехол
		Извержение пирокластического потока	Минуты	Отложения пирокластического потока	Заполнение понижений рельефа, образование пирокластических равнин
	Направленный взрыв; образование кратера 1,5х2,8 км		Секунды	Песок направленного взрыва Агломерат направленного взрыва	Плащ песчаного материала Холмистый рельеф, независимый от топографии поверхности
Докульминационная	Эксплозивная активность; деформация постройки вулкана		5 месяцев	Тефра	Пирокластический чехол
	Сейсмическая подготовка		28 дней		

Температура отложений в момент извержения потока приближалась, видимо, к 300—400°С, поскольку обломки древесины в потоке обуглены. Замеры в апреле 1956 г. на потоке показали средние температуры порядка 100°С, одна из фумарол имела температуру до 250°.

Пирокластика в момент извержения была очень подвижной — она легко скатывалась по склонам вулкана и накапливалась только там, где угол наклона не превышал 2—3°. На крутых склонах она отсутствовала, вследствие чего пирокластические потоки, залегающие в долинах сухих рек, не имеют видимой связи с кратером вулкана Безымянный.

Отложения пирокластических потоков представлены песчано-алевритовым материалом светло-серого цвета, в котором заключены обломки пористых рогообманковых андезитов с объемным весом 1,6—2,3 г/см<sup>3</sup>. Преобладающий размер обломков 0,2—0,3 м, отдельных — до 0,5—0,6 м, единичных — до 1,5 м. Толща лишена слоистости, материал распределен в ней беспорядочно. В отложениях пирокластических потоков преобладал свежий ювенильный материал (до 80—90%). Породы старой постройки занимали подчиненное положение, лишь местами их содержание увеличивалось в низах толщи.

Отложения, очень сходные с типичным материалом пирокластических потоков, отмечены в несколько иных условиях. На отрогах вулкана

Безымянный з 1955—1956 гг.

Характер отложений		Температура в момент отложения, С	Мощность, м	Площадь, км <sup>2</sup>	Объем, км <sup>3</sup>
литология	вещественный состав				
Роговообманково-пироксеновые андезиты		700—800			0,2
Грубый и тонкий пепел	Ювенильный материал, до 75% отвечающий роговообманково-пироксеновым андезитам	100			0,4—0,5
Песчано-алевритовый материал с сглаженными обломками пористых андезитов с примесью пород старой постройки вулкана	Ювенильный материал (роговообманковые андезиты) до 80%	500—600	До 30—40	40	0,8
Песок с дресвой и мелкими обломками	Преобладание пород старой постройки, ювенильный материал до 10—15%	100	0,7—0,01	500	0,2
Крупноглыбовый агломерат с песчано-алевритовым заполнителем	Преобладание пород старой постройки вулкана, ювенильный материал до 10-15%	?	10—30	60	0,8
Тонкий и грубый пепел	Ювенильный материал, отвечающий пироксеновым андезитам с примесью роговой обманки	100	0,02		0,4—0,5

Камень, являющихся частью восточного подножия Безымянного и охваченных воздействием направленного взрыва, в долинах мелких водотоков и понижениях рельефа отмечались отложения вложенной пирокластике, аналогичные описанным выше типичным отложениям пирокластических потоков. Мощность отложений составляла несколько метров, они залежали обычно в виде мелких потоков длиной в десятки и шириной в первые метры; наиболее крупное скопление такого материала представлял собой пирокластический поток в долине р. Сухая Зими́на, шириной 0,3, длиной 5 км, с мощностью отложений порядка несколько метров. Отложения не имели связи с общим полем пирокластических потоков и отделены от него высоким (до 150 м) отрогом вулкана Зими́на. На северной части того же отрога хорошо фиксировались следы движения пирокластического материала в сторону, противоположную общему движению потоков. Знакомство с детально восстановленным ходом извержения вулкана Сент-Хеленс позволяет высказать предположение, что описанные пирокластические отложения могут являться не типичными пирокластическими потоками, как полагали ранее, а аналогами фации пирокластических потоков направленного взрыва [22], материал которых отлагался непосредственно из облака направленного взрыва.

**Посткульминационная деятельность.** Вслед за кульминационным взрывом в кратере начал выжиматься экструзивный купол, формирование которого сопровождалось небольшими эксплозиями, образованием пирокластических потоков и раскаленных лавин. К июлю 1956 г. купол имел высоту 300 м.

Вся последующая активность вулкана связана с развитием внутрикратерного андезитового купола — крупнейшей экструзии нашего времени на Камчатке [2—4].

Рассмотренные особенности извержения вулкана Безымянный представлены также в табл. 2, где отражены основные события докульминационной, кульминационной и посткульминационной стадии извержения, связанные с ними типы отложений и характеризующие их параметры.

На рис. 7 представлены результаты изучения вещественного состава заполнителя разных типов отложений. Для определения количественного минералогического состава все фракции  $>0,5$  мм изучались под микроскопом и для них выводился средний количественно-минералогический состав с учетом весового содержания каждой фракции. Минералогический состав всех типов отложений вулкана Безымянный показывает большое сходство.

Рис. 8. Состав заполнителя отложений извержения вулкана Сент-Хеленс в 1980 г. Усл. обозначения см. в подписях к рис. 7. 1 — обвальная лавина; 2—4 — фации взрывных отложений (2 — базальная, 3 — массивная, 4 — пирокластической волны), 5 — пирокластический поток

Основным критерием различия оказалось разное процентное соотношение ювенильного и резургентного материала. Оно устанавливалось при изучении под биноклем крупной фракции (0,5—2 мм) заполнителя.

Ювенильный материал вулкана Безымянный представлен светло-серыми свежими слабопористыми обломками, образование которых произошло в результате дробления магмы, закристаллизованной в подводном канале вулкана. Резургентный материал представляет собой фрагменты постройки вулкана — плотные угловатые обломки лав. Такое изучение еще раз показывает правильность отнесения к преимущественно резургентным обеих фаций отложений направленного взрыва и к преимущественно ювенильным — отложений пирокластических потоков и тефры.

Для сравнения (по той же методике и в тех же фракциях) мы изучили вещественный состав заполнителя различных фаций отложений направленного взрыва пирокластических потоков и обвала вулкана Сент-Хеленс. Результаты изучения представлены на рис. 8. Как и на вулкане Безымянный, минеральный состав в различных фациях отложений оказался близким: набор минералов практически не меняется, различия проявляются лишь в количественных соотношениях ювенильного и резургентного материала.

### Извержение вулкана Шивелуч 1964 г.

Через 8 лет после извержения вулкана Безымянный произошло катастрофическое извержение другого вулкана Ключевской группы — вулкана Шивелуч.

Вулкан Шивелуч — самый северный среди действующих вулканов Камчатки. Это сильно разрушенное вулканическое сооружение, его возраст предположительно 70—60 тыс. лет. До извержения вулкан представлял собой массив, включающий: 1) частично разрушенную постройку Старого Шивелуча (северная, более высокая главная вершина вулкана 3335 м); 2) огромный (шириной 9,5 км), открытый на юг кратер (кальдера); 3) Молодой Шивелуч, расположенный в кратере и образованный множеством слившихся между собой андезитовых экструзивных куполов (южная вершина вулкана 2700 м). Образование кратера произошло в результате катастрофического направленного взрыва около 30—35 тыс. лет назад. Характерная особенность Молодого Шивелуча — мощные катастрофические извержения с массовым выносом ювенильной пирокластики в виде тефры и пирокластических потоков. За последние 10 тыс. лет подобные извержения происходили в среднем через 500 лет.

В историческое время катастрофическое извержение наблюдалось в 1854 г., когда образовался крупный кратер и изверглись протяженные пирокластические потоки. Дальнейшая деятельность вулкана выразилась в эпизодическом росте экструзивных куполов (1879—1893, 1897—1898, 1918—1929, 1944—1945 гг.) [10].

Извержение 1964 г. повторило основные стадии катастрофического извержения вулкана Безымянный. Для него выделены следующие стадии: 1) докульминационная, характеризующаяся длительной сейсмической активностью; 2) кульминационная, включающая направленный взрыв и плиннианскую деятельность; 3) посткульминационная, характеризующаяся фумарольной активностью и образованием купола в 1980 г.

Извержение 1964 г. было детально изучено Г. С. Горшковым и Ю. М. Дубиком [10], Б. И. Пийпом [15], П. И. Токаревым [16, 17], и его характеристики приводятся здесь в основном по материалам этих исследований.

Докульминационная стадия. Извержение 1964 г. не было неожиданным, оно предвлялось длительной сейсмической подготовкой. Первые слабые землетрясения были отмечены в январе. В первой декаде мая произошел четкий рой землетрясений и было высказано предположение о возможном извержении [16]. Затем наступил длительный спад сейсмической активности. Во второй половине октября началось новое ее усиление, непосредственно предшествующее извержению.

За последние сутки перед извержением было отмечено 73 землетрясения; за последние 7 ч до извержения землетрясения происходили практически непрерывно.

Кульминационная стадия. Извержение началось 12 ноября 1964 г. в 7 ч утра по местному времени с разрушения вершины вулкана и образования на ее месте кратера размером 1,5x3,0 км. В плане форма кратера сложная, он состоит из двух частей. Северная половина имеет овальную форму с сечением 1,5x1 км, высота северной стенки около 700 м. Южная часть кратера имеет форму трапеции, занимает площадь 4 км<sup>2</sup> и засыпана рыхлым агломератовым материалом, который на южном склоне кратера образует высокий крутой уступ. По мнению Г. С. Горшкова и Ю. М. Дубика [10], такая морфология кратера объясняется тем, что он образован в результате не одного пароксизмального взрыва, а по крайней мере двух или более, следовавших один за другим. В результате взрывов в южном секторе подножия вулкана на расстоянии до 10 км отложился сплошной покров рыхлого агломератового материала мощностью от нескольких до десятков метров (рис. 9). Общая площадь покрова 98 км<sup>2</sup>. Рельеф взрывных отложений холмисто-грядовый. Гряды расположены радиально по отношению к эруптивному центру (рис. 10).

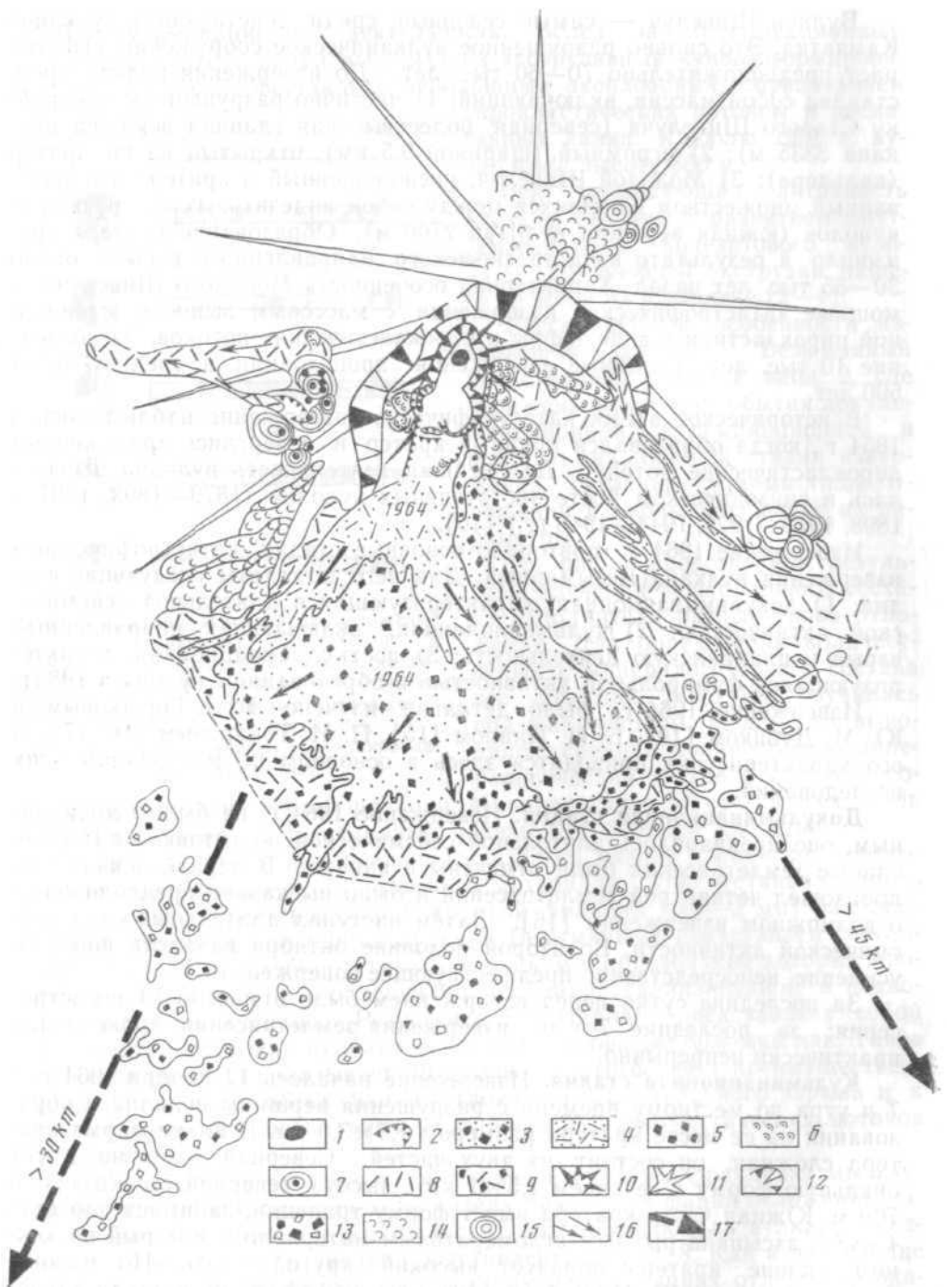


РИС. 9. Геолого-геоморфологическая схема вулкана Шивелуч. Отложения исторических извержений: 1 — андезитовый экструзивный купол 1980—1981 гг.; 2 — кратер катастрофического извержения 1964 г.; 3 — отложения направленного взрыва 1964 г.; 4 — отложения пирокластических потоков 1964 г.; 5 — фрагменты отложений направленных взрывов в XVIII в. и в 1854 г. Голоценовые вулканические образования: 6 — лавовые потоки; 7 — экструзивные купола; 8 — отложения пирокластических потоков; 9 — неразделенные отложения пирокластических потоков и направленных взрывов; 10 — постройка Молодого Шивелуча. Плейстоценовые вулканические образования: 11 — постройка Старого Шивелуча, 12 — кратер катастрофического извержения 30 тыс. л. н. и 13 — фрагменты отложений направленного взрыва; 14 — лавовые потоки; 15 — экструзивные купола; 16 — направление движения пирокластических потоков и материала направленных взрывов; 17 — протяженность распространения взрывных отложений по определенным направлениям

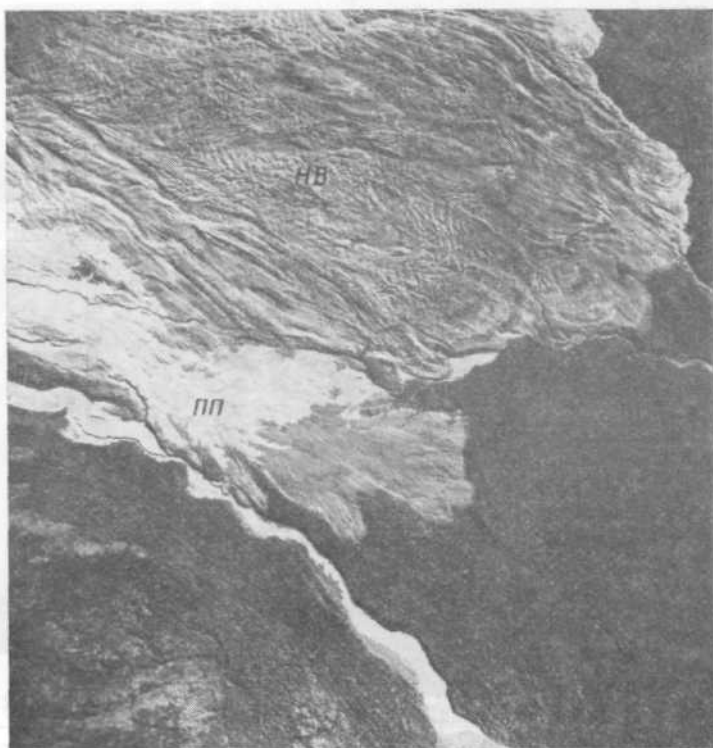


Рис. 10. Отложения направленного взрыва (НВ) и пирокластического потока (ПП) в юго-западном секторе подножья вулкана Шивелуч (фото Г. С. Штсйнберга)

Распределение материала по мощности в зоне отложений направленного взрыва неравномерное: большая часть отложений отмечена у нижней границы кратера и на расстоянии 5—10 км от него, где мощность покрова достигает 50 м. Объем отложений направленного взрыва оценивается Г. С. Горшковым и Ю. М. Дубиком в  $1,5 \text{ км}^3$ . Они подчеркивают, что материал взрывных отложений через несколько дней после извержения был холодным.

Во фронтальной части покрова отмечались следы течения материала после выпадения его на склон. Граница отложений направленного взрыва резкая. На расстоянии 1 м от фронта лес остался абсолютно нетронутым (рис. 11).

Взрывные отложения представлены несортированным и неслоистым агломератовым материалом, включающим обломки и крупные блоки пород, слагавших разрушенные части вулкана: плотных серых, пористых розовых и пемзовидных андезитов. В отложениях отмечены огромные глыбы плотного льда объемом  $10\text{--}15 \text{ м}^3$ , источником которых являлся ледник привершинной части вулкана. Материал направленного взрыва целиком резургентный.

Проведенное нами изучение заполнителя взрывных отложений (см. рис. 7) показало присутствие ювенильной составляющей (2%), представленной серо-белой округлой пористой пемзой с многочисленными мелкими вкрапленниками роговой обманки и бесцветным пластично изогнутым вулканическим стеклом.

Кинетическая энергия взрыва составила  $1 \times 10^{17}$  Дж, начальная скорость взрыва — 280—310 м/с.

Вслед за взрывами, разрушившими старую постройку, началась плинианская деятельность. Эруптивная туча поднялась на высоту до 10—



Рис. 11. Граница отложений направленного взрыва и нетронутого леса на вулкане Шивелуч

15 км. Тефра выпала на площади порядка  $100 \text{ км}^2$ . В непосредственной близости от вулкана на площади  $90 \text{ км}^2$  отложился слой (от 20 до 50 см) крупных обломков пемзовидного андезита, далее в 30—40 км от кратера откладывался вулканический песок с небольшим количеством пемзовидных лапилли. В 80 км от вулкана (пос. Усть-Камчатск) выпал пепел слоем 3 см. Общий объем пепла составил  $0,3 \text{ км}^3$ .

Вещественный состав пепла представлен на рис. 7. В нем резко преобладает ювенильная составляющая (95%). Характерной особенностью пепла является облик частиц вулканического стекла, которое представлено фрагментами пластичной формы, наиболее ярко свидетельствующими об образовании их из незакристаллизованного расплава (в отличие от вулкана Безымянный).

Одновременно были извергнуты пирокластические потоки, которые на расстоянии 2—2,5 км от кратера покрыли широким фронтом поверхность взрывных отложений. В 5—6 км от кратера потоки заполнили понижения рельефа, где их видимая мощность составила десятки метров. Максимальная протяженность пирокластических потоков—18 км, общая площадь— $50 \text{ км}^2$ , объем— $0,3\text{--}0,5 \text{ км}^3$ . Сложены они однородным ювенильным материалом с небольшой примесью чуждых обломков. Преобладают пемзовидные светло-серые андезиты, иногда встречаются рогообманковые плотные андезиты. Растительность, и крупные стволы деревьев в отложениях пирокластических потоков, обуглена. Температура пирокластического материала через 10 дней после извержения на глубине 30 см составляла  $250\text{--}300^\circ$ , температура отдельных фумарол достигала  $400^\circ \text{C}$ .

Отложения горячих пирокластических потоков вызвали образование лахаров, максимальная длина которых не превышала 5—6 км.

Извержение было очень кратковременным и продолжалось не более часа.



Рис. 12. Вулкан Шивелуч после извержения 1964 г. (фото В. А. Подтабачного). СШ — Старый Шивелуч, МШ — Молодой Шивелуч, КР — стенка северо-восточной части кратера 1964 г., К 1980—1981 — экструзивный купол 1980—1981 гг.

**Посткульминационная деятельность.** Она свелась к фумарольной активности во вновь образованном кратере. Через 16 лет, в 1980 г., в кратере началось спокойное выжимание экструзивного купола (рис. 12). Рост купола не предварялся и не сопровождался эксплозивной активностью.

Основные данные, характеризующие извержение Шивелуча, представлены в табл. 3.

На рис. 7 показаны результаты изучения вещественного состава оглоблей. Рассмотрение соотношения ювенильного и резургентного материала показало, что тефра Шивелуча является почти полностью ювенильной, а в заполнителе пирокластического потока ювенильный материал резко преобладает (75%). Отсутствие крупных обломков ювенильного материала во взрывных отложениях объясняется тем, что к началу извержения в верхней части канала, по-видимому, не существовало значительной порции закристаллизованной магмы (криптокупола), вследствие чего начало извержения не сопровождалось деформацией привершинной части постройки. Поэтому в отложениях направленного взрыва крупные обломки ювенильного материала, образующиеся в результате дробления криптокупола, отсутствовали.

При рассмотрении минералогического состава обращало внимание разное соотношение бурой (16%) и зеленой (2%) роговой обманки в заполнителе отложений направленного взрыва, с одной стороны, и в отложениях пирокластического потока и тефры — с другой (16—21% — зеленая роговая обманка, 1% — бурая). Это связано с тем, что в отложениях направленного взрыва присутствовал главным образом материал разрушенных взрывом старых экструзивных куполов, обогащенных бурой роговой обманкой. Зеленая роговая обманка, характерная для свежего ювенильного материала, является существенным компонентом тефры и пирокластических потоков.

Стадия извержения	Главные события	Длительность события	Тип отложений	Характер залегания	
Посткульминационная	Фумарольная активность	ноябрь 1964 г.—июнь 1980 г.			
Кульминационная	Плинианская деятельность	Эруптивная туча высотой 12—15 км	1 ч	Тефра	Пирокластический чехол
		Извержение пирокластического потока	Минуты	Отложения пирокластических потоков	Заполнение понижений, образование пирокластических равнин
	Направленные взрывы; образование кратера 1,5×3 км	Десятки секунд	Агломерат направленного взрыва	Холмисто-грядовый, холмистый рельеф, независимый от топографии поверхности	
Докульминационная	Стадия сейсмической подготовки	Январь — ноябрь 1964 г.			

### Сравнительная характеристика катастрофических извержений вулканов Сент-Хеленс, Безмянного и Шивелуч

Все рассмотренные извержения относятся к одному и тому же типу, который был назван Г. С. Горшковым [6, 7] типом направленного взрыва.

Извержения обычно предваряются интенсивной сейсмической активностью и могут сопровождаться деформацией постройки вулкана. Деформации выражаются в образовании локальных поднятий на высоту до 100 м, что связано с внедрением магмы и образованием криптокупола в теле вулкана.

Этот тип извержения отличает катастрофический характер кульминационной стадии, чрезвычайно опасной по своим последствиям. Кульминационная стадия включает следующие основные события: 1) направленный взрыв с разрушением вулканической постройки и образованием крупного (1,5×2; 1,5×3 км) кратера; сильные разрушения на площади в несколько сот квадратных километров (до 500—600 км<sup>2</sup>); 2) массовый выброс ювенильной пемзовой (или пемзовидной) пирокластики вслед за взрывом; образование пирокластических потоков (длина 7—18 км, объем материала — 0,1—0,8 км<sup>3</sup>) и выпадение пепла из эруптивной тучи (объем — 0,1—1,1 км<sup>3</sup>); 3) возникновение мощных лахаров длиной до 100 км.

События кульминационной стадии трех рассмотренных извержений достаточно близки по кинетической энергии взрыва ( $10—10^{17}$  Дж), начальной скорости выброса обломков (300—500 м/с), длительности (взрыв — десятки секунд, плинианская деятельность — час — первые часы), облику и начальной температуре (600—800°C) ювенильной пирокластики, морфологии и размерам образующихся кратеров (1,5×3 км, глубина 0,6—0,8 км). Отложения этой стадии извержения от-

Таблица 3

вулкана Шивелуч в 1964 г.

Характер отложений		Температура в момент отложения, °С	Мощность, м	Площадь, км <sup>2</sup>	Объем, км <sup>3</sup>
литология	вещественный состав				
Грубый и тонкий пепел	90—95% ювенильного материала, роговообманковый андезит	100			0,3
Песчано-алевритовый материал с оглаженными обломками пемзовидных андезитов размером до 0,5 м	75% ювенильного материала, роговообманковый андезит	500—600	До 40	50	0,3—0,5
Крупноглыбовый агломерат с песчано-алевритовым заполнителем	Породы старой постройки вулкана, ювенильный материал до 2%	?	До 50—60	100	1,5

кладываются в определенном секторе подножия (80—90°) на расстоянии до 30 км, имея значительную общую мощность и характеристики (см. табл. 1—4).

Завершается извержение ростом экструзивного купола в образовавшемся вершинном кратере вулкана.

При одном и том же типе извержения и сходстве составляющих его основных событий важно отметить черты отличия, выявляющиеся при сравнении этих извержений.

На вулкане Сент-Хеленс направленному взрыву кульминационной стадии извержения предшествовал спровоцированный землетрясением обвал, отложения которого представлены целиком материалом старой постройки (общий объем отложений — 2,8 км<sup>3</sup>). И только вслед за обвалом произошел направленный взрыв, отложения которого содержат как раздробленный материал взорванной части вулкана, так и ювенильные дациты взорванного криптокупола (последние составляют до 50%). Выброшенный материал отложился относительно маломощным слоем (10—40 см) на площади 600 км<sup>2</sup>; общий объем материала невелик — 0,2 км<sup>3</sup>.

На вулкане Безымянном не было такого разделения событий. Вулкан был разрушен направленным взрывом, уничтожившим восточный склон и переместившим около 1 км<sup>3</sup> материала. Отложения направленного взрыва представлены двумя фациями: 1) агломератом направленного взрыва — массивными грубообломочными отложениями, включающими 85—90% материала старой постройки и 10—15% ювенильного материала; они отложились в узком секторе на площади около 40—60 км<sup>2</sup> при мощности до 15 м; 2) «песком направленного взрыва», который покрыл площадь 500 км<sup>2</sup> при мощности от 0,5 до 1 см; старый и ювенильный материал содержались в нем в аналогичной пропорции.

Некоторые параметры катастрофических извержений

Вулкан	Направленный взрыв			Пирокластич. кно. потоки		Объем тефры, км <sup>3</sup>	Тепловая энергия извержения, Дж	Кинет. энергия взрыва, Дж	Энергия взрывной волны, Дж
	площадь отложений, км <sup>2</sup>	объем отложений, км <sup>3</sup>	размер кратера, км	длина, км	объем материала, км <sup>3</sup>				
Безымянный, 1955 г.	500	1,0	1,5 × 2,8	18	0,8	0,8—0,9	3,8—4,8 × 10 <sup>18</sup>	1,2 × 10 <sup>17</sup>	3 × 10 <sup>15</sup>
Шивелуч, 1964 г.	100	1,5	1,5 × 3	48	0,3—0,5	0,3	1,3 × 10 <sup>18</sup>	0,1—1 × 10 <sup>17</sup>	1,8 × 10 <sup>14</sup>
Сент-Хеленс, 1980 г.	600	0,2	1,5 × 3	7—8	0,12	1,1	—	—	—

Таким образом, на вулкане Сент-Хеленс разобщенные события (обвал и взрыв) дали и разные типы отложений: отложения обломочной лавины и отложения направленного взрыва, различные по вещественному составу, объему, мощности и занимаемой площади. На вулкане Безымянном, где обвала не было и произошел направленный на восток взрыв, вся масса обломочного материала старой постройки была вынесена только этим взрывом. В результате образовались отложения направленного взрыва, которые как бы объединили отложения обломочной лавины и взрыва вулкана Сент-Хеленс. Этим, по-видимому, и объясняется значительно меньшая ювенильная составляющая взрывных отложений на вулкане Безымянном.

Обращает внимание и значительное обогащение нижней части взрывных отложений Сент-Хеленс растительными остатками — дерном, почвой, древесиной, чего не отмечается для отложений вулкана Безымянный. По-видимому, это связано с тем, что извержение Безымянного происходило весной, когда мощность снега достигала 1—3 м.

На вулкане Шивелуч постройка также разрушена во время кульминационной стадии извержения. Однако здесь, возможно, произошел не один взрыв, а серия нескольких более слабых направленных взрывов, о чем свидетельствует морфология кратера и данные барометрических наблюдений. Отложения представлены только фацией агломерата направленного взрыва — массивным крупноглыбовым материалом, отложившимся в довольно широком секторе (100°) на площади около 100 км<sup>2</sup> при общем объеме выброшенного материала порядка 1,5 км<sup>3</sup>. Фация «песка направленного взрыва» вулкана Безымянный или собственно отложения направленного взрыва вулкана Сент-Хеленс здесь отсутствует.

Основная зона разрушения на вулкане Шивелуч совпадает с площадью отложений агломерата направленного взрыва. Вне контура этих грубообломочных отложений нет никаких следов воздействия взрывной волны на растительность и рельеф. Это существенное отличие от вулкана Безымянный и Сент-Хеленс, где область разрушения отвечает площади отложения песка направленного взрыва и составляет около 500—600 км<sup>2</sup>.

За период плинианской деятельности общее количество существенно ювенильного материала (тефра, пирокластические потоки) для вулканов Сент-Хеленс и Безымянный оказалось примерно сопоставимым

(в обоих случаях около  $1,2 \text{ км}^3$ ) и большим, чем у вулкана Шивелуч ( $0,8 \text{ км}^3$ ). При этом объем материала собственно пирокластических потоков на вулкане Сент-Хеленс значительно меньше ( $0,12 \text{ км}^3$  против  $0,5 \text{ км}^3$  на Шивелуче и  $0,8 \text{ км}^3$  на Безымянном).

На докульминационной стадии для вулканов Безымянный и Сент-Хеленс характерны деформации постройки и эксплозивная активность, продолжающаяся несколько месяцев. На Шивелуче эксплозивная активность отсутствовала, о характере деформаций данных нет в связи с отсутствием наблюдений.

Тепловая энергия извержений этих вулканов сопоставима:  $1,3 \cdot 10^{18}$  Дж для Шивелуча,  $3,8\text{—}4,8 \cdot 10^{18}$  Дж для Безымянного и  $1 \cdot 10^{17}$  Дж для Сент-Хеленс. Они принадлежат к наиболее мощным на земном шаре извержениям XX в. (см. табл. 4).

Все отмеченные различия в характере извержений вулканов Сент-Хеленс, Безымянный и Шивелуч тем не менее укладываются в рамки выделенного Г. С. Горшковым [6, 7] одного общего типа извержений — направленного взрыва с разрушением постройки вулкана.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Богоявленская Г. Е.* Вулкан Безымянный на Камчатке и его агломератовый поток.—Тр. Лабор. вулканол., 1960, № 8, с. 13—18.
2. *Богоявленская Г. Е., Дубик Ю. М., Кирсанов И. Т.* Кристаллизация андезитов в верхних частях вулканического канала.— В кн.: Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971, с. 161—162.
3. *Богоявленская Г. Е., Иванов Б. В., Кирсанов И. Т., Максимов А. П.* Зависимость кристаллизации лав вулкана Безымянного от механизма извержения.— В кн.: Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976, с. 118—126.
4. *Богоявленская Г. Е., Кирсанов И. Т.* Двадцать пять лет вулканической активности вулкана Безымянного.— Вулканол. и сейсмол., 1981, № 2.
5. *Брайцева О. А., Кирьянов В. Ю.* О прошлой активности вулкана Безымянного по данным тефрохронологических исследований.— Вулканол. и сейсмол., 1982, № 6, с. 44—55.
6. *Горшков Г. С.* О связи вулканических и сейсмических явлений при извержении вулкана Безымянного.— Бюл. вулканол. ст., 1961, № 31, с. 32—37.
7. *Горшков Г. С.* К вопросу о классификации некоторых типов взрывных извержений.— В сб.: Вопросы вулканизма. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
8. *Горшков Г. С.* Направленные вулканические взрывы.— Геол. и геофиз., 1963, № 12.
9. *Горшков Г. С., Богоявленская Г. Е.* Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения. М.: Наука, 1965.
10. *Горшков Г. С., Дубик Ю. М.* Направленный взрыв на вулкане Шивелуч. М.: Наука, 1968, с. 3—37.
11. *Гущенко И. И.* Пеплы Северной Камчатки и условия их образования. М.: Наука, 1965. 144 с.
12. *Краевая Т. С.* Генетические типы грубообломочных отложений стратовулканов. М.: Недра, 1977.
13. *Мелекесцев И. В., Краевая Т. С., Брайцева О. А.* Рельеф и отложения молодых вулканических районов Камчатки. М.: Наука, 1970. 103 с.
14. *Мелекесцев И. В.* Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980, с. 212.
15. *Пийп Б. И., Мархинин Е. К.* Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 года.— Бюл. вулканол. ст., 1965, № 39.
16. *Токарев П. И.* Рой землетрясений вулкана Шивелуч в мае 1964 г.— Бюл. вулка-нол. ст., 1964, № 38.
17. *Токарев П. И.* Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 года и его предвестники.—Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1967, № 9.
18. *Banks N. G., Hoblitt R. P.* Summary of temperature studies of 1980 deposits.— In: The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington: U. S. Geol. Surv. Process Paper, 1250, 1981, p. 295—314.
19. *Christiansen R. L., Peterson D. W.* Chronology of the 1980 eruptive activity.— In: The 1980 Eruptions of Mount. St. Helens. Washington: U. S. Geol. Surv. Profess. Paper, 1250, 1981, p. 17—30.
20. *Crandell D. R., Mullineaux D. R.* Potential hazards from future eruptions of Mount. St. Helens volcano. Washington: U. S. Geol. Surv. Bull., 1383-C, 1978. 26 p.
21. *Hoblitt R. P., Crandell D. R., Mullineaux D. R.* Mount St. Helens eruptive behaviour during the past 1500 years—Geol., 1980, v. 8, № 11, p. 555—559.
22. *Hoblitt R. P., Miller C. D., Vallance J. W.* Origin and stratigraphy of the deposits

- produced by the May 18 directed blast.— In: The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington: U. S. Geol. Surv. Profess. Paper, 1250, 1981, p. 401—420.
23. *Lipman P. W., Moore J. G., Swanson D. A.* Bulging of the north flank before the May 18 eruption — geodetic data.— In: The 1980 Eruptions of Mount St. Helens. Washington: U. S. Geol. Surv. Profess. Paper, 1250, 1981, p. 143—156.
  24. *Moore J. G., Lipman P. W., Swanson D. A., Alpha T. R.* Growth of lava domes in the crater, June 1980 — January 1981.— In: The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington: U. S. Geol. Surv. Profess. Paper, 1250, 1981, p. 541—548.
  25. *Rowley P. O., Kuntz M. A., Macleod N. S.* Pyroclastic flow deposits.— In: The 1980 Eruptions of Mount St. Helens. Washington: U. S. Geol. Surv. Profess. Paper, 1250, 1981, p. 489—512.
  26. *Sama-Wojcicki A. M., Shipley S., Waitt R. B., Jr., Dzurisin D., Wood S. H.* Areal distribution, thickness, mass, volume, and grain size of air-fall ash from the six major eruptions of 1980.— In: The 1980 Eruptions of Mount St. Helens. Washington: U. S. Geol. Surv. Profess. Paper, 1250, 1981, p. 577—600.
  27. The 1980 Eruptions of Mount St. Helens. Washington; Geol. Surv. Profess. Paper, 1250, 1981. 600 p.
  28. *Voight B., Glicken H., Janda R. J., Douglass P. M.* Catastrophic rockslides avalanche of May 18.— In: The 1980 Eruptions of Mount St. Helens. Washington: U. S. Geol. Surv. Profess. Paper, 1256, 1981, p. 347—378.

Институт вулканологии  
ДВНЦ АН СССР

Геологическая служба США,  
Денвер, Федеральный центр

Поступила в редакцию  
4.VI.1984