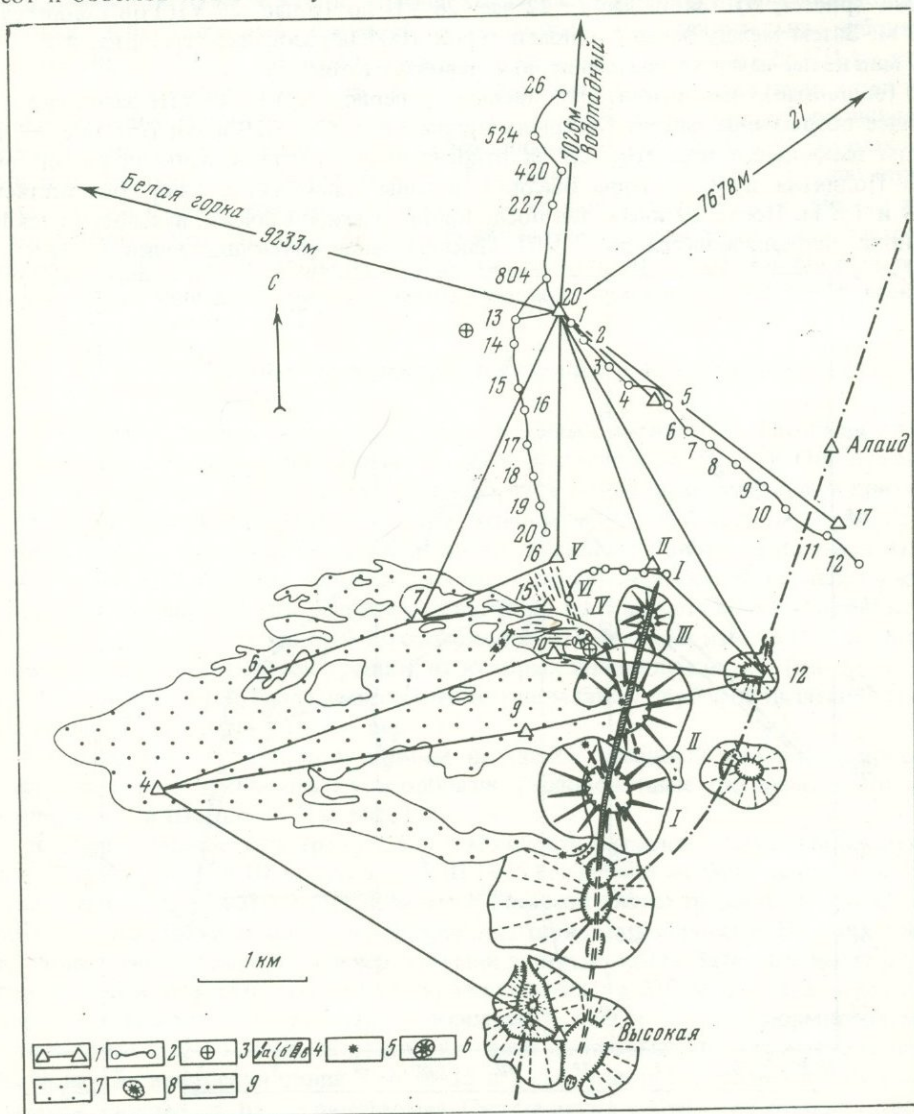


ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВБЛИЗИ НОВЫХ ТОЛБАЧИНСКИХ ВУЛКАНОВ (1975–1976 гг.)

Геодезические работы вблизи зоны Большого трещинного Толбачинского извержения начались с 13 июля 1975 г., спустя неделю после начала деятельности I конуса. В комплекс исследований входило измерение горизонтальных и вертикальных подвижек. Горизонтальные смещения изучались светодальномерами на разных расстояниях от новых вулканов 1975 г. Поднятия и опускания измерялись тригонометрическим и геометрическим нивелированием. Этими же методами в сочетании с фототеодолитными стереосъемками регистрировались приращение высот и объемов новых конусов и изменения их формы. Изучение наклонов зем-



Р и с. 1. Схема расположения геодезических пунктов вблизи Северного прорыва

1 – светодальномерные линии; 2 – нивелирный ход; 3 – наклономерные станции; 4 – трещины, образовавшиеся во время извержения; а – эруптивные трещины, б – видимые на поверхности, в – вероятное положение глубокой питающей дайки; 5 – истоки лавовых потоков; 6 – шлаковые конусы 1975 г.; 7 – лавовые потоки; 8 – голоценовые шлаковые конусы; 9 – голоценовая трещина растяжения

ной поверхности велось автономными наклономерами, установленными в подземных лавовых трубах.

В течение первых двух месяцев работы велись в непосредственной близости от извергающихся конусов, в радиусе до 4 км, где происходили максимальные деформации. Затем появилась возможность расширить район работ до 10 км (рис. 1). С октября 1975 г. начались геодезические, а с августа 1976 г. — наклономерные измерения вблизи Южного прорыва (VIII конус).

В статье приведены основные результаты работ у Северного прорыва и наклономерные данные, полученные в лавовой пещере у Южного прорыва.

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ СМЕЩЕНИЯ В РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО ПРОРЫВА ВО ВРЕМЯ ИЗВЕРЖЕНИЯ

28 и 29 июля начались резкие деформации северо-западного склона горы 1004 (рис. 2, б). За 12 час (с 22 час 28.VII до 10 час 29.VII) он поднялся на 30 м. Затем между этим уступом и горой 1004 образовалась трещина, и в 10 час 30 мин из нее начал изливаться первый лавовый поток.

Теодолитные измерения, выполненные в период 22.VII—11.VIII, зафиксировали общее воздымание района Северных прорывов с 22 по 29 июля (см. рис. 2), при этом наибольшее поднятие 2,9 м относительно пункта 4 испытал район точки 12. Поднятия пунктов горы Высокой и горы Алаид составляли соответственно 1,4 и 1,8 м. После 29 июля, т.е. после прорыва южной бокки, началось опускание района, продолжавшееся до 7.VIII. Максимальное опускание точки 12 за 9 дней

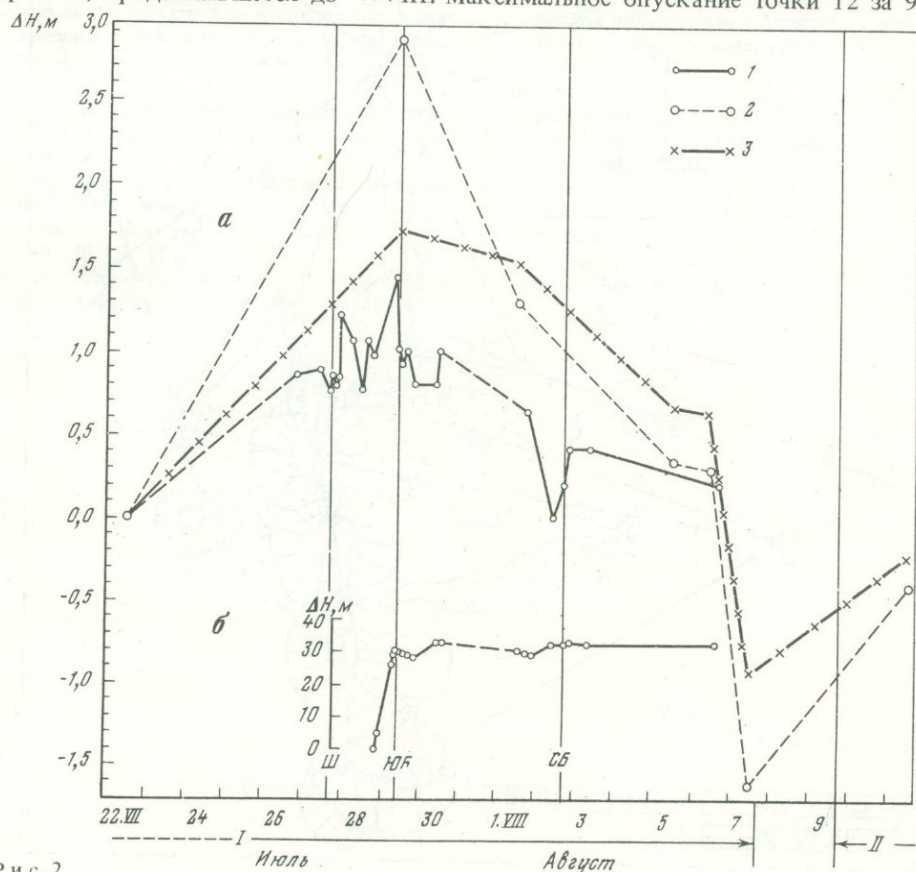


Рис. 2.

а — Изменение высот пунктов: горы Высокой, 12, горы Алаид относительно пункта 4 (за период 22.VII по 11.VIII 1975); б — поднятие блока на северном склоне горы 1004 перед прорывом лавы на южной бокке. 1 — гора Высокая; 2 — пункт 12; 3 — гора Алаид, момент образования: Ш — шарры; ЮБ — южной бокки; СБ — северной бокки. Внизу сплошной линией показано время работы I и II конусов

составило 4,5 м, за это же время точки горы Высокой и горы Алаид опустились на 2,2 и 2,6 м соответственно. Затем началось интенсивное поднятие района, вызванное, вероятно, подготовкой прорыва II конуса.

Тригонометрическое нивелирование выполнялось с пункта 4 на гору Высокую и с пункта 12 на горы Алаид и Высокую. Графики рис. 2 синтезированы по данным измерений при следующих допущениях. За начало отсчета изменения высот всех пунктов условно принят уровень 22.VII (начало измерений). Измерения велись секундными теодолитами в одну сторону, иногда ежечасно. В неблагоприятных метеоусловиях при длинах линий до 4 км возможны ошибки определения превышений порядка 0,5 м. Тем не менее можно считать верной основную тенденцию смещений. Амплитуда опускания пунктов с 29.VII по 7.VIII может быть меньше указанной на 20–25%, составляя примерно 2,5, 2,0 и 1,5 м соответственно для пунктов 12, Алаид и Высокая.

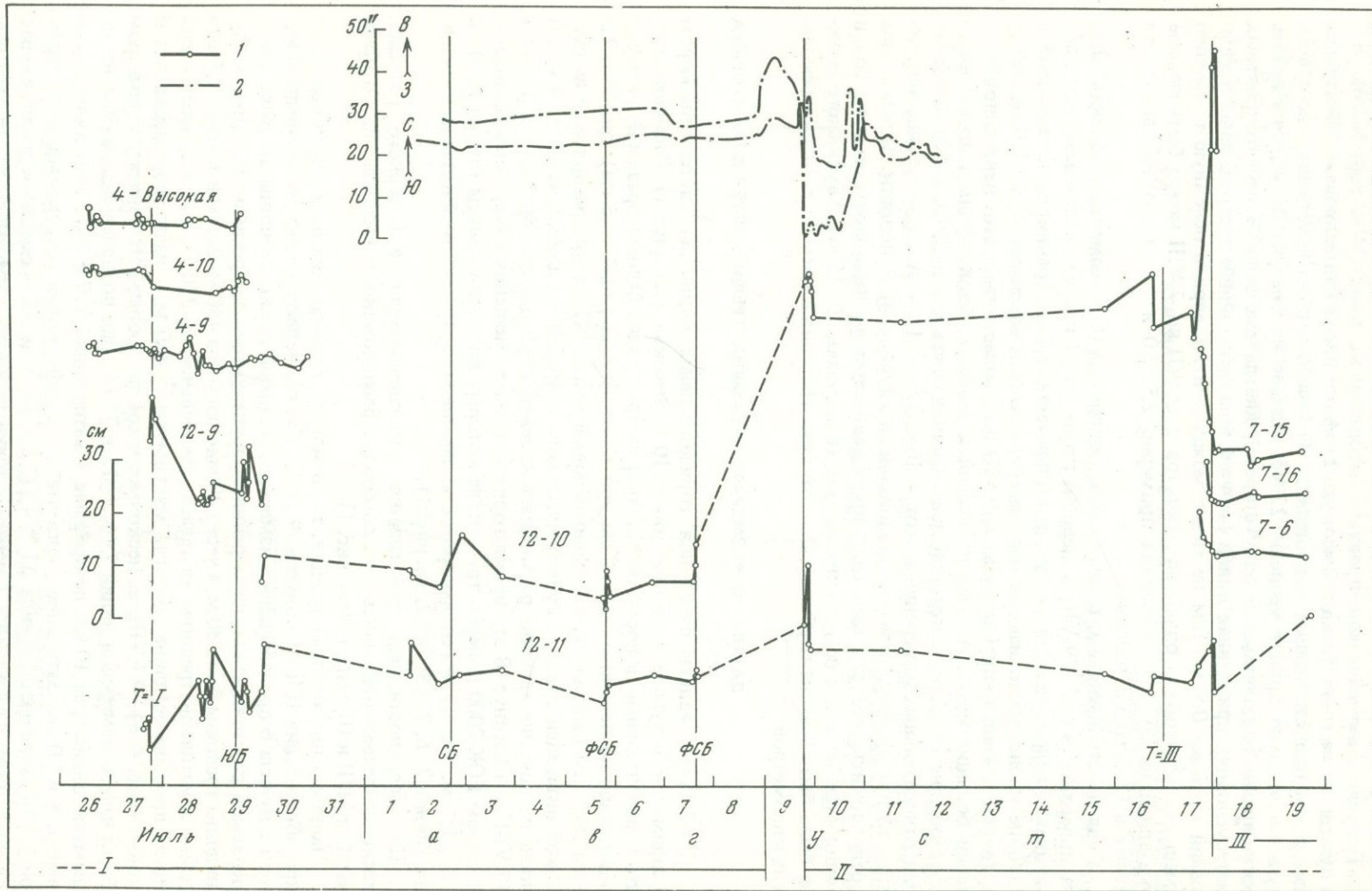
Судя по этим данным, с начала извержения 6.VII до момента появления лавы на поверхности 27–29.VII, в период, когда из I кратера выбрасывались лишь мощная пеплово-газовая струя и пирокластика, на сравнительно небольшой глубине происходило накопление магмы. Уменьшение высот с 29.VII до конца активной деятельности I конуса 7–9.VIII показывает, что в этот период при истечении больших потоков лавы из южной и северной бокк, видимо, происходило опустошение полости, в которой лава накапливалась с 6 по 29.VII. По одной линии относительных измерений высот – Высокая – 12 – Алаид – трудно определить точную форму, размеры, положение и глубину этой полости. Можно лишь предположить, что это был силл протяженностью до нескольких километров и мощностью не менее нескольких метров (возможно, 10–15 м). Глубина его должна была быть меньше глубины сильного газоотделения в магме, т.е. около нескольких километров.

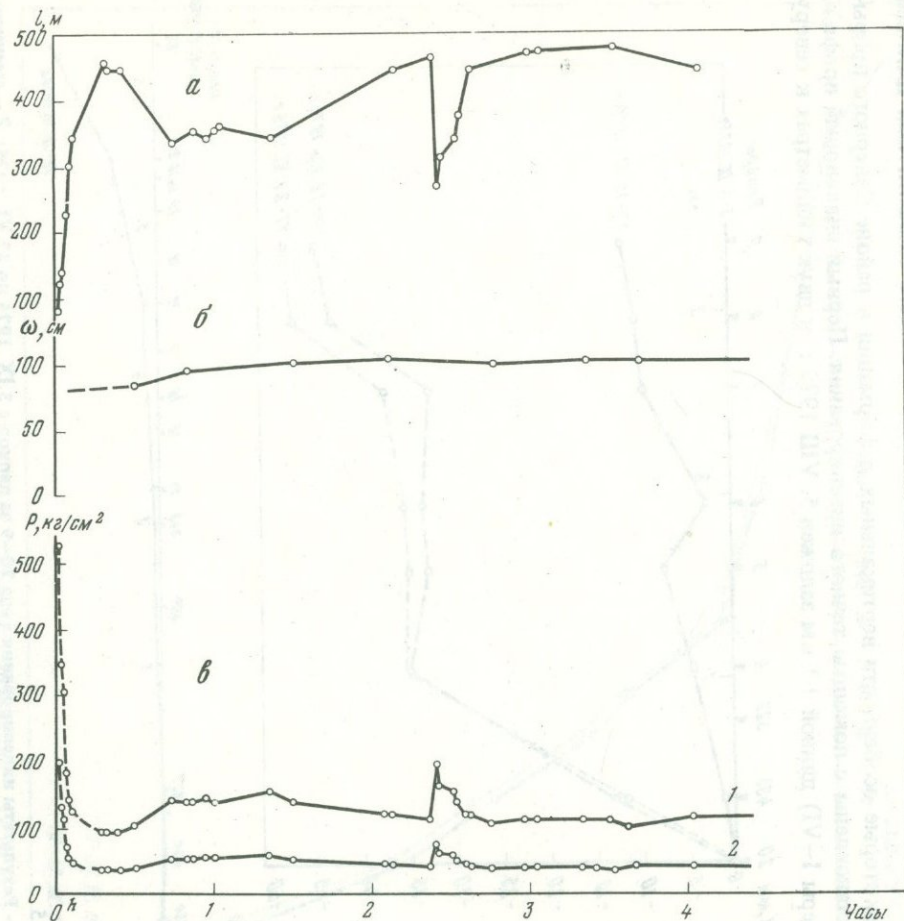
ДАННЫЕ О РАЗМЕРАХ ПИТАЮЩИХ ТРЕЩИН СЕВЕРНОГО ПРОРЫВА

26–29.VII велись измерения горизонтальных смещений светодальномером Геодиметр-8 с пункта 4 до пунктов 9, 10 и Высокая (см. рис. 1). Они показали, что горизонтальные деформации вдоль всех трех линий были синфазны и примерно одинаковы по величине (0,5–4 см при точности измерений (0,5 см) (рис. 3). Таким образом выявилось, что первый новый вулкан (I конус) расположен на глубокой питающей трещине субмеридиального направления длиной не менее 4 км. В последующие дни трещина развивалась на север, где 9 августа образовался II конус, 17.VIII – III конус. В это время горизонтальные смещения измерялись светодальномером ЕОК-2000 поперек трещин, на которых возникли конусы (линии 12–10 и 12–11; см. рис. 1), и Геодиметром-8 на западном борту глубокой питающей трещины (линии 7–6, 7–15, 7–16, см. рис. 3).

На поверхности, над этой главной питающей трещиной Северного прорыва, последовательно открылись кулисообразно расположенные трещины, на которых выросли I, II и III конусы (см. рис. 1).

Данные о ширине этих трещин, т.е. о мощности питающих даек, были получены при образовании II и III конусов. 9.VIII 1975 г. с первой же минуты прорыва II конуса с пункта 6 производилось измерение видимой длины трещины прорыва, определяемой расстоянием между крайними эруптивными выбросами. На второй минуте длина трещины была 80 м, а через 20 мин достигла 450 м. Затем в течение 2,5 часа длина эруптивной трещины менялась, уменьшаясь до 270 м, и когда через 3 часа после прорыва ее длина достигла максимума – 480 м – начал формироваться II конус (рис. 4, а). 17.VIII, за несколько часов до прорыва III конуса, геодиметром были начаты измерения линий 7–6, 7–15 и 7–16; они подвергались сжатию, начавшемуся, видимо, за 10 час до прорыва. Сжатие линий 6–7 и 7–15 составило, естественно, 8 и 20 см. Затухание горизонтальных деформаций аппроксимируется эмпирической зависимостью вида $\Delta L = 4,1(3,5 - r)^2$, где ΔL – смещение точек, r – расстояние точек от трещины. Смещение точки на кромке трещины оказывается равным 52 см, т.е. ширина трещины немного превосходит 1 м.





Р и с. 3. Горизонтальные деформации и наклоны вблизи Северного прорыва в июле – августе 1975 г.

1 – изменение длины линий; 2 – наклоны. Моменты образования видимых трещин: Т-1 – во время работы I конуса, Т-III – до прорыва III конуса. Моменты образования: ЮБ – южной бокки; СБ – северной бокки; ФСБ – фонтанирование северной бокки

Р и с. 4

а – Рост длины трещины прорыва II конуса; б – рост ширины трещины прорыва III конуса; в – давление магмы в дайке; 1 – при $E = 4 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$; 2 – при $E = 1 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$

С момента образования трещины ширина ее менялась, по-видимому, аналогично изменениям линий 6-7 и 7-15. Это позволило вычислить вариации ширины трещины (рис. 4, б). В первую минуту извержения она составляла около 80 см (максимальная ширина — 1 м). Разрыв земной поверхности, видимо, происходил на несколько часов раньше, и трещина в скальных породах была гораздо длиннее трещины, видимой на поверхности толщи рыхлой пирокластики.

ДИНАМИКА ВНЕДРЕНИЯ МАГМЫ СЕВЕРНОГО ПРОРЫВА ПО ПИТАЮЩИМ ТРЕЩИНАМ

Считая быстрые деформации, происходящие в минуты и первые часы, упругими, можно оценить избыточное давление магмы при прорыве. При плотности верхних толщ лав и пирокластики $\rho = 2 \text{ г/см}^3$ и скорости продольных волн в приповерхностном слое $V_p = 1400 \text{ м/с}$ модуль Юнга равен $E = 2(1 + \sigma) \rho V_p^2 = 4 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$, где σ — коэффициент Пуассона, V_s — скорость поперечных волн.

Внутреннее давление вязких жидкостей в вертикальных щелях $P = \omega_0 E/4(1 - \sigma^2)$ (Желтов, 1975), где ω_0 — полная ширина щели, l — половина ее длины.

Избыточное давление магмы и газов в питающих дайках оказалось скромным — максимум около 100 кг/см^2 (рис. 4, в).

При $E = 1 \times 10^5 \text{ кг/см}^2$, полученном по скорости продольных волн $V_p = 2-2,5 \text{ км/час}$ для толщи в 1 км (та же величина E дана в справочниках для спекшихся туфов), кривая избыточного давления лежит выше, максимальное давление — около 250 кг/см^2 .

ВЕРТИКАЛЬНОЕ СМЕЩЕНИЕ РАЙОНА СЕВЕРНОГО ПРОРЫВА ПО НИВЕЛИРНЫМ ДАННЫМ

Некоторые особенности вертикальных деформаций в районе Северного прорыва установлены с помощью точного нивелирования. Первый нивелирный профиль (реперы I—VI) длиной 1,1 км заложен 5. VIII 1975 г. в двух километрах к северу

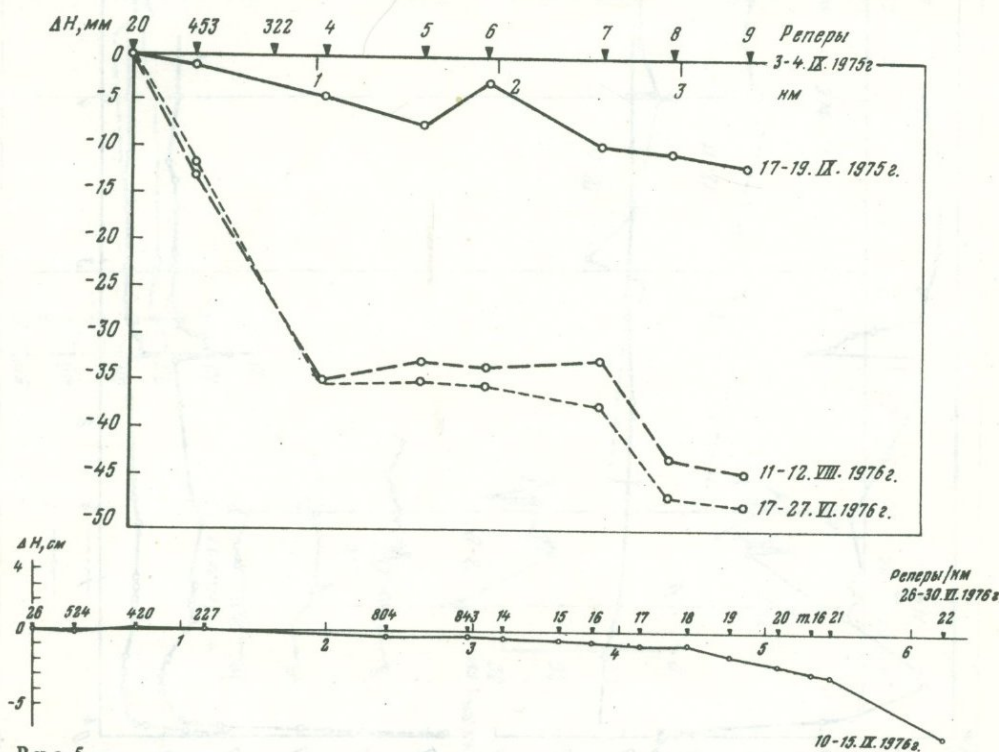


Рис. 5

1 — Результаты нивелирования хода 20-9 за период с 3.IX 1975 по 27.VI 1976; 2 — смещения реперов линии 766-12 с 17.VI по 12.VIII 1976

от I конуса. Выполнено четыре нивелирования этого хода – 7, 11, 13 и 15. VIII. К концу августа заложена более протяженная сеть. Три профиля: 1–12; 843–20; 804–26 длиной 3,0; 1,8; 1,2 км сходятся в одной узловой точке. Регулярные повторные измерения на этих профилях начаты 28. VIII.

Повторные нивелирования первого профиля I–VI показали поднятие реперов в период образования II конуса. Для репера VI смещение за период 7–11. VIII оказалось равным 11,3 см (за исходный принят репер I), что соответствует наклону около $40''$ на северо-восток. После 11. VIII вертикальных смещений не наблюдалось.

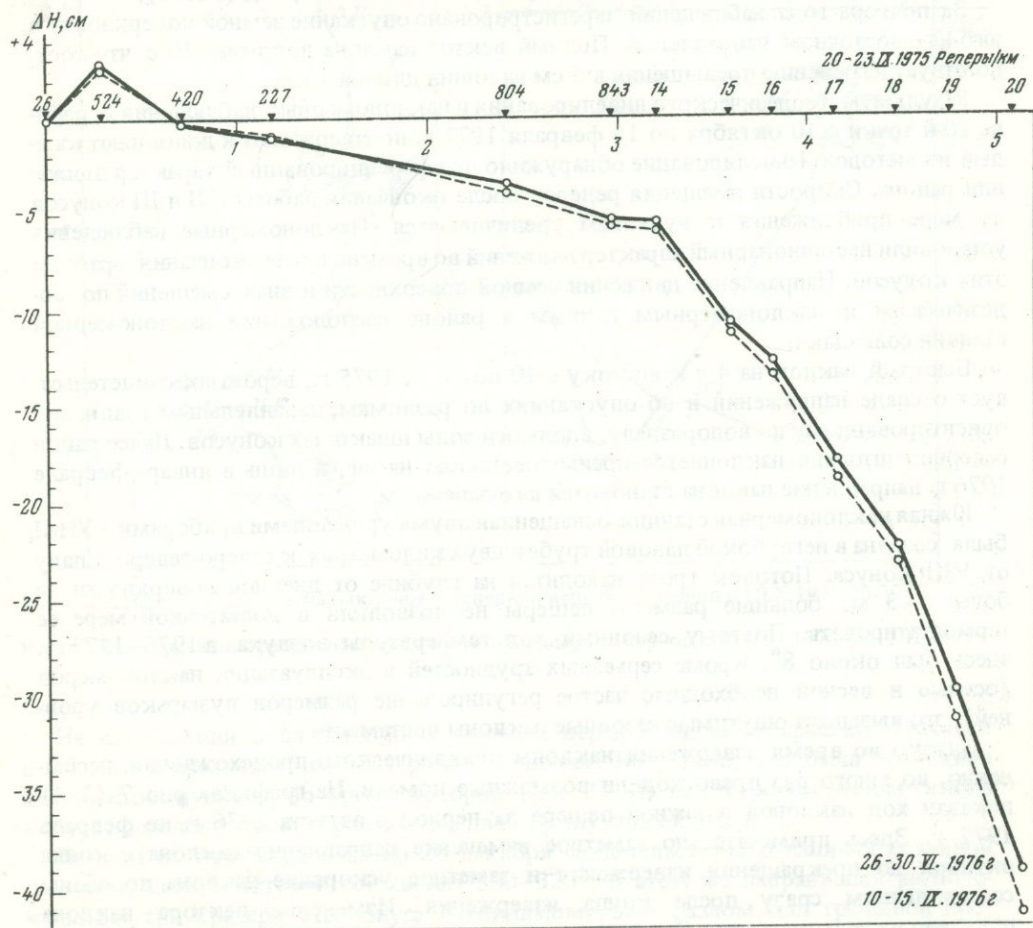
Повторное нивелирование секции (V–VI) 17 августа зарегистрировало смещение, равное 20 мм на базе 300 м (наклон $15''$) к юго-западу, вызванное подготовкой прорыва III конуса 17. VIII.

По результатам повторных измерений нивелирной сети зафиксировано постепенное опускание района северных конусов с сентября 1975 г.

Участок трассы (20–9) нивелировался в 1975 и 1976 гг. (рис. 5, а). Просадки реперов относительно пункта 20 не превышали 5 см за период с 3 сентября 1975 г. по 27 июня 1976 г. Далее, к середине августа 1976 г. наблюдалась тенденция поднятия реперов 11 и 12, ближайших к линии разлома, проходящей по водоразделу свода к Плоскому Толбачику (рис. 5, б).

Другая нивелирная линия (26–20) измерялась с 20. IX 1975 г. по 15. IX 1976 г. трижды. Скорость опускания реперов здесь выше: достигает 35 см/год относительно пункта 843 и превосходит 40 см/год относительно пункта 26 (рис. 6).

Вектор наклона за год, построенный в пункте 20 по нивелирным данным, превышает $40''$, направлен на центр северного прорыва (II конус). Величина его значитель-



Р и с. 6. Опускание нивелирных реперов относительно репера 26 с 20. IX 1975 по 15. IX 1976

но превосходит величину наклона за это же время в Северной наклономерной станции. Это объясняется быстрым нарастанием скорости опускания реперов по мере приближения к новым вулканам. Возможно также, что большая часть линии 843—20 находится в трещинной зоне и большие скорости опусканий обусловлены локальными причинами.

НАКЛОНОМЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдения деформаций земной поверхности с помощью наклономеров выполнялись вблизи Северного прорыва на двух станциях, расположенных в лавовых трубах. Использовались высокостабильные автономные уровенные наклономеры УН-П чувствительностью около 0,1 с дуги с дискретностью отсчетов 1 или 12 час (Доброхотов, 1972).

Первая станция работала в 0,8 км к северу от I конуса с 28 июля по 12 августа 1975 г. За время извержения I конуса заметных наклонов не наблюдалось (см. рис. 3). Появлению II конуса предшествовали большие знакопеременные наклоны (в сумме более 40 с дуги).

Вторая станция начала работать 10 октября 1975 г. Она располагалась на большем удалении от Северного прорыва, в 3 км к северо-западу от ближайшего III конуса (766, см. рис. 1). Приборы были установлены в лавовой трубе длиной более 100 м на глубине около 20 м от дневной поверхности. Кривые наклонов по обем составляющим показали существенное уменьшение наклона с марта 1976 г., особенно по составляющей север-юг (рис. 7; 1,2). Общее направление наклонов показано на вертикальной диаграмме, построенной за тот же период (рис. 8).

За полтора года наблюдений зарегистрировано опускание земной поверхности в юго-юго-восточном направлении. Полный вектор наклона достигает 10 с, что соответствует изменению превышения в 5 см на линии длиной 1 км.

Результаты геодезического нивелирования и наклономерные наблюдения в районе 20-й точки с 10 октября по 15 февраля 1977 г. подтверждают и дополняют каждый из методов. Нивелирование обнаружило дифференцированный характер движений района. Скорости смещения реперов после окончания работы I, II и III конусов по мере приближения к вулканам увеличиваются. Наклономерные наблюдения установили нестационарный характер движений во времени после окончания работы этих конусов. Направление движения земной поверхности и знак смещений по геодезическим и наклономерным данным в районе расположения наклономерной станции совпадают.

Быстрый наклон на 4 с к востоку с 10 по 20. X 1975 г., вероятно, свидетельствует о спаде напряжений и об опусканиях по разломам, параллельным главному, ориентированному по водоразделу, вдоль оси зоны шлаковых конусов. Далее район северной штольни наклоняется преимущественно на юг, и лишь в январе-феврале 1976 г. направление наклона становится юго-западным.

Южная наклономерная станция, оснащенная двумя уровенными приборами УН-П, была создана в неглубокой лавовой трубе в двух километрах к северо-северо-западу от VIII конуса. Потолок грота находится на глубине от дневной поверхности не более 2—3 м; большие размеры пещеры не позволили в достаточной мере ее термостатировать. Поэтому сезонный ход температуры воздуха в 1976—1977 гг. здесь был около 8°. Кроме серьезных трудностей в эксплуатации наклономеров (осенью и весной необходимо частое регулирование размеров пузырьков уровней), это вызывает ощутимые сезонные наклоны постамента.

Однако во время извержения наклоны вулканического происхождения, несомненно, во много раз превосходили возможные помехи. На графиках рис. 7 (3, 4) показан ход наклонов в южной пещере за период с августа 1976 г. по февраль 1977 г. Здесь примечательно заметное изменение направления наклона с конца октября до прекращения извержения и заметное ускорение наклона по обем составляющим сразу после конца извержения. Изменение вектора наклона показано на диаграмме рис. 9.

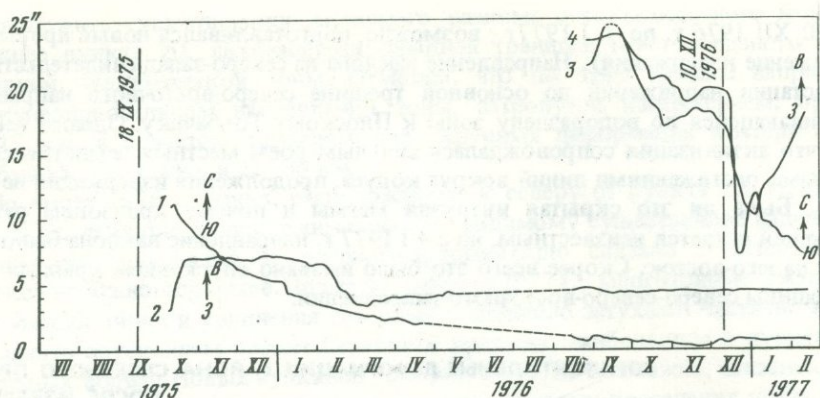


Рис. 7.

1, 2 — Наклоны по двум составляющим в северной пещере за период с 10.X 1975 по 5.II 1977; 3, 4 — наклоны по двум составляющим в южной пещере за период с 20.VIII 1976 по 15.II 1977. Вертикальные пунктирные линии — начало и конец извержения Южного прорыва

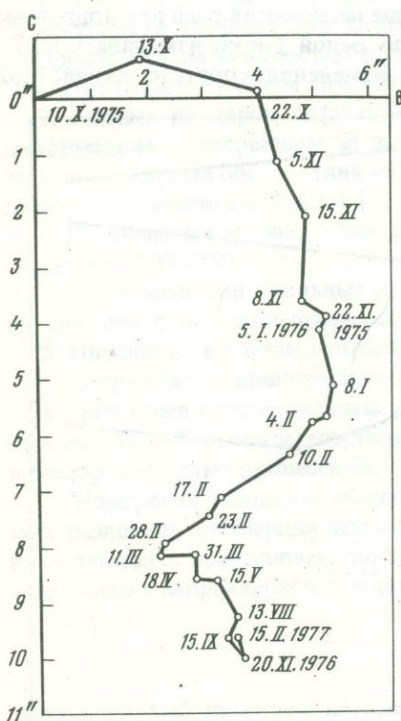


Рис. 8. Векторная диаграмма наклонов в северной пещере за период с 10.X 1975 по 20.XI 1976

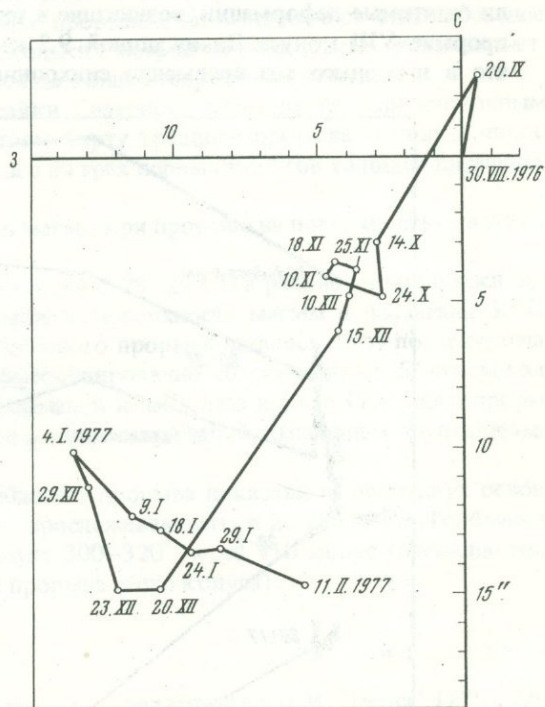


Рис. 9. Векторная диаграмма наклонов в южной пещере за период с 30.VIII 1976 по 11.II 1977

На протяжении последних двух месяцев перед концом извержений (начиная с 14.X) направление наклона резко менялось. Возможно, это была последняя активизация вулкана, во время которой (7 и 23.XI) на северо-восточном склоне конуса последовательно образовались два действующих кратера.

Наклон на юго-запад с 10 по 20 декабря свидетельствует о наличии активной трещины, азимут которой составляет $300-320^\circ$. В этом же направлении расположены все три кратера VIII конуса. По-видимому, этот разлом был трещиной прорыва VIII конуса. Положение этого разлома подтверждается и другими геодезическими данными.

С 20. XII 1976 г. по 4. I 1977 г., возможно, подготавливался новый прорыв (или продолжение извержения). Направление наклона на северо-запад свидетельствовало о нарастании напряжений по основной трещине северо-восточного направления, протягивающейся по водоразделу зоны к Плоскому Толбачику. Однако несмотря на то что активизация сопровождалась сильным роением местных землетрясений¹ и заметными растяжениями линий вокруг конуса, продолжения извержения не последовало. Была ли это скрытая интрузия магмы и почему произошла разрядка напряжений остается неизвестным, но с 4. I 1977 г. направление наклона было устойчивым на юго-восток. Скорее всего это было вызвано опусканием крыльев основной трещины северо-северо-восточного направления.

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ РАЙОНА СЕВЕРНОГО ПРОРЫВА ПОСЛЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ

С сентября 1985 г. по февраль 1977 г. выполнялись измерения линий длиной 1–10 км в районе Северного прорыва светодальномерами, в основном геодиметром модели 8 (см. рис. 1). Исходной точкой измерений являлся пункт 20. Характер изменения длин линий показан на рис. 10. Измерения в сентябре 1975 г. показали ощутимые деформации, возникшие в течение нескольких дней при подготовке и прорыве VIII конуса. Линия длиной 9,2 км до Белой Горки изменилась на 7 см, что в несколько раз превысило синхронные изменения коротких линий. Можно

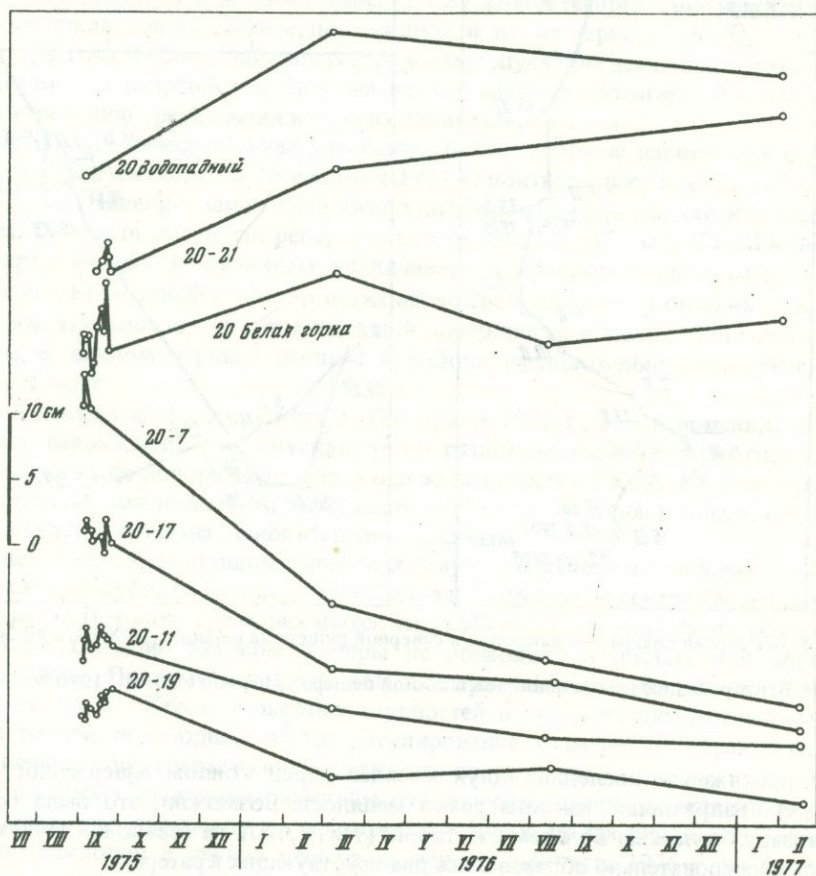


Рис. 10. Изменение длин линий за период с сентября 1975 по февраль 1977

¹ См. статью Федотова С.А., Горельчик В.И. и др. Развитие Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. по сейсмологическим данным (в настоящем сборнике).

предположить существование активного разлома северо-восточного направления западнее пункта 20, являющегося западной границей горстообразного поднятия активной вулканической зоны. Отметим, что по этим данным напряженность в субмеридиональном направлении зоны, затронутой извержением, превышает 10–12 км, а с учетом одновременных крупных деформаций кратера Плоского Толбачика, возможно, и 25–30 км.

До марта 1976 г. линии, расположенные к северу от пункта 20, удлинлись, а короткие, лежащие к югу, сжимались. По-видимому существенное падение напряжений в этот период в районе Северного прорыва было связано с интенсивной разгрузкой на Южном прорыве. Позже, до февраля 1977 г., многотонные сжатия коротких южных линий и удлинения северных постепенно затухают. Частично это можно объяснить опусканием района Северного прорыва, наибольшим в пунктах, расположенных вблизи Новых вулканов (см. рис. 5–7), и, возможно, связанным с обрушением подземных камер и возникновением воронки проседания после образования конусов, вес которых составляет более 1,5 млрд. т.

ВЫВОДЫ

1. Предположительно от начала извержения до прорыва южной бокки I конуса на небольшой глубине под Северным прорывом формировалось силлообразное внедрение магмы мощностью от нескольких метров до нескольких десятков метров. Этот резервуар затем опустошался до конца извержения I конуса.
2. Оценка размеров питающей дайки Северного прорыва по горизонтальным деформациям, измеренным на западном борту трещины прорыва II конуса, показала, что во время образования каждого из трех первых конусов толщина питающей дайки была немногим более 1 м.
3. Величина избыточного давления магмы при прорыве на поверхность оказалась скромной: 100–250 кг/см².
4. Локальные вертикальные деформации с 28–29.VII в районе южной бокки были связаны с напором прорывающейся к поверхности магмы и достигали 30 м.
5. Опускание в районе конусов Северного прорыва началось сразу после окончания извержения и происходило дифференцированно со скоростями 5–40 см/год.
6. Затухание горизонтальных деформаций и наклонов вблизи Северного прорыва к началу 1977 г. свидетельствовало о спаде напряжений, вызванных эруптивными и постэруптивными процессами.
7. Измерения наклонов вблизи Южного прорыва показали наличие двух основных разломов: субмеридионального, прослеживающегося до Плоского Толбачика, и оперяющего, проходящего по азимуту 300–320° через VIII конус (очевидно совпадающего с направлением трещины прорыва этого конуса).

ЛИТЕРАТУРА

Доброхотов Ю.С. Измерение наклонов земной поверхности высокочувствительными уровнями. В сб.: Медленные движе-

ния земной коры. М., "Наука". 1972, с. 229.
Желтов Ю.П. Механика нефтегазоносного пласта. М., "Недра", 1975. 450 с.