

УДК 551.217.2 : 552.143(265.53)

САЗОНОВ А. П.

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛОЗИВНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА АЛАИД НА ОСАДКООБРАЗОВАНИЕ В РАЙОНЕ О-ВА АТЛАСОВА (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

В период 27.IV—5.VI.1981 г. произошло сильное пароксизмальное извержение вершинного кратера вулкана Алаид [15, 16], в результате которого большой объем ($\sim 0,025 \text{ км}^3$) тефры выпал в море, сформировав на участке дна (площадью $\sim 318 \text{ км}^2$), прилегающего к острову, горизонт мощностью до 300 мм (рис. 1, а), весом (при объемном весе $1,2 \text{ г/см}^3$) $30,0 \cdot 10^6 \text{ т}$. Количество выпадавшей в зонах пеплопада тефры в среднем составляло $0,12 \text{ г/м}^2$ (максимум $0,48 \text{ г/см}^2$). Необходимо отметить, что в результате эоловой дифференциации алевритовые и пелитовые фракции в исследованном районе не выпадали. Для изучения форм и степени влияния этого извержения на осадкообразование были проведены литологические исследования [13] в рейсах НИС «Вулканолог».

1. Материал и методика работ

Пробы донных осадков отбирались дночерпателем «Океан-50» и предварительно обрабатывались в судовых условиях по методике Института океанологии АН СССР [7]. Станции (ст.) опробования (их было 34) располагались по большому (БКП) и малому (МКП) кольцевым профилям (см. рис. 1, а). Кроме того, в зонах пеплопада было отобрано 18 проб тефры, условно названной «сухой» (СТ).

В 1983 г. в 15-м рейсе НИС «Вулканолог» с целью выяснения характера и скорости возможных изменений, происшедших с донными осадками за период после извержения, было проведено 14 режимных литологических опробований.

Все анализы проводились в лабораториях Института вулканологии. Гранулометрический анализ 116 проб проведен по методике 19-фракционного дробного ситового анализа [12]. Данные обработаны по методу кумулятивных кривых и по методу моментов [4].

Минералогический анализ проводился как в шлифах, так и в иммерсионных препаратах. Всего было проанализировано 48 проб. Также было выполнено 67 полных силикатных анализов. Результаты всех анализов были подвергнуты статистической обработке [5] с помощью диалоговой системы анализа многомерных данных «Вулканит», разработанной в Институте вулканологии и реализованной на ЭВМ ЕС-1033.

2. Классификация тефры и ее распределение в районе о-ва Атласова

В основу выделения основных типов тефры положена классификация вулканитов Межведомственной терминологической комиссии [9], а также классификация современных морских осадков Института океа-

нологии АН СССР [1]. Такой двойственный подход обусловлен тем, что, с одной стороны, предметом исследований являются морские осадки, а с другой — эти осадки своим происхождением обязаны вулканическому извержению.

В качестве основных признаков, используемых для подразделения тефры по гранулометрическому составу, приняты величины медианного диаметра (Md) и размер преобладающей фракции.

Пробы СТ по гранулометрическому составу представляют собой вулканический песок с различным содержанием в виде примесей мелких лапилли и вулканической пыли.

Тефра, пробы которой отбирались с морского дна, была условно названа мокрой (МТ). Согласно классификации морских осадков, в изученной части бассейна можно выделить следующие основные типы МТ: средний и мелкий вулканогенный гравий, крупный средний и мелкий вулканогенный песок и крупный вулканогенный алеврит. Этим типам морских осадков по классификации вулканитов Е. Ф. Малеева [9] соответствует группа рыхлых осадочно-вулканокластических пород: лапилли с примесью осадочного материала, туффитовый песок, туффитовая пыль. Средний вулканогенный гравий развит (рис. 1, б) в северном и северо-восточном направлениях от острова (ст. 55, 26, 25, 24, 23, 22). Причем в направлении север — юг полоса его распространения все время сужается. Мелкий гравий встречен только на трех станциях МКП у юго-восточного (ст. 5 и 21) и северо-западного (ст. 28) берегов. Крупный вулканогенный песок, так же как и мелкий гравий, имеет широкое распространение и замещает его в вышеуказанном направлении.

Средний вулканогенный песок отмечен только на одной станции (ст. 27) МКП у северо-западного берега острова. Как будет сказано ниже, этот песок не является синхронным извержению 1981 г., так же как и мелкий вулканогенный песок и крупный алеврит, поднятые у южного и юго-западного берегов острова.

Механический состав «сухой» тефры. Ввиду того что пробы СТ отбирались не случайно и по неравномерной сетке, их гранулометрические параметры рассматривать не имеет смысла. Единственное, что следует заметить, так это полное отсутствие во всех пробах фракции $<0,01$ мм, которая уносилась ветром и выпадала далеко за пределами полигона, а также полное отсутствие в пробах фракции >10 мм. Исключение составляет только проба 7, которая была отобрана 9 мая 1981 г., в период второй пароксизмальной фазы извержения [15].

Механический состав МТ извержения 1981 г. МТ, синхронная извержению 1981 г., поднята не на всех станциях опробования. Грубозернистые осадки галечниковой размерности (>10 мм) на станциях БКП почти повсеместно отсутствуют. Исключением является самая северная станция опробования (ст. 55). Содержание фракции в пробе составляет 3,2%.

На станциях МКП частицы данной размерности отмечены почти на всех станциях. На северной ст. 26 содержание фракции 6,9%. При движении по профилю с севера на юг содержание этой фракции незначительно уменьшается с резким максимумом до 14% на восточной ст. 22. На западе МКП ее содержание составляет 7,7% (ст. 13).

Содержания фракции среднего гравия (10—5 мм) испытывают значительные колебания (рис. 2) — от 0 до 32%, причем максимальные значения опять приходятся на северные станции: на БКП — 15,5% (ст. 55), на МКП — 32,3% (ст. 26). На южных, юго-западных и западных станциях БКП данная размерность тефры отсутствует. Среднее содержание фракции на станциях малого кольцевого профиля ($\bar{x}=11,7\%$) почти вдвое превышает содержание на станциях большого профиля ($\bar{x}=4,2\%$).

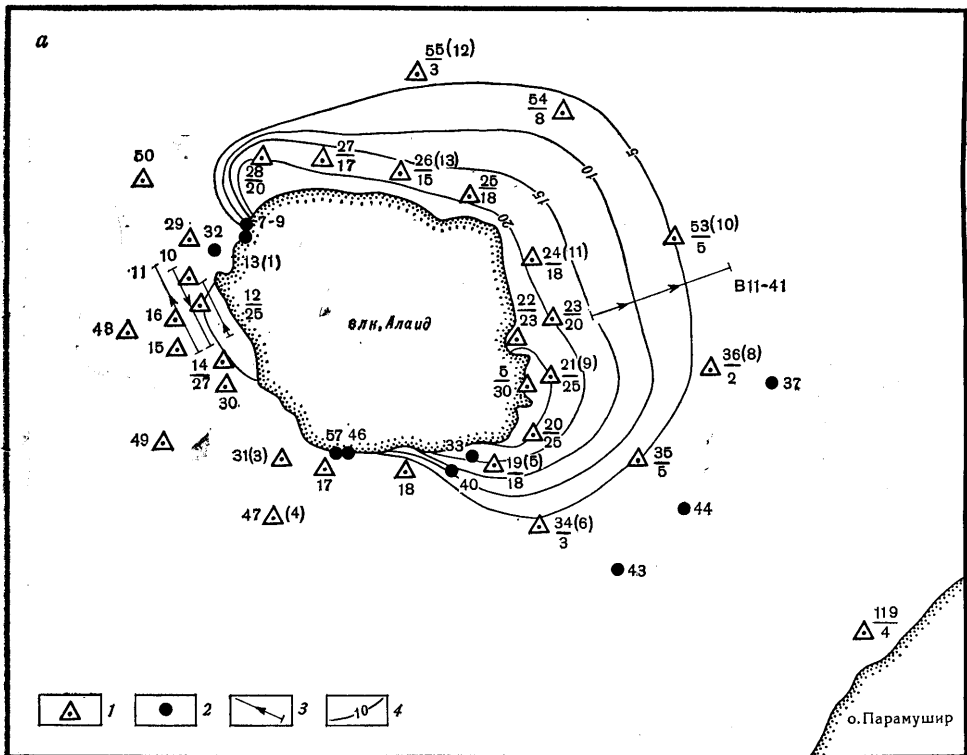


Рис. 1. Схема расположения станций литологического опробования и распределения донных осадков. *а* — станции опробования; 1 — дночерпальные станции (числовые значения в числителе — номера станций, в скобках — номера режимных станций, в знаменателе мощность МТ в 1981 г.), 2 — станции отбора СТ, 3 — станции отбора СТ при прохождении судна через зону пеллопада; 4 — изолинии мощностей МТ в 1981 г.; *б* — распределение донных осадков (МТ в 1981 г.); 1 — средний гравий, 2 — мелкий гравий, 3 — крупный песок; *в* — пелловый шлейф на снимках искусственного спутника Земли [15]

Концентрации среднегравийной фракции (5—3 мм) испытывают ту же тенденцию, что и концентрации фракции предыдущей размерности. Количество частиц этого размера на ст. 55 составляет 40,2% и резко отличается от такового на станции, расположенной южнее. На МКП максимальное содержание (40,8%) выявлено опять на ст. 26, причем в отличие от предыдущих фракций оно почти не отличается от количества данной фракции на внешнем профиле (ст. 55). На станциях большого профиля мелкогравийные частицы распространены довольно равномерно. Концентрации их колеблются от 33,6% на севере до 23,5% на юго-востоке при среднем содержании 37,6%. Станция 36 с максимальным содержанием (37,2%) мелкого гравия смещена несколько южнее относительно станции с максимальным содержанием частиц ранее описанных размерностей. Станция 21 с максимальным содержанием на МКП также смещена на юго-восток. Концентрация фракции здесь составляет 53,2%. Колебания концентраций на МКП довольно значительны — от 13,2% до 53,2% ($\bar{x}=35,8\%$). В распределении наблюдается два максимума: на ст. 21, расположенной на юго-востоке профиля, и на ст. 13 — на северо-западе.

Максимальное содержание (53,5%) крупнопесчаной фракции (1—0,5 мм) большого профиля отмечено на ст. 54. Концентрации частиц крупного песка на этом профиле колеблются от 2,6% на севере (ст. 55) до 17,8% на юго-востоке (ст. 34) при среднем содержании 29,9%. На малом профиле его максимальные концентрации тяготеют к юго-восточ-

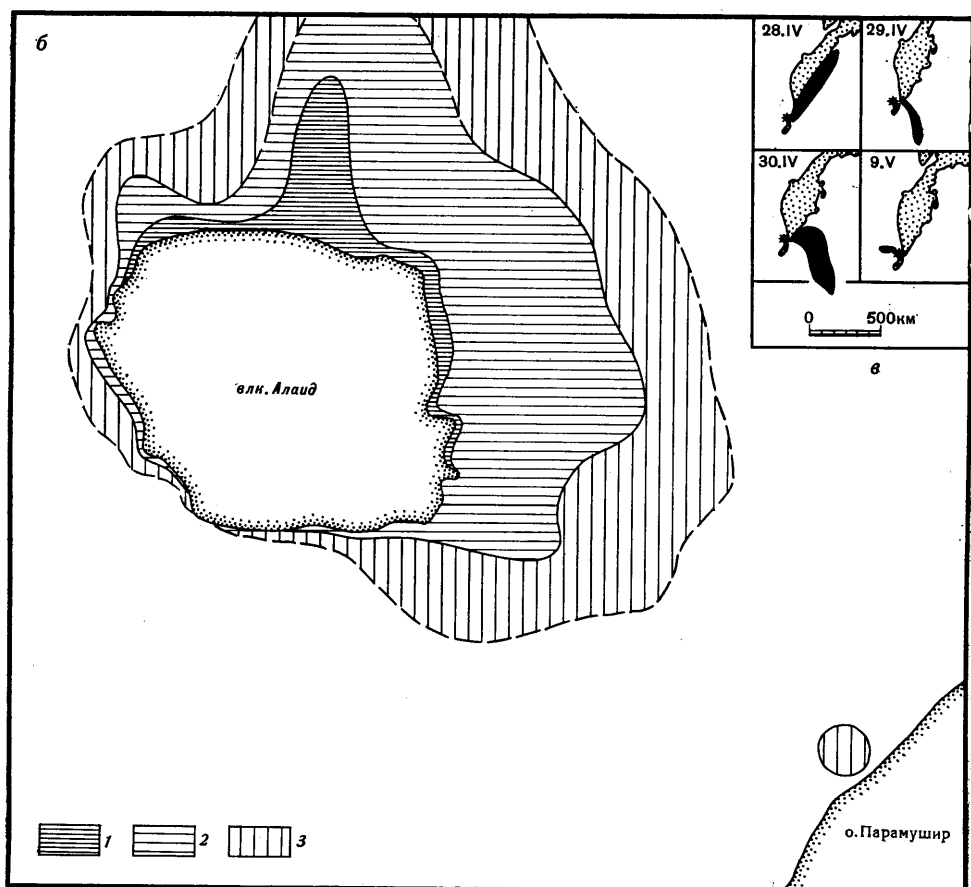


Рис. 1, б

ным и западным азимутам. Начиная с крупнопесчаной становится заметным постепенное увеличение песчаной составляющей с севера на юг. Особенно хорошо эта тенденция проявлена во фракции среднего песка (0,5—0,25 мм). В то время как на северной ст. 55 (БКП) концентрация частиц всего 0,4%, при движении на юг она резко увеличивается — до 29,3% (ст. 34). Не менее ярко это изменение прослеживается и на МКП — от 0,8 (ст. 26) до 26,8% (ст. 19). Кроме того, на юго-западе профиля выделяется еще один максимум — 28,5% (ст. 14).

Мелкопесчаная и алевритовая фракции ввиду своего незначительного содержания отдельного рассмотрения не заслуживают. Можно только отметить на одной из восточных станций (ст. 12) малого профиля относительно большой максимум мелкого песка (10,5%), который, по всей вероятности, не синхронен последнему извержению.

Максимальные значения Md отмечены на северных станциях обоих профилей, причем на севере БКП заметен резкий максимум ($Md = 3,09$ мм), а начиная со ст. 54, происходит постепенное уменьшение Md в направлении на юг — с 0,76 до 0,65 мм. На станциях МКП такое изменение происходит менее резко (3,89—1,78 мм), хотя и с существенно большим перепадом в значениях.

Необходимо также отметить, что в направлении с севера на юг на станциях обоих профилей ухудшается коэффициент сортировки S_0 . Значения его изменяются от 1,51 (хорошая сортировка) до 2,57 (плохая сортировка). На станциях МКП все значения S_0 (1,43—1,90) соответствуют хорошо- и среднесортированным осадкам.

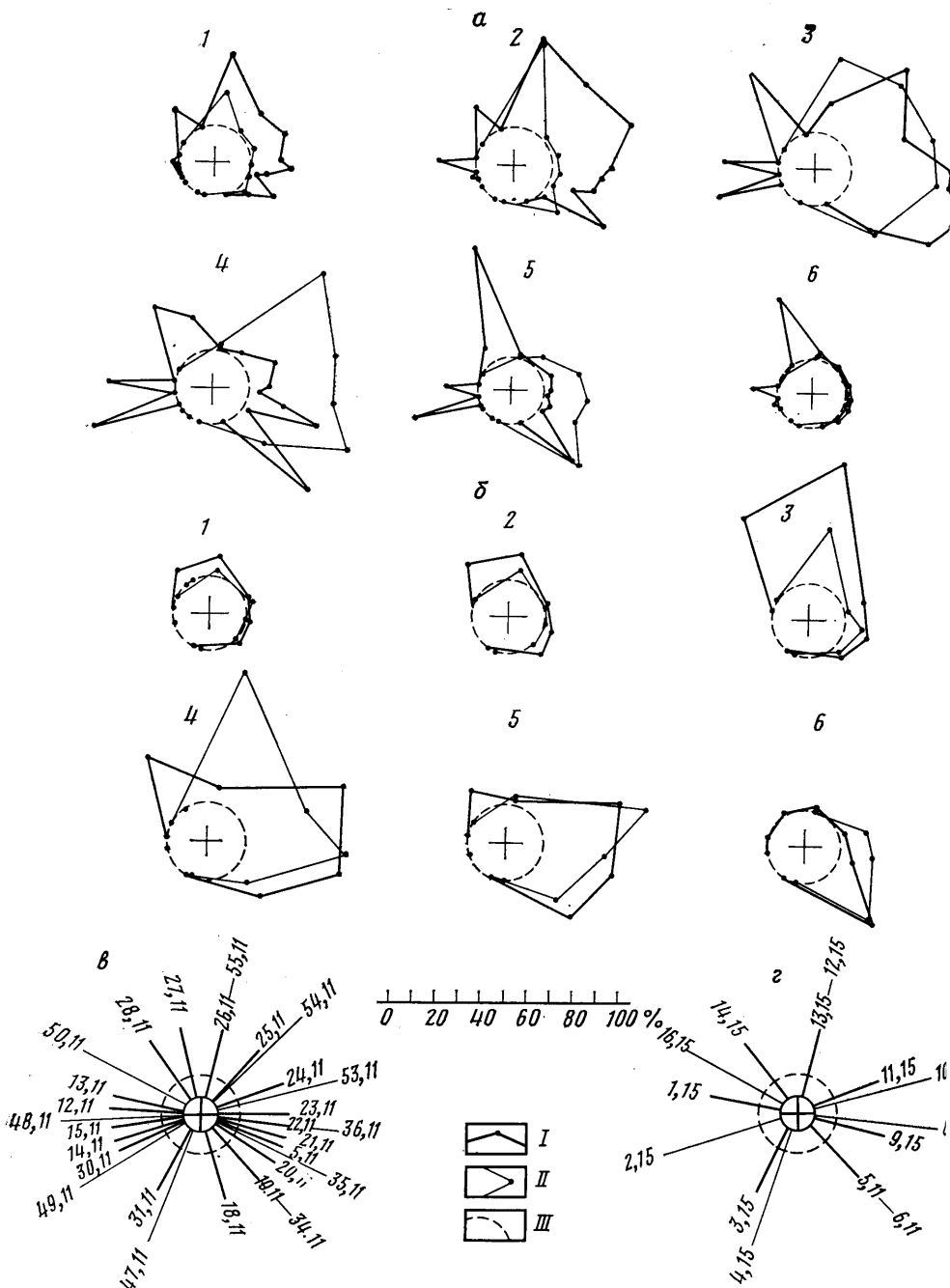


Рис. 2. Розы-графики изменения концентраций гравийных и песчаных фракций на станциях литологического опробования. *а* — пробы МТ 1981 г.; *б* — режимные пробы МТ 1983 г.; 1 — фракция 10—5 мм, 2 — фракция 5—3 мм, 3 — фракция 3—1 мм, 4 — фракция 1—0,5 мм, 5 — фракция 0,5—0,25 мм, 6 — фракция 0,25—0,1 мм; *в* — схема расположения азимутов станций опробования 1981 г.; *г* — схема расположения азимутов режимных станций опробования 1983 г.; I — азимуты станций МКП, II — азимуты станций БКП, III — условная линия «0» — содержания МТ

Гранулометрическая характеристика тefры извержений 1934 и 1972 гг.
 При предварительной обработке проб МТ в судовых условиях было замечено, что осадки, поднятые на некоторых станциях, покрыты тонкой (<1,0 мм) пелитовой пленкой с микроводорослями.

При тщательном анализе гистограмм (рис. 3) и кумулятивных кривых, построенных по результатам гранулометрического анализа, было замечено, что по своей форме гистограммы и кривые разделяются на две группы. Для первой группы характерны одновершинные асимметричные гистограммы с резкими максимумами. Для второй, к которой относятся и упомянутые пробы, характерны пологие, чаще двух- и даже трехвершинные. Было сделано предположение, что осадки второй группы не имеют отношения к последнему извержению. При предварительном изучении результатов химического и минералогического анализов это предположение осталось недоказанным. Поэтому данные гранулометрического, минералогического, силикатного анализов были подвергнуты машинной математической обработке с применением анализа дискриминантных векторов данных силикатного анализа. Предварительно были выделены два класса осадков. В результате анализа были получены дискриминантные числа, имеющие следующие значения: 1—4,983; 2—3,513; 3—2,602. Первое число является обобщенным расстоянием Махалобиса между двумя многомерными совокупностями.

Все машинные графические построения (рис. 4, 5) для упрощения операции выделения подмножеств данных выполнены с помощью АЦПУ в основном масштабе. При этом шкала любого признака разбита на 60 делений [3]. Применение T^2 — Хотеллинга [5] дает на 5%-ном уровне значимости ($\alpha=0,05$) критическое значение расхождения 3,02, что говорит о статистически значимом различии двух классов осадков, которое хорошо видно на диаграмме рассеяния первых двух дискриминантных векторов (см. рис. 4).

В результаты дискриминантного анализа этих же классов по восьми гранулометрическим признакам получены следующие значения дискриминантных чисел: 1—4,454; 2—3,379; 3—2,302. Критерий Хотеллинга в этом случае дает критическое значение расхождения 2,27, что опять-таки говорит о существенном статистическом различии между двумя классами осадков и по гранулометрическим признакам.

На основании данных предварительного изучения осадков в судовых условиях и местоположения станции опробования, результатов гранулометрического, минералогического и химического анализов, а также их последующей математической обработки можно с уверенностью сказать, что осадки 2-й группы являются продуктами предыдущих извержений в. Алайд (1933 и 1972 гг.). МТ этой группы представлены следующими типами осадков: мелкий вулканогенный гравий, крупный вулканогенный песок, средний вулканогенный песок, мелкий вулканогенный песок, крупный вулканогенный алеврит.

Результаты математической обработки данных гранулометрического анализа. По данным предварительной обработки и гранулометрического анализа были выделены три большие группы МТ: МТ, синхронные извержению 1981 г.; МТ предыдущих извержений; режимные пробы МТ, отобранные в 1983 г.

На первой стадии математической обработки проверялись гипотезы нормальности и однородности выделенных групп [6]. Проверка показала, что практически все фракции имеют нормальное распределение. Для проверки гипотезы однородности привлекался метод дискриминантного анализа. Выше уже говорилось, что этот метод доказал правомерность сделанных предположений и выделения на их основе группы МТ предыдущих извержений. Кроме того, была проведена проверка однородности групп по отдельным гранулометрическим параметрам. Проверка проводилась по t -критерию при условии равенства дисперсий, а также по непараметрическим критериям Уилкоксона и Смирнова. Следует отметить, что, несмотря на существенные внешние различия (размерность, сортировка, окатанность) между МТ 1981 г. и режимными пробами МТ, которые были выявлены при предварительной обработке проб,

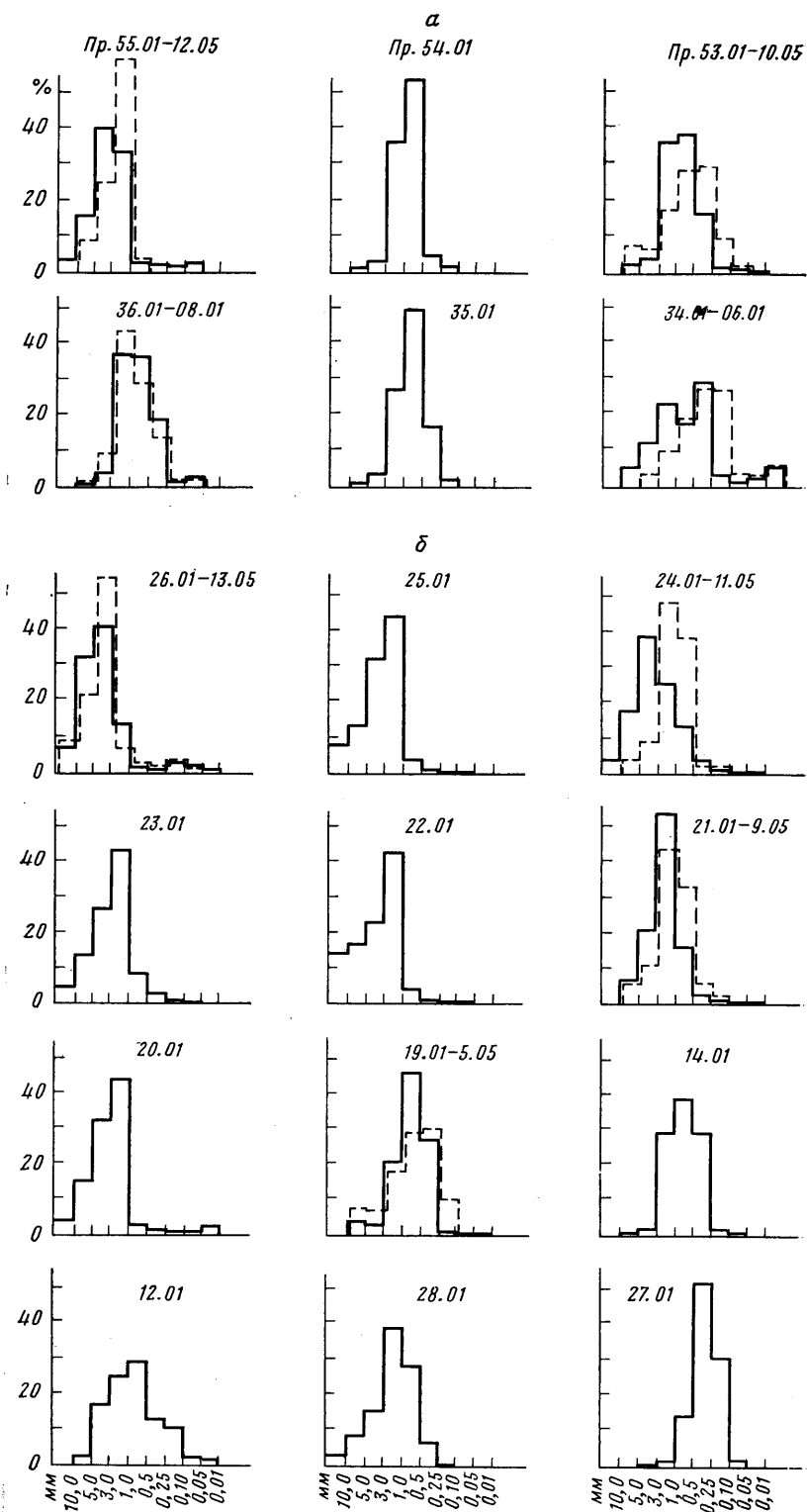


Рис. 3, а, б

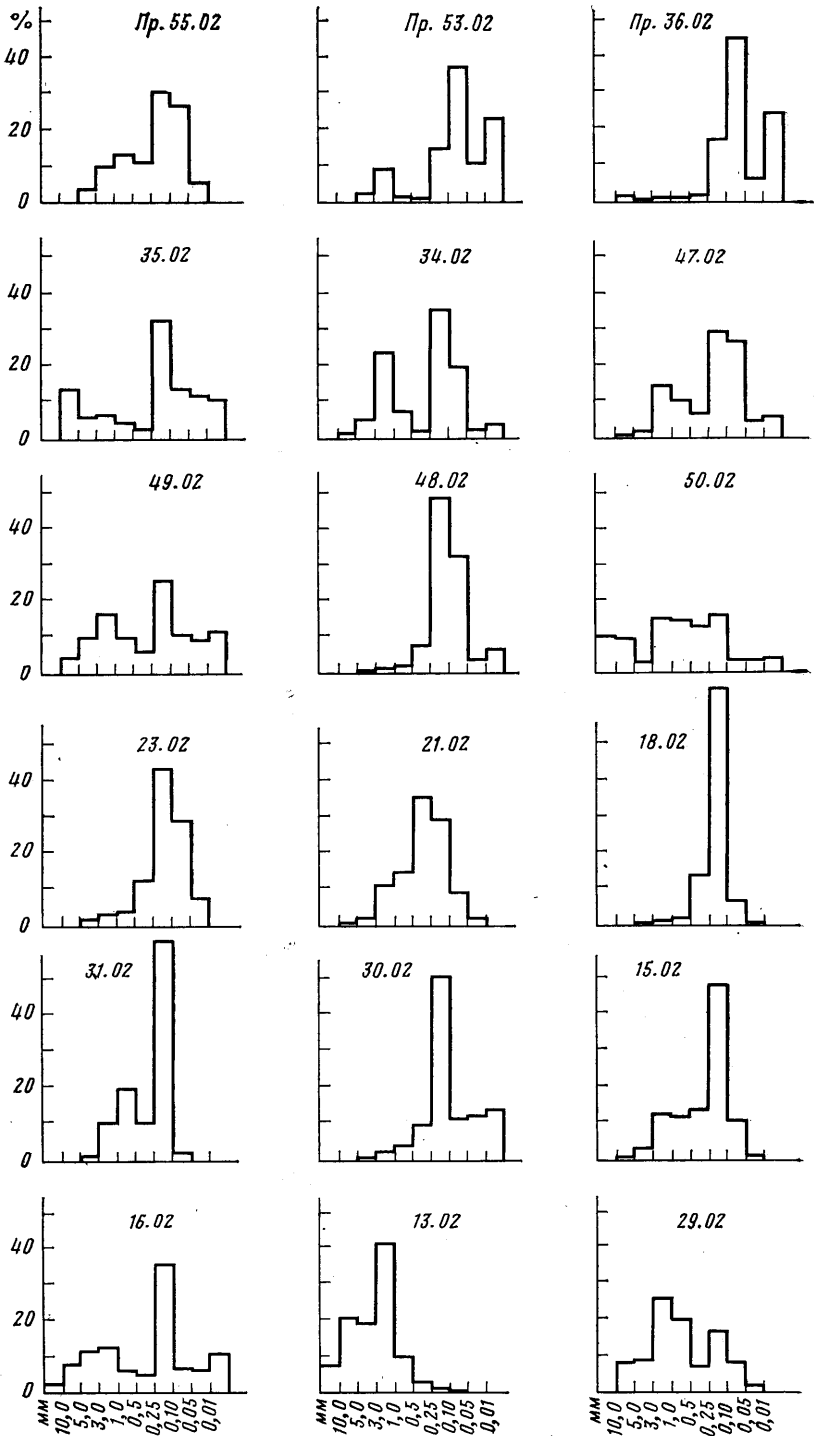


Рис. 3. Гистограммы гранулометрического состава «мокрой» тефры. а — МТ 1981 г. на станциях БКП, б — МТ 1981 г. на станциях МКП, в — МТ 1934 и 1972 гг. на станциях МКП; пунктир — режимные пробы МТ 1983 г.; пр. 55.02 и т. п. — номера проб

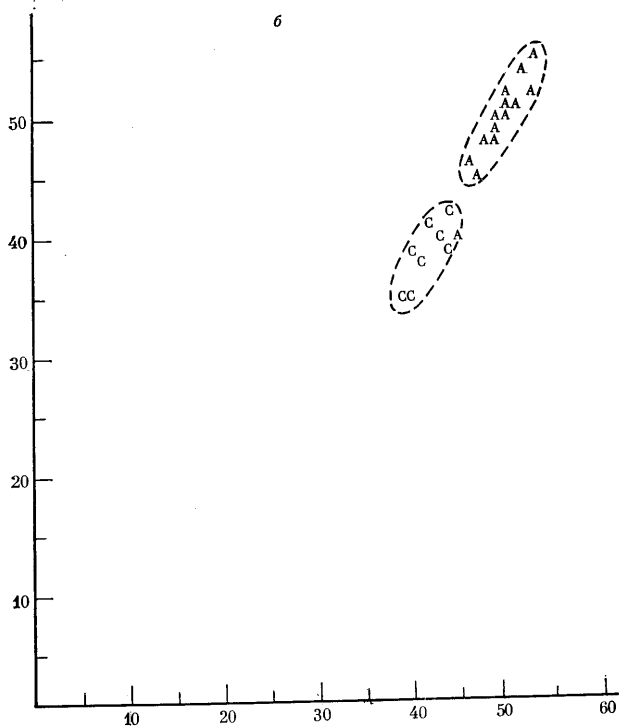
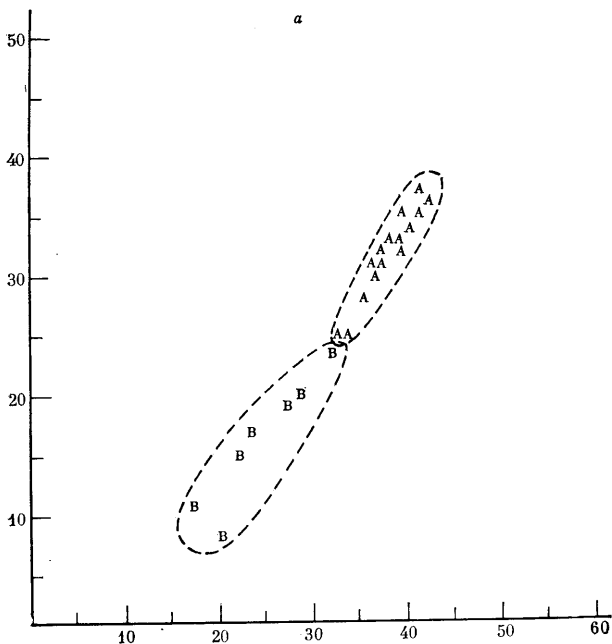


Рис. 4, а, б

тефра этих двух больших групп по всем параметрам, за исключением плотности, статистически однородна. Плотность режимных проб МТ стала несколько меньше. Если раньше, т. е. в 1981 г., ее $\bar{x}=2,78$ г/см³, то в 1983 г. оно стало 2,71 г/см³. И хотя внешне приведенные значения мало отличаются друг от друга, примененные критерии делают это отличие статистически значимым. При дискриминантном анализе 16 грануломет-

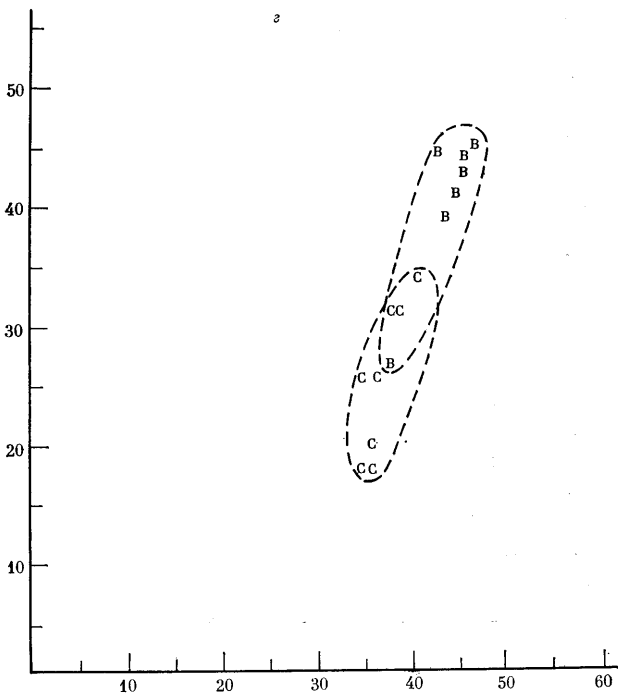
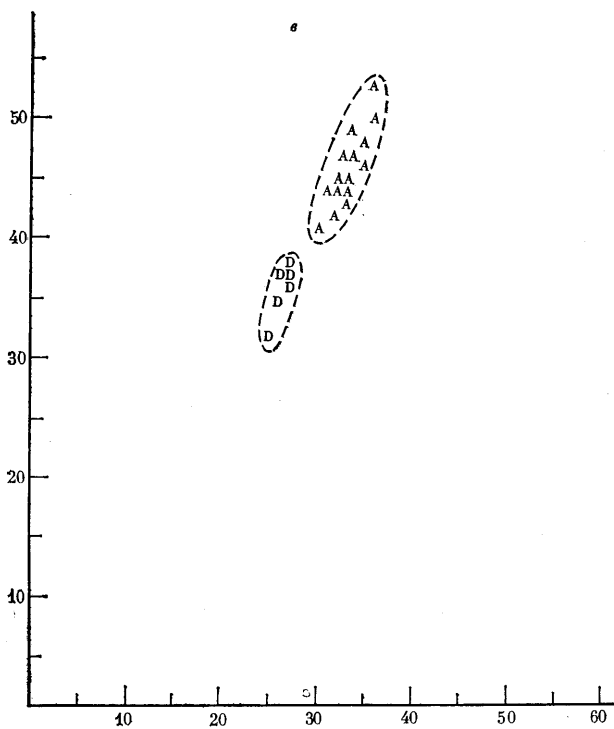


Рис. 4, в, г

рических параметров этих групп было получено обобщенное расстояние Махаланобиса $D=4,144$. Критерий Хотеллинга (F -критерий), применяемый для проверки значимости расхождения, равен 2,58 при критическом значении $F=2,84$. Помимо дискриминантного в процессе математической обработки применялся также корреляционный анализ 16 па-

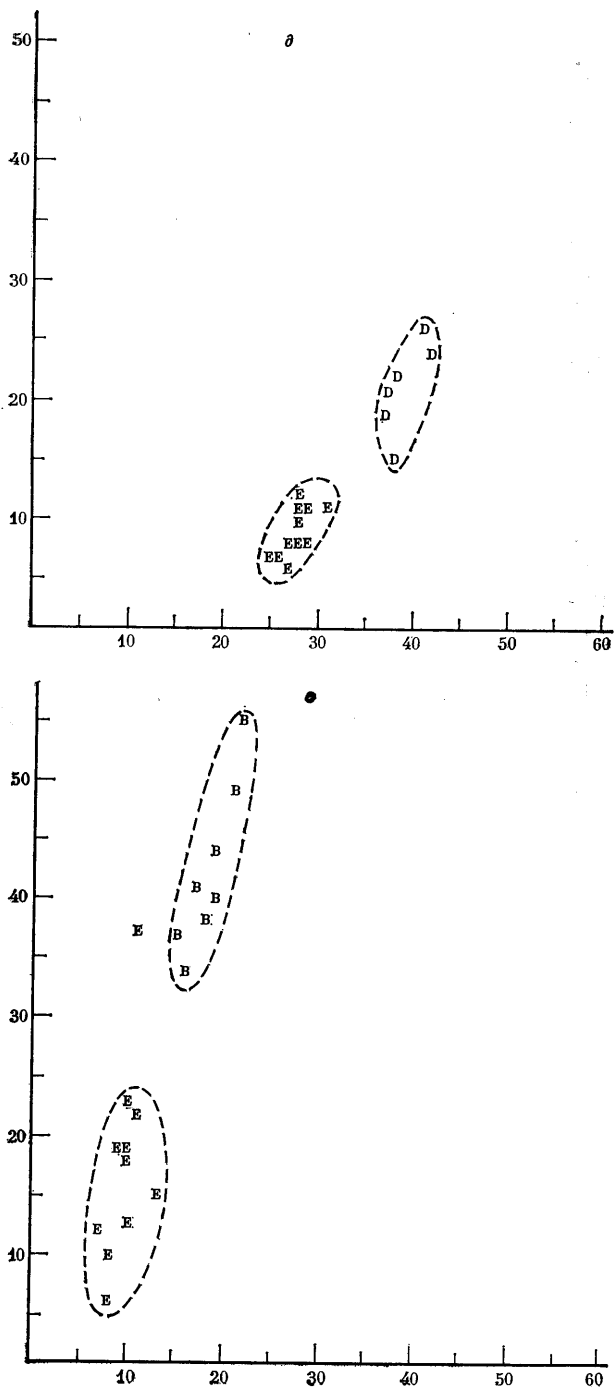


Рис. 4. Диаграммы рассеяния первых двух дискриминантных векторов различных групп тефры. *а* — группы СТ и МТ 1981 г., *б* — группы СТ 1981 г. и режимных проб МТ 1983 г., *в* — группы СТ 1981 и 1972 гг. *г* — МТ 1981 г. и режимные пробы МТ 1983 г.; *д* — СТ и МТ извержений 1934 и 1972 гг.; *е* — МТ 1983 г. и МТ 1934 и 1974 гг.; значения А—Е см. в табл. 1

раметров. На станциях БКП существует некоторая корреляционная зависимость между плотностью осадков и расстоянием до центрального кратера, что говорит в пользу того, что именно центральный кратер являлся источником поступления этого осадочного материала. Коэффици-

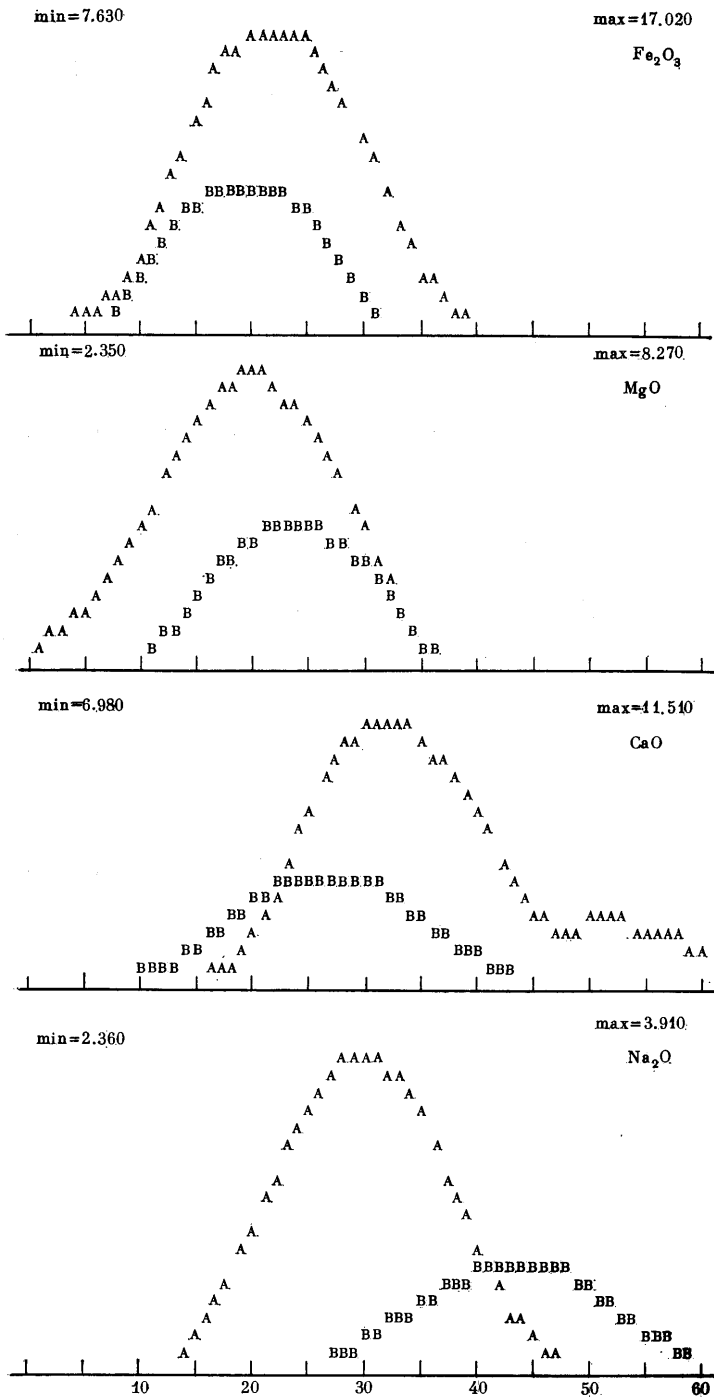


Рис. 5, а

ент корреляции $r = -0,51$ соответствует общеизвестной зависимости, при которой с увеличением расстояния от источника поступления плотность осадков становится меньше.

Но в режимных пробах картина уже совершенно иная. Появляются большие значения коэффициентов корреляции плотности и глубины ($r = 0,53$), плотности и расстояния до берега ($r = 0,99$), увеличивается

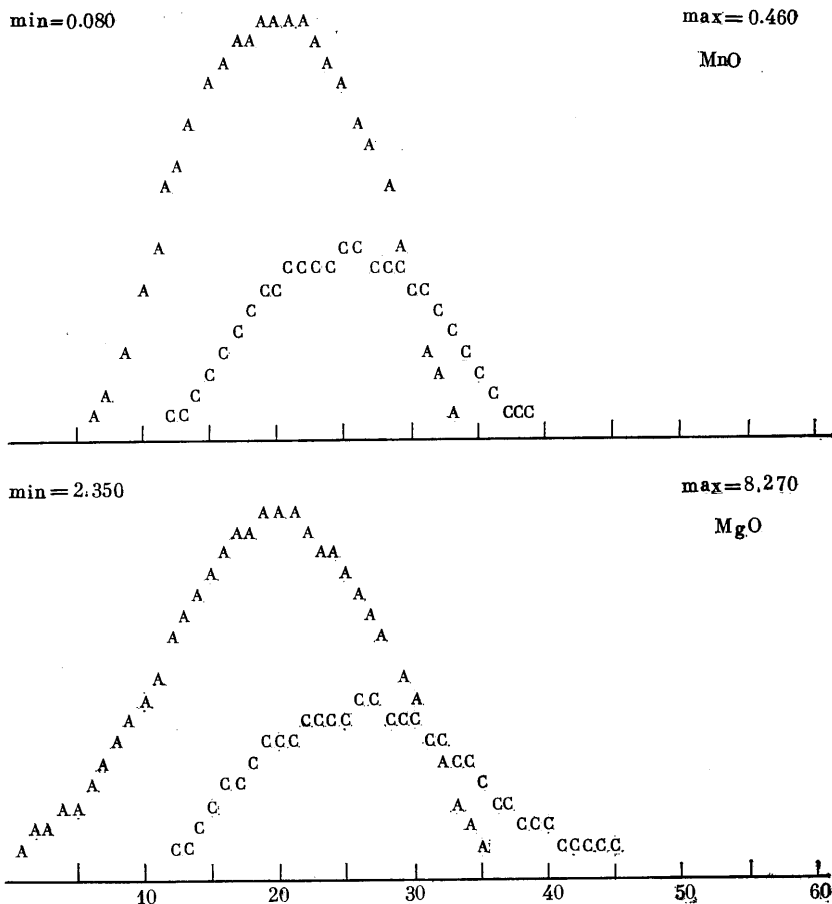


Рис. 5, б

значение коэффициента корреляции плотности и расстояния до кратера ($r=0,92$). Но самое главное — меняется знак корреляции. Корреляция становится положительной, т. е. с увеличением расстояния от станции опробования до источника поступления осадочного материала плотность осадков также увеличивается.

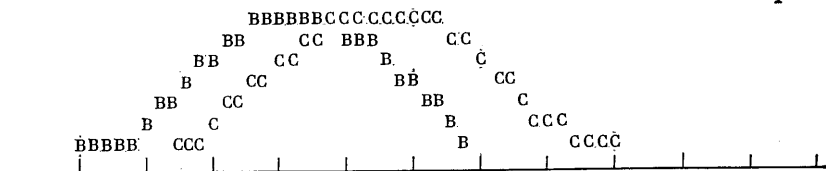
На первый взгляд такая зависимость кажется необъяснимой. Однако она становится понятной, если допустить существование в районе исследований, и именно вблизи станций БКП, мощного течения, огибающего остров с северной стороны и имеющего направление с юго-запада на северо-восток. При этом чем дальше станция находится от кратера или от берега, тем ближе она к осевой части течения и тем сильнее воздействие, оказываемое течением на осадок, в результате чего вымываются и уносятся более легкие и, естественно, концентрируются более тяжелые частицы, т. е. плотность МТ растет. Проверить существование этого течения предстоит в следующих экспедициях.

Помимо названных в пробах МТ, синхронных извержению, имеется четкая корреляционная зависимость как между плотностью и отдельными фракциями, так и фракций между собой, так как все они были из одного источника, т. е. сингенетичны. Вполне естественно, что в этих корреляционных взаимоотношениях участвует и *Md*. В режимных же пробах почти все ранее существовавшие связи либо полностью разрушены, либо сильно затушеваны. В то же время у некоторых параметров корреляционные связи со временем окрепли, как, например, у песчано-алевритовых и гравийных фракций ($r=-0,75$); это, очевидно, связано

min = 47.860

max = 52.980

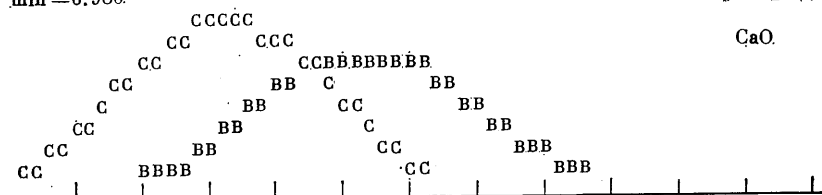
SiO₂



min = 6.980

max = 41.510

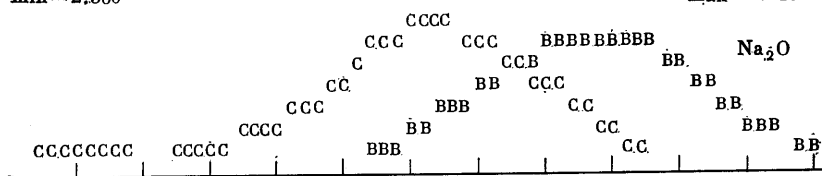
CaO



min = 2.360

max = 3.910

Na₂O



min = 1.540

max = 2.140

K₂O

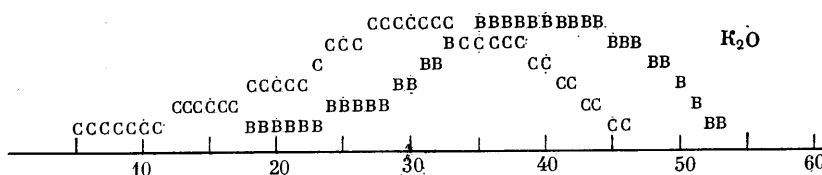


Рис. 5, в

с тем, что первые являются продуктом механической обработки вторых (истирание, окатывание и пр.).

Также необходимо отметить корреляционную связь коэффициента сортировки S_0 с глубиной ($r=0,97$). Казалось бы, что более логичной должна быть его связь с расстоянием до берега или кратера. Но в данном случае существующая связь является скорее всего опосредованной и объясняется, вероятно, не изменением глубины, а изменением направления и энергии течения. Поэтому сортировка МТ ухудшается в направлении с севера на юг в сторону динамической тени [8].

3. Минеральный состав тефры

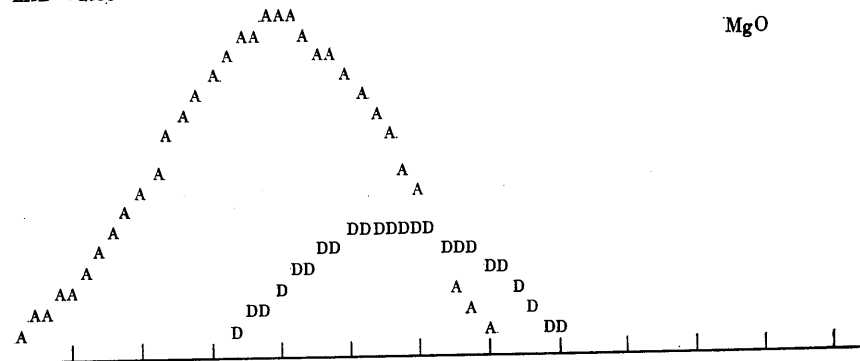
Твердые продукты извержения по своему составу относятся к пироксен-оливин-плаггиоклазовым базальтам с существенным преобладанием плаггиоклаза и резко подчиненным — клинопироксенов. Более подробная петрографическая характеристика продуктов извержения дана в статье Г. Б. Флерова и др. [17].

Вещественный состав гравийных и крупнопесчаной фракций. Все пробы тефры содержат ювенильный материал с незначительной примесью резургентных частиц. Ювенильный материал состоит из вулканического стекла и вкрапленников, представленных моноклинными пи-

min = 2.350

max = 8.270

MgO



min = 1.540

max = 2.140

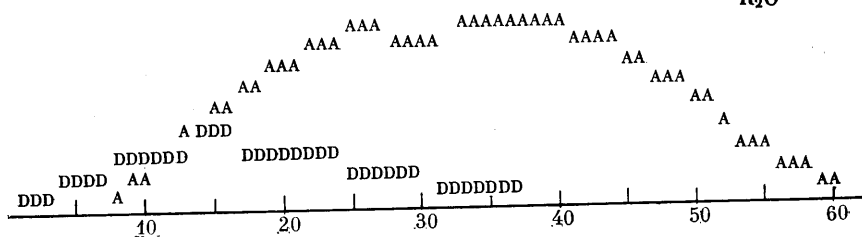
K₂O

Рис. 5, з

роксенами диопсид-авгитового ряда и плагиоклазами (An_{73}). Структура основной массы — гиалопилитовая, пилотокситовая или микролитовая. Микролиты *Pl* редкие, разобщенные, с различным удлинением — от 1 : 2 до 1 : 10. Крупные фенокристаллы плагиоклазов (№ 60—90) часто содержат включения вулканического стекла, зональность почти всегда отсутствует. Часто во вкраплениях и микролитах присутствуют хорошо ограниченные кристаллы оливина, которые по своему химическому составу относятся к хризолиту [17]. Оливин свежий, не затронутый вторичными процессами. Резургентный материал, основная масса которого приходится на фракцию среднего гравия (5—3 мм), представлен в основном обломками измененных эффузивных пород.

Минералогия мелкого песка. В иммерсионных препаратах изучалась фракция 0,25—0,10 мм как наиболее представительная в минеральном отношении [11].

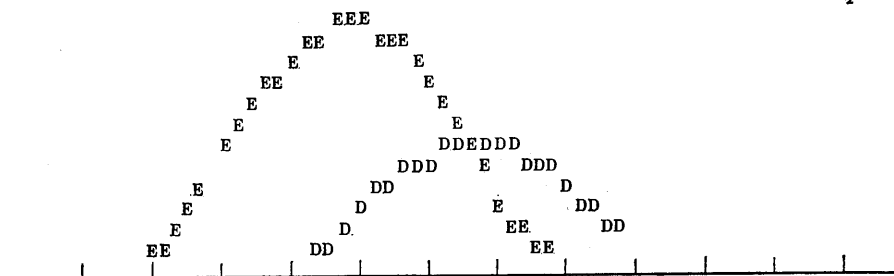
Главным компонентом тяжелой фракции (уд. вес $> 2,889$ г/см³) является вулканическое стекло. Обломки стекла характеризуются изометричными формами, а по оптическим свойствам могут быть разбиты на три группы. 1. Бурое, темно-бурое и почти черное гомогенное, иногда слабораскристаллизованное вулканическое стекло. Показатель преломления $1,567 > n > 1,559$. Стекло бурых оттенков часто содержит включения рудного вещества (магнетита), делающего стекло непрозрачным. Концентрации стекол этой группы колеблются от 5 до 84%. 2. Буровато-зеленое стекло. Показатель преломления 1,555—1,561. Концентрации в пробах от 3 до 80%. 3. Прозрачное бесцветное или слегка зеленоватое стекло. Встречается очень редко. Средний показатель $n_{cp} = 1,502$.

Вторым по значению компонентом тяжелой фракции являются минералы группы пироксенов, среди которых чаще встречается моноклинный пироксен. Кристаллы его имеют неправильную, иногда короткостолбчатую форму с плохо развитыми гранями. Преобладает зеленая и темно-зеленая окраски. Оптические свойства пироксенов зависят от их хими-

min = 0.340

max = 1.520

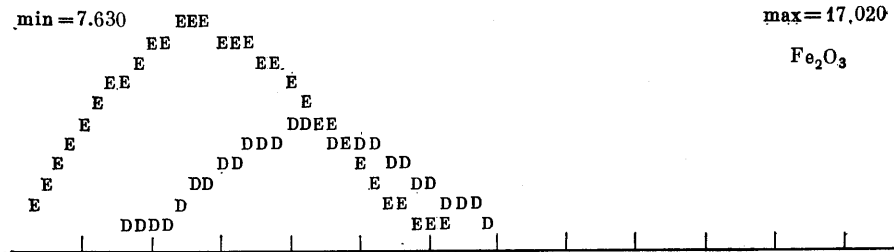
TiO₂



min = 7.630

max = 17.020

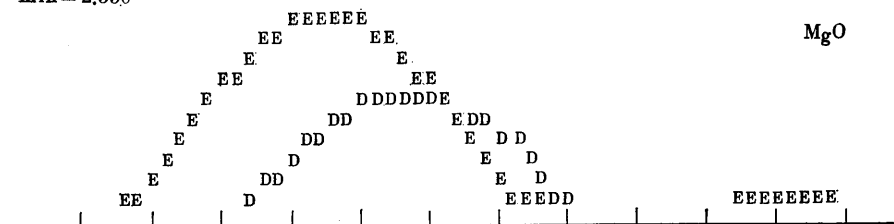
Fe₂O₃



min = 2.350

max = 8.270

MgO



min = 2.360

max = 3.910

Na₂O

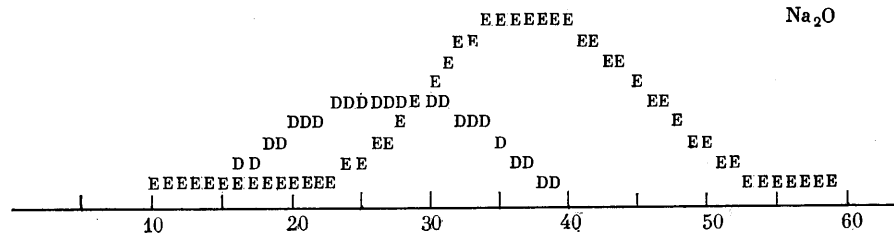


Рис. 5. Сглаженные парные гистограммы сравнения различных групп тефры по отдельным химическим элементам. а — СТ и МТ извержения 1981 г., б — СТ 1981 г. и режимные пробы МТ 1983 г., в — МТ 1981 г. и режимные пробы МТ 1983 г., г — СТ 1981 и 1972 гг, д — СТ 1972 г. и МТ 1934 и 1972 гг.; значения А—Е см. в табл. 1

ческого состава. $Ng = 1,710 - 1,720$; $+2V = 52 - 58^\circ$; $c Ng = 39 - 42^\circ$; удлинение положительное. По этим данным пироксен можно отнести к диоксид-авгитовому ряду. Ромбический пироксен в пробах присутствует в единичных зернах, окрашенных в зеленовато-бурые тона. От моноклинного отличается сильным плеохроизмом (по оси Ng — зеленоватая окраска, по Np — розовая). Минерал оптически отрицательный; $+2V = 56 - 59^\circ$; $Ng = 1,724 - 1,727$. Показатель преломления зависит от содержания $FeO + MnO$. По описанным оптическим свойствам ромбический пироксен может быть отнесен к гипертену.

Магнетит в пробах встречается либо в виде включений, либо в виде отдельных слабоокатанных кристаллов.

Результаты математической обработки. Проверка гипотезы нормальности показала, что все минералы распределены по площади нормально. Исключение составляет магнетит. По результатам минерального и химического анализов был проведен корреляционный анализ на 5%-ном уровне значимости ($\alpha=0,05$). В ходе анализа была выявлена прямая статистически значимая корреляционная зависимость между Ti и темно-бурым вулканическим стеклом ($r=0,57$) в пробах «сухой» тефры. Появление в этих же пробах оливина, слюды, турмалина и пр. связано с одновременным появлением резургентных обломков эффузивных пород ($r=0,89$). В пробах МТ выявлена прямая зависимость между концентрацией магнетита и расстоянием от кратера ($r=0,62$), что, очевидно, связано с шлихованием осадков придонным течением, активность которого возрастает с удалением от берега. В то же время с увеличением количества магнетита в пробах МТ пропорционально увеличивается содержание Mn ($r=0,99$).

Корреляция между концентрациями пироксенов и Al_2O_3 ($r=0,78$) объясняется тем, что с увеличением в пробах содержаний пироксена одновременно растет и содержание полевых шпатов. Такая синхронность в свою очередь определяется тем, что и те и другие содержатся в виде включений и микролитов в вулканическом стекле.

Необходимо также отметить, что МТ извержения 1981 г. существенно отличается от МТ предыдущих извержений содержанием пироксенов (28 и 5% соответственно).

4. Изменение химического состава тефры

По химическому составу (см. табл. 1) тефру извержения 1981 г. можно отнести к субщелочным высокоглиноземистым базальтам калиевой серии, причем на первый взгляд она практически идентична тефре предыдущего извержения — 1972 г. [2]. В то же время проверка гипотезы однородности этих двух групп, которая проводилась методом дискриминантных векторов (см. табл. 2; рис. 4), показала их существенное различие ($D=4,517$). Для выяснения сущности этого различия была сделана проверка этой же гипотезы на уровне отдельных химических элементов. В результате проведенного анализа стало ясно, что базальты последних двух извержений отличаются друг от друга только содержаниями Mg и K , которые и обуславливают ту статистически значимую разницу, которая была выявлена при дискриминантном анализе. СТ извержения 1981 г. отличается (см. табл. 1; рис. 5) повышенным содержанием K_2O (1,87 против 1,69%) и пониженным — MgO (3,96 против 5,04%).

Для выяснения характера и величины изменений в химсоставе, которые произошли с тефрой под воздействием морской воды, с помощью дискриминантного анализа проводилось сравнение трех групп проб: СТ извержения 1981 г. (А); МТ извержения 1981 г. (В); МТ режимных проб, отобранных в 1983 г. (С).

Была также проведена проверка гипотезы однородности этих же групп по отдельным компонентам. Дискриминантный анализ показал (см. табл. 2), что группы А — В и А — С значительно отличаются внутри этих пар друг от друга. И в то же время группы В и С практически идентичны, т. е. наиболее существенные изменения произошли с тефрой сразу же после ее попадания в морскую воду. Анализируя результаты сравнения на уровне отдельных химических элементов, можно предположить следующую схему происшедших изменений. На первой стадии, т. е. сразу же после попадания тефры в морскую воду, в ней уменьшились концентрации Fe и Ca . В то же время увеличивались концентрации Mg и Na . В дальнейшем содержания железа в осадках опять возрастали и к моменту отбора режимных проб МТ (1983 г.) становились равными первоначальному. То же происходило с Na и K , концентрации которых воз-

Таблица 1

Средний химический состав различных групп тефры

Группа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
A. «Сухая» тефра 1981 г.	49,91	1,03	18,86	10,77	0,19	3,96	9,74	3,12	1,87
B. «Мокрая» тефра 1981 г.	49,42	0,96	19,48	10,25	0,21	4,48	8,88	3,53	1,93
C. Режимные пробы МТ, отобранные в 1983 г.	50,12	0,93	18,65	11,28	0,23	4,87	7,92	3,07	1,81
D. «Сухая» тефра 1972 г.	49,43	1,00	18,96	10,59	0,19	5,04	9,46	2,98	1,69
E. «Мокрая» тефра предыдущих извержений	49,71	0,78	18,17	9,32	0,24	4,71	9,21	3,32	1,71

Примечание. А — выборка из 18 анализов; В — выборка из 14 анализов; С — выборка из 13 анализов; D — выборка из 10 анализов; E — выборка из 12 анализов.

Таблица 2

Результаты дискриминантного анализа данных силикатного анализа различных групп тефры

Сравниваемые группы тефры	Дискриминантные числа		F-критерий	Различия по отдельным элементам							
	1	2		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O
A—B	3,882	3,664	6,41 2,49				+		+	+	+
A—C	3,816	3,437	7,09 2,46					+	+	+	
A—D	4,517	3,861	6,74 2,59						+		
B—C	2,878	2,512	1,82 3,68	+						+	+
B—E	4,703	3,242	5,90 3,02				Не определялись				
D—E	6,843	4,455	10,41 3,39	+			+		+		+

Примечание. В графе F — критерий в знаменателе указано критическое значение при 5%-ном уровне значимости ($\alpha = 0,05$). Значения A — E см. в табл. 1.

вращались к изначальным значениям. К этому же моменту незначительно увеличивалось содержание Mn. Рост его концентрации, возможно, был связан с диагенетическими процессами [14] и стал заметным только при сравнении групп A и C. Содержание Mg в осадках продолжало увеличиваться, правда, уже с меньшей скоростью.

Дж. Мейнард в своей работе (10) приводит данные по взаимодействию горячей морской воды с базальтовым стеклом. Эксперименты проводились при $T = 300^\circ \text{C}$. Отношение веса воды и породы в системе было равным 10 : 1. Результаты экспериментов почти полностью совпадают со сказанным выше и данными, приведенными в табл. 1, 2. Разница между результатами незначительна и заключается только в масштабах явлений, т. е. в количествах извлеченного вещества, что объясняется, вероятно, тем, что экспериментальные работы проводились в условиях повышенной температуры. Дж. Мейнард считает, что при извлечении тяжелых металлов из базальтов важную роль играют два фактора: температура и отношение вода/порода. В условиях высоких температур ($> 400^\circ \text{C}$) в морской воде начинают образовываться комплексные хлоридные соединения металлов, при этом значительная часть их металли-

Коэффициенты корреляции гранулометрических фракций и химических компонентов тefры

№	Анализируемые параметры	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
		12	13	14	15	16	17	18	19	20
МТ современного извержения										
1	Уд. вес	0,45	-0,08	0,10	0,08	-0,11	0,39	-0,01	-0,11	-0,06
2	>10 мм	0,32	-0,28	0,36	0,56	-0,32	-0,27	-0,40	-0,02	0,25
3	10-7	0,33	-0,24	0,42	0,36	-0,38	-0,28	-0,40	-0,18	0,28
4	7-5	0,39	0,30	0,34	0,65	-0,49	-0,25	-0,46	-0,04	0,32
5	5-3	0,47	-0,33	0,22	0,83	-0,39	-0,12	-0,51	0,02	0,24
6	3-1	0,22	0,28	-0,69	0,20	0,38	0,56	-0,31	-0,08	-0,65
7	1-0,5	-0,39	0,34	0,03	-0,86	0,34	0,16	0,67	0,04	-0,09
8	0,5-0,25	-0,61	0,07	0,02	-0,80	0,15	-0,16	0,60	0,03	0,09
9	0,25-0,1	-0,45	-0,23	-0,10	0,09	-0,14	-0,75	-0,07	0,30	0,22
10	0,1-0,05	-0,56	-0,08	-0,34	0,15	0,41	-0,59	0,16	0,72	-0,20
11	0,05-0,01	-0,19	0,02	-0,27	-0,18	0,34	-0,28	0,15	-0,15	0,24
12	SiO ₂	1,0	0,20	0,07	0,34	-0,64	0,28	-0,73	-0,50	0,19
13	TiO ₂		1,00	-0,53	-0,21	-0,32	-0,19	-0,12	0,32	0,36
14	Al ₂ O ₃			1,00	-0,19	-0,14	0,07	0,38	-0,29	0,31
15	Fe ₂ O ₃				1,00	-0,09	0,18	-0,52	0,10	0,08
16	MnO					1,00	0,38	0,46	0,12	-0,81
17	MgO						1,00	-0,07	-0,58	-0,55
18	CaO							1,00	0,43	0,10
19	Na ₂ O								1,00	0,30
20	K ₂ O									1,00

Режимные пробы МТ (1983 г.)

1	Уд. вес	-0,60	0,54	-0,87	0,87	0,85	0,59	-0,77	-0,74	-0,68
2	>10 мм	-0,26	0,05	-0,02	-0,03	-0,04	-0,02	0,61	0,34	0,21
3	10-7	-0,15	-0,12	0,09	-0,18	-0,14	0,09	0,58	0,37	0,23
4	7-5	-0,04	0,02	0,10	-0,17	-0,23	0,06	0,57	0,40	0,33
5	5-3	-0,16	0,06	0,09	-0,13	-0,14	-0,10	0,65	0,46	0,32
6	3-1	0,35	0,02	0,27	-0,03	-0,04	-0,66	-0,15	-0,50	0,50
7	1-0,5	0,06	-0,07	-0,31	0,31	0,48	0,29	-0,88	-0,56	-0,33
8	0,5-0,25	-0,25	0,15	-0,34	0,19	0,03	0,65	-0,25	-0,70	-0,68
9	0,25-0,1	-0,13	0,02	0,10	-0,23	-0,33	0,17	0,32	-0,27	-0,38
10	0,1-0,05	0,03	-0,08	0,28	-0,35	-0,30	-0,23	0,39	0,00	-0,08
11	0,05-0,01	0,08	-0,43	0,23	-0,31	-0,21	-0,09	0,26	-0,17	-0,12
12	SiO ₂	1,00	-0,69	0,77	-0,73	-0,52	-0,58	0,05	0,53	0,83
13	TiO ₂		1,00	-0,68	0,70	0,47	0,30	-0,20	-0,39	-0,55
14	Al ₂ O ₃			1,00	-0,97	-0,87	-0,65	0,58	0,83	0,77
15	Fe ₂ O ₃				1,00	0,90	0,47	-0,61	-0,73	-0,67
16	MnO					1,00	0,31	-0,73	0,70	-0,48
17	MgO						1,00	-0,30	-0,72	-0,79
18	CaO							1,00	0,67	0,33
19	Na ₂ O								1,00	0,82
20	K ₂ O									1,0

Примечание. В таблице выделены коэффициенты, значимые на 5%-ном уровне ($\alpha=0,05$).

ческой составляющей выщелачивается из базальтов. При более низких температурах ($\leq 300^\circ\text{C}$) необходимы более низкие значения pH (≤ 5), которые обеспечиваются высокими содержаниями растворенного в морской воде Mg^{2+} . В связи со всем вышеизложенным можно сделать предположение, что свежие базальты начинают взаимодействовать с морской водой и в обычных условиях, или, если следовать Дж. Мейнард, достаточным оказывается большое значение отношения веса воды к породе. При этом характер их взаимодействия не изменяется, если не считать незначительного уменьшения скорости и масштаба этого взаимодействия.

Для выяснения характера взаимосвязей между отдельными химическими элементами, а также для выявления связей химических элементов с гранулометрическими параметрами внутри различных групп

тефры был проведен корреляционный анализ. Анализ проводился на 5%-ном уровне значимости ($\alpha=0,05$). Как видно из таблицы (табл. 3, а), в свежих МТ корреляционные связи существуют только между отдельными химическими элементами и определенными гранулометрическими фракциями. Видимой зависимости между химическими элементами нет. Такой характер корреляции обусловлен, по-видимому, «доводными» условиями, при которых химический состав тефры зависел только от определенного набора минералов; последние в свою очередь были связаны с определенными гранулометрическими фракциями, образовавшимися в результате взрыва и последующих выбросов, и в конечном счете с определенными кристаллографическими формами, ростом и размерами кристаллов и способностью их раскалываться при взрыве. Так, например, корреляционная зависимость между Fe_2O_3 и гравийными фракциями обусловлена наличием именно в этих фракциях лимонита (резургентный материал). Вероятно, существуют корреляционные связи и между отдельными элементами, но только внутри определенных фракций и связанных с ними минеральных ассоциаций, и поэтому в приведенном варианте анализа они не проявлены. В дальнейшем, при продолжительном нахождении тефры в морской воде, отдельные фракции и связанные с ними минералы становятся как бы единым целым. Устанавливаются новые химические связи, поведение отдельных элементов становится взаимозависимым. Кроме того, происходит еще и дробление тефры с последующей механической дифференциацией (шлихованием), при которой образуются большие концентрации отдельных минералов. Так, например, (см. табл. 3, б) коэффициенты корреляции $r_{14, 12}=0,77$; $r_{19, 12}=0,53$; $r_{20, 12}=0,83$; $r_{18, 14}=0,58$; $r_{20, 14}=0,77$; $r_{19, 14}=0,83$ говорят о концентрации алюмосиликатных минералов (полевых шпатов), а коэффициенты корреляции между TiO_2 , Fe_2O_3 и Fe_2O_3 и MnO — о концентрации магнетита. Концентрирование названных минералов связано с дроблением тефры гравийных фракций, состоящих из ювенильного стекла, и последующим шлихованием полевых шпатов и магнетита, входящих в его состав в виде включений.

Заключение

Период I фазы извержения (27.IV.—1.V.1981), в ходе которой произошла очистка кратера и весь материал, заполнявший кратер, был выброшен в северном и северо-восточном направлениях (см. рис. 1, б), отражен в пробах МТ, отобранных к северу от острова. В них наблюдаются: а) наибольшие концентрации резургентного материала (до 89%); б) максимальные концентрации наиболее крупнозернистых частиц (>10 мм); в) максимальные значения Md тефры (3,09 мм).

В дальнейшем, вплоть до окончания извержения, пирокластический материал выбрасывался в основном в юго-восточном и западном направлениях, о чем свидетельствуют результаты дешифрирования космических снимков [15] (см. рис. 1, в), наблюдения, проводившиеся на НИС «Вулканолог» в зонах пеплопада, а также наибольшие мощности свежих вулканогенных осадков на этих направлениях (как, например, на ст. 5, где мощность МТ составляла >300 мм).

Тефра, синхронная извержению, имела следующий минеральный состав: тяжелая фракция — вулканическое стекло (75%), пироксены (15%), магнетит (2%), резургентный материал (8%); легкая фракция — вулканическое стекло (85%), полевые шпаты (10%).

В районе исследований выделено шесть типов донных осадков — от среднего вулканогенного гравия до крупного вулканогенного алеврита.

При математической обработке анализов были получены следующие результаты.

1. Удалось выделить группу МТ, относящуюся к предыдущим извержениям (1933 и 1972 гг.).

2. На основании выделенной прямой корреляции между удельным весом осадков и расстоянием до кратера, S_0 и глубиной, а также между концентрацией магнетита и расстоянием до кратера сделано предположение о существовании в районе острова мощного придонного течения, имеющего направление с юга-запада на северо-восток и огибающего остров с северной стороны.

3. Выяснено, что СТ извержения 1981 г. отличаются от СТ извержения 1972 г. повышенным содержанием K_2O (1,87 против 1,69%) и пониженным содержанием MgO (3,69 против 5,04%). А мокрая тефра — более высоким содержанием пироксенов (28 против 5%).

4. Выявлены некоторые существенные изменения в химсоставе тефры, происходящие практически сразу же после ее попадания в морскую воду. При этом уменьшаются концентрации Fe и Ca и увеличиваются концентрации Mg и Na. В дальнейшем содержания этих элементов, за исключением Mg, становятся равными первоначальному. Приведенные данные почти полностью совпадают с данными экспериментальных исследований, описанных Дж. Мейнардом [10].

Таким образом, нашими полевыми наблюдениями показано, что свежие базальты способны взаимодействовать с морской водой и при обычных пониженных температурах (3—6° С).

5. В результате извержения 1981 г. в донные осадки у о-ва Атласова в составе тефры поступило Fe — $2,26 \cdot 10^6$ т, Mn — $0,045 \cdot 10^6$ т, Al — $2,99 \cdot 10^6$ т, а в морскую воду — $0,01 \cdot 10^6$ т Fe и $0,018 \cdot 10^6$ Ca.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории подводного вулканизма, участникам 11-, 15- и 17-го рейсов НИС «Вулканолог» за помощь, оказанную при проведении литологических работ, Г. П. Авдейко за помощь при написании и редактировании данной работы, А. Н. Иваненко и С. Е. Жаринову за консультации и помощь при проведении математической обработки результатов лабораторных анализов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безруков П. Л., Лисицын А. П. Классификация осадков современных водоемов//Тр. ИО АН СССР. 1960. Т. 32. С. 3—14.
2. Будников В. А., Малеев Е. Ф. Пирокластика Олимпийского прорыва вулкана Алаид извержения 1972 г.//Бюл. вулканол. ст. 1973. № 53. С. 65—76.
3. Горицкий Ю. А., Жаринов С. Е., Масуренков Ю. П. Диалоговая система «Вулканит» и ее применение для анализа и классификации петрохимической информации//Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 3—24.
4. Гриффитс Дж. Научные методы исследования осадочных пород. М.: Мир, 1971.
5. Левис Дж. Статистика и анализ геологических данных. М.: Мир, 1977. 574 с.
6. Жаринов С. Е. Диалоговая система анализа многомерных данных «Вулканит». Описание алгоритмов. Препринт. Владивосток, 1984. С. 16.
7. Лисицын А. П., Петелин В. П. К методике предварительной обработки проб морских осадков в судовых условиях//Тр. ИО АН СССР. 1956. Т. 19. С. 240—251.
8. Лисицын А. П. Осадочное тело океана//Геология дна океанов по данным глубоководного бурения. М.: Наука, 1984. С. 12—61.
9. Малеев Е. Ф. Вулканиты. М.: Недра, 1980. 240 с.
10. Мейнард Дж. Геохимия осадочных рудных месторождений. М.: Мир, 1985. 360 с.
11. Методика изучения вещественного состава донных отложений. Л., 1977. 56 с.
12. Рожков Г. Ф. Геологическая интерпретация гранулометрических параметров по данным дробного ситового анализа//Гранулометрический анализ в геологии. М., 1978. С. 5—25.
13. Сазонов А. П., Гавриленко Г. М. Влияние извержения вулкана Алаид на осадкообразование в районе о-ва Атласова (Курильские острова)//Геология океанов и морей. М., 1984. С. 163—164.
14. Страхов Н. М. Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. М.: Наука, 1976. 300 с.
15. Федотов С. А., Иванов Б. В., Авдейко Г. П. и др. Извержение вулкана Алаид в 1981 г.//Вулканология и сейсмология. 1981. № 5. С. 82—87.
16. Федотов С. А., Иванов Б. В., Флеров Г. Б. и др. Изучение извержения вулкана Алаид (Курильские острова) в 1981 г.//Вулканология и сейсмология, 1982. № 6.
17. Флеров Г. Б., Иванов Б. В., Андреев В. Н. и др. Вещественный состав продуктов извержения вулкана Алаид в 1981 г.//Вулканология и сейсмология. 1982. № 6.