

А. ААЛОЭ, Рээт ТИИРМАА

РАСПЫЛЕННОЕ МЕТЕОРИТНОЕ И ИМПАКТНОЕ ВЕЩЕСТВО НА КРАТЕРНОМ ПОЛЕ КААЛИ

Кратеры Каали являются самыми молодыми метеоритными ударно-взрывными кратерами в СССР. Они образовались на рубеже VII и VI столетий до нашей эры (Aaloe и др., 1975), поэтому относительно хорошо сохранены не только морфология и структура их, но и метеоритное вещество и своеобразные импактиты, захороненные в линзах брекчи в кратерах и в грунте кратерного поля.

Систематический сбор метеоритного вещества в Каали начался в 1955 г. В этом же году были открыты первые импактные частицы, но их природа долгое время оставалась невыясненной.

С 1975 г. авторы настоящей статьи приступили к более подробному исследованию не только метеоритных осколков, но и типов и распространения распыленного (мелкодисперсного) вещества, связанного с падением и взрывом метеорита Каали. В данной работе анализируются первые результаты переработки собранного материала.

Грунтовые пробы весом 2—3 кг отбирались из нижней части почвенного слоя. В полевых условиях пробы промывались для удаления гумуса, растительных остатков и глинистого вещества. Более крупные гальки и обломки удалялись с помощью сит диаметром отверстий 5 мм. Затем пробы подвергались сухой магнитной сепарации. Поиски немагнитных импактитов проводились в лабораторных условиях.

Во всех пробах обнаружен в разном количестве земной магнетит. Это обстоятельство значительно усложняет выделение метеоритного и импактного материалов под бинокляром. Кроме того, необходимо учитывать естественный фон внеземной пыли, а также возможность попадания в пробы искусственных частиц, так как окрестности Каали уже более 2000 лет являются пахотной землей. Например, в грунте около мастерских совхоза Кылъяла найдено большое количество шариков, которые возникли при сварке металла.

Метеорит Каали — железный (грубоструктурный октаэдрит группы IA). Большая часть его находилась в атмосфере и при взрыве превратилась в магнетитовую метеоритную пыль, остальная часть раскололась на мелкие осколки или переплавилась, образуя вместе с переплавленным грунтом импактиты. Факт, что весь собранный в Каали материал очень мелкий, указывает в первую очередь на высокую скорость метеорита при ударе (до 21 км/сек). Кроме того, вес железных осколков заметно уменьшился вследствие окисления.

Доля распыленного вещества (по сравнению с более крупными метеоритными осколками) небольшая — 10—20% из всего собранного материала, т. е. около 5—10 г на 1 м³ грунта, но ареал его рассеивания значительно превышает распространение осколков,

Чтобы облегчить описание отдельных типов распыленного метеоритного и импактного вещества кратерного поля Каали, составлена их предварительная классификация.

- | | | |
|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1. Метеоритное железо | | { Микрометеориты |
| | | { Метеоритные микроосколки |
| 2. Метеоритная пыль | | { Магнетитовые шарики |
| | | { Магнетитовые пластинки |
| 3. Импактиты | { А. Магнетито- силикатные | { Яниты |
| | | { Корочки |
| | { Б. Силикатные | { Силикатные шарики |
| | | { Микроиргизиты |

Метеоритное железо

Под названием метеоритное железо рассматриваются неизменные или лишь частично превращенные в магнетит частицы раздробленного метеоритного тела. На кратерном поле Каали метеоритное железо составляет около 90% из всего собранного метеоритного и импактного материала. Осколки крупнее 1000 мкм в данной работе не рассматривались.

Микрометеориты. По Е. Л. Кринову (1963), микрометеоритами называются мельчайшие осколки метеоритного тела, отколовшиеся при дроблении его во время движения в атмосфере.

На кратерном поле Каали микрометеориты довольно многочисленны и встречаются почти во всех грунтовых пробах. Площадное распределение их неравномерное, без видимой закономерности. В кратерах микрометеориты не найдены. Среднее количество их в грунтовых пробах 150—300 мг/м³. Их размеры 500—1200 мкм, вес колеблется в пределах 0,1—1 мг. По форме микрометеориты неправильные (таблица I, фиг. 2 и 3), их поверхность вогнутая, местами имеются заметные выступы. Некоторые неровности можно принять за микроремаглипты. Все микрометеориты несут следы оплавления. Они покрыты гладкой или матовой темно-серой коркой плавления. Края и углы сглаженные. Местами встречаются налеты ржавчины.

Возможно, что некоторая часть микрометеоритов вторичная, т. е. они образовались при взрыве из мелких раскаленных осколков метеоритного железа, выброшенных с высокой скоростью из кратеров. Об этом говорят находки микрометеоритов далеко перед кратерным полем.

Метеоритные микроосколки диаметрами меньше 1000 мкм и весом до нескольких миллиграмм образуют основную часть собранного в Каали мелкодисперсного вещества.

Как осколки, так и микроосколки метеорита Каали в разной степени деформированы (таблица I, фиг. 1). Их форма неправильная, края и углы резкие. Они сильно окисленные и покрыты толстой коркой суглинистого материала, сцементированного гидроокислами железа. Вес корки часто превышает вес самого осколка.

Распределение микроосколков на кратерном поле неравномерное. В кратерах и вблизи их количество микроосколков достигает нескольких грамм на 1 м³, дальше от кратеров — меньше грамма на 1 м³.

Метеоритная пыль

По возникновению метеоритная пыль считается гетерогенной. Общей чертой ее является то, что ее зерна образовались из переплавленных или перераскаленных частиц метеоритного железа, превращенных в магнетит, а также при конденсации металлических паров. Термин метеоритная пыль следует считать условным, так как кроме пылеватых (алевритовых) частиц (0,01—0,1 мм) она включает и крупные пелитовые (0,005—0,001 мм) и песчаные (0,1—1,0 мм) зерна.

Магнетитовые шарики встречаются в разном количестве во всех грунтовых пробах, собранных не только с кратерного поля, но и далеко за пределами его. Их среднее количество в 1 м³ грунта составляет 2—3 мг. Размеры отдельных частиц достигают 5—1000 мкм. Приведенные цифры являются условными, так как почти во всех пробах рядом с метеоритной пылью обнаружены и яннты, более мелкие из которых внешне не отличимы от магнетитовых шариков. Разделить их по составу можно лишь в результате минералогического или микрохимического анализа. В основном яннты характеризуются относительно крупными размерами и, так как Е. Л. Кринов (1963) называет метеоритной (метеорной) пылью частицы размерами от 4 до 800 мкм, авторы настоящей статьи принимали последнюю цифру при расчетах за условную границу между магнетитовыми и магнетито-силикатными шариками.

Морфологически магнетитовые шарики правильно сферические, реже каплевидные или эллипсоидные (таблица I, фиг. 4). Обнаружены единичные целые или разбитые колбочки и двояковыпуклые зерна. Нередко к более крупным шарикам прилеплены один или несколько мелких. Найдено и одно двойниковое зерно, состоящее из двух сросшихся шариков диаметром около 300 мкм.

Поверхность магнетитовых шариков имеет темно-серый и синевато-черный цвет. Она гладкая с металлическим блеском или матовая, иногда шероховатая. Внутренность зерен в большинстве случаев полая, на внутренних стенках их заметны мелкие округлые лунки — остатки газовых пузырьков. Толщина стенок обычно составляет 25—30% радиуса шарика. Шарики бывают с пенистой структурой и плотные. Более крупные из них имеют обычно металлическое ядро. Такие зерна рассматриваются как переход от метеоритной пыли в микрометеориты.

Основная часть магнетитовых шариков — это частицы пылевого следа, т. е. они представляют собой продукт абляции метеоритного тела в атмосфере. Другая часть образовалась, явно, при взрыве из брызг расплавленного металла, а самые мелкие шарики возникли при конденсации металлических паров.

Магнетитовые пластинки остроугольные, плоские; иногда гнутые тонкие пластинки не имеют признаков плавления (таблица I, фиг. 7). Поперечник самых крупных пластинок доходит до 2000 мкм, а обычно он меньше 1000 мкм. Преобладающая толщина пластинок 100—200 мкм. Поверхность магнетитовых пластинок серого цвета; они матовые, шероховатые, редко с металлическим блеском. Поверхность в большинстве случаев в разной степени штрихованная, часто бесспорядочно неровная, иногда гладкая. В отдельных случаях отмечается частичное переплавление пластинок (таблица I, фиг. 6, нижние фигуры). Появляются следы газовых пузырьков, утолщенные сглаженные края. Это явный переход в корочки.

Генезис магнетитовых пластинок неясен. Они, явно, связаны с

падением метеорита, так как эти частицы распространяются в кратерах и в окрестностях Қаали. Такие же пластинки найдены и в песчаниках нижнего кембрия в керне скв. Виру-Роэла на глубине 324—326 м, где обнаружено концентрирование метеоритной пыли (Вийдинг, 1965). Возможно, что они возникли из периферических раскаленных частей метеорита, в частности камассита. Растрескивание последнего хорошо видно (см. таблицу I, фиг. 9), при этом промежутки между отдельными трещинами более или менее равны толщине магнетитовых пластинок. Содержание никеля и кобальта в пластинках выше, чем в эталонной пробе, изготовленной из камассита. Это объясняется тем, что для спектрального анализа было использовано большее количество пластинок, а среди них могли быть и такие, которые состоят из рабтита или содержат тэнит.

Магнетитовые пластинки встречаются как в кратерах, так и в окрестностях.

Импактиты

Импактиты — продукты ударного метаморфизма — характеризуют в первую очередь крупные, многокилометровые метеоритные кратеры и астроблемы. Энергия ударов метеоритов в Қаали была невелика. Поэтому и импактиты в Қаали являются редкими, своеобразными и представлены мелкими зернами. По вещественному составу они разделяются на две группы: магнетито-силикатные и силикатные.

Магнетито-силикатные импактиты

Эти импактиты возникли при взрыве в результате перемешивания расплавленных земного силикатного и метеоритного веществ. Их характеризует широкое колебание соотношения названных компонентов.

Яниты (магнетито-силикатные шарики) самый распространенный тип импактитов в Қаали. Впервые они были найдены на кратерном поле Қаали и лишь в 1967 г. открыты в Якутии, в бассейне р. Яна (Астапович, Переяслов, 1970). В Қаали среди магнитной фракции из грунтовых проб, взятых около кратера № 5, выделялись неожиданно крупные субсферические зерна диаметром более 1 мм. А. Аалоз (Aaloe, 1958) считал, что они возникли при взрыве метеорита из металлических брызг. Два шарика были минеграфически изучены И. А. Юдиным. Он установил, что основная часть (70—80%) их представляет собой силикатное вещество, которое содержит изометрические зерна (размерами до 50 мкм) или мелкие скелетные кристаллики магнетита, похожие на дендриты размером до 1—2 мкм в количестве 20—30% (Юдин, Смышляев, 1963). Из этого И. А. Юдин сделал вывод, что названные шарики не являются метеоритными. Однако нет сомнения, что они возникли при взрыве из смеси переплавленного грунта и метеоритного вещества. На это указывают многие факты, среди них и тот, что распределение янитов вокруг кратеров № 4 и 5 в основном совпадает с распределением метеоритных осколков. Содержание составляющих силикатного и магнетитового компонентов колеблется в больших пределах до почти полного отсутствия одного или другого. Некоторые по форме типичные яниты оказались немагнитными.

Самые мелкие яниты имеют диаметр 250 мкм. Самый крупный янит субсферической формы найден около кратера № 5. Его диаметр достигает 6600 мкм (таблица II, фиг. 3). В большинстве случаев их размеры

350—1000 мкм. Форма янитов разнообразна. Мелкие яниты в основном сферические, каплевидные, эллипсоидные или двояковыпуклые, иногда неправильные. Крупные зерна (диаметром более 1000 мкм) имеют преобладающе неправильную (таблица II, фиг. 2), реже субсферическую форму (таблица II, фиг. 3 и 6). Нередко яниты деформированы и потрескавшиеся (таблица II, фиг. 2). Во многих случаях найдены лишь их осколки (таблица II, фиг. 5). Часто наблюдается срастание зерен разной формы и величины (таблица II, фиг. 6).

Яниты имеют темно-серый, иногда с синеватым оттенком цвет. Преобладает матовая, шероховатая поверхность, только у самых мелких шариков она гладкая, с металлическим блеском. Наблюдаются тонкие налеты ржавчины (таблица II, фиг. 4). Внутри мелкие яниты обычно полые, более крупные имеют пенистую структуру. Бывают и случаи, когда к поверхности янитов прилипают мелкие, частично переплавленные зерна силикатных минералов, в частности кварца.

К янитам относятся и железисто-силикатные агрегаты — магнитные, неправильно шаровидные, местами каплевидные или неправильные образования (таблица II, фиг. 10), состоящие из зерен разных минералов, сцементированных окислами и гидроокислами железа. Их структура разноминерально-псаммитовая, полимиктовая. Преобладают зерна кварца и полевых шпатов. В некоторых случаях края силикатов частично оплавлены. Поверхность железисто-силикатных агрегатов шероховатая и лимонитизированная, коричневатого-бурого цвета.

Количество янитов в общем случае в пределах 10—50 мг/м³. Вблизи мелких кратеров оно местами превышает 200 мг/м³.

Корочки как самый гетерогенный тип магнетито-силикатных импактитов образуют четкие переходы с янитами, метеоритными осколками, а также с магнетитовыми пластинками. Поэтому их состав, как и у янитов, колеблется в больших пределах — встречаются немагнитные, т. е. состоящие из силикатного вещества, а также чисто магнетитовые корочки. Соотношения силикатов и магнетита в большинстве случаев колеблется от 2:1 до 4:1. Среди корочек около кратера № 5 найден и обломок коры плавления с магнетитовым шариком (таблица I, фиг. 5).

Найденные корочки пластинкообразные, обычно в разной степени выпуклые (таблица II, фиг. 1). Преимущественно они остроугольные, с четкими следами изломов на краях. В некоторых случаях края корочек носят следы плавления. Размеры корочек достигают 4000 мкм, толщина варьирует обычно в пределах 100—600 мкм. Их поверхность неровная, бугристая, часто с заметными выступами. Нередко встречаются следы газовых пузырьков. Корочки бывают гладкими, с металлическим блеском, шероховатыми или матовыми. Часто встречаются тонкие налеты ржавчины или они сильно лимонитизированы.

Большинство корочек возникло при взрыве из жидкого расплава

ТАБЛИЦА I

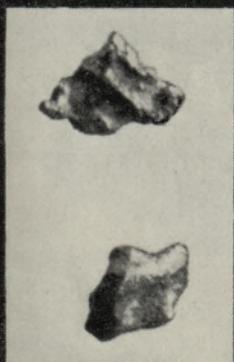
Фиг. 1. Микроосколки метеоритного железа, $\times 10$. Фиг. 2. Микрометеориты, собранные около кратера № 4, $\times 10$. Фиг. 3. Два микрометеорита весом 0,25 мг (верхний) и 0,4 мг (нижний) с ясными следами атмосферной обработки, $\times 15$. Фиг. 4. Магнетитовые шарики, $\times 10$. Фиг. 5. Осколок коры плавления метеорита с магнетитовым шариком, $\times 6$. Фиг. 6. Частично переплавленные магнетитовые пластинки, $\times 10$. Фиг. 7. Магнетитовые пластинки, $\times 10$. Фиг. 8. Частично переплавленные метеоритные осколки, $\times 6$. Фиг. 9. Спайность камасситовой палки в самом крупном осколке метеорита Каали, найденном в кратере № 5, $\times 6$.



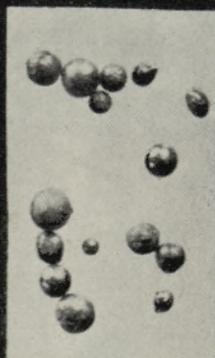
1



2



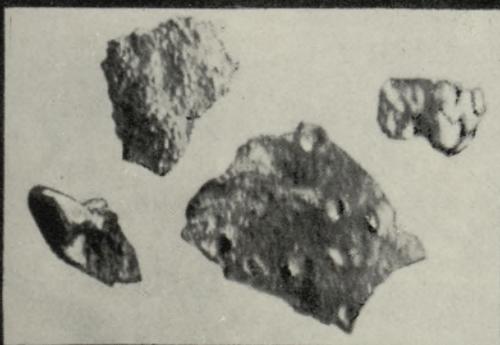
3



4



5



6



7



8



9



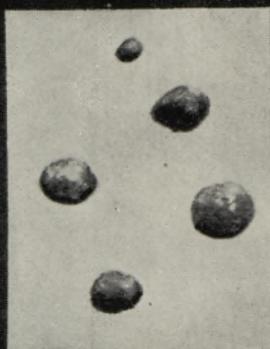
1



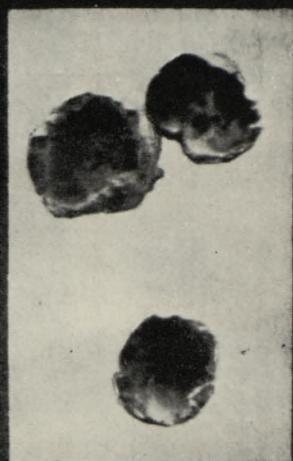
2



3



4



5



6



7



8



10



грунта и метеоритного железа. Основная часть корочек найдена вне кратеров. Их количество по сравнению с янитами или магнетитовыми пластинками незначительно.

Явный переход от метеоритных осколков в магнетито-силикатные корочки представляют частично переплавленные осколки, найденные единичными экземплярами.

Особый интерес представляет самый крупный экземпляр размерами $5,8 \times 7,8$ мм (таблица I, фиг. 8). У него один наиболее тонкий край (на фотографии левый) полностью превращен в магнетит. Он тонковогнутый с блестящей поверхностью, покрытый мельчайшими бугорками. Дальше блестящая поверхность постепенно переходит в матовую. Встречаются следы более крупных пузырьков. Местами магнетитовая кора разрушена и видно, что в средней части поверхности осколка она тонкая, меньше 0,1 мм. Более толстая часть, а также обратная сторона осколка сложены лимонитизированным метеоритным железом. У меньшего экземпляра (на снимке слева) в магнетит превращены лишь небольшие участки у края осколка.

Силикатные импактиты

По сравнению с остальными группами космического и импактного вещества силикатные импактиты в Каали относительно слабо изучены, так как их выделение из грунтовых проб под бинокляром очень трудоемко. Кроме того, в начале ученые обращали внимание только на магнитную фракцию, поскольку считалось, что силикатные образования в Каали или отсутствуют, или должны быть крайне редкими. Лишь в 1979 г. при пересмотре немагнитной фракции под бинокляром были найдены первые силикатные стекловидные шарики и микроиргизиты.

Силикатные шарики, по предварительным данным, встречаются на всем кратерном поле и в окрестностях его. Хотя их концентрация небольшая и общее содержание в 1 м^3 грунта меньше 1 мг , она выше фонового содержания внеземной пыли. Наибольшее количество силикатных шариков найдено вместе с микроиргизитами. Такая же ассоциация наблюдается в астроблеме Жаманшин. Поэтому и в данном случае силикатные шарики рассматриваются как возникшие при взрыве в результате переплавления силикатных минералов, содержащихся в четвертичных отложениях.

Диаметр силикатных шариков 5—200 мкм (таблица II, фиг. 7). Более мелкие из них диаметром менее 100 мкм; коричнево-желтые, просвечивающие, с гладкой блестящей поверхностью. Более крупные зерна имеют коричневатый цвет и матовую поверхность. Морфологически преобладают правильные шарики, реже встречаются каплевидные или эллипсоидные. Самые крупные зерна неправильно-сфериче-

ТАБЛИЦА II

Фиг. 1. Магнетитово-силикатные корочки, $\times 6$. Фиг. 2. Разные типы янитов (магнетитово-силикатных зерен), $\times 6$. Фиг. 3. Самый крупный субсферический янит, найденный около кратера № 5, $\times 6$. Фиг. 4. Неправильно-сферические янты, покрытые оболочкой лимонита, $\times 10$. Фиг. 5. Разбитые пустотелые янты, $\times 10$. Фиг. 6. Крупный субсферический янит с прилипшими мелкими шариками, $\times 6$. Фиг. 7. Силикатные шарики, $\times 10$. Фиг. 8. Микроиргизиты, $\times 13$. Фиг. 9. Пузырчатое стекло, осколки микроиргизитов, $\times 10$. Фиг. 10. Цементированные окислами и гидроокислами железа агрегаты силикатных минералов, $\times 6$.

ские. Их цвет темный и они образуют явный переход в микроиргизиты. Микроиргизиты. Иргизиты, описанные П. В. Флоренским (1977) как особый тип тектитов, открыты среди выбросов из кратера Жаманшин (Казахская ССР). Они имеют форму застывших брызг, капелек, жгутов и т. д. Иргизиты состоят из темного стекла. От «классических» тектитов они отличаются развитой пористой, нешироким распространением и отсутствием признаков прохождения длительной атмосферной траектории. Это характеризует и стекловидные частицы, собранные среди выбросов из кратеров Каали, и поэтому мы называем их не микротектитами, а микроиргизитами.

Размеры микроиргизитов редко превышают 1 мм. По форме они неправильные (таблица II, фиг. 8), сглаженные, без резких краев. Встречаются мелкие неровности, ямки, выступы и т. д. Их поверхность блестящая. Преобладает черный цвет, но заметны и зеленые и коричневатые оттенки. В большинстве случаев они непрозрачные, просвечивают только их тонкие осколки. Внутренняя структура каалиских микроиргизитов пузырчатая или пористая (таблица II, фиг. 9).

Заключение

1. Около 90% из внеземного вещества в Каали сложено метеоритными осколками.
2. Собранные на кратерном поле Каали метеоритные осколки и импактные частицы очень мелкие. Это обусловлено высокой скоростью метеорита при ударе и относительно небольшой массой его.
3. На основе собранного в Каали материала можно утверждать, что ударно-взрывным кратерам характерен своеобразный комплекс магнетито-силикатных и силикатных импактитов очень изменчивого состава.
4. Район распространения распыленного метеоритного и импактного вещества далеко превышает пределы кратерного поля.

ЛИТЕРАТУРА

- Астапович И. С., Переяслов В. П. Древние ископаемые метеоритные кратеры в Куларском районе Якутской АССР. — Астр. циркуляр, 1970, 585, 6—8.
- Вийдинг Х. А. Метеоритная пыль в низах кембрийских песчаников Эстонии. — Метеоритика, 1965, вып. 26, 132—139.
- Кринов Е. Л. Метеоритная и метеорная пыль, микрометеориты. — В кн.: Сихотэ-Алинский метеоритный дождь. М., 1963, II, 240—279.
- Флоренский П. В. Первая находка тектитов в СССР. — Метеоритика, 1977, вып. 36, 120—122.
- Юдин И. А., Смышляев С. И. Минераграфическое и химическое исследование железного метеорита Каали. — Тр. Ин-та геологии АН ЭССР, 1963, XI, 53—59.
- Aaloe, A. Kaalijärve meteoriidikraatri nr. 5 uurimisest 1955. aastal. — ENSV TA Geol. Inst. Uurimused, 1958, II, 105—117.
- Aaloe, A., Eensalu, H., Liiva, A., Lõugas, V. Võimalusi Kaali kraatrite vanuse täpsustamiseks. — Eesti Loodus, 1975, 12, 706—709.

A. AALOE, Reet TIIRMAA

PIHUSTUNUD METEORIITNE JA IMPAKTIITNE AINES KAALI KRAATRIVÄLJAS

Kaali meteoriidikraatrites ja nende ümbruse pinnases leidub peale meteoriidikildude rohkesti meteoriidi langemisel ning plahvatusel pihustunud, löögi toimel osalt metamorfeerunud ainet. Selle keskmine hulk 1 m³ pinnases on 5—10 g, osakeste läbimõõt on tavaliselt alla 1 mm. Valdava osa pihustunud ainesest moodustavad meteoriittraua osakesed — mikrometeoriidid ja mikrokillud. Rohkesti on meteoriiditolmu, mille hulka on loetud nii meteoriidi langemisel kui ka plahvatusel sulanud ainesest või kondenseerunud metalliaurudest moodustunud magnetiitkerakesed ja kuumenenud kamassiidist lõhenemispindu pidi kujunenud magnetiitplaadid. Väga varieeruvad ja omapärased on impaktiidid. Need jagunevad kahte rühma — magnetiit-silikaatsed ja silikaatsed. Esiimesed on tekkinud plahvatusel sulanud meteoriittraua ja maise silikaatse ainese segunemisel. Nende hulka kuuluvad kerakujulised või korrapäratud janiidid ja koorikud. Plahvatusel sulanud või aurustunud silikaatsetest mineraalidest moodustunud impaktiite esindavad silikaatkerakesed ja korrapäratu kujuga poorsed mikroirgisiidid.

A. AALOE, Reet TIIRMAA

PULVERIZED AND IMPACTITE METEORITIC MATTER IN THE KAALI CRATER FIELD

The soil in the Kaali craters and in their surroundings contains, apart from meteorite fragments, also great amounts of pulverized and partly metaformed meteoritic matter generated as a result of the impact. Its mean amount per cubic metre of soil is 5—10 g, the diameter of the particles being as a rule less than 1 mm. The major part of the pulverized matter consists of particles of meteoritic iron — micrometeorites and microfragments. There is likewise a great amount of meteoritic dust, in which we have also included the magnetite globules formed at the melting of the meteoritic matter during the impact or from condensed metal vapours, as well as the magnetite platelets formed from heated camassite along the cracked surfaces. The impactites are of a very varying and peculiar character. They are divided into two groups — the magnetite-silicate and silicate ones. The former have been formed at the mixing of the terrestrial silicate matter with the meteoritic iron that melted during the explosion. Here belong the spherical or irregular-shaped ianites and crusts. The impactites formed from molten or vaporized silicate minerals during the explosion are represented by silicate globules and porous microirgisites of an irregular shape.