

А. ААЛОЭ, Валве АНДРА, Х. АНДРА

НАПРАВЛЕНИЕ ПАДЕНИЯ МЕТЕОРИТНОГО ДОЖДЯ КААЛИ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В настоящее время вопрос о направлении падения метеорита Каали, с которым связаны не только морфология и строение кратеров этой группы, а также распределение метеоритного и импактного веществ в кратерах и в околokrатерном пространстве, стал особенно актуальным. В последние годы в Эстонии оживленно обсуждаются возможные отражения метеоритной катастрофы Каали в народных преданиях, в некоторых исторических данных и т. д. При этом возникла возможность точного определения направления полета каалиского болида.

Для определения направления падения метеоритного дождя Каали применялись различные методы. М. Рейнвальд (Reinwald, 1937) на основе строения кратеров, а особенно вскрытого им кратера № 4, предполагал, что метеорит падал в направлении с В—ЮВ под углом около 40°. А. Аалоз (Aaloe, 1958) считал, судя по строению кратера № 5 и особенно по форме следа удара метеорита на истинном дне этого кратера, что метеорит падал приблизительно в направлении с востока на запад; угол падения его был около 30°. В 1960 г. Е. Кринов (Kriпов, 1960) пытался вырисовать эллипс рассеивания метеоритного дождя Каали (рис. 1). Так как главный кратер группы находится в северо-северо-западной части кратерного поля, он предполагал, что удар был направлен с Ю—ЮВ на С—СЗ. В 1970-х годах А. Аалоз провел частичную расчистку истинного дна кратера № 4 и установил, что деформация дна имеет симметрию относительно вертикальной плоскости. Так как такое же явление было обнаружено им и при исследовании метеоритных кратеров Сихотэ-Алинской группы, А. Аалоз (1979) сделал вывод, что все небольшие метеоритные структуры — ударные и ударно-взрывные — имеют плоскостную симметрию. Плоскость симметрии в кратере № 4 группы Каали направлена приблизительно с востока на запад, т. е. морфология и структура кратера указывают на западное направление падения метеорита. Это было проверено в 1973 г. путем замера направлений возникших при ударе вторичных трещин. Работа была

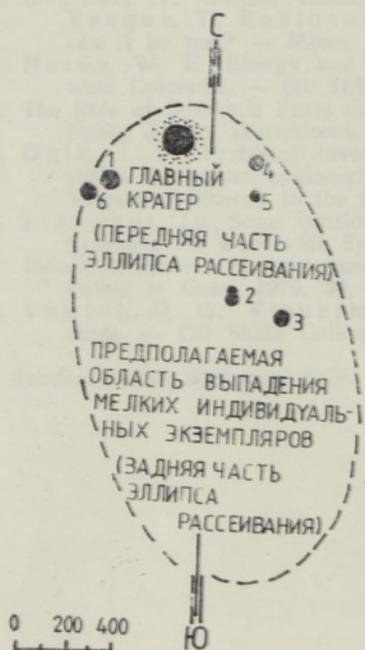


Рис. 1. Эллипс рассеивания метеоритного дождя Каали по Е. Кринову (Kriпов, 1960).

выполнена независимо друг от друга А. Аалоз и геотектоником Е. Осадчим. А. Аалоз обрабатывал свои данные статистически и получил азимутом направления удара 268° . Е. Осадчий обрабатывал материал на сетке Шмидта в изолиниях плотностей точек. Его результат (по устным данным) был 271° . Таким образом, полученные результаты хорошо совпадали, указывая на западное направление падения метеорита. В 1973 г. для оценки ориентированности поверхностного рассеяния метеоритного дождя Каали был применен также метод минимума инверсий (Цветков, Горицкий, 1973). Полученный результат — 235° — сомнительный, так как можно предположить, что некоторые мелкие кратеры и ударные воронки давно исчезли вследствие земледельческих работ, а индивидуальные метеориты до сих пор не обнаружены. В последние годы детально изучено распределение метеоритного вещества вокруг кратера № 4. Выяснено, что основная часть метеоритных осколков выброшена из кратера в направлении $250-260^\circ$, которое считают и направлением удара метеорита (Аалоз, Тийрмаа, 1981).

Для изучения глубинного строения главного кратера в Каали зимой 1974 г. совершены совместные геофизические исследования сотрудниками кафедры геофизики геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова и Института геологии Академии наук Эстонской ССР. Из различных геофизических методов наиболее эффективными в данных геологических условиях оказались электроразведка и ударная сейсморазведка. С помощью этих методов выявлены приблизительные контуры зоны разрушенных горных пород, окружающей главный кратер (Аалоз и др., 1976). К сожалению, в связи со сложными зимними условиями 1974 г., а также из-за разных построений вблизи кратера, границы зоны разрушенных пород северовосточнее и юго-восточнее его остались неуточненными. Опыт исследования мелких кратеров группы Каали показал, что самая интенсивная деформация истинного дна кратеров распространяется именно в северовосточном и юго-восточном направлениях от следа удара метеорита, образуя своеобразный структурный элемент дна — так наз. бабочку (Аалоз, 1979). Последняя возникла, очевидно, под воздействием метеоритных ударных и отраженных волн. Поэтому предполагали, что зона разрушенных пород в указанных направлениях более широкая. Дальнейшие геофизические экспедиции МГУ продолжали микросейсмические исследования зоны разрушенности вокруг главного кратера, возникшей главным образом под влиянием взрывной волны. В Институте геологии АН ЭССР были в 1977 г. начаты электроразведочные работы по выявлению разрушенности горных пород вне кратеров под воздействием баллистических ударных волн.

Известно, что ударные волны — головная и хвостовая —, возникшие при сверхскоростном движении твердого тела в атмосфере, могут вызывать значительные разрушения земной поверхности. Разрушительное действие заметно увеличивается в результате их отражения. При высокой скорости энергия ударных волн так велика, что они должны вызывать заметные разрушения верхних слоев коренных пород за кратерами, т. е. восточнее их. Исходя из изложенного положения, проводились электроразведочные работы методом ВЭЗ и электропрофилирования по схеме $AMNB$ с помощью аппаратуры низкочастотного переменного тока. Параметры установки определяли по данным ВЭЗ. Так как распространяющиеся на кратерном поле участки разрушенных пород неглубокие и определяются единичными или десятками метров, четкие аномалии q_k выявились при $AB=10-20$ м, $MN=3-5$ м с шагом 6 м.

Исследованию в известной мере препятствовали постройки юго-

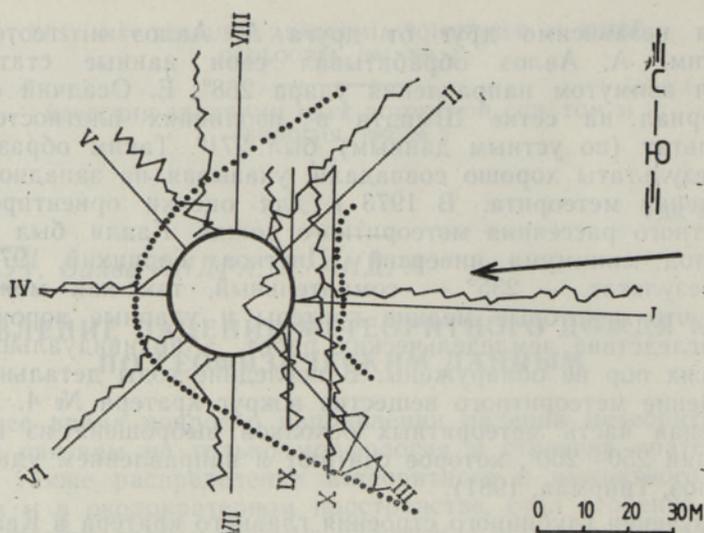


Рис. 2. Профили электроразведочных работ около кратера № 3. Основной шкалы изменений кажущегося сопротивления (Q_h) является 200 ом·м. Пунктиром обозначена наиболее интенсивно разрушенная зона коренных пород.

восточнее главного кратера, а также перекрытие зон разрушений отдельными кратерами — кратеры № 4 и 5 оказались расположенными в зоне разрушенности главного кратера, около кратера № 1 находится кратер № 6 и т. д. Объектами изучения служили окрестности главного кратера и кратеров № 1, 3, 4 и 5.

Успехи электроразведки небольших глубин зависят от уровня подземных вод, который довольно сильно колеблется. Например, 1977 год в Эстонии отличался обилием осадков, что отразилось на результатах электропрофилирования в виде повышения интенсивности аномалий над разрушенными участками на кратерном поле. Для установления изменений степени разрушенности в зависимости от расстояния от кратеров вокруг них были заложены радиальные электропрофили, а восточнее кратеров для выявления возможных разрушений от сжатия ударных волн — некоторые ориентированные профили в направлении С—Ю (рис. 2). На радиальных профилях на общем беспокойном фоне изменения кажущегося сопротивления отмечается резкое уменьшение Q_h в непосредственной близости кратеров, вызванное интенсивной трещиноватостью доломитов в прикратерной зоне сжатием взрывной волны. Ширина этой зоны колеблется от 1 до 2 радиусов кратера. Меридиональными электропрофилями восточнее главного кратера и некоторых маленьких кратеров обнаружены аномалии Q_h , маркирующие веерообразную структуру, в пределах которой резко выделяются более интенсивно разрушенные краевые части, образуя четко выраженные крылья (рис. 3). Последние соединяются с зоной разрушения вокруг кратера. Вся эта структура в общих чертах напоминает тунгусскую «бабочку», в головной части которой находится кратер. Угол между внешними краями крыльев равняется приблизительно 50° , точные данные приводить пока рано, так как кроме вторичной ударной трещиноватости причиной уменьшения Q_h служат первичные трещины, а также другие возмущители. Ширина крыльев приблизительно равна диаметру, а длина 2—3 диаметрам соответствующего кратера, дальше крылья плавно расплываются. Медиана между углами крыльев явно совпадает с проекцией траектории метеорита на земную поверхность. По названным

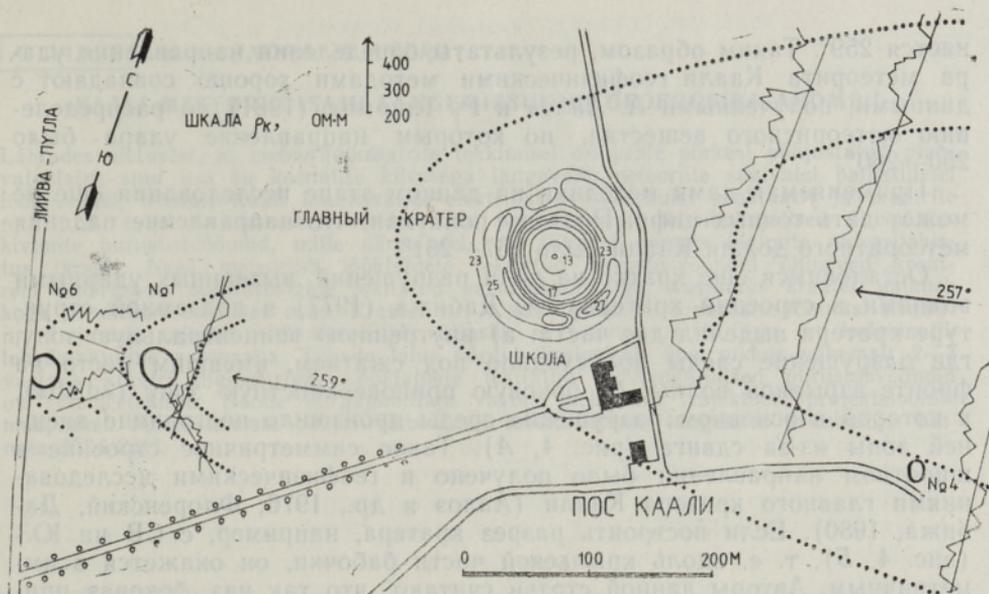


Рис. 3. Схема зон наиболее интенсивных разрушений коренных пород около главного кратера и кратеров № 1 и 6 группы Каали с изложением некоторых характерных электропрофилей. Основной шкалы изменений ρ_k является 200 ом·м. Стрелками обозначены предполагаемые направления падения метеоритов.

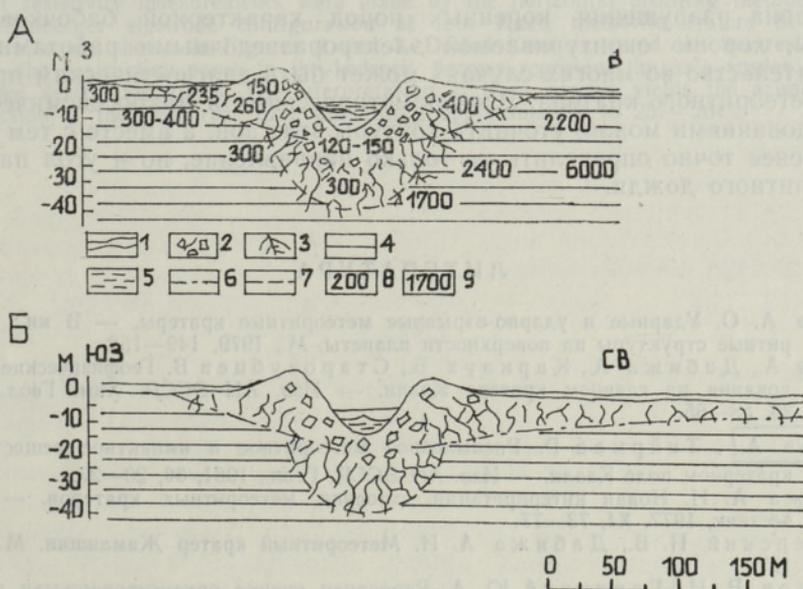


Рис. 4. Разрезы главного кратера Каали (Флоренский, Дабижа, 1980; рис. 26). А — в широтном направлении; Б — в направлении СВ—ЮЗ. 1 — рыхлые четвертичные отложения, 2 — брекчии, 3 — трещиноватые коренные породы, 4 — коренные породы, 5 — озерные илы, 6 — граница внешней зоны, 7 — граница внутренней эпицентральной зоны, 8 — значения кажущегося сопротивления, 9 — скорость сейсмических волн.

выше причинам полученные нами результаты в известной мере колеблются — у главного кратера азимут медиана равняется 257° , у кратера № 1 — 259° и у кратера № 3 — 261° . Среднее арифметическое рав-

няется 259°. Таким образом, результаты определения направления удара метеорита Каали геофизическими методами хорошо совпадают с данными, полученными А. Аалое и Р. Тийрмаа (1981) по распределению метеоритного вещества, по которым направление удара было 250—260°.

Применяемая нами методика на данном этапе исследования еще не может дать точных цифр. Поэтому полагали, что направление падения метеоритного дождя Каали было 257—261°.

Остановимся еще кратко на роли разрушений, вызванных ударными волнами в строении кратеров. А. Дабижа (1977) в подземной структуре кратера выделил две части: а) внутреннюю эпицентральною зону, где разрушение среды происходило под сжатием, имевшим место на фронте взрывной волны; б) боковую приповерхностную зону («dish»), в которой в основном разрушение среды произошло по границе внешней зоны из-за сдвига (рис. 4, А). Такое симметричное строение в широтном направлении было получено и геофизическими исследованиями главного кратера Каали (Аалое и др., 1976; Флоренский, Дабижа, 1980). Если построить разрез кратера, например, с СВ на ЮЗ (рис. 4, Б), т. е. вдоль крыльевой части бабочки, он окажется асимметричным. Авторы данной статьи считают, что так наз. боковая приповерхностная зона возникла преимущественно от сжатия ударных волн, а сдвиг частиц грунта вследствие взрывной волны имел второстепенное значение.

Таким образом, под воздействием ударных волн, сопровождающих кратерообразующие метеориты, в околоратерном пространстве возникает зона разрушения коренных пород характерной бабочковидной формы, хорошо оконтуриваемой электроразведочными работами. Это обстоятельство во многих случаях может быть диагностическим признаком метеоритного кратера. Электрометрическими и микросейсмическими исследованиями можно уточнить контуры этих зон, а вместе с тем более или менее точно определить не только направление, но и угол падения метеоритного дождя.

ЛИТЕРАТУРА

- Аалое А. О. Ударные и ударно-взрывные метеоритные кратеры. — В кн.: Метеоритные структуры на поверхности планеты. М., 1979, 149—158.
- Аалое А., Дабижа А., Карнаух Б., Старозубцев В. Геофизические исследования на главном кратере Каали. — Изв. АН ЭССР. Хим. Геол., 1976, 25, 58—65.
- Аалое А., Тийрмаа Р. Распыленное метеоритное и импактное вещество на кратерном поле Каали. — Изв. АН ЭССР. Геол., 1981, 30, 20—27.
- Дабижа А. И. Новая интерпретация строения метеоритных кратеров. — Астр. вестник, 1977, XI, 73—77.
- Флоренский П. В., Дабижа А. И. Метеоритный кратер Жаманшин. М., 1980, 127.
- Цветков В. И., Горичкий Ю. А. Вероятная оценка ориентированности поверхностного рассеяния метеоритных дождей. — Астр. вестник, 1973, VII, 160—166.
- Аалое, А. Kaalijärve meteoriidikraatri Nr. 5 uurimisest 1955. aastal. — ENSV TA Geol. Inst. Uurimused, II, 1958, 105—117.
- Krinow, E. L. Die meteoritischen Krater Kaalijärve auf der Insel Saaremaa, Estnische SSR. — Chemie der Erde, 1960, Bd. XX, H. 4, 199—216.
- Reinwald, I. Meteoriidikraatrid Saaremaal. — Looduskaitse, I, 1937, 118—131.

Институт геологии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
2/X 1981

KAALI METEORIIDISAJU LANGEMISSUUND GEOFÜÜSIKA ANDMEIL

Lähtudes oletusest, et meteoriidikraatrite tekkimisel on peale põrkest põhjustatud plahvatuslaine suur osa ka kosmilise kiirusega langevaid meteoriite saatvatel ballistilistel lööklainetel, teostati Kaali kraatriväljal elektrilist profiileerimist peakraatri ja kraatrite nr. 1, 3, 4 ja 5 ümbruses. Nendest ida pool avastati lehvikukujulised aluspõhjakivimite purustusvööndid, mille äärealadel, nn. tiibadel, langes kivimite näiveritakistus järsult. Need meteoriidi lööklainete tekitatud purustusvööndid ühinevad kraatrite ümbritseva plahvatuslaine tekitatud purustusvööndiga, kusjuures kraater paikneb kogu struktuuri eesmisel osas. Kraater nr. 4 asub peakraatri purustusvööndis. Kraatri nr. 1 juurde rajatud radiaalprofiilid näitasid, et kraatri nr. 16 taga on iseloomulik lehvikukujuline anomaalia. Tiibade laius võrdub keskmiselt ühe, pikkus vähemalt 2—3 vastava kraatri diameetriga. Lööklainete tekitatud lehvikukujulised purustusvööndid on sümmeetrilised. Nende nurgapoolitaja vastab meteoriidi trajektoori projektsioonile maapinnal. Mõõdistamiste põhjal võib Kaali meteoriidisaju langemise asimuudiks hinnata 257—261°.

DETERMINATION, BY GEOPHYSICAL METHODS, OF THE DIRECTION OF THE METEORITIC RAIN AT KAALI

Apparent resistivity measurements were made by the horizontal profiling method with the Schlumberger electrode configuration at four Kaali meteorite craters in 1977. Some results are shown in Figures 2 and 3. Dotted lines surround the low-resistivity areas — the destruction zones in the bedrock. Arrows represent the axis angles of the fan-shaped destruction zones. The interpretation of these arrows yields the azimuth of the direction of the meteoritic rain, amounting approximately to 257—261°.

