

*А. ААЛОЭ, А. ДАБИЖА, Б. КАРНАУХ, В. СТАРОДУБЦЕВ*

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ГЛАВНОМ КРАТЕРЕ КААЛИ

Начало геофизических исследований кратеров Каали относится к 1929 г., когда профессором Кенигсбергского университета К. Андре (Reinvaldt, 1933) была проведена магнитная съемка главного кратера в целях обнаружения крупных метеоритных масс. Результаты оказались отрицательными. В 1955 г. сотрудником Института геологии АН ЭССР Э. Побул была проведена частичная магнитная съемка кратера № 3 для поисков метеоритного вещества. Были выявлены некоторые слабые (порядка  $10 \gamma$ ) микроаномалии, вызванные, по мнению Э. Побул (1963), скоплениями осколков железного метеорита. Геофизические исследования, проведенные зимой 1974 г. сотрудниками кафедры геофизики геологического факультета МГУ и Института геологии АН ЭССР, преследовали иную цель — изучить внутреннее строение главного метеоритного кратера Каали комплексом геофизических методов.

Известно, что столкновение метеорита с поверхностью Земли при больших скоростях падения сопровождается сильным разрушением метеорита и земных пород. Некоторая часть пород выбрасывается за пределы возникшего кратера, часть падает обратно в кратер в виде аллогенной брекчии, значительный объем пород дробится, разрушается, оставаясь на месте или дислоцируясь. Резкое изменение при этом физических свойств пород является предпосылкой для изучения метеоритных кратеров методами геофизики. Различие плотностей пород, заполняющих кратер, и коренных ненарушенных пород позволяет использовать гравиметрический метод. Изменение намагниченности пород под воздействием удара может служить основой для применения магнитного метода. Относительно высокая электропроводность пород, заполняющих кратер, в результате насыщения их водными растворами, позволяет исследовать подобные структуры с помощью таких методов электроразведки, как вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электропрофилирование. Изменение упругих свойств пород, а также затухание скорости распространения сейсмических волн внутри кратера в связи с увеличением пористости в брекчиевой линзе дает возможность применять сейсмические методы.

На главном кратере Каали были проведены следующие геофизические работы: 1) гравиметрическая съемка по двум пересекающимся профилям — меридиональному и широтному; 2) магнитная съемка по восьми профилям, пересекающим кратер; 3) сейсмическая разведка на двух

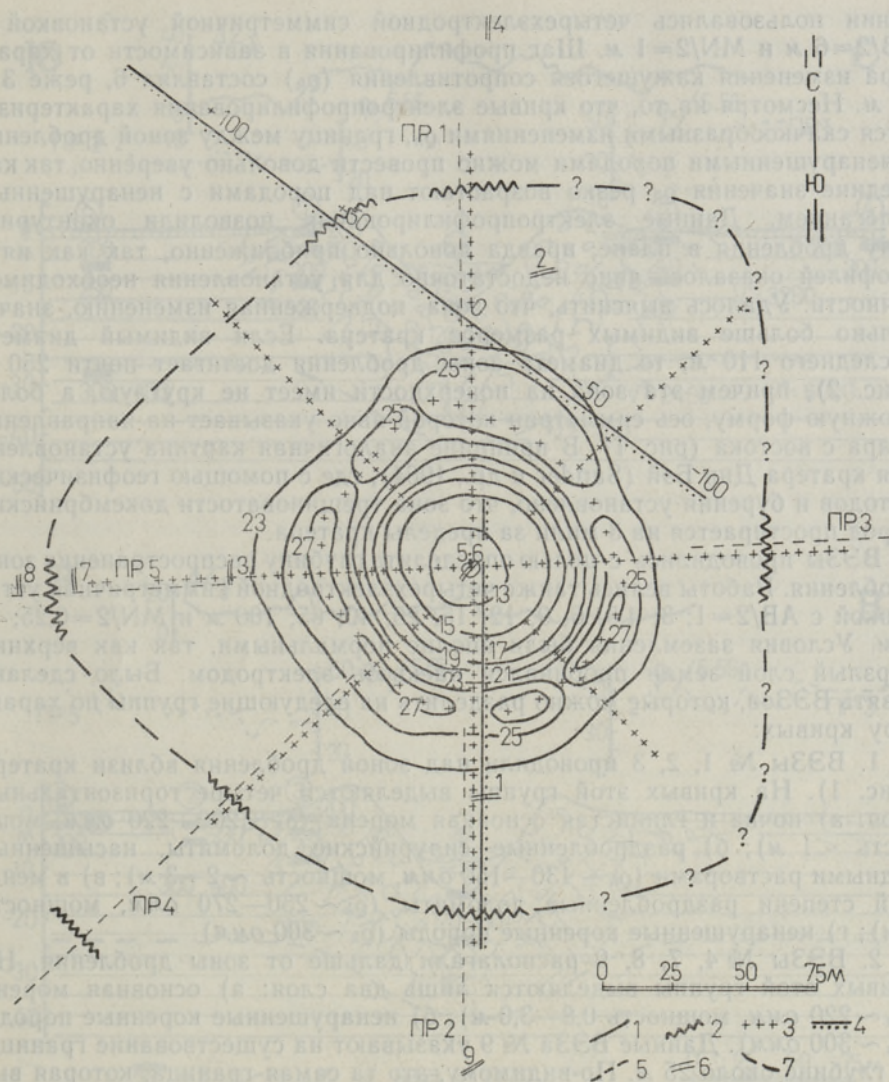


Рис. 1. Карта фактического материала: 1 — изогипсы; 2 — границы резких изменений  $\rho_k$ ; 3 — точки измерения  $\Delta Z$  и  $\Delta G$ ; 4 — сейсмический профиль; 5 — электрический профиль; 6 — точки ВЭЗ; 7 — граница зоны разрушения.

профилях; 4) электроразведка (девять точек ВЭЗ и несколько профилей электропрофилеирования) (рис. 1).

Остановимся более подробно на методике выполненных исследований и результатах по каждому геофизическому методу. Наиболее интересные данные были получены при электроразведочных и сейсмических работах.

Электроразведочные работы проводились в модификациях профилирования и зондирования на постоянном токе. Цель электропрофилеирования — выявить распространение зоны дробления по площади, для чего было составлено пять профилей, направленных по радиусам от центра кратера. Начало каждого профиля располагали как можно ближе к валу кратера. Кроме того, по одному из профилей были проведены сейсмические наблюдения для сравнения результатов. При профилиро-

вании пользовались четырехэлектродной симметричной установкой с  $AB/2=6$  м и  $MN/2=1$  м. Шаг профилирования в зависимости от характера изменения кажущегося сопротивления ( $q_k$ ) составлял 6, реже 3 и 12 м. Несмотря на то, что кривые электропрофилирования характеризуются скачкообразными изменениями  $q_k$ , границу между зоной дробления и ненарушенными породами можно провести довольно уверенно, так как средние значения  $q_k$  резко возрастают над породами с ненарушенным залеганием. Данные электропрофилирования позволили оконтурить зону дробления в плане, правда довольно приближенно, так как пяти профилей оказалось явно недостаточно для установления необходимой точности. Удалось выяснить, что зона, подверженная изменению, значительно больше видимых размеров кратера. Если видимый диаметр последнего 110 м, то диаметр зоны дробления достигает почти 250 м (рис. 2), причем эта зона на поверхности имеет не круглую, а более сложную форму, ось симметрии которой явно указывает на направление удара с востока (рис. 1). В принципе аналогичная картина установлена для кратера Дип Бэй (Sander и др., 1964), где с помощью геофизических методов и бурения установлено, что зона трещиноватости докембрийских пород простирается на 3 мили за пределы кратера.

ВЭЗы проводились с целью определить глубину распространения зоны дробления. Работы велись также четырехэлектродной симметричной установкой с  $AB/2=1; 3; 4,5; 6; 9; 12; 15; 25; 40; 65; 100$  м и  $MN/2=0,25; 1; 5$  м. Условия заземления были вполне нормальными, так как верхний мерзлый слой земли пробивался насквозь электродом. Было сделано девять ВЭЗов, которые можно разделить на следующие группы по характеру кривых:

1. ВЭЗы № 1, 2, 3 проводили над зоной дробления вблизи кратера (рис. 1). На кривых этой группы выделяются четыре горизонтальных слоя: а) почва и глинистая основная морена ( $q_k \sim 200-220$  ом, мощность  $< 1$  м); б) раздробленные силурийские доломиты, насыщенные водными растворами ( $q_k \sim 130-150$  ом, мощность  $\sim 2-3$  м); в) в меньшей степени раздробленные доломиты ( $q_k \sim 250-270$  ом, мощность 7 м); г) ненарушенные коренные породы ( $q_k \sim 300$  ом).

2. ВЭЗы № 4, 7, 8, 9 располагали дальше от зоны дробления. На кривых этой группы выделяются лишь два слоя: а) основная морена ( $q_k \sim 220$  ом, мощность 0,8—3,0 м); б) ненарушенные коренные породы ( $q_k \sim 300$  ом). Данные ВЭЗа № 9 указывают на существование границы на глубине около 25 м. По-видимому, это та самая граница, которая выделяется по сейсмическим данным как преломляющая.

3. ВЭЗы № 5, 6 проводили в центре кратера. Первый слой очень низкого сопротивления, порядка 23—27 ом, и мощностью до 9 м от уровня воды озера, по-видимому, можно связать с илами на дне кратера и сильно обводненной зоной дробления. Дальше идет увеличение сопротивления до 120—150 ом и до глубины приблизительно 25 м. Точный результат получить трудно, так как правая ветвь кривой искажена из-за неровностей рельефа и отклонения внутренних границ от горизонтального залегания.

Данные ВЭЗ и электропрофилирования позволили построить геолого-геофизический разрез, отражающий внутреннее строение кратера (рис. 2). Глубина зоны нарушенных пород согласуется с вычислениями по Р. Б. Болдуину (1968).

Сейсмические работы. Эффективность использования сейсмических методов при исследовании метеоритных ударных структур показали сейсмические работы в кратере Рис (Angenheister, Pohl, 1969; Sauer, 1969), выполненные методами отраженных и преломленных волн (МОВ и

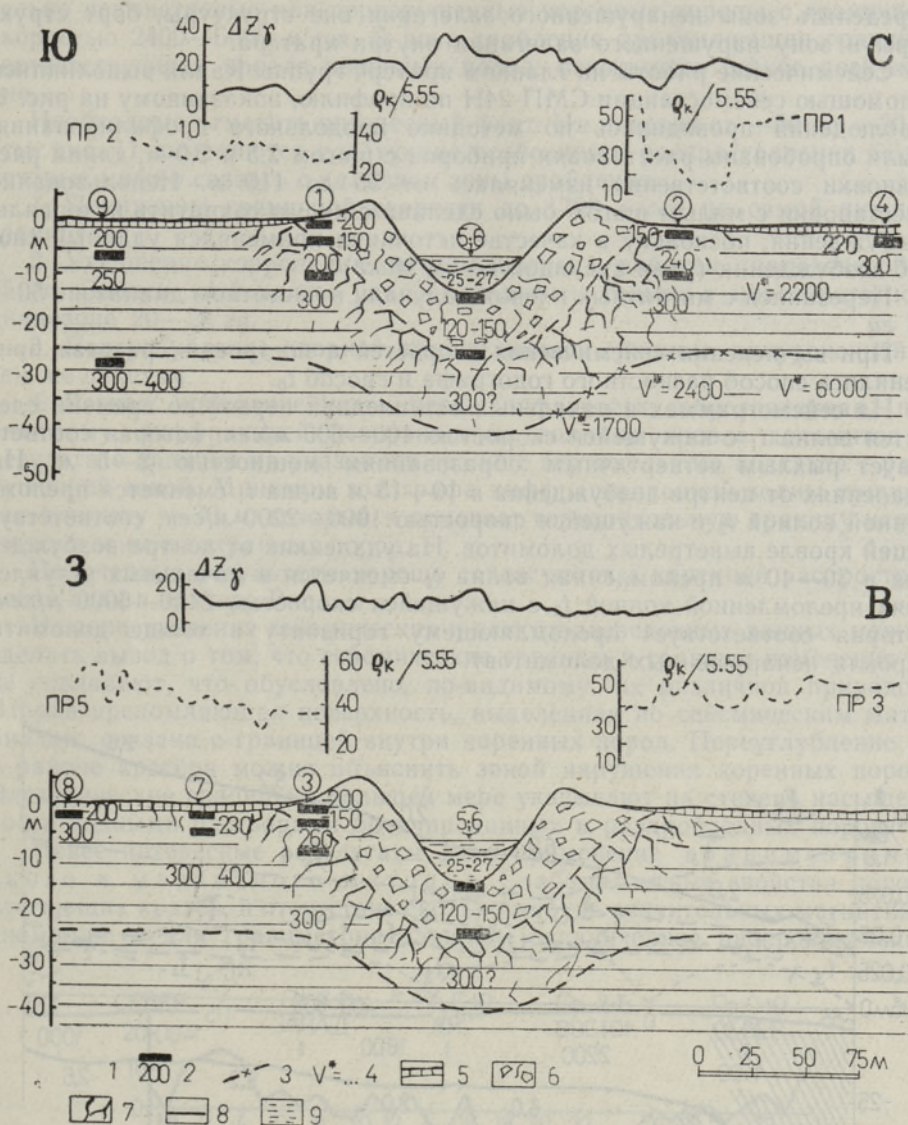


Рис. 2. Геолого-геофизический разрез через главный кратер Каали: 1 — точки ВЭЗ; 2 — границы изменения и значение  $Q_k$ ; 3 — граница зоны разрушенных пород по сейсмическим данным; 4 — кажущаяся скорость сейсмических волн, м/сек; 5 — рыхлые четвертичные отложения; 6 — брекчии; 7 — трещиноватые коренные породы; 8 — незатронутые коренные породы; 9 — озерные илы.

МПВ). Эти исследования выявляют особенности скоростного строения и волновой картины, на основании которых устанавливается структура кратера. Это прежде всего сложная картина распространения волн, особенно на границах кратера, нарушение в зоне кратера горизонтальных границ раздела, резкое уменьшение пластовых и граничных скоростей к центру кратера не только в породах, заполняющих кратер (от 3000 до 1700 м/сек), но и в подстилающих породах (от 4500 до 3300 м/сек), а также потеря корреляции волн на сейсмограммах. По картине распространения волн (положению отражающих и преломляющих площадок) можно

определить зоны ненарушенного залегания вне структуры, борт структуры и зону нарушенного залегания внутри кратера.

Сейсмические работы на главном кратере группы Каали выполнялись с помощью сейсмостанции СМП-24Н по профилю, показанному на рис. 1. Наблюдения проводились по методике продольного профилирования. Были опробованы расстановки приборов с шагом 2,5 и 5,0 м, длина расстановки соответственно изменялась от 55 до 110 м. Использование расстановки с малым шагом было сделано с целью сократить интервалы возбуждения, поскольку в качестве источника применялся ударный способ возбуждения (удар кувалдой весом 16 кг).

Перезаписи с магнитных пленок получали в частотном диапазоне 50—75 гц.

При вычислении сейсмических скоростей и построении разреза применялись способ разностного годографа и способ  $t_0$ .

На сейсмограммах в начальных вступлениях первой во времени следится волна  $t_1$  с кажущейся скоростью 400—600 м/сек, которая соответствует рыхлым четвертичным образованиям мощностью 2—5 м. На удалениях от центра возбуждения в 10—15 м волна  $t_1$  сменяется преломленной волной  $t_2$  с кажущейся скоростью 1000—2200 м/сек, соответствующей кровле выветрелых доломитов. На удалениях от центра возбуждения в 30—40 м преломленная волна  $t_2$  сменяется в начальных вступлениях преломленной волной  $t_3$  с кажущейся скоростью 2400—6000 м/сек, которая соответствует преломляющему горизонту в толще доломита (кровля ненарушенных доломитов).

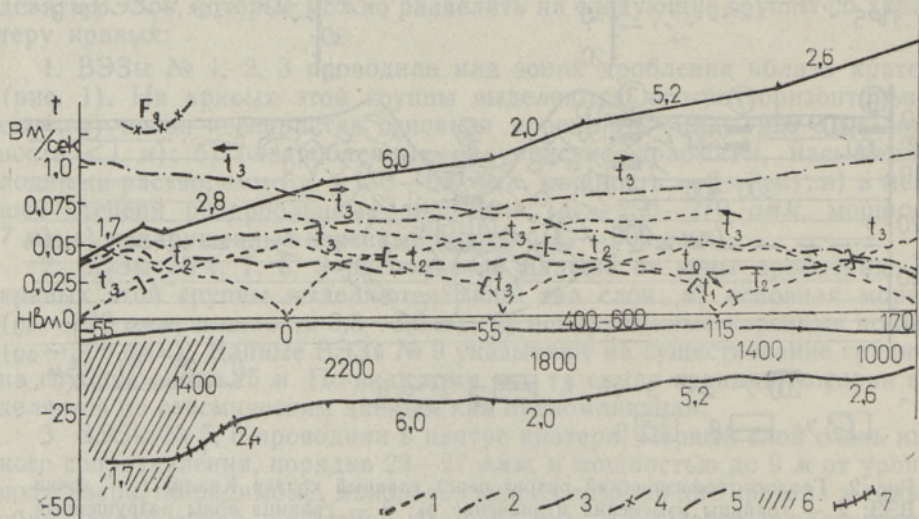


Рис. 3. Сейсмический разрез в районе главного кратера Каали: 1 — годографы начальных вступлений; 2 — сводные годографы; 3 — разностный годограф; 4 — годограф диффрагированных волн; 5 — линия  $t_0$ ; 6 — зона разрушенных пород; 7 — предполагаемое положение опорной преломляющей границы в приконтактной зоне.

Сейсмический разрез в районе главного кратера Каали по данным МПВ представляется следующим (рис. 3): сверху рыхлые четвертичные образования со скоростью сейсмических волн 400—600 м/сек (мощность 2—5 м). Глубже располагается зона со скоростью сейсмических волн 1000—2200 м/сек (мощность 10—20 м). Ее подошву составляют относи-

тельно невыветрелые или неразрушенные коренные породы с граничной скоростью 2400—6000 м/сек. В зоне дробления преломляющая граница, соответствующая кровле коренных пород, испытывает резкое погружение.

Необходимо отметить интересный факт. На пикетах от —50 до —30 м (см. рис. 1) выявляются следующие особенности распространения волн, которые можно связать с наличием зоны дробления:

1. Понижение граничной скорости до 1700 м/сек на самой нижней границе.

2. Ухудшение корреляции опорной волны в рабочем диапазоне 50—75 гц. Записи этой волны удалось получить только в низкочастотном диапазоне 20—28 гц.

3. Переуглубление опорной преломляющей границы, приуроченной к тем же пикетам.

4. Резкая криволинейность осей синфазности, обусловленная, по-видимому, дифракцией поверхностных волн на кровле доломитов в результате наличия на указанной границе вертикального контакта с разрушенной зоной. Минимум годографа диффрагированной волны приурочен к пикету —30 м, который и отмечает горизонтальную границу нарушенной зоны и сохранных пород.

Полученные результаты хорошо согласуются с картиной распространения волн в кратере Рис.

Из сопоставления сейсмических и электроразведочных данных можно сделать вывод о том, что сейсмические и границы изменения  $\rho_h$  не совпадают, что обусловлено, по-видимому, их различной природой. Вторая преломляющая поверхность, выделенная по сейсмическим материалам, связана с границей внутри коренных пород. Переуглубление ее в районе кратера можно объяснить зоной нарушения коренных пород. Электрические границы в большей мере указывают на степень насыщенности водными растворами брекчированных и раздробленных пород.

Менее интересные результаты дало применение гравиметрического и магнитного методов. Слабомагнитные свойства пород, слагающих кратер, и отсутствие сколько-нибудь значительных магнитных аномалий, а для гравиметрии слишком ограниченное распространение

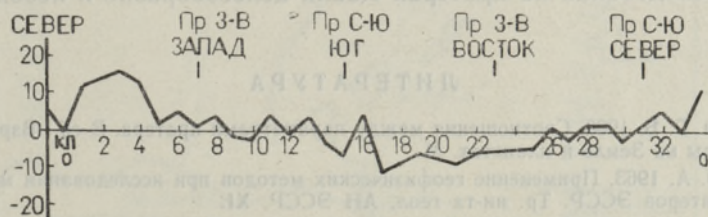


Рис. 4. Кривая аномалий  $\Delta Z_a$  по валу главного кратера Каали.

плотностных неоднородностей в пределах исследуемой площади ограничи возможности методов лишь получением качественной картины полей. Следует отметить, что в некоторых случаях скачки в магнитном поле совпадают со скачками  $\rho_h$  на кривых электропрофилеирования. Выявленная небольшой интенсивности положительная аномалия  $\Delta Z_a$  в центральной части кратера немного смещена к юго-западной части. На кривой  $\Delta Z_a$ , снятой по валу, отмечается максимум  $\Delta Z_a$  на северо-западной стороне кратера (+17 г), минимум на юго-восточной (от —10 до —12 г) и сравнительно ровное поле, близкое к нулю, на юго-западной и северо-

восточной стороне вала главного кратера (рис. 4). Таким образом, магнитное поле кратера несимметрично относительно кратера и многие особенности поля обусловлены, по-видимому, иными причинами, нежели его внутренним строением. Для детализации поля в районе главного кратера необходима более густая сеть профилей.

Попытка провести гравиметрические работы окончилась не совсем удачно. Дело в том, что теоретический гравитационный эффект структуры совсем незначительный — порядка 0,1 мгл. Для того, чтобы уловить этот эффект, необходимо провести съемку с точностью до 0,03 мгл. Эта точность не была получена по причине недостаточного топообеспечения, неблагоприятных климатических условий и сложного рельефа, затрудняющего проведение непосредственных измерений. Однако уже предварительные результаты показывают, что структура выделяется и в гравитационном поле.

Подводя итоги первым комплексным геофизическим исследованиям на главном кратере Каали, можно сказать следующее:

1. Даже небольшого размера ударные структуры находят свое отражение в геофизических полях.

2. Наиболее эффективными из геофизических методов при изучении глубинного строения кратера оказались методы электроразведки и ударной сейсморазведки.

3. Определены размеры и глубина распространения зон брекчированности и трещиноватости, а также физические параметры  $q_k$  и  $V^*$  разреза.

4. Использован метод МПВ с применением ударного способа возбуждения, как наиболее безопасного и пригодного для работ в районах заповедников. Сделано предположение, что изложенная выше методика сейсмических исследований наиболее эффективна при изучении кратерных структур, имеющих ограниченное распространение по площади и глубине.

5. Метеоритные кратеры Каали считаются классическими. Детальное знание их внутреннего строения может послужить базой для выяснения геофизической характеристики метеоритных кратеров вообще и для разработки методики работ на других, частично погребенных или сильно денудированных структурах. Отсюда следует, что продолжение геофизических исследований на кратерах Каали целесообразно и необходимо.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Болдуин Р. Б. 1968. Соотношения между параметрами кратера. В сб.: Взрывные кратеры на Земле и планетах. М.
- Побул Э. А. 1963. Применение геофизических методов при исследовании метеоритных кратеров ЭССР. Тр. ин-та геол. АН ЭССР, XI.
- Angenheister G., Pohl J. 1969. Die seismischen Messungen im Ries von 1948—1969. Das Ries. Geologica Bavarica 61. München.
- Reinvaldt I. A. 1933. Kaali järv — the Meteorite Craters on the Island of Ösel (Estonia). Tartu Ulik. Geol. Inst. Toim., Nr. 30.
- Sander J. W., Overton A., Bataille R. D. 1964. Seismic and Magnetic Investigation of the Deep Bay Crater. R.A.S.C. Jour., 58, Nr. 1.
- Sauer H.-D. 1969. Seismik, Ries 1968, I. Auswertung der Reflexionsseismik für Laufzeiten bis zu einer Sekunde. Dipl.-Arbeit Institut für Angewandte Geophysik der Universität München.

Московский  
государственный университет  
имени М. В. Ломоносова

Институт геологии  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
15/1 1975

A. AALOE, A. DABIZA, B. KARNAUHH, V. STARODUBTSEV

## KAALI PEAKRAATRI GEOFÜSİKALISEST UURIMISEST

Artiklis käsitletakse Kaali meteoriidikraatrite rühma peakraatri (diameeter 110 m, sügavus 16 m) kompleksset geofüüsikalist uurimist, mida 1974. aastal sooritasid ühiselt M. V. Lomonossovi nim. Moskva Riikliku Ülikooli geofüüsikakateeder ja ENSV TA Geoloogia Instituut. Elektrometrilise ja seismomeetrilise meetodi abil määrati kraatrit ümbritseva purustatud kivimivööndi kontuurid. Viimased ületavad rohkem kui kahekordselt nähtava kraatri mõõtmed. Purustusvööndit iseloomustab kivimite näiveritakistuse järsk vähenemine seoses vee tungimisega lõhedesse ja pooridesse ning seismiliste lainete leviku kiiruse aeglustumine (joon. 2). Purustusvöönd moodustab omapärase kujuga kontuuri (joon. 1), mille sümmeetriatelg kulgeb idast läände, ühtides meteoriidi langemise suunaga.

A. AALOE, A. DABIZHA, B. KARNAUKH, V. STARODUBTSEV

## GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS OF KAALI CRATER

The results obtained at exhaustive geophysical investigations of the main crater (diameter 110 m, depth 16 m) in the group of the meteoritic craters at Kaali are presented in this paper. The investigation was carried out in 1974, by the Geophysics Chair of the Geology Department of Moscow State University named after M. Lomonossov and by the Institute of Geology of the Academy of Sciences of the Estonian SSR. Using seismic and electrometric methods, the contours of the zone of shattered rocks surrounding the crater were determined. The zone surpasses the dimensions of the crater twice. It is characterized by an abrupt abatement of the resistance  $Q_R$  in connection with water solutions filling up the fissures and pores, and by a deceleration of seismic waves (Fig. 2).

The zone of shattered rocks has a contour of a specific character (Fig. 1), the axis symmetry of which is directed from east to west, coinciding with the direction of the fall of the Kaali meteorite.

