

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



10/11-75

П-27

P13 - 8359

515/2-75

В.П.Перелыгин, Ш.Б.Виик, О.Отгонсурэн

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ
ДОАТМОСФЕРНОГО РАЗМЕРА МЕТЕОРИТА
МАРЬЯЛАХТИ

1974

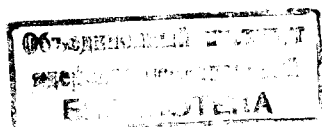
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

P13 - 8359

В.П.Перелыгин, Ш.Б.Виик, О.Отгонсурэн

**ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ
ДОАТМОСФЕРНОГО РАЗМЕРА МЕТЕОРИТА
МАРЬЯЛАХТИ**

Доклад, представленный на XVI Метеоритную конференцию, Москва, январь 1975 г.



Перельгин В.П., Виик Ш.Б., Отгонсүрэн О.

P13 - 8359

Об определении доатмосферного размера метеорита
Марьялахти

Проведены измерения плотности треков ядер группы железа и ядер с атомными номерами $Z > 35$ в кристаллах оливина, взятых из 54 участков метеорита Марьялахти. Установлено, что плотность следов Fe в этом метеорите меняется от $6 \cdot 10^5$ до $7 \cdot 10^5$ тр/см², что соответствует глубинам от 4-5 до 10-12 см от космической поверхности этого метеорита. Потеря массы метеорита Марьялахти при прохождении плотных слоев атмосферы, согласно этим измерениям, составляет ~90 кг - несколько более 60% от первоначальной величины.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований
Дубна, 1974

Perelygin V.P., Viik Sh.B., Otgonsuren O.

P13 - 8359

On Determination of Pre-atmospheric
Dimensions of Marjalahti Meteorite

The track densities of nuclei of Fe group and those with atomic numbers $Z > 35$ are measured in the olivine crystals from 54 points of the Marjalahti meteorite. It was found that Fe track density in this meteorite changes from $6 \cdot 10^5$ to $7 \cdot 10^5$ tr/cm², which corresponds to the depths from 4-5 to 10-12 cm from the cosmic surface of this meteorite. Losses in the meteorite mass when passing the dense atmospheric layers, according to the above measurements, are of about 90 kg which constitutes 60% from the initial amount.

Communications of the Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1974

Одной из наиболее важных областей применения метода диэлектрических детекторов в последние годы являлось исследование минералов из метеоритов, а затем также и лунных минералов, способных регистрировать в течение многих миллионов лет следы от остановок тяжелых космических ядер ^{1-3/}. Начало этим исследованиям было положено еще в 1964 году в работе М. Моретта, П. Пелласа, Р. М. Уокера, посвященной выявлению треков космических ядер группы железа в минералах из метеоритов ^{4/}.

Методика диэлектрических детекторов позволила получить сведения об энергетическом спектре и спектре масс ядер первичного космического излучения, о постоянстве его состава в течение последних десятков и сотен миллионов лет, о скорости эрозии поверхности космических объектов и глубине расположения каждого данного участка от первоначальной поверхности образца.

Подробные измерения плотности следов от остановок ядер железа в сочетании с определяемым по концентрации космогенных изотопов возрастом образца позволяют с высокой степенью надежности вычислять первоначальные /доатмосферные/ размеры метеоритов.

Впервые такая методика была применена для нахождения доатмосферных размеров метеорита Сан-Северин ^{5/}. Детальные измерения плотности треков в этом метеорите позволили также определить энергетический спектр космических ядер группы железа, получить сведения об интенсивности трекообразующей компоненты галактических космических лучей на глубинах залегания образцов вплоть до 14 см ^{3,5/}.

Аналогичные измерения размеров доатмосферных тел были проведены также для метеоритов Илимаяз /6/, Кейс /7/, Эллеген /8/. Для метеорита Красноярск методом треков была определена нижняя граница первоначальной массы /9/.

Проблема определения первоначальной формы и размеров метеоритов, глубины расположения образцов приобретает особое значение в связи с проведением поисков протяженных следов сверхтяжелых космических ядер в силикатных минералах из каменных и железокосменных метеоритов /2,10,11/.

Действительно, пробег ядер сверхтяжелых элементов в области энергий до 3 ГэВ/нуклон не превышает 8 см в веществе палласитов и примерно соответствует пробегу ядер Fe с энергией 1 ГэВ/нуклон /10/. Поэтому для поисков следов сверхтяжелых элементов необходимо выявлять участки метеоритов, расположенные возможно ближе к первоначальной поверхности, на глубинах не свыше 4-6 см /палласиты/.

Проведенные нами ранее исследования оливинов из метеорита Марьялахти свидетельствуют о значительной потере массы этого метеорита при замедлении в атмосфере Земли /10,11/. Поскольку в этом метеорите были обнаружены участки, отличающиеся по плотности треков ядер группы железа в 5-7 раз, по результатам предварительных исследований нельзя было исключить, что найденный образец не являлся частью более крупного космического объекта, раздробившегося в верхних слоях атмосферы.

Задачей настоящих исследований явилось более детальное измерение плотности треков тяжелых космических ядер в различных участках метеорита Марьялахти с целью определения глубины залегания этих участков от первоначальной поверхности. Такие детальные исследования имеют важное значение при отборе наиболее подходящих образцов для поисков треков сверхтяжелых космических ядер; они позволяют получать достоверные сведения о доатмосферных размерах метеоритов.

Нами были подробно исследованы образцы кристаллов из двух наиболее крупных фрагментов метеорита Марьялахти весом 22,7 и 4,8 кг /рис. 1/.



Рис. 1. Фрагмент метеорита Марьялахти весом 4,8 кг.

Всего было взято 54 пробы из различных участков поверхности этих фрагментов; расстояние между локализациями составляло 5-8 см /рис. 2/. Из каждой пробы отбиралось от 5 до 10 кристаллов оливина.

Кристаллы помещались в эпоксидную смолу, полировались и подвергались травлению в соответствии с рецептом С.Кришнасвами, Д.Лала /14/. Концентрация щавелевой кислоты в этом травителе была увеличена в четыре раза, значение pH раствора доводилось до $8,00 \pm 0,05$.

Травление оливинов производилось в герметически замкнутых сосудах при температуре 115°C в течение 4-6 час. Просмотр кристаллов проводился последователь-

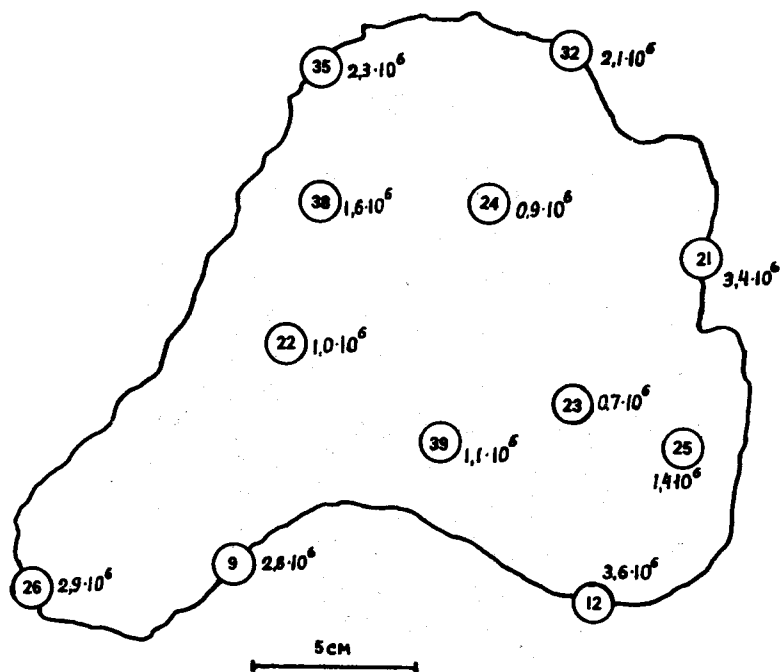


Рис. 2. Проекция одной из граней метеорита. Указаны места отбора проб и средняя плотность треков ядер железа в этих локализациях.

но двумя наблюдателями при увеличении 600X. Определялась плотность следов ядер группы железа, а также следов ядер в области атомных номеров $Z \geq 36$ /табл. 1/. Поскольку эти величины зависят от ориентации кристаллов по отношению к первоначальной поверхности метеорита ^{15/}, в табл. 1,2 приведены средние значения плотности треков для всех локализаций. Как следует из этих таблиц, наибольшую плотность треков ядер группы железа - до $5-6 \cdot 10^6$ $1/\text{см}^2$ - имеют участки 7, 8, 11, 34, 48, 50. Наименьшую плотность следов имеют оливины из локализаций 22, 23, 24, 39 - от 0,7 до $1,2 \cdot 10^2$ $1/\text{см}^2$. Отметим, что примерно такую же плотность следов содержат кристаллы из участков 45, 46 малого фрагмента метеорита Марьялахти. Участки с относительно малой плотностью

треков расположены в области характерного рваного излома большого и малого фрагментов. В связи с этими обстоятельствами мы заключили, что грани с локализациями 22, 23, 24, 39 большого фрагмента и с локализациями 45, 46 малого фрагмента прилегали друг к другу.

При проведении более детального анализа глубины залегания образцов в метеорите Марьялахти мы основывались на выполненных Р.Флейшером, П.Прайсом, Р.Уокером, М.Мореттом расчетах скорости образования тре-

Таблица 1
Большой фрагмент

#	$N_{Fe}, 2$ $1/\text{см}^2$	$N(Z \geq 36)$ $1/\text{см}^2$	Глубина $D, \text{см}$	#	$N_{Fe}, 2$ $1/\text{см}^2$	$N(Z \geq 36)$, $1/\text{см}^2$	Глубина $D, \text{см}$
I.	$3,8 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^3$	5,2	21	$3,4 \cdot 10^6$	$3,9 \cdot 10^3$	5,5
2	$2,6 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^3$	6,3	22	$1,0 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^2$	9,3
3	$2,0 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^3$	6,7	23	$0,7 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^2$	10,4
4	$2,5 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^3$	6,2	24	$0,9 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^2$	9,5
5	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^3$	5,8	25	$1,2 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^3$	8,5
6	$4,6 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^3$	4,8	26	$2,9 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^3$	5,9
7	$6,1 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^4$	4,2				
8	$5 \cdot 10^6$	10^4	4,6	27	$4,7 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^3$	4,8
9	$2,8 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^3$	6,0	28	$3,0 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^3$	5,8
10	$4,6 \cdot 10^6$	$7,5 \cdot 10^3$	4,8	29	$3,4 \cdot 10^6$	$6,6 \cdot 10^3$	5,5
11	$6 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^4$	4,3	30	$4 \cdot 10^6$	$6,8 \cdot 10^3$	5,1
12	$3,6 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^3$	5,4	31	$4,5 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^3$	4,8
13	$3,6 \cdot 10^6$	$6,5 \cdot 10^3$	5,4	32	$2,1 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^3$	6,6
14	$2,9 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^3$	5,9	33	$2,2 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^3$	6,5
15	$3,4 \cdot 10^6$	$(4:6) \cdot 10^3$	5,5	34	$5 \cdot 10^6$	$8,7 \cdot 10^3$	4,6
16	$2,8 \cdot 10^6$	$3,9 \cdot 10^3$	6,0	35	$2,6 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^3$	6,4
17	$3,2 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^3$	5,6	36	$3,7 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^3$	5,3
18	$2,0 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^3$	6,7	37	$4 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^3$	5,1
19	$4,4 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^3$	4,9	38	$1,6 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^3$	7,5
20	$3,1 \cdot 10^6$	$4,8 \cdot 10^3$	5,7	39	$1,1 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^2$	8,6

Таблица 2
Фрагмент 4,8 кг

№	$N_{Fe},$ I/cm^2	$N(Z \geq 36),$ I/cm^2	Глубина $D,$ см	№	$N_{Fe},$ I/cm^2	$N(Z \geq 36),$ I/cm^2	Глубина $D,$ см
40.	$4,3 \cdot 10^6$	$8,8 \cdot 10^3$	4,9	48	$4,6 \cdot 10^6$	$9,5 \cdot 10^3$	4,8
41.	$3,7 \cdot 10^6$	$5,4 \cdot 10^3$	5,2	49	$3,6 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^3$	5,4
42.	$2,4 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^3$	6,3	50	$6 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^4$	4,3
43.	$3,1 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^3$	5,75	51	$4,0 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^3$	5,1
44.	$3,3 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^3$	5,6	52	$3,2 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^3$	5,6
45.	$1,1 \cdot 10^6$	10^3	8,7	53	$2,6 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^3$	6,1
46.	$0,8 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^2$	9,7	54	$2,3 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^3$	6,4
47.	$3,3 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^3$	5,6				

ков в минералах из метеоритов, которые позволяют учесть процессы замедления и фрагментации тяжелых космических ядер в веществе метеоритов^{/15/}.

Экспериментальная зависимость плотности следов ядер группы железа от глубины залегания в веществе метеоритов была наиболее подробно исследована И. Кантелобом, П. Пелласом для пироксенов из метеорита Сан-Северин^{/5/}. Зависимости скорости образования следов тяжелых космических ядер в пироксенах из хондритов различных радиусов приведены также в работе Д. Лала^{/3/}.

Однако, как показывают недавние исследования кристаллов из метеоритов Кейс и Эллеген, плотность следов ядер группы железа в оливинах в 1,8 - 2,4 раза меньше, чем в пироксенах из тех же локализаций^{/7,8/}. Кроме того, предыдущие исследования оливинов метеорита Марьялахти показали, что в нем наиболее отчетливо проявляется эффект регрессии непроявленных треков в космических условиях. На рис. 3а,б приведены распределения длин следов ядер группы железа в кристаллах оливина из метеорита Марьялахти и Игл Стейшн.

Как следует из этих графиков, длина следов наиболее представительного пика смещается от 10,2 мкм до 7,5 мкм для метеорита Марьялахти.

Исходя из изменения средней длины треков ядер группы железа в метеорите Марьялахти можно с большой степенью достоверности заключить, что отношение плотности следов в оливинах из этого метеорита должно быть в $/2,9 \pm 0,6/$ раза меньше, чем в пироксенах, расположенных на той же глубине.

Далее, для определения глубины расположения образцов необходимо иметь данные о космическом возрасте метеорита. Такие измерения были впервые произведены Г. Мегруз в 1968 году^{/16/}.

Согласно его данным, значение возраста метеорита Марьялахти, полученное по концентрации космогенных изотопов 3He , ^{22}Ne , составляет около 204 млн. лет, по концентрации ^{38}Ar - 178 млн. лет. Проведенные недавно Е. М. Колесниковым измерения возраста этого метеорита, основанные на определении концентрации космогенных

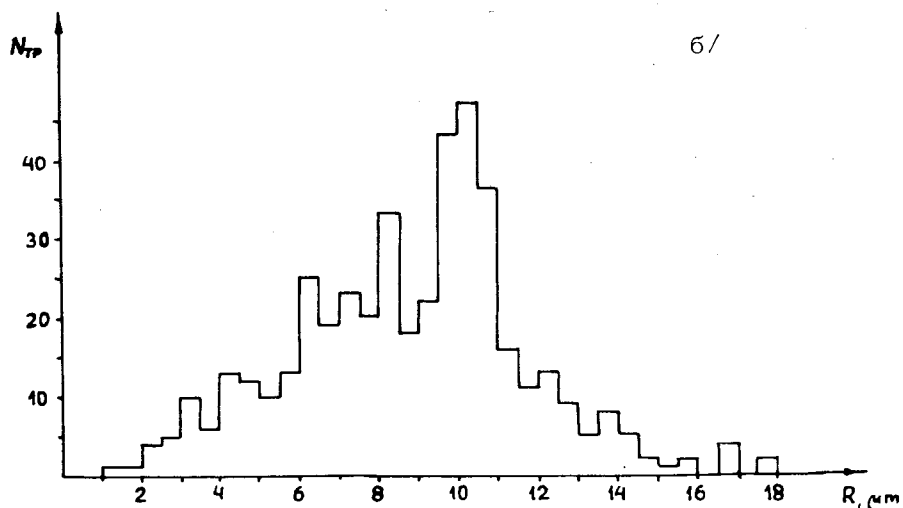
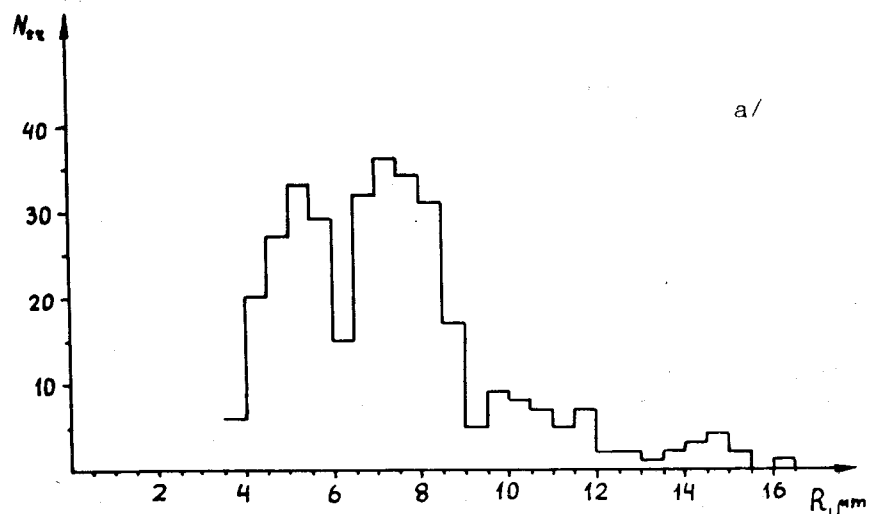


Рис. 3. Распределение длин следов ядер группы железа в оливинах из метеорита Марьялахти /а/ и из метеорита Игл Стейшн /б/.

изотопов ^{38}Ar , ^{39}Ar , дали величину $/174 \pm 11/$ млн. лет.

Это значение возраста согласуется с данными работы /14/; оно используется нами далее при расчетах как наиболее достоверное. При определении глубины расположения образцов было принято, что средняя плотность метеорита Марьялахти составляет $4,62 \text{ г/см}^3$, а химический состав соответствует приведенному в монографии /13/. Полученные нами значения глубины залегания различных участков фрагментов метеорита Марьялахти от его первоначальной /космической/ поверхности приведены в табл. 1,2. Как следует из этих таблиц, глубина расположения кристаллов для различных локализаций колеблется от 4,2 до 10-11 см.

Основываясь на этих данных, мы произвели расчеты массы метеорита Марьялахти до вхождения его в атмосферу Земли. Мы предполагали, что метеорит имеет форму тупого конуса с высотой около 20 см. При массе 44,8 кг /12,13/ поверхность такого тела составляет около $3,5 \cdot 10^3 \text{ см}^2$. Затем мы вычислили среднюю толщину слоя для поверхностных участков метеорита, устраненную при прохождении атмосферы.

Взвешенное среднее значение глубины расположения образцов составляет соответственно 5,7 и 5,5 см для большого и малого фрагментов. Мы предположили, что такой же слой устранился и на других участках поверхности этого метеорита. Таким образом, потеря массы метеорита Марьялахти при торможении в атмосфере Земли составила около 90 кг; полный вес этого метеорита был около 135 кг.

Ошибка в определении первоначального размера метеорита Марьялахти складывается из неточности в определении космического возраста метеорита $\pm 6\%$, статистических ошибок при подсчете средней плотности треков $\pm 15\%$, ошибки в определении отношения плотности треков для оливинов и пироксенов $\pm 20\%$, неопределенности геометрии первоначальной поверхности метеорита $\pm 15\%$. Она составляет $\pm 30\%$ в предположении, что интенсивность и энергетический состав тяжелой компоненты первичного космического излучения существенно не изменились за последние ~200 млн. лет.

Таким образом, во-первых, по результатам исследований плотности треков ядер группы железа можно заключить, что метеорит Марьялахти не испытал значительного дробления и фрагментации при прохождении плотных слоев атмосферы.

Во-вторых, с большой степенью достоверности можно заключить, что в процессе замедления в атмосфере Земли этот метеорит потерял немногим более 60% от первоначальной массы.

В результате этих опытов обнаружены участки, расположенные на глубине не свыше 4-5 см от доатмосферной поверхности метеорита Марьялахти. Эти участки могут служить объектом поисков сверхтяжелых космических ядер в области энергий свыше 2 ГэВ/нуклон.

В заключение авторы выражают глубокую признательность Г.Н.Флерову за постоянное внимание к работе и ценные советы.

Авторы благодарят Е.М.Колесникова за помощь в работе с метеоритом Марьялахти и Е.Л.Кринова, Л.Г.Кваша, П.Пелласа за полезные обсуждения.

Литература

1. R.L.Fleischer, P.B.Price, R.M.Walker. *Ann.Rev.Nucl.Sci.*, 15, 1 (1965).
2. P.B.Price, R.L.Fleischer. *Ann.Rev.Nucl.Sci.*, 21, 295 (1971).
3. D.Lal. *Space Sci.Rev.*, 14, 3 (1972).
4. M.Maurette, P.Pellas, R.M.Walker. *Nature*, 204, 821 (1964).
5. Y.Cantelaube, P.Pellas. *Origin and Distribution of Elements*. Ed. L.Ahrens. Pergamon Press, p. 479 (1968).
6. L.L.Kaschkarov, L.I.Genaeva, V.V.Malischew, L.M.Satarova, A.K.Lavrukhina. *Rep. No. 290, XIth Internal Conf. on Cosmic Rays, Budapest (1969)*.
7. J.C.Lorin, G.Poupeau. *Meteoritics*, 8, 410 (1973).
8. P.Pellas, A.Ducater, J.L.Berdot. *Meteoritics*, 8, 418 (1973).
9. Y.Cantelaube. *C.R.Acad.Sci. Paris*, 276D, 1093 (1973).
10. О.Отгонсурэн, В.П.Перельгин. *Сообщение ОИЯИ, Р7-7406, Дубна, 1973; АЭ, 37, 164 /1974/*.
11. Г.Н.Флеров, О.Отгонсурэн, В.П.Перельгин. *Сообщение ОИЯИ, Р7-8135, Дубна, 1974*.
12. L.H.Borgstrom. *Bull.Comm. Geol., Finlande*, 14, 45 (1903).

13. П.Н.Чирвинский. *Палласиты*. Изд. "Недра", М., 1967.
14. S.Krishnaswami, D.Lal, N.Prabhu, A.S.Tamhane. *Science*, 174, 287 (1971).
15. R.L.Fleischer, P.B.Price, R.M.Walker, M.Maurette. *Journ. Geophys. Res.*, 72, 331 (1967).
16. G.H.Megrue. *Journ. Geophys. Res.*, 73, No. 6 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел
31 октября 1974 года.