Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LI, вып. 2, 1966 г.

УДК 550.835

ОБЪЕМНАЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЛОТНОСТИ ГАММА-МЕТОДОМ

В. А. Арцыбашев, Э. П. Попов

Развитие теории и практики γ-метода требует изучения глубинности исследований в конкретных условиях. Глубинность зависит главным образом от типа источника γ-излучения, плотности среды, размеров зонда (измерительной установки) и его конструкции, положения зонда относительно поверхности исследуемой среды (наличия промежуточной среды и ее свойств). Экспериментальное изучение глубинности исследований [Емельянов, 1965; Фирстов, 1961; Филиппов, 1962; Шипенко, 1960; Eife, 1959; Wendt, Wolters, 1957] в основном относится к методу рассеянного γ-излучения.

В настоящей статье приведены дополнительные экспериментальные данные и сделана попытка систематизировать накопленные сведения, изложены результаты изучения представительности различных участков среды, прилегающей к зонду, при исследовании плотности методом рассеянного γ-излучения. Последнее необходимо учитывать при выборе оптимальных параметров измерительной установки.

При изучении глубинности в γ-методе обычно, постепенно увеличивая размеры v изучаемой среды, устанавливают зависимость регистрируемой интенсивности γ-излучения от v

$$I = f_1(v). \tag{1}$$

Вид функции (1) зависит от способа изменения v, так как рассеяние γ-излучения — процесс неаддитивный, поэтому в каждом отдельном случае для однозначности необходимо указывать геометрию измерений.

Зависимость (1) имеет характер насыщения. Предельное значение v_0 определяется такими размерами среды, увеличение которых не влияет на измеряемую величину. Степень насыщения оценим с помощью показателя, характеризующего величину отклонения от насыщенного состояния,

$$V^* = \left| \frac{I_{v_0} - I_v}{I_{v_0}} \right| \cdot 100\%, \tag{2}$$

где I_{v_0} и I_v — интенсивности γ-излучения, соответствующие насыщенному v_0 и переменному v размерам среды.

Плотность ϱ, определяемая γ-методом (назовем ее кажущейся плотностью), связана с I соотношением [Арцыбашев, 1964]

$$\varrho = a|\ln I| + b, \tag{3}$$

где параметры a и b зависят от конструкции зонда.

Аналогично выражению (2) введем показатель насыщенности относительно кажущейся плотности

$$V = \left| \frac{\varrho_{v_0} - \varrho_v}{\varrho_{v_0}} \right| \cdot 100\%, \qquad (4)$$

где ϱ_{v_0} и ϱ_v — значения кажущейся плотности, соответствующие размерам среды v_0 и v.

Радиус действия (глубинность) γ-метода характеризуют обычно не величиной насыщенного слоя, а таким слоем, которому соответствует показатель $V^* = 10\%$. При определении насыщенности по кажущейся плотности для оценки глубинности метода целесообразно принять критерий $V = 5\%$, так как для большинства типов зондов $V \approx 0{,}5\,V^*$. Показатель V непосредственно характеризует представительность определяемой величины (плотности), а показатель V^* не учитывает конструкции зонда.

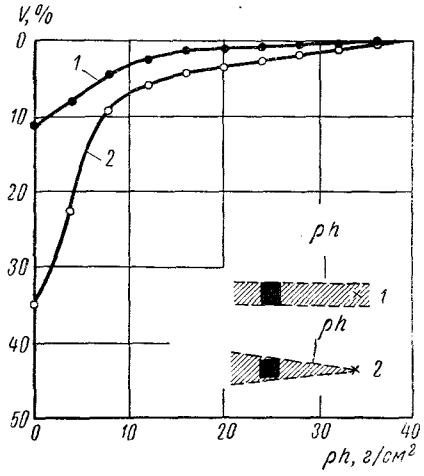


Рис. 1. Изменение показателя насыщенности в методе широкого пучка. Источник Co^{60}, детектор — сцинтилляционный счетчик. Начальный объем среды: *1* — плоский слой; *2* — клин.

Рассмотрим вопрос о глубинности исследований применительно к двум разновидностям γ-метода: методу просвечивания широким пучком и методу рассеянного γ-излучения.

Метод просвечивания широким пучком. Показатель V исследовали применительно к измерению плотности в двух параллельных вертикальных скважинах. Источник и детектор размещали по оси скважин. Объем поглощающей среды (кварцевого песка плотностью 1,62 *г/см*³) изменяли последовательным увеличением мощности первоначального слоя, имевшего в первом случае форму клина, во втором — слоя толщиной 3 *см* (см. схемы рис. 1). Вследствие этого размеры среды зависели только от одной пространственной координаты x, направленной по оси скважины,

$$v = v(x). \qquad (5)$$

Размеры дополнительного слоя характеризовали толщиной

$$\Delta x = \varrho h,$$

выраженной в массовых единицах (*г/см*²). Расстояние между источником и детектором также выражали в граммах на квадратный сантиметр. Введение массовых единиц дает возможность распространить результаты опытов на среды любой плотности.

Опыты в песчаной среде проводили с источниками Co^{60}, Ra^{226}, Cs^{137} и сцинтилляционным счетчиком с кристаллом NaI (Tl) (30 × 20 *мм*) в защитном экране толщиной 2 *мм* Al + 1 *мм* Pb. Показатель V рассмотрен при различных расстояниях между источником и детектором.

Результаты экспериментов с источником Co^{60} представлены в виде графиков (рис. 1)

$$V = V(\varrho h). \qquad (6)$$

Характер функции (6) при изменении расстояния между источником и детектором незначительно меняется. Так, при расстояниях 50 и 80 *г/см²* расхождения не превышают точности эксперимента (1—2%), поэтому на рис. 1 приведены только осредненные данные. Их можно относить ко всему рабочему диапазону расстояний между источником и детектором от 50 до 100 *г/см²*.

Как следует из графиков рис.1, влияние отдельных участков среды резко убывает при удалении от плоскости, проходящей через источник и детектор. Основной вклад в регистрируемую величину вносят участки, расположенные непосредственно у линии источник-детектор. Например, переход от первоначального объема в виде клина к плоскому слою высотой 5 *г/см²* (рис. 1, схемы *2* и *1*) изменяет V от 35 до 11%. При дальнейшем наращивании слоя на 20—25 *г/см²* V изменяется всего на 8—9%.

С источником Ra^{226} и Cs^{137} получены аналогичные результаты. Экспериментально определены радиус действия и величина насыщенного слоя (табл. 1), выраженные мощностью дополнительного слоя ρh (см. рис. 1).

Таблица 1

Глубинность исследования методом просвечивания широким пучком (сцинтилляционный счетчик)

Источник	ρh, *г/см²*	Радиус действия		
		г/см²	*см*, $\rho = 2{,}0$ *г/см³*	*см*, $\rho = 2{,}7$ *г/см³*
Co^{60}	35	9	4,5	3,3
Ra^{226}	35	9	4,5	3,3
Cs^{137}	19	4	2,0	1,5

В аналогичных опытах с газоразрядным счетчиком СТС-8 (длина катода счетчика и мощность первоначального слоя 15 *см*) слой насыщения оказался равным для всех типов источников 10—15 *г/см²*, а радиус действия не превышал длины катода счетчика, т. е. ограничен первоначальным объемом.

Показатели радиуса действия можно непосредственно использовать для оценки разрешающей способности метода широкого пучка при определении плотности слоистой среды. Разрешение метода характеризуется минимальной мощностью слоя, плотность которого можно определить без заметной (1—2%) ошибки. При сцинтилляционном счетчике минимальная мощность слоя, плотность которого отличается от плотности вмещающей среды на 50%, превышает размеры счетчика всего на 4—7 *г/см²*. При газоразрядном счетчике мощность минимального слоя равна длине катода счетчика.

Метод рассеянного γ-излучения. Типичная схема эксперимента по изучению глубинности методом рассеянного γ-излучения показана на рис. 2. Зонд, состоящий из источника, детектора и свинцового разделительного экрана, расположен непосредственно на поверхности рассеивающей среды. Расстояние между источником и детектором (длина зонда) — основная характеристика измерительной установки. Для метода рассеянного γ-излучения представляет интерес изучение как величины горизонтального насыщенного слоя h, так и мощности вертикального насыщенного слоя Z, размещенного за пределами зонда.

Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал характеризует в основном величину насыщенного слоя h. Она зависит главным образом от типа источника γ-излучения и плотности среды.

Систематизированные результаты ряда экспериментов по определению насыщенного слоя (силикатная среда) показаны в табл. 2. Чтобы распространить данные табл. 2 на среды произвольной плотности, необходимо значение насыщенного слоя ϱh, $г/см^2$ разделить на плотность среды ϱ, $г/см^3$.

Таблица 2

Определение слоя насыщения при измерении плотности методом рассеянного γ-излучения

ϱ, $г/см^3$	h, $см$	ϱh, $г/см^2$	Среднее ϱh, $г/см^2$	Исследователь
		Cs^{137}		
1,5 *	15—20	22—30		В. А. Емельянов, 1965
2,6	10	25	22 ± 8	Е. М. Филиппов, 1962
1,7	8—10	14—17		О. П. Шипенко, 1960
		Co^{60}		
2,6	12	33		Е. М. Филиппов, 1962
1,8 *	15—20	27—36		В. Г. Фирстов, 1961
1,1 **	30	33	32 ± 5	К. Ейфе, 1959
1,1 **	25	28		

* Ориентировочно.
** Исправлена по избыточной электронной плотности.

Насыщенность по оси зонда за его пределами (рис. 2, слой Z) изучена недостаточно. В соответствии с экспериментом слой насыщения Z примерно в 3—5 раз меньше насыщенного слоя h, причем со стороны детектора величина слоя Z больше, чем со стороны источника.

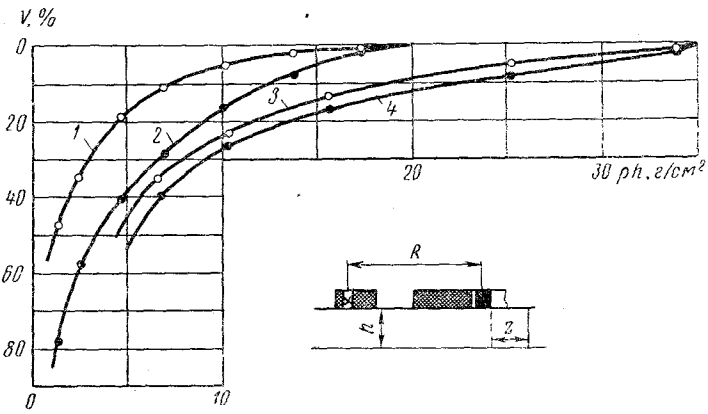


Рис. 2. Изменение показателя насыщенности в методе рассеянного γ-излучения. Силикатная среда, детектор — сцинтилляционный счетчик.

1 — источник Cs^{137}, $\varrho R = 24$ $г/см^2$; *2* — источник Cs^{137}, $\varrho R = 49$ $г/см^2$; *3* — источник Co^{60}, $\varrho R = 39$ $г/см^2$; *4* — источник Co^{60}, $\varrho R = 55$ $г/см^2$.

Для определения радиуса действия метода рассеянного γ-излучения и изучения зависимости радиуса действия и насыщенности от типа источника и длины зонда рассмотрена зависимость (6) для источников Co^{60}, Cs^{137} при сцинтилляционном детекторе. Как следует из анализа

рис. 2, величина насыщенного слоя не зависит от длины зонда, если его длина не менее 30—40 *г/см*². Глубинность исследований (радиус действия) существенно меньше величины насыщенного слоя и увеличивается с ростом зонда. Для источника Cs^{137}, например, при увеличении длины зонда от 25 до 49 *г/см*² она возрастает от 11 до 15 *г/см*², для источника Co^{60} при длине зондов 39 и 55 *г/см*², соответственно, 26 и 29 *г/см*².

Результаты расчета, приведенные в табл. 3, относятся к так называемым неколлимированным изотропным зондам, у которых источник и детектор расположены непосредственно вблизи поверхности среды, причем отсутствуют какие-либо коллиматоры первичного или рассеянного γ-излучения. На практике в основном применяют именно такие зонды.

Таблица 3

Глубинность исследования методом рассеянного γ-излучения для зондов от 30—40 до 80—100 *г/см*²

Источник	ϱh, *г/см*²	Радиус действия		
		*г/см*²	*см*, $\varrho = 2{,}0$ *г/см*³	*см*, $\varrho = 2{,}7$ *г/см*³
Co^{60}	37	31	16	12
Cs^{137}	21	16	8	6

В пределах насыщенного объема рассеивающей среды существует зона (назовем ее действующей), из которой при измерении плотности поступает основная информация. Форма и структура зоны в тех или иных условиях определяют глубинность исследований и влияют на выбор зонда и интерпретацию результатов измерений. Так как экспериментальное изучение формы действующей зоны затруднительно, основные качественные закономерности выяснялись методом расчета регистрируемого поля однократно рассеянного γ-излучения [Филиппов, 1962]. В точке *O* рис. 3, *а* размещается источник γ-излучения, а в точке *P* — детектор. Так как симметрия осевая, расчет выполнили только в полуплоскости, проходящей через *OP*. Интенсивность однократно рассеянного γ-излучения от источника *O* в точке *P* представим выражением

$$I_1 = B \int_D F(s)\, ds, \tag{7}$$

где B — постоянный множитель; s — площадь рассеивающего элемента;

$$F(s) = \sigma(\theta)\, \frac{\exp[-\mu_0 r_1 - \mu_\theta r_2]}{r_1^2 \cdot r_2} \sin\gamma,$$

r_1 и r_2 — расстояние соответственно от источника до рассеивающего элемента и от рассеивающего элемента ds до детектора; μ_0 и μ_θ — линейный коэффициент ослабления соответственно первичного γ-излучения, и γ излучения, рассеянного под углом θ; $\sigma(\theta)$ — сечение рассеяния на угол θ.

Если среда неоднородная, то однократное рассеяние рассчитывается по формуле (7) с предварительной заменой r_1 и r_2, а также $\mu_0 r_1$ и $\mu_\theta r_2$

$$r = \sum_{i=1}^{m} r_i \quad \text{и} \quad \mu r = \sum_{i=1}^{m} \mu_i r_i, \tag{8}$$

где суммирование производится по всем составляющим сложной среды.

Ядро $F(s)$ интеграла (7) характеризует плотность регистрируемого однократно рассеянного γ-излучения, т. е. поведение функции $F(s)$ отражает форму и структуру интересующей нас действующей зоны.

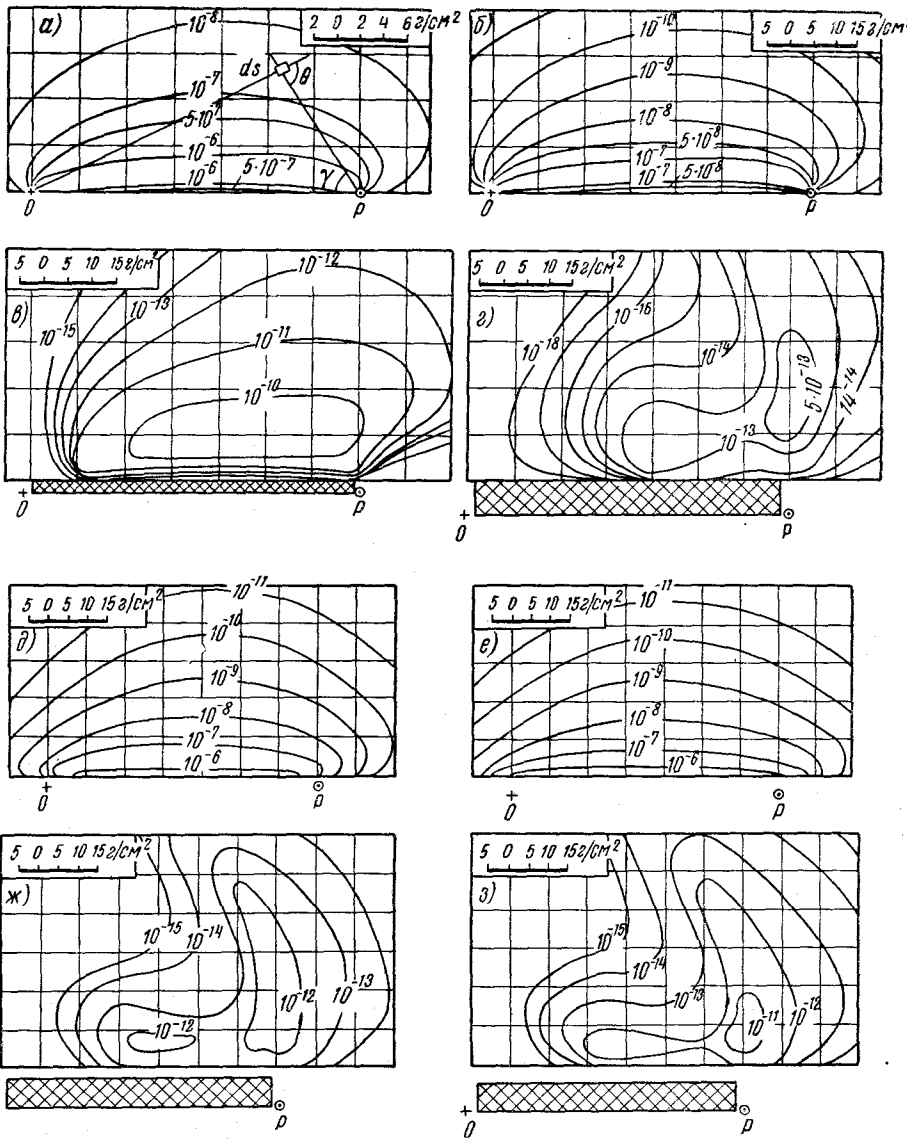


Рис. 3. Изолинии $F(s)$ плотности однократного рассеянного γ-излучения: изотропный зонд длиной 28 (*а*) и 70 (*б*) г/см²; зонды с малой (*в*) и большой (*г*) направленностью; изотропный зонд при малом (*д*) и большом (*е*) воздушном зазоре, направленный зонд при малом (*ж*) и большом (*з*) воздушном зазоре.

Расчет изолиний функции $F(s)$ для источника Co^{60} и силикатной среды в зависимости от длины и конструкции зонда и наличия воздушного слоя (зазора) между зондом и средой приведена на рис. 3. На схемах *а* и *б* показан изотропный зонд. В схемах *в* и *г* источник и детектор удалены на некоторое расстояние от поверхности среды. Расположенный между

ними свинцовый экран касается поверхности среды и создает направленный перпендикулярно поверхности поток первичного γ-излучения. Схемы *д* и *е* отличаются от изотропного зонда *б* только воздушным промежутком между зондом и средой. Схемы *ж* и *з* аналогичны схеме направленного зонда *г* и отличаются от него воздушным зазором между зондом и средой. Длина зонда *а* равна 28 *г/см*^{2}, всех остальных зондов 70 *г/см*^{2}. Если плотность среды равна 2,5 *г/см*^{3}, то величина малого воздушного зазора (схемы *д* и *ж*) равна 1 *см*, а большого (схемы *е* и *з*) 2 *см*.

Изотропные зонды создают действующую зону правильной формы, напоминающей полуэллипс. Регистрируемое поле несколько асимметрично. Асимметрия, рассчитанная по разнице площадей внутри соответствующих изолиний относительно центра зонда, возрастает с увеличением длины зонда: на 6% для малого зонда (см. рис. 3, *а*) и на 14% для большого (см рис. 3, *б*). Основное влияние на регистрируемый эффект оказывает участок среды, расположенный между источником и детектором. Влияние боковых частей среды, расположенных за пределами зонда, невелико (10%). Максимум однократно рассеянного γ-излучения находится на глубине, которая увеличивается с ростом длины зонда (см. рис. 3, *а* и *б*). Мощность слоя насыщения h больше слоя насыщения Z (см. схему рис. 2) по расчетным данным в 3—8 раз, причем со стороны детектора слой насыщения примерно в два раза больше, чем со стороны источника.

Несмотря на некоторую разницу, случаи *а* и *б* очень сходны, т. е. с изменением длины зонда форма и строение действующей зоны в основном сохраняются. Поэтому влияние воздушного зазора и направленности излучения рассмотрим только на примере большого зонда.

Переход от изотропных зондов к зондам с направленным приемом и излучением (см. рис. 3, *в* и *г*) сопровождается изменением действующей зоны: регистрируемое поле смещается к детектору, увеличивается глубинность и на несколько порядков уменьшается интегральная интенсивность рассеянного γ-излучения.

При появлении воздушного зазора между зондом и средой (см. рис. 3, *д* — *з*), если зонд изотропный (см. рис. 3, *б*, *д*, *е*), сохраняется симметрия действующей зоны относительно центра зонда, постепенно увеличивается с ростом зазора интегральная интенсивность рассеянного γ-излучения, максимум рассеянного γ-излучения смещается непосредственно на поверхность среды. При зонде с направленным излучением и приемом (рис. 3, *г*, *ж*, *з*) при аналогичных изменениях максимум рассеянного γ-излучения размещается на некотором расстоянии от поверхности среды даже при наличии воздушного зазора. По-видимому, направленный зонд будет менее чувствителен к неровностям поверхности среды и изменениям воздушного зазора между зондом и средой. Это предположение проверено экспериментально. С помощью двух различных зондов длиной по 60 *г/см*^{2} изучено влияние воздушного зазора между зондом и силикатной средой (плотность 2,35 *г/см*^{3}). Источник Co^{60}, счетчик сцинтилляционный. В направленном зонде источник и детектор смещены в глубь свинцового экрана на 2 *см*.

Получены следующие значения относительной величины рассеянного γ-излучения:

	Зазор, *мм*										
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Неколлимированный зонд . . .	1,00	1,11	1,22	1,34	1,46	1,58	1,71	1,85	2,00	2,16	2,33
Коллимированный зонд	1,0	1,06	1,10	1,15	1,19	1,23	1,27	1,32	1,37	1,42	1,47

Как видно из приведенных данных, влияние воздушного зазора резко снижается при направленном зонде. Такой зонд заслуживает предпочтения при измерениях на неровной поверхности среды, когда переменная величина воздушного зазора является существенной помехой.

Выводы

1. Насыщенный слой при измерениях плотности методом широкого пучка и методом рассеянного γ-излучения не зависит от расстояния между источником и детектором и составляет 30—40 *г/см*^{2} для Co^{60} и 17—22 *г/см*^{2} для Cs^{137}.

2. Структура действующей зоны при измерениях плотности методом широкого пучка неоднородна. Максимальное влияние на измерения оказывает объем среды, заключенной в телесном угле, под которым виден детектор из точки размещения источника γ-квантов. Радиус действия незначительно превышает размеры детектора, вследствие чего разрешающая способность метода широкого пучка практически полностью определяется величиной детектора.

3. Глубинность исследований (радиус действия) в методе рассеянного γ-излучения для большинства зондов 25—30 *г/см*^{2} при источнике Co^{60} и 10—15 *г/см*^{2} при Cs^{137}, причем она убывает при уменьшении длины зонда.

4. Структура действующей зоны в поле рассеянного γ-излучения симметрична относительно центра зонда, если зонд изотропный, и резко асимметрична для направленных зондов.

5. Зонды с направленным перпендикулярно поверхности среды излучением и приемом излучения отличаются от изотропных снижением скорости счета (при одинаковой активности источника). Преимуществом направленных зондов является их меньшая чувствительность к неоднородности поверхности среды.

ЛИТЕРАТУРА

Арцыбашев В. А. Измерение плотности горных пород гамма-методом. В сб. Вопросы рудной геофизики, вып. 4. Недра, 1964.

Емельянов В. А. Гамма-лучи и нейтроны в полевых почвенно-мелиоративных исследованиях. Госатомиздат, 1965.

Филиппов Е. М. Прикладная ядерная геофизика. Изд-во АН СССР, 1962.

Фирстов В. Г. Радиометрический контроль плотности земляного полотна и дорожных одежд. Тр. Харьк. автомоб.-дорожн. ин-та, № 25, 1961.

Шипенко О. П. Гамма-гамма плотномер для измерения плотности почвы. Вестн. сельскохоз. наук, № 5, 1960.

Eife K. H. Die Bestimmung des Raumgewichtes von Böden und Gesteinen durch Gamma-Strahlen. Freiberger Forschungs-Heft, C. 61, Geophysik, Acad. — Verlag. Berlin, 1959.

Wendt I. und Wolters R. Eine weitere Methode zur Bestimmung des Raumgewichtes von Böden durch Gamma-Strahlen. Geol. Jahrb., B. 72. Hannover, 1957.