

И. Ф. ГОЛОВИНА, Н. Н. МАЛОВ

К ТЕОРИИ ГЕЙЗЕРОВ

Рассматривается механизм действия гейзеров. На основе принятой автором упрощенной схемы анализируется активность камчатских гейзеров, их температурный режим, продолжительность отдельных циклов и т. д.

Среди камчатских гейзеров, открытых Т. И. Устиновой в 1941 г. [1] и обследованных ею и С. И. Набоко [2—4], наиболее мощным является гейзер Великан, который выбрасывает струю воды на высоту 30—50 м (струя пара поднимается еще в несколько раз выше). Характерной особенностью Великана является длительный сильный выброс пара (20—30 мин.), продолжающийся после окончания основного извержения, длящегося всего 1—1,5 мин.

Проследив по одному циклу деятельности Великана в 1941 и 1951 гг., Т. И. Устинова отметила удлинение цикла с 2 ч. 52 м. до 3 ч. 10 м. В конце августа 1951 г. С. И. Набоко наблюдала 15 циклов (две серии наблюдений).

Средняя продолжительность наблюдаемых циклов составила 3 ч. 11 м., но колебания около среднего значения были значительны (от 2 ч. 33 м. до 3 ч. 48 м.), причем сокращение цикла происходило главным образом за счет сокращения «фазы покоя» — между окончанием извержения пара и появлением воды на дне грифона гейзера; при этом за коротким извержением следовал и короткий цикл.

Можно учесть 17 циклов, пропущенных С. И. Набоко в течение четырех ночей (по три-пять циклов в каждую); средняя продолжительность этих пропущенных циклов составляет 3 ч. 23 м. Рассчитанная по всем циклам средняя продолжительность составляет 3 ч. 17 м.

Мы были в Долине гейзеров летом 1959 г. и наблюдали в течение двух суток семь извержений Великана. Между ними, по-видимому, произошло еще пять извержений, нами не наблюдавшихся из-за темноты или нашего отсутствия. Данные наблюдений приводятся в табл. 1.

Средняя длительность наблюдавшихся циклов составляет 3 ч. 43 м., пропущенных — 3 ч. 53 м., средняя для всех циклов 3 ч. 50 м.

Таким образом, замеченное Т. И. Устиновой и С. И. Набоко удлинение циклов в последнее время продолжалось. За истекшие 8 лет продолжительность цикла увеличилась на 30 мин.

Наши наблюдения производились при очень плохой дождливой погоде и температуре воздуха 12—15°. Условия наблюдения С. И. Набоко,

Таблица 1

Наблюдение за деятельностью Великана

Дата	Время начала извержения (местное)	Длительность цикла
29. VII	14 ч. 40 м.	3 ч. 51 м.
30. VII	18 31	Средняя за три цикла
	Пропущено	
	Пропущено	3 ч. 53 м.
	6 ч. 10 м.	
31. VII	10 00	3 50
	13 28	3 28
	Пропущено	Средняя за пять циклов
	21 ч. 30 м.	
	Пропущено	
	Пропущено	3 ч. 53 м.
8 ч. 55 м.		
Средняя за 11 циклов		3 ч. 50 м.

судя по приводимым ею фотографиям, были значительно лучше. Однако столь большое различие в длительности циклов едва ли можно объяснить лишь изменением атмосферных условий. Мы считаем удлинение цикла вполне реальным; возможно, оно служит предвестником грядущего ослабления деятельности Великана, как это наблюдалось у гейзеров Исландии.

Интересно отметить, что расчетная длительность ночных (пропущенных при наблюдениях) циклов немного превышает длительность дневных циклов (как по данным С. И. Набоко, так и по нашим данным).

До настоящего времени не существует общепризнанной теории гейзеров. Большинство исследователей полагает, что механизм действия различных гейзеров различен [5, 6]. Для гейзеров, подобных по своим проявлениям Великану, можно считать общепринятыми следующие положения.

а) извержение возникает при внезапном испарении воды в грифоне гейзера (и, возможно, в части его канала);

б) причинами извержения являются постепенное повышение температуры воды в грифоне; накопление пузырей пара и газов, растворенных в воде, вблизи зеркала грифона и связанное с этим накоплением выплескивание воды из грифона и снижение гидростатического давления, действующего сверху на слой жидкости, расположенные ниже зеркала грифона.

При возникновении быстрого испарения перегретой воды начинается мощный выброс пароводной смеси, давление снижается, и процесс распространяется в глубь грифона;

в) прекращение извержения связано с исчерпанием запасов горячей воды, самоохлаждением воды благодаря быстрому испарению, а также с проникновением в канал гейзера холодной воды. Мы, однако, полагаем, что последняя причина является наименее существенной, и что питание канала осуществляется в основном горячей водой (см. ниже);

г) канал гейзера соединен подземными трещинами с областью циркуляции горячей и холодной (что менее существенно) воды.

Однако вопрос о том, существуют ли, как это полагает Барт и другие [6], относительно большие подземные полости, где может собираться (и испаряться) перегретая вода, спорен. Так, С. И. Набоко считает, что у Великана таких полостей нет. По ее оценке вместимость грифона Великана составляет  $13,5 \text{ м}^3$ , что соответствует и нашей глазомерной оценке, а масса выброшенной при извержении воды —  $23 \text{ т}$ . Эта оценка, полученная измерением дебита ручья, текущего при извержении с площадки гейзера, кажется нам несколько заниженной. Во-первых, далеко не вся изверженная вода попадает на небольшую ( $30 \times 35 \text{ м}^2$ ) площадку гейзера. В этом мы убедились, попытавшись наблюдать извержение с края площадки: при развитии извержения нам пришлось отступить на  $20\text{--}25 \text{ м}$ . Во-вторых, замеры ручья не учитывают массу пара, уносимого ветром. Между тем при длительном парообразовании после окончания извержения доля пара в общей изверженной массе воды делается заметной (см. уравнение (6)).

Мы полагаем, что подобные полости существуют. Отдельные детали поведения Великана, по нашему мнению, подтверждают это предположение. Так, грифон Великана после извержения некоторое время пустует, а затем очень медленно, в течение примерно полутора часов, наполняется. После заполнения грифона вода начинает медленно изливаться через его края, причем отчетливо заметно двукратное (а иногда и трехкратное) попеременное поднятие и опускание уровня воды, а также то возникающее, то исчезающее местное закипание и небольшие выбросы воды через края грифона. Эти особенности, отмечавшиеся и другими наблюдателями, плохо укладываются в простую схему: наполнение, нагревание, закипание, извержение.

Если канал гейзера связан с большими полостями, число которых к тому же не менее двух, то объяснение указанных особенностей возможно. Действительно, в полости может поступать перегретая вода, закипающая там; при этом растет давление внутри полости, которое передается в канал гейзера и через него — в грифон, а также в другую полость (или другие полости). Так как заполнение полостей не может происходить строго синхронно, то возникает сложная борьба давлений, создаваемых различными полостями. Это сказывается на скорости заполнения грифона и может вызвать в нем колебания уровня воды. Такова же, как нам кажется, и причина немонотонного возрастания со временем температуры воды в различных сечениях канала гейзера, отмеченного Торкельсоном у исландских гейзеров. И лишь когда распределение давлений в полостях установится таким, что все они согласно питают грифон, происходит мощное выделение пара в грифоне с последующим извержением.

Конечно, такой сложный механизм лишь в редких случаях действует удовлетворительно — именно поэтому гейзеры встречаются неизмеримо реже, чем другие горячие источники, и оказываются, по-видимому, относительно недолговечными.

Становится понятным и отмеченное С. И. Набоко различие в продолжительности отдельных циклов: после особенно сильного извержения нужно много времени, чтобы наполнить опустошенные полости и поднять в них давление; лишь после этого начнется наполнение грифона.

При извержении грифон опустошается, по-видимому, очень быстро, за доли минуты (см. уравнение (5)). Водяная же струя существует дольше — более минуты. Это возможно лишь при условии быстрого пополнения запасов воды в грифоне и канале — вода гонится туда повышенным давлением из подземных полостей. В результате грифон и канал могут дополнительно прогреться, после чего режим испарения меняется, и почти вся неиспарившаяся вода идет на создание стенок пузырьков газа и пара — гейзер начинает интенсивно парить. Эта фаза парения, хорошо выраженная у Великана, наблюдается не у всех гейзеров.

Следует отметить, что струю, выбрасываемую гейзером, не совсем правильно называть струей пара — скорее, это струя «тумана» или своеобразной «пены», состоящей из пузырьков с жидкой оболочкой, заполненных газом и паром. (Мы пользуемся старым термином «пар».)

Когда давление в быстро опустошающихся полостях еще снизится, поступление пара и воды в канал замедлится; тогда начинает сказываться самоохладение воды в процессе испарения; при этом парообразование замедляется, сосредоточиваясь преимущественно в верхних слоях. Часть воды остается в канале, но пар еще отделяется от воды и извергается, хотя и менее интенсивно.

Позже процесс парообразования совсем прекращается, и наступает фаза покоя гейзера.

В этой стадии поступление холодной воды (если таковое имеет место) может сократить длительность процесса парообразования и удлинить стадию покоя. Однако приток холодной воды не является принципиально необходимым и, вероятно, вообще не играет большой роли.

Уже давно подчеркивалась роль растворенных газов, создающих зародыши пузырьков, необходимых для возникновения испарения [6, 7]. Резкое различие в плотности пара и жидкости может вызвать резкую разницу в скоростях поднятия воды и пузырьков в канале гейзера и его грифоне. Это обстоятельство, отмечавшееся в работе [7], способствует временному обогащению верхних слоев воды пузырями газа и пара. С. И. Набоко вслед за С. А. Дуровым [8] подчеркивает, кроме того, большую роль электролитов, меняющих поверхностное натяжение и облегчающих возникновение пузырьков, а также роль коллоидов, упрочняющих стенки пузырьков. Стойкость же пузырьков определяет возможность их накопления в жидкости.

С. И. Набоко приводит численный пример, рассчитанный С. А. Дуровым на основании данных о большом исландском гейзере, не имеющем грифона. Этот расчет, как и следовало ожидать, показывает, что при быстром (адиабатическом) испарении в пар переходит лишь незначительная часть имеющейся массы жидкости, но что интенсивность этого процесса весьма велика.

Исландский гейзер, возможно, и не связан с большими подземными полостями (по крайней мере, их существование оспаривается С. И. Набоко и С. А. Дуровым). Но Великан действует не так, как исландский гейзер, и имеет громадный грифон. Представляет интерес рассчитать условия работы Великана, задавшись известными из наблюдений данными: масса воды в грифоне  $M = 13,5 \text{ т}$ ; высота выброса водяной струи  $H = 30 \text{ м}$ ; время основного извержения (существования водяной струи)  $\tau_1 = 1,5 \text{ мин.}$ ; длительность последующего интенсивного испарения  $\tau_2 = 20 \text{ мин.}$ ; площадь зеркала грифона  $F_0 = 4,5 \text{ м}^2$ ; с глубиной площадь горизонтального сечения грифона уменьшается (в вертикальном сечении грифон подобен трапеции с очень коротким основанием внизу). Поскольку извержение происходит не вполне равномерно со всей площади зеркала, то в дальнейшем будет учтена меньшая площадь  $F = 1 \text{ м}^2$ ; глубина грифона  $h = 6 \text{ м}$ ; температура на поверхности воды перед извержением равна  $100^\circ$ ; с глубиной температура растет по закону, для Великана не установленному.

Расчет проведен для двух средних температур воды в грифоне, выбранных из следующих соображений: под давлением  $1,5 \text{ атм}$ , т. е. вблизи дна грифона, температура кипения воды равна  $118^\circ$ ; полагая, что адиабатическое закипание охватывает весь грифон (и даже, возможно, часть нижежащего канала), примем среднюю температуру воды перед закипанием равной  $110^\circ$  и  $115^\circ$ . В дальнейшем в результатах численных расчетов верхняя строка относится к температуре  $110^\circ$ , а нижняя к температуре  $115^\circ$ . Как будет видно из расчета, небольшие изменения начальной температуры не изменяют существенных особенностей результата.

Пусть  $S_1$  — энтропия  $1 \text{ г}$  воды при средней температуре жидкости в грифоне  $T_1$  (в формулах везде фигурирует абсолютная температура);  $S_2$  — то же после испарения, при температуре  $T_2$ ;  $S$  — энтропия пара при  $T_2$  (разность энтропий пара и воды обусловлена существованием тепла испарения);  $x$  — доля испарившейся жидкости (по массе). Считая процесс испарения адиабатным, т. е. происходящим при постоянной энтропии, имеем:

$$S_1 = S_2(1 - x) + Sx.$$

Отсюда получаем (табл. 2):

$$x = \frac{S_1 - S_2}{S - S_2} = \frac{1,87\%}{2,77\%}. \quad (1)$$

При этом расчете мы не учитываем факта испарения в пузырьки и образования добавочной свободной поверхности жидкости, так как соответствующее изменение энтропии мало, как мала и работа образования пузырьков (см. уравнение (2)) по сравнению с работой испарения. Но сам факт образования пузырьков представляется нам очень важным. Примем средний радиус пузырька  $R = 0,2 \text{ см}$ ; толщину его стенки  $d = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ . Если удельный объем пара равен  $V \text{ см}^3/\text{г}$ , то число пузырьков, образующихся при испарении  $1 \text{ г}$  воды:

$$N = \frac{3}{4\pi} \frac{V}{R^3},$$

Таблица 2

## Расчет количества испарившейся жидкости

Температура, °С	Энтропия воды, $S_1, S_2$ , кал/г. град	Удельный объем пара, $V$ , см <sup>3</sup> /г	Энтропия пара $S$ , кал/г. град	Процент испарившейся жидкости $x$ (по массе) для температур испарения	
				100°	110°
100	0,312	1674	1,756	—	—
110	0,339	1240	1,728	1,87	—
115	0,352	1050	1,714	2,77	—
120	0,365	891	1,701	3,68	1,87
130	0,391	668	1,676	5,45	3,74
140	0,416	508	1,652	7,20	5,55
160	0,434	307	1,611	10,5	9,00
180	0,511	195	1,575	13,8	12,4
210	0,582	106	1,530	18,7	17,5
310	0,800	18,5	1,340	33,7	33,2

их свободная поверхность равна:

$$F_2 = 2F_1 = 8\pi R^2 N = 6 \frac{V}{R} \text{ см}^2/\text{г}.$$

При поверхностном натяжении  $\sigma = 60 \text{ эрг/см}^2$  свободная энергия поверхности составляет

$$W_F = F_2 \sigma = 6 \frac{V}{R} 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ кал/г} = 0,07 \text{ кал/г}, \quad (2)$$

что значительно меньше работы расширения пара при испарении, равной 40,7 кал/г.

Масса жидких стенок на 1 г пара составляет (в г):

$$y = F_1 d = \frac{3Vd}{R} = 5. \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что масса жидких стенок превышает массу пара. При подходящих условиях можно ожидать, что практически вся неиспарившаяся вода пойдет на создание стенок пузырьков. Каковы же эти условия? Из уравнений (1) и (3) получаем условие полного расхода воды:

$$1 = x + yx = x \left( 1 + \frac{3Vd}{R} \right) = 6x. \quad (4)$$

Отсюда следует необходимое значение испаряющейся доли:  $x = 0,167$ . По данным табл. 2 находим соответствующую начальную температуру:  $T_1 = 471^\circ \text{ абс.} = 198^\circ$ . Это вполне реальная температура для подземных полостей, питающих канал гейзера.

По-видимому, эта причина может объяснить работу гейзеров, не дающих водяной струи (а только пар), а также и других термальных источников. Так, по С. И. Набоко, парящие источники Долины гейзеров на Камчатке имеют температуру пара до  $117^\circ$ ; посещенные нами fumaroles на вулкане Эбеко (о-в Парамушир Курильской группы) извергают парогазовую струю с температурой  $110\text{--}140^\circ$  [9—10]. Струя вещества на вулкане Эбеко хорошо видна у самого ее основания. Если бы извергался только перегретый пар, а не парогазовая смесь, заключенная в пузырьки, то конденсация пара наступала бы позже на каком-то расстоянии от основания струи (вспомним, что струя пара из обычного чайника у самого носика еще не видна).

Конечно, в выходящей струе пузыри будут расширяться и лопаться, так что конденсация возникнет и здесь, но не у самого основания струи.

Приняв температуру испарения равной  $110^\circ$ , находим по табл. 2, что вся жидкость будет использована на испарение и образование стенок пузырьков, если доля испарившейся воды составит 21,6%; для этого начальная температура адиабатно закипающей воды должна равняться  $250^\circ$ , что в вулканических условиях также вполне возможно.

По известной высоте подъема изверженной жидкой струи, увлекаемой паром, найдем начальную скорость выброса Великана ( $g$  — ускорение силы тяжести):

$$u = \sqrt{2gH} = 2.44 \cdot 10^3 \text{ см/сек.}$$

Это число не вполне обосновано, так как при его вычислении принято, что вода поднимается свободно, преодолевая лишь действие тяжести. На самом деле вода окружена паром, и следовало бы учесть ряд обстоятельств, например, возможное расширение струи, архимедову силу окружающего пара (эти факторы при заданной высоте уменьшают начальную скорость), а также трение, требующее увеличения начальной скорости. Поскольку свойства гейзерной струи не исследованы, подобные уточнения пока невозможны. Однако наша приближенная оценка, вероятно, все же недалеко от истины. Механическая энергия вещества, изверженного при первом опустошении грифона, т. е. со средней глубины  $h/2$ , равна:

$$W_m = g(H + h/2) = 0.33 \text{ Дж/г} = 0,08 \text{ кал/г,}$$

что также мало по сравнению с работой расширения пара при испарении.

Объем 1 г изверженного вещества определяется в основном объемом пара и составляет:

$$V_0 = [1 - (x + yx) + Vx] = \frac{30,2}{45,2} \text{ см}^3/\text{г.}$$

Поэтому водяная струя, содержащая более 80% извергающейся массы, но имеющая относительно малый объем, видна при извержении очень плохо.

Зная скорость выброса, находим время, требуемое на опустошение грифона:

$$\tau = \frac{V_0 M}{u F} = \frac{17}{25} \text{ сек.} \quad (5)$$

Таким образом, в первой стадии извержения гейзер развивает громадную мощность:

$$P = \frac{W_m M}{\tau} = \frac{260}{180} \text{ квт}$$

и высокую паропроизводительность:

$$Q = \frac{Mx}{\tau} = \frac{53}{54} \text{ т/час,}$$

что превосходит паропроизводительность многих типов современных котлов. Столь большая паропроизводительность объясняется, конечно, тем, что испарение происходит не с поверхности зеркала грифона, а в многочисленных пузырьках газа, содержащегося в толще воды. Приняв средний радиус растущего пузырька равным  $0,5 R = 0,1 \text{ см}$ , получим полную поверхность испарения, допустив для простоты постоянную скорость испарения

$$F_{\text{исп}} = 3 \frac{VMx}{\tau \cdot 0,5R} = \frac{7,0}{7,6} \cdot 10^4 \text{ м}^2.$$

Эти числа, на четыре порядка превосходящие поверхность зеркала гейзера, оправдывают сделанное выше пренебрежение испарением с поверхности грифона по сравнению с испарением в пузырьки. Быстрое паро-

образование, естественно, сопровождается интенсивным выбросом вещества наружу.

Фактическое время существования пароводяной струи у Великана составляет  $\tau_1 = 1,5$  мин., что превосходит расчетное время первого опустошения грифона. Следовательно, струя должна поддерживаться быстрым притоком новых масс воды и пара из подземных полостей, становящихся, по-видимому, необходимым элементом системы Великана. Допустим, что за время  $(\tau_1 - \tau)$  интенсивность выброса в среднем вдвое меньше, чем в начальной стадии извержения. Тогда дополнительная изверженная масса составляет:

$$M_1 = \frac{M}{2} \frac{90 - \tau}{\tau} = \frac{2,15 M}{1,30 M}.$$

Мощное, но более спокойное выделение пара продолжается после исчезновения водяной струи еще  $\tau_2 = 20$  мин. Приняв, что при этом паропроизводительность ослаблена, например, еще втрое, получаем добавочную массу пара

$$M_{II} = \frac{Q\tau_2}{6} = 0,22 M.$$

Вместе с массой воды, образующей стенки пузырьков, получим добавочную массу:

$$M_2 = 6M_{II} = 1,32 M.$$

Итак, общий выброс массы за один цикл извержения составляет:

$$M_0 = M + M_1 + M_2 = \begin{matrix} 4,47 M = 61 m \\ 3,62 M = 48 m \end{matrix} \quad (6)$$

что превосходит изверженную массу, измеренную С. И. Набоко, в 2,6—2,1 раза. Эти числа, по нашему мнению, говорят в пользу гипотезы о существовании у Великана подземных полостей, во много раз превосходящих грифон по объему и связанных с каналом гейзера. С. А. Дуров [8], возражая против мнения Барта [11], полагавшего, что объем полостей, связанных с каналом исландского гейзера, превосходит объем канала в сотни раз, указывал, что Барт ошибочно считал объем воды в струе преувеличенным в 25 раз. Для помещения этой преувеличенно большой массы воды Барту и понадобились полости, в сотни раз превышающие объем канала гейзера. Но у исландского гейзера грифона нет. Великан же с его громадным грифоном, по-видимому, все же имеет полости, в несколько раз превосходящие грифон по объему. По отношению к каналу гейзера объем полостей будет еще в несколько раз больше, поэтому создается впечатление, что Барт был не так уж далек от истины даже в отношении полостей исландского гейзера.

В пользу существования полостей, питающих горячей водой канал гейзера, говорит также и следующий расчет. Предположим, что гейзер имеет глубокий вертикальный цилиндрический канал диаметром  $2r = 60$  см, проходящий своим нижним концом в слое горячей лавы с температурой  $\theta_1 = 400^\circ$ . Пусть мощное парообразование начинается при нагреве воды  $\theta_2 = 200^\circ$ , а температура холодной воды, поступающей извне в канал (возможно, из более высоких слоев земли), есть  $\theta = 20^\circ$ . Тогда легко показать, исходя из уравнений теплопроводности, что радиальный поток тепла через стенки канала в его внутренние области способен нагреть воду за время

$$\tau = \frac{r^2}{2\lambda} \frac{\theta_2 - \theta}{\theta_1 - \theta_2} \cdot I(z),$$

где  $\lambda$  — теплопроводность стенок ( $5 \cdot 10^{-3}$  кал/см. сек. град),  $I(z)$  — некоторая функция, зависящая от диаметра канала и материала его стенок,

а также от времени существования источника нагрева [12]. При этом оказывается, что при всех разумных допущениях эта функция меняется мало (примерно от 5,5 до 10,5), а потому можно взять среднюю ее величину и принять  $I(z) = 8$ . При сделанных допущениях период извержения оказывается равным 180 час., что в 50 раз превышает истинный период Великана. Для приближения расчетного значения периода к истинному придется сильно увеличить температуру поступающей в канал воды, т. е. признать, что питание канала происходит горячей водой. Итак, гипотеза холодной воды противоречит фактическим данным. Следует отметить, что А. С. Нехорошев [9,10], решающий близкие по содержанию задачи, также отвергает предположение о существенной роли холодной воды в питании гейзеров и гейзероподобных скважин.

Московский государственный  
педагогический институт  
им. В. И. Ленина  
Московский филиал  
географического общества

Поступила  
7.XII 1959

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Устинова Т. И. Гейзер в долине реки Шумной. Бюлл. Камчатской вулканологич. станции АН СССР, № 12, 1946.
2. Устинова Т. И. Камчатские гейзеры. Тр. Лабор. гидролог. пробл. АН СССР, 2, 1949.
3. Устинова Т. И. Камчатские гейзеры. Географиз, М., 1955.
4. Набоко С. И. Гейзеры Камчатки. Тр. Лабор. вулканологии АН СССР, вып. 8, 1954.
5. Allen E., Day A. Hot springs of the national park. Washington, 1935.
6. Barth T. Volcanic geology; Hot springs and geysers. Washington, 1950.
7. Versluys J. How can intermittence of springs be explained? Proc. Kon. Akad. van Wetenschappen. Amsterdam, 32, 1929; 33, 1930.
8. Дуров С. А. Физико-химические основы пенистого переброса котловой воды. Изд. АН СССР, 1948.
9. Нехорошев А. С. Тепловой поток Эбеко. Сб. «Проблемы вулканологии». Изд. АН СССР, 1959.
10. Нехорошев А. С. К вопросу о теории действия гейзеров. Докл. АН СССР, 127, № 5, 1959.
11. Barth I. Geysers in Iseland. Amer. J. Sci., 238, 1940.
12. Ингерсолл Л. Теплопроводность и ее применение в технике и геологии. Машгиз, М., 1959.