

УДК 539.383.

ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО СЕЧЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ЛЬДА

ЕПИФАНОВ В. П., ФАУСТОВ М. А.

По результатам экспериментального исследования деформационных характеристик, а также параметров зондирующих импульсов и сигналов акустической эмиссии определены размеры, ориентация и закон накопления трещин, возникающих при одноосном сжатии образцов. Связь акустических величин с образованием трещин и их накоплением установлена в модельных опытах по искусственно вводимым (механически или с помощью лазерного луча) трещинам внутрь образца.

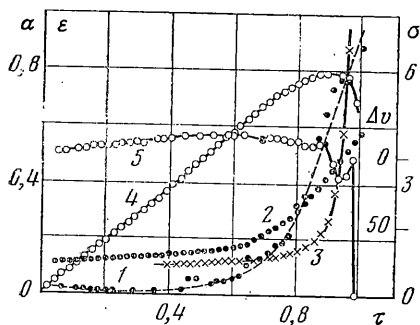
Разрушению образцов поликристаллического льда при одноосном сжатии предшествует образование многочисленных внутренних трещин разной величины и ориентации. Они появляются при значениях $\sigma_1 \approx 0,6 \sigma_*$ ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) и приводят к необратимым деформациям (продольной ϵ_1 и поперечным $\epsilon_2 = \epsilon_3$). В [1] первые трещины зарегистрированы при напряжениях примерно $0,6 \text{ МН/м}^2$. Попытка изучить процесс трещинообразования, используя запись сигналов акустической эмиссии, была предпринята в [2]. Сигнал отождествлялся с образованием трещины, а временная зависимость числа импульсов акустической эмиссии рассматривалась как основная характеристика кинетики разрушения. В основе теоретических построений содержалось допущение об одинаковом размере образующихся трещин. Это предположение ничем не подтверждалось. Напротив, при визуальном осмотре образца перед разрушением можно обнаружить трещины существенно разной величины и ориентации. Поэтому в данной работе поставлена задача оценить эффективное сечение трещин, возникающих на различных стадиях деформирования.

1. Разработанная ранее методика [3] включает комплексное определение механических характеристик деформируемого материала. Для их измерения была создана экспериментальная установка, позволяющая в процессе одноосного сжатия синхронно выполнять замеры продольных и поперечных деформаций, амплитуды и времени прохождения упругого возмущения через образец, вести запись амплитуды и спектрального состава сигналов, регистрировать величину и скорость приложения нагрузки, записывать и поддерживать заданную температуру образца. Кроме отмеченного, определялась структура шлифов льда. Сжатие осуществлялось при различных скоростях приложения нагрузки. Такая методика позволяет определять динамические и квазистатические характеристики и наблюдать процесс возникновения и накопления трещин.

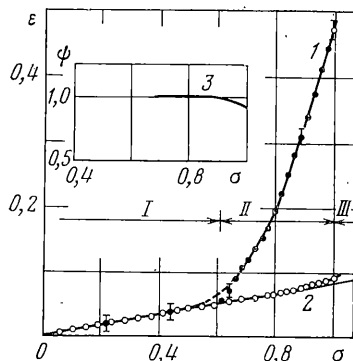
Образец помещался между термостатируемыми задержками, через которые передавалось усилие сжатия, а также направлялся и принимался акустический импульс, распространяющийся в образце вдоль оси нагружения. Исходя из результатов предварительных экспериментов частота заполнения зондирующих импульсов выбрана около 1 МГц. Время распространения и ослабления акустической волны определялось импульсно-фазовым методом. Запись импульсов акустической эмиссии производилась калиброванным акустическим трактом. Для записи сигналов использовались микрофон пленочного типа и широкополосные пьезоэлементы. Один микрофон был механически изолирован от стенок камеры и образца, второй — жестко связан с образцом. Видеозапись спектра сигналов осуществлялась с экрана спектроанализатора. Регистрация числа и амплитуды сигналов велась на шлейфовом осциллографе с двух независимых каналов.

Измерения выполнялись в интервале температур от -2 до -60°C , температурный градиент по всей длине измерительной камеры не превышал $0,3^\circ$, точность измерений времени задержки акустического импульса $\pm 3 \cdot 10^{-9}$ с, температуры $\pm 2,5\%$, линейных перемещений $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ м. Через смотровые окна можно вести наблюдения за состоянием образца. Надежность работы установки апробирована на материалах с известными свойствами: граните [4], канифоли, некоторых типах композитных материалов.

Лед приготавливали замораживанием дистиллированной воды по методике, описанной в [5]. Образцы поликристаллического льда имели форму цилиндров диаметром 0,03 м и высотой 0,06 м. Характерный размер зерна около $3 \cdot 10^{-3}$ м, преиму-



Фиг. 1



Фиг. 2

пещественная ориентация C -осей — вдоль образующей цилиндра. Доводка в размер выполнялась оплавлением поверхностного слоя. Время термостатирования — 2 ч.

2. При сжатии образцов льда коэффициент ослабления α и скорость v изменяются. На фиг. 1 приводятся зависимости продольной (кривая 2) и поперечной (кривая 3) деформаций (ε , %), изменения скорости Δv в м/с (кривая 5), коэффициента ослабления α (кривая 1) и напряжения σ в МПа (кривая 4) от безразмерного времени τ ; температура -40°C (кривые 1 и 3 смещены вверх на 0,1). Чувствительность акустических величин к структурным изменениям различна. Коэффициент ослабления α изменяется в процессе деформирования почти на два порядка, скорость v изменяется меньше.

По экспериментально определенным значениям скорости можно рассчитать динамический модуль E и динамическую деформацию ε_2 ($E = d\sigma/d\varepsilon_2 = \rho v^2$, где ρ — плотность). Сопоставление деформаций (фиг. 2), определенных в динамическом (кривая 2) и квазистатическом (кривая 1) режимах, позволяет выделить характерные стадии деформирования: I — предварительную, II — основную и III — стадию лавинообразного разрушения (кривая 1 рассчитана по изменению скорости, кривая 2 соответствует измерениям при осевом сжатии). При переходе от первой стадии ко второй заметно возрастает различие деформаций, определенных в статическом и динамическом режимах, увеличивается амплитуда сигналов акустической эмиссии и коэффициент ослабления; в образце появляются трещины.

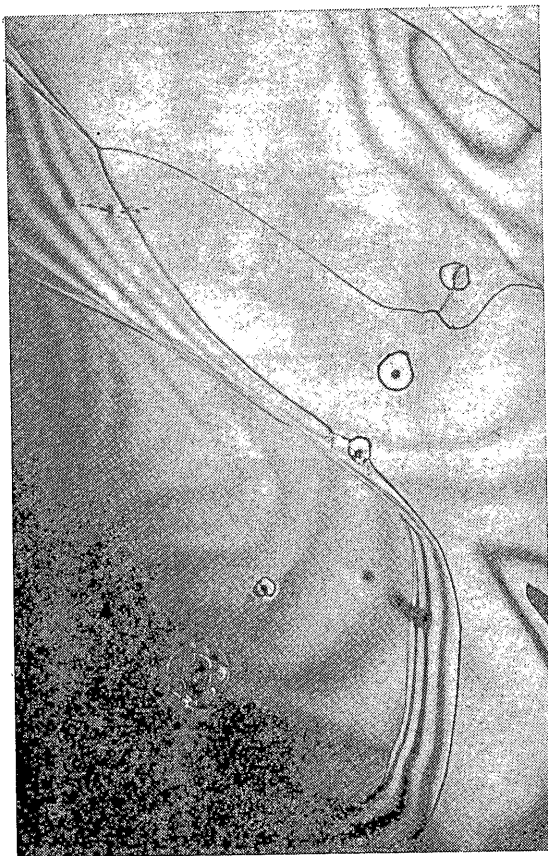
3. Напряжение сжатия меняется во времени (фиг. 1) по траектории малой кривизны 4 и только перед самым разрушением наблюдается некоторое отклонение с изменением знака производной σ . С увеличением нормального напряжения в исследуемом материале на поверхностях раздела кристаллитов и перед вершинами трещин могут возникать касательные напряжения, от которых зависят пластические деформации, приводящие к изменению знака приращения напряжения перед разрушением. Фактическое изменение нормального напряжения, по-видимому, несколько отличается от расчетного. Для расчета напряжения использовалось соотношение $\sigma = P/S_0$, где P — нагрузка сжатия, регистрируемая силоизмерителем разрывной машины, S_0 — сечение образца в недеформированном состоянии. Обычно предполагается, что в процессе деформирования «исчезающее» сечение образца остается неизменным. Накопление в образце многочисленных трещин должно, безусловно, приводить к уменьшению сечения.

Оценить эффективное сечение можно в первом приближении из отклонения функции $\varepsilon_2 = f(\sigma)$ от прямолинейной зависимости. Считая, что динамический модуль, определенный на высоких частотах (около 1 МГц), остается неизменным, а его кажущееся изменение вызвано формальным неучетом изменения сечения в расчетном соотношении $E = \rho v^2 = \Delta(P/S) / \Delta\varepsilon_2$, можно определить изменение эффективного сечения в процессе деформирования.

Результат расчета для относительного изменения сечения $\psi = S/S_0$ проиллюстрирован кривой 3 на фиг. 2. Максимальное изменение сечения в условиях эксперимента составляет 9%, что не противоречит результатам в [6]. Можно показать, что учет изменения сечения в процессе деформирования несколько уменьшит отклонение кривой 4 (фиг. 1) от начальной траектории.

Процесс роста деформации развивается во времени (лед течет) с характерной скоростью около $2 \cdot 10^{-6}$ м/с при -40°C , что обнаруживается по появлению на кривой 4 участка, параллельного оси абсцисс при $\sigma \approx \sigma_*$. Появление трещин приводит к явлениям акустической эмиссии и изменению характеристик зондирующего импульса. Для выявления количественной связи акустических величин с размерами трещин был выполнен модельный эксперимент.

4. С помощью лазерного луча в образце льда создавались дефекты-трещины с характерными размерами от $0,3 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ м (фиг. 3). Визуально определялась площадь их сечения, а импульсно-фазовым методом — соответствующие изменения акустических величин.



Фиг. 3

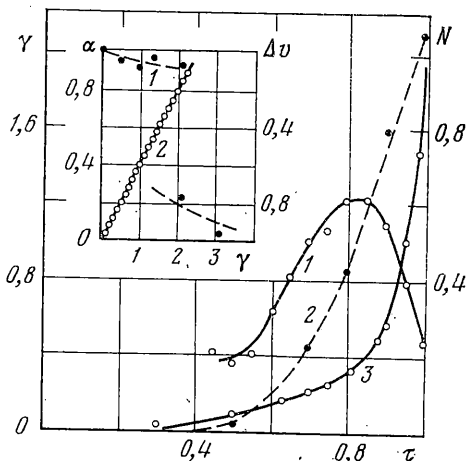
На фиг. 4 представлены зависимости скорости Δv (км/с) (кривая 1) и избыточного ослабления $\alpha = \alpha_1 - \alpha_0$ (см⁻¹), где α_0 — коэффициент ослабления звука для образца в недеформированном состоянии, α_1 — коэффициент ослабления для образца с дефектами (кривая 2), от величины нормированного сечения искусственно созданных дефектов γ_N , т. е. от проекции суммарной площади сечения на плоскость, перпендикулярную акустическому лучу. Коэффициент избыточного ослабления $\alpha = k_1 \gamma_N$ возрастает прямо пропорционально γ_N , причем k_1 зависит от частоты зондирующего импульса (для условий эксперимента зависимость k_1 от частоты близка к прямо пропорциональной).

При создании дефектов-трещин частота заполнения зондирующего импульса для $\gamma_N \geq 2,2$ уменьшается почти до 300 кГц, коэффициент избыточного ослабления возрастает до 0,9. Близкие к указанным значениям имеют акустические величины перед разрушением льда при деформировании [7], что свидетельствует в пользу обоснованности модельных испытаний. Ослабление звука и изменение скорости, вызванное обеднением спектра высокочастотными составляющими, является следствием рассеяния на дефектах. Простая количественная связь акустических величин с размерами трещин позволяет исследовать процесс трещинообразования.

5. Используя зависимости, полученные в модельном эксперименте, можно в первом приближении рассчитать изменение сечения в процессе нагружения, например, по изменению коэффициента ослабления. На фиг. 4 (справа) представлены зависимости нормированного сечения рассеяния (кривая 2) и числа сигналов акустической эмиссии (кривая 3) от времени при одноосном сжатии образцов льда. Возможность отождествления числа импульсов с числом образующихся трещин подтверждается визуальными наблюдениями. Существование такой связи отмечалось также в [8].

Из сопоставления зависимостей 2 и 3 следует, что имеется расхождение в описании процесса трещинообразования, выполненном двумя способами. Наибольшее расхождение при $t \approx 0,8 \tau_*$. Это расхождение, по-видимому, связано с разным размером трещин на различных стадиях нагружения. В представлениях о накоплении трещин, основанных на данных о количестве звуковых импульсов, не учитывается возможность изменения размеров трещин. Напротив, кинетическая кривая 1, рассчитанная по данным ослабления акустического сигнала, содержит информацию

о величине и пространственном положении трещины. Ее избирательную чувствительность к трещинам определенного размера или к трещинам, размеры которых находятся в заданном интервале величин, можно широко варьировать. Используя обе зависимости, можно оценить эффективное сечение рассеяния отдельной трещины $\gamma^* = \gamma_N / N$, где N — число импульсов акустической эмиссии к моменту времени t_i .



Фиг. 4

Кривая 1 на фиг. 4 иллюстрирует изменение эффективного сечения рассеяния трещины в процессе деформирования льда. Эффективное сечение трещины меняется почти на порядок, изменение имеет стадийный характер. На первой стадии разрушения образуются мелкие трещины. После превышения некоторого напряжения происходит их укрупнение, например, за счет подрастания или слияния, что отмечалось для других материалов [9]. С увеличением количества трещин, при $t \geq 0,8 t_*$, сокращается объем неразрушенной части кристаллитов, что вносит дополнительные ограничения на размер вновь образующихся трещин. Этим объясняется куполообразный вид кривой 1, характеризующей изменение эффективного сечения трещины.

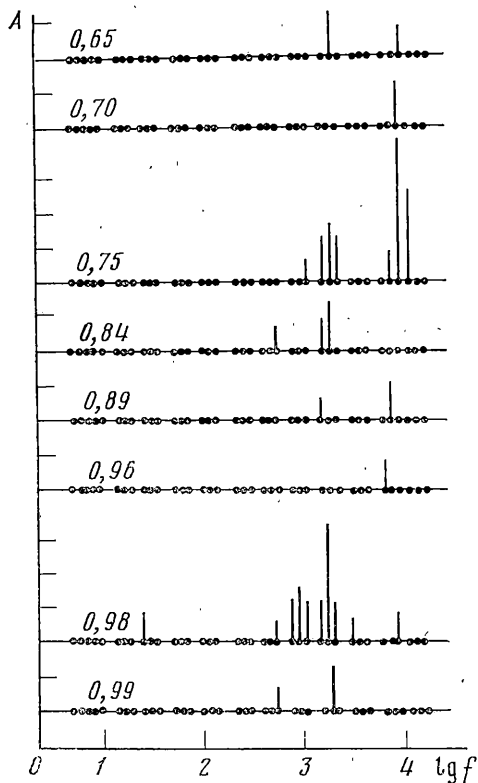
Воспользуемся изменением амплитуды сигналов акустической эмиссии для независимого подтверждения изменений размеров трещин в процессе деформирования. В [10] установлена связь между площадью сечения трещины и амплитудой сигнала, т.е. $\gamma^* \sim A^2$. Если судить о масштабе трещины по амплитуде сигналов (фиг. 5), то можно ожидать его изменение также по крайней мере на порядок (A — амплитуда, f — частота). Корреляция величин, полученных принципиально разными способами, может служить подтверждением изменения размеров трещин.

Усложнение спектра, его расширение и смещение характерной частоты в область более низких частот (фиг. 5) может быть связано с подрастанием трещин, их слиянием, скольжением кристаллитов или их частей по свободным поверхностям скола или по межкристаллитным поверхностям раздела и другими изменениями структуры, в том числе со смыканием трещин и кратковременным упрочнением образца. Момент смыкания, «залечивания», трещины можно наблюдать по появлению экстремальных точек на зависимости скорости распространения упругого возмущения 5 (фиг. 1) вблизи $t = 0,95 t_*$. В этой же временной области наблюдается слабое уменьшение скорости изменения коэффициента ослабления 1.

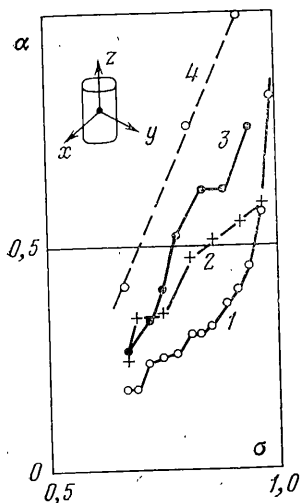
6. Принято считать, что трещины ориентируются параллельно оси наибольшего сжатия и раскрываются в направлении наименьшего сжатия [11]. Исходя из этих представлений процесс трещинообразования лучше было бы изучать направляя зондирующий акустический импульс не вдоль, а перпендикулярно оси нагружения. Однако выбранная схема эксперимента обладает некоторыми преимуществами: позволяет контролировать процесс во всем объеме исследуемого образца; этот контроль может осуществляться непрерывно в течение всей основной стадии деформирования при оптимальной чувствительности акустического тракта; в образце перед разрушением можно наблюдать трещины различной ориентации, в том числе расположенные перпендикулярно оси нагружения, что исключает преимущества прозвучивания деформированного образца в одном направлении. Наличие трещин, ориентированных перпендикулярно оси нагружения, как экспериментальный факт, не требует особых пояснений. Для трансверсально-изотропных материалов, особенно уже имеющих дефекты, не следует, по-видимому, ожидать совпадения по направлению максимальных локальных напряжений и приложенной к образцу нагрузки.

Для определения размера трещины необходимо определить угол между плоскостью трещины и, например, осью образца. Нетрудно видеть, что угол ориентации связан с коэффициентами ослабления соотношением $\delta = \arctg [\alpha_x / (\alpha_x^2 + \alpha_y^2)^{1/2}]$, где x, y, z образуют систему прямоугольных координат; площадь сечения трещины $\gamma_i^* = (\Delta k) / \sin \delta$. Величина Δk может определяться для каждого сигнала акустической эмиссии или некоторого временного интервала Δt .

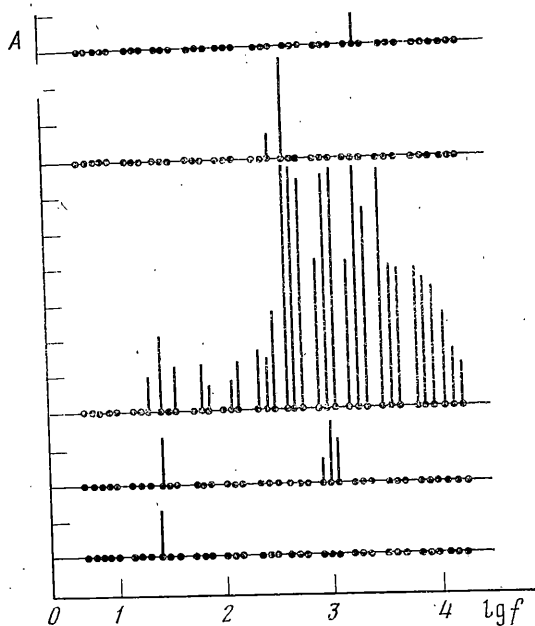
Сопоставление коэффициентов ослабления по направлениям зондирующих лучей (фиг. 6) позволяет установить, что $\alpha_x(\tau), \alpha_y(\tau) > \alpha_z(\tau)$ (кривые 1–3 соответствуют зондирующим лучам, направленным вдоль осей x, y, z ; кривая 4 соответствует коэффициенту α , вычисленному по формуле $\alpha = (\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2)^{1/2}$). Это соответствует известному факту ориентации трещин при $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ вдоль оси сжатия. Рассчитанные углы ориентации вблизи $0,56 t_*$, $0,62 t_*$ и $0,69 t_*$ равны соответственно 7, 30 и 31°. На-



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

копление продольных трещин способствует расчленению образца на столбчатые образования, при изломе которых образуются поперечные трещины. Суммарный коэффициент ослабления γ увеличивается прямо пропорционально напряжению сжатия, что с учетом выявленной связи между γ_N и α соответствует линейному закону накопления повреждений, т. е. $\gamma = k_2 \sigma$.

На фиг. 7 представлены спектры, соответствующие разным временным интервалам стадии лавинообразного разрушения. Запись сигналов производилась калиброванным акустическим трактом высокой разрешающей способности с целью получения представлений о деталях процесса разрушения. Спектр разрушения оказывается дискретным, в нем наряду с широкополосным сигналом, впервые зарегистрированным в [12], можно обнаружить одиночные сигналы, похожие на наблюдавшиеся при образовании отдельных трещин. Это позволяет представить процесс лавинообразного разрушения состоящим из нескольких этапов и оценить характерный объем разрушения, как это сделано в [7].

Сопоставление со спектрами, соответствующими образованию отдельных трещин (фиг. 5), позволяет выявить некоторые отличия и найти общее. Отличительными особенностями спектров разрушения является наличие широкополосного сигнала максимальной амплитуды и смещение, особенно в начале процесса, спектров сигналов в область низких частот. Смещение спектров по частотной шкале связано с уменьшением собственной резонансной частоты дефекта, т. е. с увеличением его размера, что может иметь место при расширении фронта разрушения, а в случае образования отдельной трещины — с подрастанием или слиянием отдельных трещин. Можно отметить, что минимальная частота сигналов на фиг. 5 и 7 оказывается неизменной. Это обстоятельство позволяет сделать предположение о связи между минимальной частотой и выходом трещины на поверхность образца. Однако однозначная интерпретация спектров сигналов акустической эмиссии остается затрудненной и требует дальнейших исследований.

Таким образом, комплексное определение механических характеристик деформируемого материала дает принципиально новый материал, позволяющий по-новому рассмотреть кинетику процесса трещинообразования. В частности, становится возможным определение размеров трещин и их ориентации, установить связь между напряжением и суммарным сечением трещин.

Авторы благодарны Н. Х. Арутюняну за помощь в работе и обсуждение ее результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gold L. W. The process of failure of columnar-grained ice.— *Philos. Mag.*, 1972, v. 26, No. 2, p. 311–328.
2. Зарецкий Ю. К., Чумичев Б. Д., Соломатин В. И., Гаврило В. П., Гусев А. В. Разрушение льда в условиях кратковременной ползучести.— В кн.: Инженерное мерзлотоведение. Новосибирск: Наука, 1979, с. 115–127.
3. Епифанов В. П., Воронина И. Ю. Кинетика разрушения и изменение акустических параметров гранита при осевом сжатии.— *Изв. АН АрмССР. Механика*, 1980, т. 23, № 2, с. 64–70.
4. Воронина И. Ю., Епифанов В. П. Акустические исследования структурных изменений гранита при осевом сжатии.— *Акуст. ж.*, 1980, т. 26, вып. 3, с. 371–376.
5. Goodman D. J. Critical stress intensity factor (K_{Ic}) measurements at high loading rates for polycrystalline ice.— In: *Physics and Mechanics of Ice. IUTAM Symposium*. Berlin: Springer, 1980, p. 129–146.
6. Уикс У. Ф., Ассур А. Разрушение озерного и морского льда.— В кн.: Разрушение. Т. 7. Ч. 1. М.: Мир, 1976, с. 513–623.
7. Епифанов В. П. К вопросу о механических свойствах льда.— *Изв. АН СССР. МТТ*, 1982, № 1, с. 187–192.
8. Зарецкий Ю. К., Чумичев Б. Д. Реологические свойства льда.— В кн.: Инженерное мерзлотоведение. М.: Наука, 1979, с. 179–191.
9. Журков С. Н., Кузнецко В. С., Слуцкер А. И. Микромеханика разрушения полимеров.— *Проблемы прочности*, 1974, № 2, с. 45–50.
10. Шамина О. Г. Упругие импульсы при разрушении образцов горных пород.— *Изв. АН СССР. Сер. геофиз.*, 1956, № 5, с. 513–518.
11. Brace W. F., Paulding B. W., Scholz C. H. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks.— *J. Geophys. Res.*, 1966, v. 71, No. 16, p. 3939–3953.
12. Богородский В. В., Гаврило В. П., Григорьев В. С., Гусев А. В. О некоторых механизмах звукообразования при разрушении образцов льда в жидкости.— *Акуст. ж.*, 1969, т. 15, вып. 2, с. 184–188.

Москва

Поступила в редакцию
23.II.1982