

УДК 539.37:537.221

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЛЬДА $I_h$

© А.А. Шибков, Р.Ю. Кольцов, М.А. Желтов, В.В. Скворцов, А.В. Шуклинов, Е.К. Денисов

Shibkov A.A., Koltsov R.Y., Zheltov M.A., Skvortsov V.V., Shuklinov A.V., Denisov E.K. An experimental study of intrinsic electromagnetic emission during plastic deformation of ice crystals. Pulsed electromagnetic emission during plastic deformation and fracture of a single crystal and polycrystal ice was discovered and investigated. An atlas of electromagnetic signals that allowed both identifying and studying the kinetics of important mesoscopic events of structural relaxation connected with the dynamics of dislocation pile ups and cracks.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение природы электромагнитных явлений, сопровождающих динамические процессы во льде, имеет очень важное прикладное значение, связанное, прежде всего, с проблемами навигации в условиях северных широт. Кроме того, известно, что при сходе ледников, снежных лавин, распространении трещин в мерзлых грунтах и ледяных покровах водоемов и даже перед этими катастрофическими событиями возникают всплески радиоизлучения в области средних частот [1–3]. Поэтому помимо навигационных проблем существует практический интерес к непрерывному электромагнитному мониторингу природной среды, содержащей мерзлые грунты, большие массы льда и снега, склонные к катастрофическим сдвигам. Для изучения проблемы идентификации различных процессов структурной релаксации (пластической деформации, разрушения, трения и режеляции, т. е. плавления под давлением и последующей кристаллизации) и оценки доли их участия в сложном природном явлении по электромагнитному сигналу необходимо создавать экспериментальные условия, в которых преобладает один из указанных процессов.

Известно, что во льде, также как и в соединениях  $A_nB_{8-n}$  [4–16], дислокации переносят электрический заряд, а берега быстрой трещины электрически активны, поэтому нестационарное движение дислокационных скоплений и трещин должно вызывать генерирование не только акустической эмиссии [17], но и электромагнитного излучения. Действительно, распространение одиночной трещины, возникающей при изгибе [18], одноосном сжатии [18–20], ударном воздействии сосредоточенной нагрузки [19, 21], замерзании воды [21], сопровождается характерным сигналом электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) в полосе частот  $\sim 10^3$ – $10^5$  Гц, в то же время электромагнитное излучение, обусловленное собственно перемещением дислокации во льде, ранее не исследовалось.

Цель настоящей работы заключается в исследовании характеристик сигналов ЭМЭ при движении одиночных полос скольжения и трещин, а также при множественном скольжении и разрушении и создании на основе полученных результатов «альбома ЭМЭ-отображе-

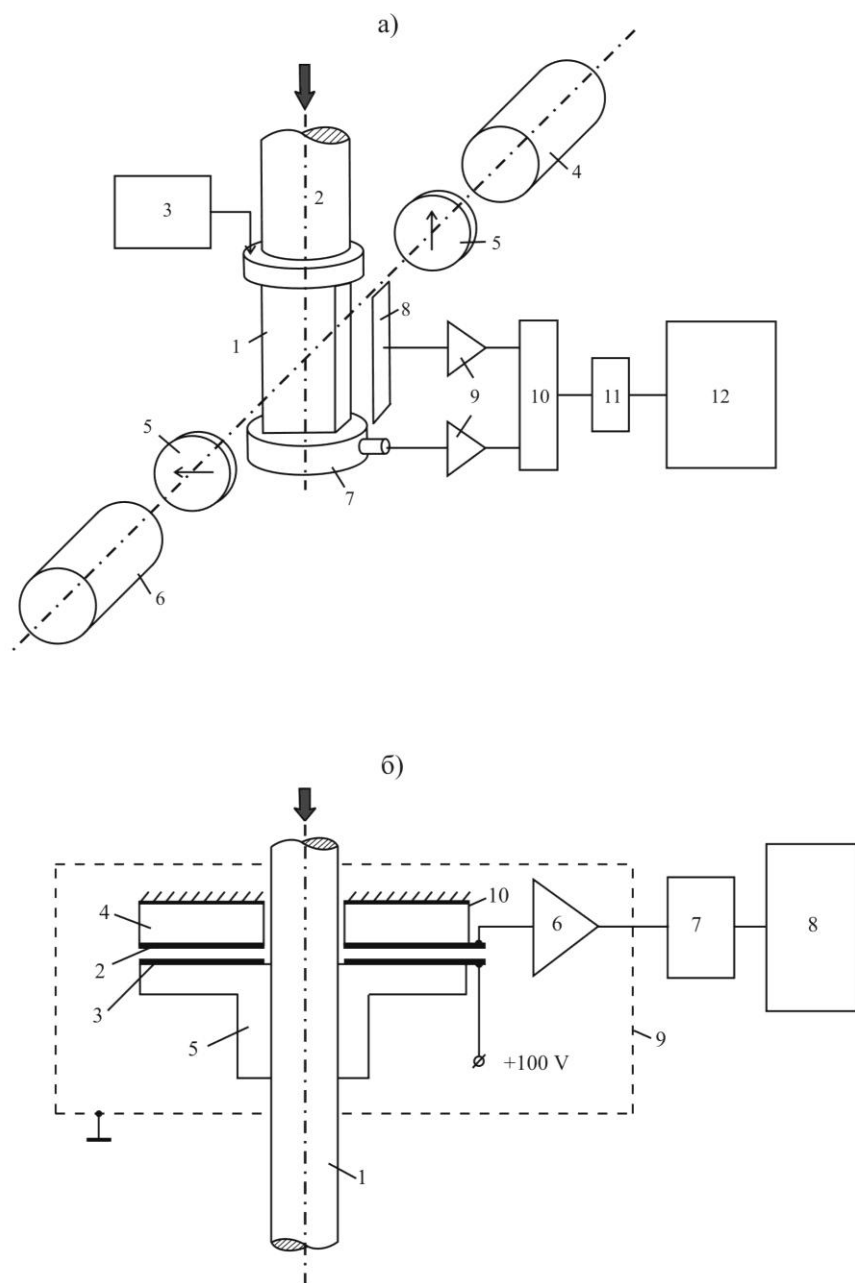
ний» процессов структурной релаксации во льде, связанных с эволюцией дислокационных скоплений и развитием микротрещин на границе и в объеме зерна и т. д.

### МЕТОДИКА

В макроскопических экспериментах пластические свойства льда обычно исследуются на основе анализа кривых деформирования в «жесткой» испытательной машине [22, 23] или кривых ползучести [24]. Исследование неустойчивости пластического течения предпочтительнее проводить в условиях деформирования кристалла в «мягкой» машине, когда задан закон нагружения  $\sigma = \sigma(t)$ , а измеряемой величиной является деформация  $\varepsilon(t)$ . В настоящей работе образцы моно- и поликристаллического льда размерами  $12 \times 18 \times 30$  мм<sup>3</sup> подвергались одноосному сжатию в «мягкой» деформационной машине с постоянной скоростью нагружения  $\dot{\sigma} = 5$  кПа/с при температуре  $T = 250$  К до полного разрушения. Образцы вырезались ниточной пилой из блоков пресноводного (речного) льда с различным средним размером зерна от  $\sim 1$  до  $\sim 100$  мкм. Монокристаллические образцы выпиливались из крупных зерен для деформирования в базисной системе скольжения:  $c$ –ось составляла угол  $\approx 40$ – $50^\circ$  с осью сжатия. Для исследования влияния границы зерна на зарождение и иммобилизацию дислокаций и трещин приготавливались «бикристаллы» – образцы, содержащие одну границу зерна, т. е. состоящие из двух зерен. Используемые поликристаллические образцы имели размер зерна в диапазоне от 2 до 4,5 мкм. Для стабилизации структуры все образцы подвергались изотермическому отжигу при  $T = 263$  К в течение  $\sim 10^3$  часов. В ходе деформирования образцы видеофильмировались в проходящем поляризованном свете для выявления моментов зарождения полос скольжения и трещин по эволюции их фотоупругой картины (рис. 1а). Кривую деформирования  $\varepsilon = \varepsilon(t)$  записывали, используя механический индикатор перемещения с точностью до 1 мкм. Для измерения тонких скачков пластической деформации использовали высокочувствительный емкостный датчик

смещения, позволяющий фиксировать скачки деформации образца в полосе частот  $\sim 1-100$  Гц с чувствительностью  $\sim 10$  нм (рис. 1б). Потенциал нестационарного электрического поля (сигнал ЭМЭ) измеряли с помощью плоского емкостного зонда размером  $20 \times 30$  мм<sup>2</sup>, расположенного на расстоянии 5 мм от поверхности образца. Учитывая, что характерные времена эволюции трещин и дислокационных полос скольжения в кристаллах находятся в диапазоне  $\Delta t \sim 10^{-6} - 10^0$  с, полоса

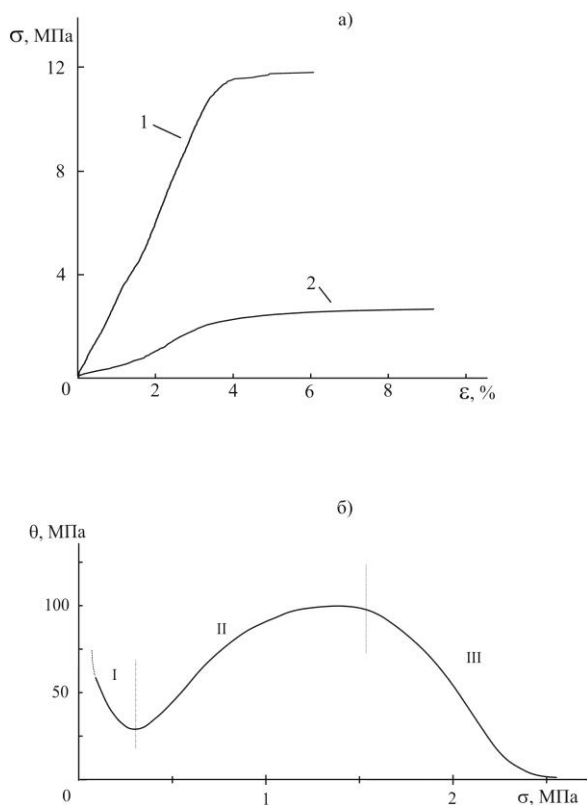
пропускания канала регистрации электрического сигнала выбиралась равной  $1 \text{ Гц} - 3 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ . Канал регистрации состоял из высокоомного широкополосного преусилителя ( $R_m = 10^{12}$  Ом,  $C_{in} = 20$  пФ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и компьютера. В ряде экспериментов синхронно с регистрацией сигнала ЭМЭ записывали сигнал акустической эмиссии (АЭ) пьезодатчика, расположенного в нижней опоре образца.



**Рис. 1.** а) Схема экспериментальной установки для исследования скачкообразной пластической деформации и разрушения льда поляризационно-оптическим, акустическим и электромагнитным методами: 1 – образец, 2 – шток мягкой деформационной машины, 3 – блок измерения деформации, содержащий механический индикатор смещения (точность 1 мкм) и емкостной датчик смещения (рис. 1б), 4 – коллимированный источник света, 5 – поляризаторы, 6 – цифровая видеокамера, 7 – пьезодатчик, 8 – емкостный зонд, 9 – высокоомный преусилитель, 10 – коммутатор, 11 – АЦП, 12 – компьютер. б) Схема емкостного датчика смещения: 1 – шток деформационной машины, 2 и 3 – неподвижная и подвижная обкладки емкостного датчика (конденсатора), 4 и 5 – неподвижное и подвижное (укрепленное на штоке машины) тефлоновые кольца, 6 – преусилитель, 7 – АЦП, 8 – компьютер, 9 – экран толщиной 10 мм, выполненный из железа армо, 10 – неподвижная опора

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**1. Кривые нагружения моно- и поликристаллического льда.** На рис. 2а представлены типичные кривые нагружения  $\sigma(\varepsilon)$  в «мягкой» машине с постоянной скоростью роста напряжения  $\dot{\sigma} = 5$  кПа/с при  $T = 250$  К монокристаллического (кривая 1) и поликристаллического льда со средним размером зерна  $\bar{d} \approx 3$  мм (кривая 2). Видно, что коэффициент упрочнения  $\theta = d\sigma/d\varepsilon$  и прочность на сжатие  $\sigma_{\max}$  монокристаллического льда значительно выше соответствующих значений для поликристалла. Кроме того, кривая деформирования последнего нелинейна на всех уровнях приложенного напряжения и содержит по крайней мере три основных стадии: стадия легкого скольжения I, не характерная для поликристаллов и обусловленная, по-видимому, наличием крупных зерен, стадия деформационного упрочнения II и стадия динамического возврата III, которая наблюдается при  $\sigma > 1,6$  МПа (рис. 2б). Учитывая, что пластическое скольжение льда обеспечивается движением базисных дислокаций, подвижность которых лимитируется рельефом Пайерлса [25, 26], то зависимость скорости дислокаций  $v_d$  от



**Рис. 2.** а) Кривые нагружения  $\sigma(\varepsilon)$  монокристаллического (1) и поликристаллического (2) льда, деформируемые в мягкой машине с постоянной скоростью роста напряжения  $\dot{\sigma} = 5$  кПа/с при  $T = 250$  К. б) Зависимость от напряжения коэффициента упрочнения  $\theta = d\sigma/d\varepsilon$  поликристаллического льда. Римскими цифрами I, II и III обозначены стадии легкого скольжения, деформационного упрочнения и динамического возврата соответственно

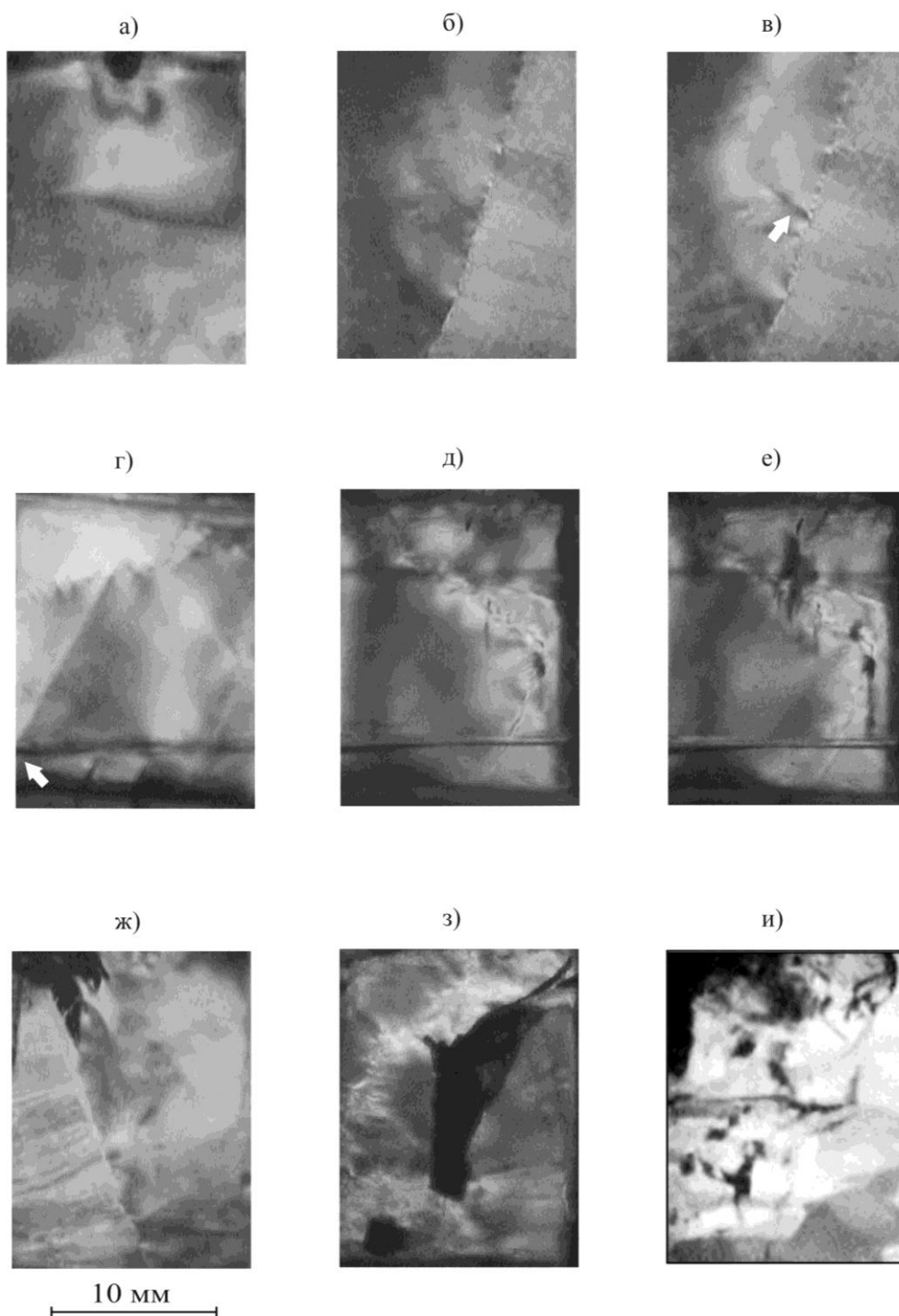
приведенных касательных напряжений  $\tau$  дается линейным законом при «низких» напряжениях  $\tau \ll \ll k_B T / abh$ , (где  $a$  – параметр решетки,  $h$  – линейное расстояние в направлении скольжения и  $b$  – вектор Бюргерса). Для льда при  $T = 250$ – $260$  К это условие соблюдается для напряжений вплоть до  $3 \div 5$  МПа, что покрывает практически всю кривую нагружения поликристалла. В сочетании с уравнением Орована  $\dot{\varepsilon} = \phi \rho b v_d$  (где  $\rho$  – плотность подвижных дислокаций, а  $\phi$  – ориентационный множитель) это означает, что более нелинейное деформационное поведение поликристаллического льда по сравнению с монокристаллическим обусловлено существенным влиянием границ зерен на размножение и иммобилизацию дислокаций.

**2. Роль границ зерен.** Фотоупругость и оптическая активность льда позволяет исследовать *in situ* распределение внутренних упругих полей напряжений, выявлять границы зерен и оценивать их роль в процессах зарождения и торможения скоплений с избытком дислокаций одного механического знака – «механических зарядов», – основных источников дальнедействующих полей напряжений в пластически деформируемом кристалле. В качестве примера прекрасной фотоупругости льда на рис. 3а представлена классическая картина распределения напряжений в монокристалле при вдавливании в поверхность шарика. Подобные фотоупругие розетки наблюдаются вдоль макроскопически плоской границы зерна в деформируемом бикристалле, декорируя концентраты внутренних напряжений вблизи микроскопических неровностей границы (рис. 3б). Релаксация этих напряжений может происходить по разным каналам в зависимости от их уровня, скорости деформирования и температуры: зарождение полос скольжения, микротрещин, проскальзывание вдоль границы с участием процессов режелеации, а также миграции границы за счет рекристаллизации льда в условиях высокотемпературной ( $T = 0,94T_m$ , где  $T_m$  – температура плавления) пластической деформации. На рис. 3в показан момент зарождения полосы скольжения от источника типа концентратора напряжения на границе зерна.

В ряде экспериментов концентраторы напряжения создавались искусственно путем нанесения царапин либо запилы с помощью ниточной пилы. Полосы скольжения зарождались, как правило, от локальных источников вблизи пересечения царапины или запила с ребром кристалла, «простреливали» через зерно в базисной плоскости и блокировались границей зерна, создавая в голове заторможенного скопления новые концентраторы напряжения (рис. 3г), которые в свою очередь являются источниками полос и/или микротрещин (рис. 3д, е), подготавливая эстафетную передачу сдвига или микроразрушения в соседние зерна поликристалла. На рис. 3ж показана трещина, растущая по границе зерна бикристалла. Видеофильмирование показывает, что она растет скачками и может внезапно, сменив направление роста, перейти в объем зерна (рис. 3з). Для деформируемого поликристалла характерно спонтанное образование за время  $\sim 1$ – $3$  с случайной сетки несоприкасающихся мезотрещин (размером порядка размера зерна), расположенных, в основном, по границам зерен, реже пересекающих отдельные зерна (рис. 3и); причем характерный масштаб этой сетки,

т. е. расстояния между наиболее удаленными мезотрещинами, может достигать макроскопических размеров (~1 см), соизмеримых с размером образца. Несмотря на

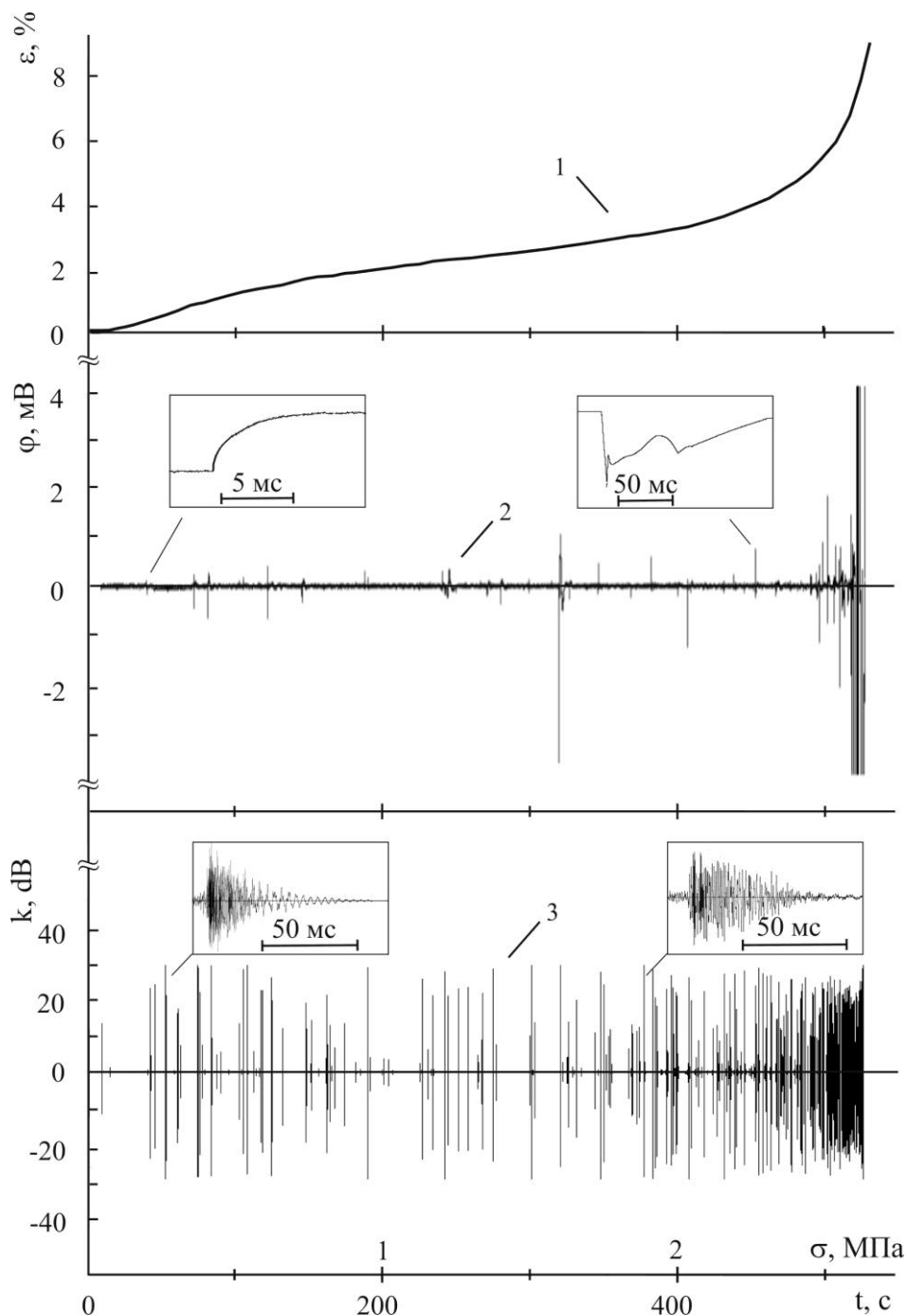
большую суммарную площадь разрушения, образец макроскопически не разрушается.



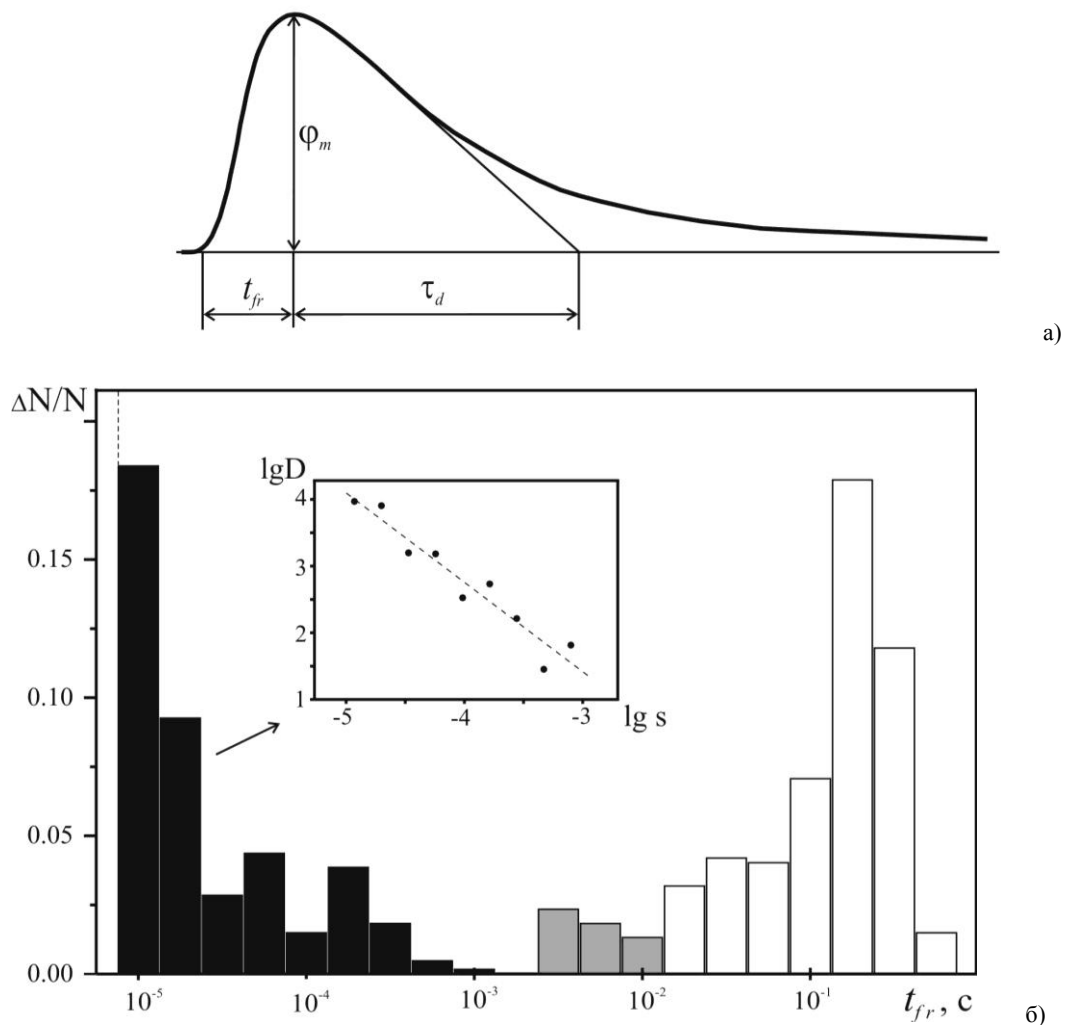
**Рис. 3.** Типичные изображения в поляризованном свете деформируемых образцов моно- и поликристаллического льда: а – фотоупругая розетка при вдавлении шарика в поверхность монокристаллического льда; б – концентрация напряжения вблизи границы зерна в бикристалле,  $\sigma = 1,5$  МПа; в – зарождение и распространение полосы скольжения (отмечена стрелкой) от концентратора напряжения вблизи границы зерна,  $\sigma = 2,3$  МПа; г – полоса скольжения, блокированная границей зерна в бикристалле (источник полосы, отмеченный стрелкой, – область пересечения запила с ребром кристалла,  $\sigma = 2,5$  МПа, д – зарождение и распространение мезотрещин в объеме зерна от концентраторов, расположенных вблизи границы зерна,  $\sigma = 9$  МПа; е – то же при  $\sigma = 9,7$  МПа; ж – распространение трещины по границе зерна в бикристалле,  $\sigma = 10,3$  МПа; з – макротрещина в бикристалле,  $\sigma = 11,2$  МПа; и – фрактальная сетка мезотрещин, в основном, по границам зерен поликристаллического образца (множественное докритическое разрушение,  $\sigma = 2,3$  МПа)

**3. Сигналы электромагнитной и акустической эмиссии.** Обнаружено что процесс пластического деформирования, начиная с напряжения вблизи предела текучести до макроскопического разрушения образцов моно- и поликристаллического льда, сопровождается генерированием дискретных сигналов ЭМЭ и АЭ (рис. 4). На всех стадиях деформирования сигналы АЭ имели вид затухающих гармоник, форма которых, по данным калибровки, совпадает с баллистической реакцией системы машина – образец. Поэтому идентификация динамических процессов структурной релаксации по

форме сигналов АЭ представляет значительные трудности, которые ограничивают, как известно [27], применение метода АЭ в физических исследованиях. В то же время форма сигналов ЭМЭ демонстрирует большое разнообразие (см. табл. 1). Синхронное видеосъемление в поляризованном свете и измерение скачков пластической деформации высокочувствительным датчиком смещения позволяет в принципе производить идентификацию скачкообразных процессов пластической деформации и разрушения по сигналу ЭМЭ.



**Рис. 4.** Электромагнитная и акустическая эмиссия при деформировании льда: 1 – кривая деформирования с постоянной скоростью роста напряжения  $\dot{\sigma} = 5$  кПа/с, 2 – сигнал ЭМЭ; 3 – сигнал АЭ. На вставках представлены типичные сигналы ЭМЭ и АЭ на начальной и конечной стадии деформирования

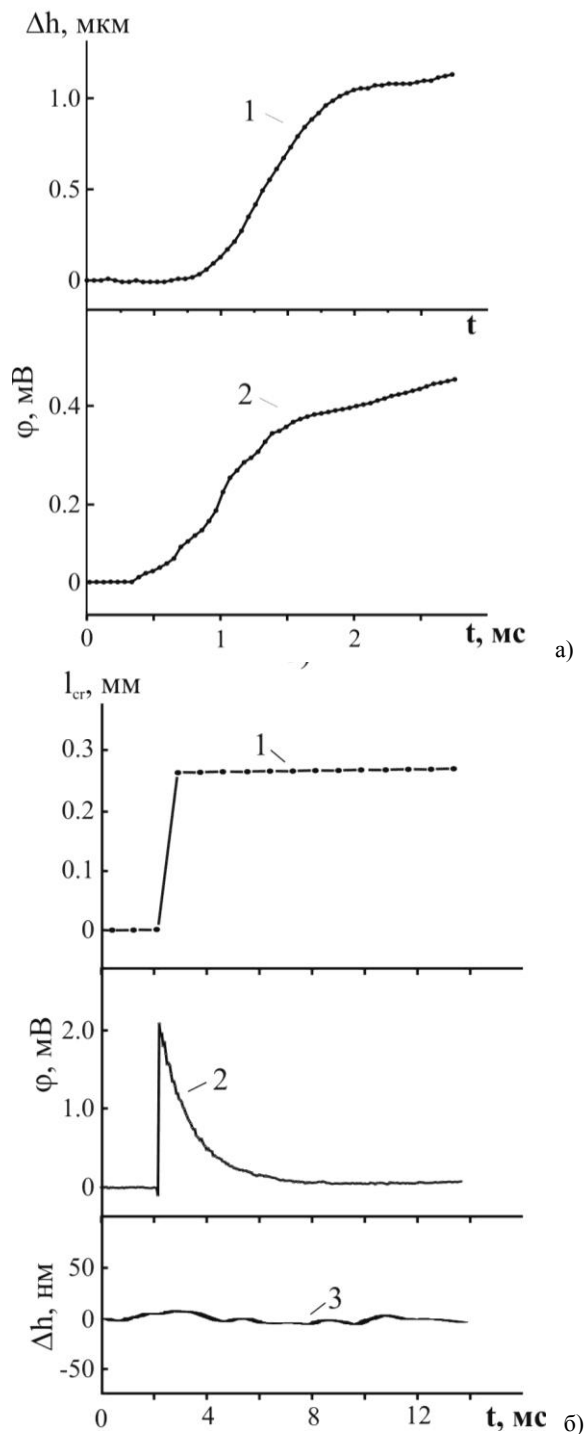


**Рис. 5.** а) Схематическое изображение импульса ЭМЭ:  $\phi_m$  – амплитуда,  $t_{fr}$  – длительность переднего фронта,  $\tau_d$  – время диэлектрической релаксации. б) Гистограмма передних фронтов  $t_{fr}$  импульсов ЭМЭ. Черным цветом обозначены импульсы ЭМЭ II типа, связанные с развитием микро- и макротрещин, серым – импульсы ЭМЭ I типа, имеющие вид степенной функции  $\varphi(t) \sim t^{1/n}$ , которые обусловлены динамикой консервативных скоплений дислокаций, а белым – импульсы ЭМЭ I типа с сигмовидной формой фронта, связанные с зарождением полос скольжения (см. табл. 1). На врезке представлена функция распределения  $D(s)$  для импульсов ЭМЭ II типа (см. текст)

Несмотря на большое разнообразие форм сигналов ЭМЭ, их можно представить в виде последовательности импульсов почти треугольной формы, характеризуемых тремя основными параметрами: длительностью переднего фронта  $t_{fr}$ , амплитудой  $\phi_m$  и временем спада  $\tau_d$  (рис. 5а), соизмеримого с максвелловским временем релаксации во льду  $\tau_M$  в области средних и низких частот [26, 28]. Наиболее информативной характеристикой сигнала оказалась величина  $t_{fr}$ , которая определяется характерным временем поляризации кристалла, обусловленной эволюцией электрически активного структурно-кинетического элемента. По величине  $t_{fr}$  импульсы ЭМЭ можно разделить на две группы: 1) импульсы I типа с  $t_{fr} \sim 3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-1}$  с, которые сопровождаются генерированием сигнала АЭ, но не сопровождаются появлением видимых микротрещин; 2) импульсы II типа с  $t_{fr} \sim 3 \cdot 10^{-4} - 10^{-5}$  с, вызванные

по данным видеофильмирования зарождением и распространением трещин размером более  $\sim 100$  мкм.

В серии экспериментов синхронно с видеофильмированием образца в поляризованном свете и регистрацией сигнала ЭМЭ записывали сигнал высокочувствительного датчика смещения штока машины (рис. 1б). Обнаружено, что развитие одиночной полосы скольжения в монокристаллическом образце на начальной стадии деформирования ( $\epsilon \sim 0,5-1\%$ ) сопровождается скачком деформации  $\Delta h \sim 0,1-1$  мкм и одновременно генерированием импульса ЭМЭ I типа (рис. 6а). В то же время развитие внутренней трещины длиной  $l_{cr} \approx 200$  мкм на стадии развитой деформации ( $\epsilon = 3\%$ ) вызывает генерирование сигнала ЭМЭ II типа, но не вызывает заметного (в пределах чувствительности метода) скачка деформации (рис. 6б).



**Рис. 6.** Данные синхронной регистрации эволюции полосы скольжения и трещины оптическим и электромагнитным методами: а – синхронная запись скачка деформаций  $\Delta h$  (1) и сигнала ЭМЭ I типа  $\phi$  (2), вызванные развитием полосы скольжения, б – синхронная запись скачка длины трещины  $l_{cr}$  (1), сигнала ЭМЭ II типа  $\phi$  (2) и сигнала датчика смещения (3)

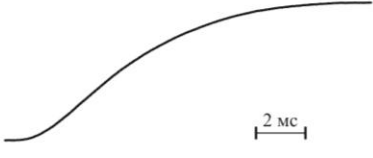
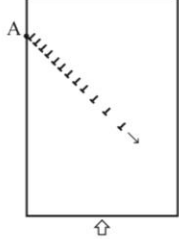
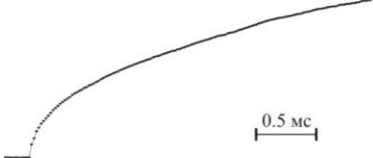
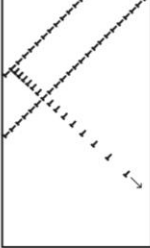
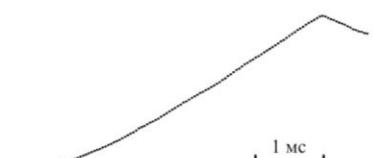
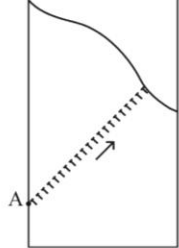

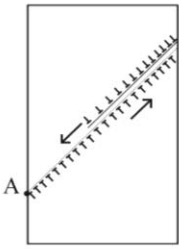
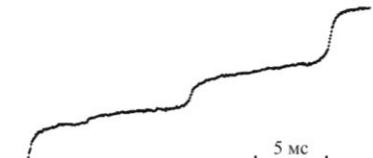
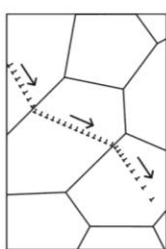
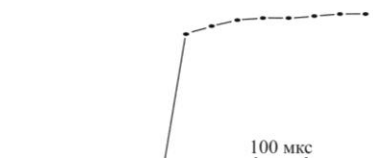
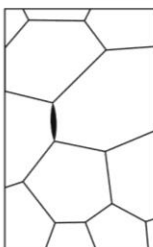
Таким образом, две группы сигналов ЭМЭ отражают два основных нестационарных (в полосе частот  $10^4$ – $10^5$  Гц) процесса в деформируемом кристалле: скачкообразную пластическую деформацию и разрушение. Вследствие существенного различия мгновенных ско-

ростей пластического сдвига и распространения микротрещин, а следовательно, характерных времен этих процессов, гистограмма передних фронтов  $t_{fr}$  импульсов ЭМЭ в полулогарифмическом масштабе имеет седлообразный вид (рис. 5б). Существование интервала «запрещенных» значений  $t_{fr}$  (седловая область гистограммы) может быть использовано для разделения сигналов на импульсы I и II типа. Из рисунка видно, что гистограмма фронтов импульсов I типа, связанных со скачками пластической деформации, имеет колоколообразный вид, в то время как гистограмма фронтов импульсов ЭМЭ II типа, обусловленных зарождением и развитием в образце микро- и макротрещин, описывается степенной статистикой:  $D(s) \sim s^{-\alpha}$  (см врезку на рис. 5б), где  $D(s) = N^{-1} \delta N(s) / \delta s$  – нормированная статистическая функция распределения величины  $s = t_{fr}$ ,  $\delta N(s)$  – число событий (импульсов ЭМЭ), попавших в интервал от  $s - \delta s$  до  $s + \delta s$ , а  $N$  – размер статистической выборки. Для всех исследованных образцов моно- и поликристаллического льда показатель степени  $\alpha$  находится в пределах от 1,2 до 1,6, что количественно соответствует статистике землетрясений, которая описывается степенным законом Гуттенберга – Рихтера с  $\alpha \sim 1$  [29]. Таким образом, импульсы ЭМЭ I и II типа имеют не только различные интервалы передних фронтов  $t_{fr}$ , но и существенно различную статистическую функцию распределения этой величины.

**4. «Альбом» ЭМЭ-отображений.** В таблице 1 сведены основные типы и сочетания сигналов ЭМЭ, отображающие нестационарные мезоскопические события пластической деформации и разрушения моно- и поликристаллического льда: 1) сигнал I типа сигмовидной формы, как установлено, отображает зарождение и распространение одиночной полосы скольжения; 2) сигнал I типа в форме степенной функции  $t^{1/n}$  вызван прорывом заблокированного скопления или сваливанием скопления в сток; 3) сигнал сигмовидной формы с внезапным сбросом скорости роста вызван развитием полосы скольжения с последующей блокировкой границей зерна (рис. 3г); 4) сигнал в виде последовательности сигналов I типа сигмовидной формы противоположного знака отображает «переизлучения» полосы поверхностью кристалла. Поверхностный источник вторичной полосы запускается упругим полем головной группы дислокаций первичного скопления. Такой процесс приводит к релаксации изгибающего момента, создаваемого первичной полосой с избытком дислокаций одного механического знака и к уменьшению суммарного вектора Бюргера системы скоплений; 5) сигнал в виде последовательности сигмовидных сигналов I типа одного знака вызван «эстафетной» передачей сдвига в соседние зерна; 6) сигнал ЭМЭ II типа вызван развитием одиночной микротрещины; 7) последовательность сигналов II и I типов отображает развитие микротрещины и последующей пластической релаксации за счет эмиссии дислокационного скопления из вершины остановившейся трещины; 8) наложение сигналов I и II типов отображает процесс, в котором в фазе максимальной скорости роста полосы скольжения срабатывает источник микротрещины (рис. 7);

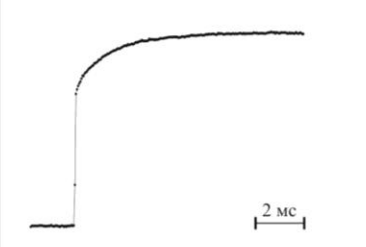
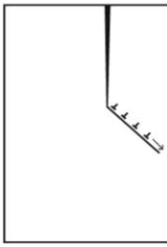
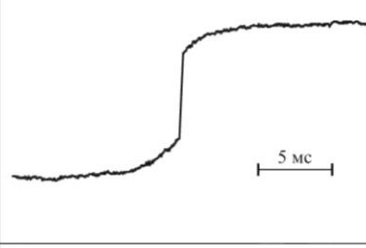
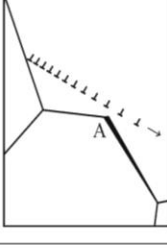
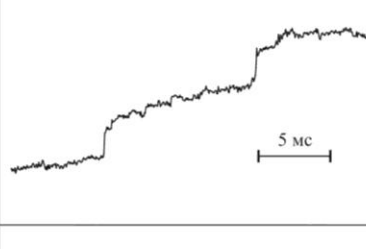
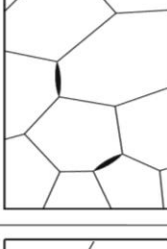
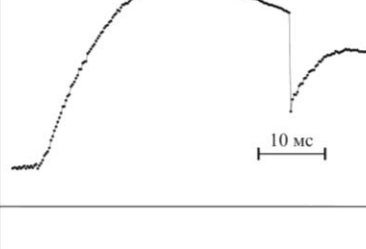
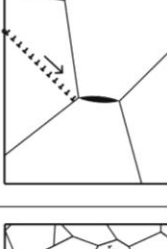
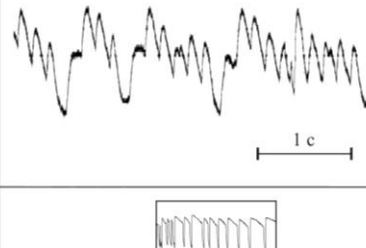
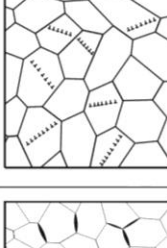
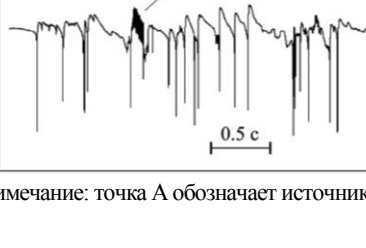

Таблица 1

Альбом ЭМЭ-отображений

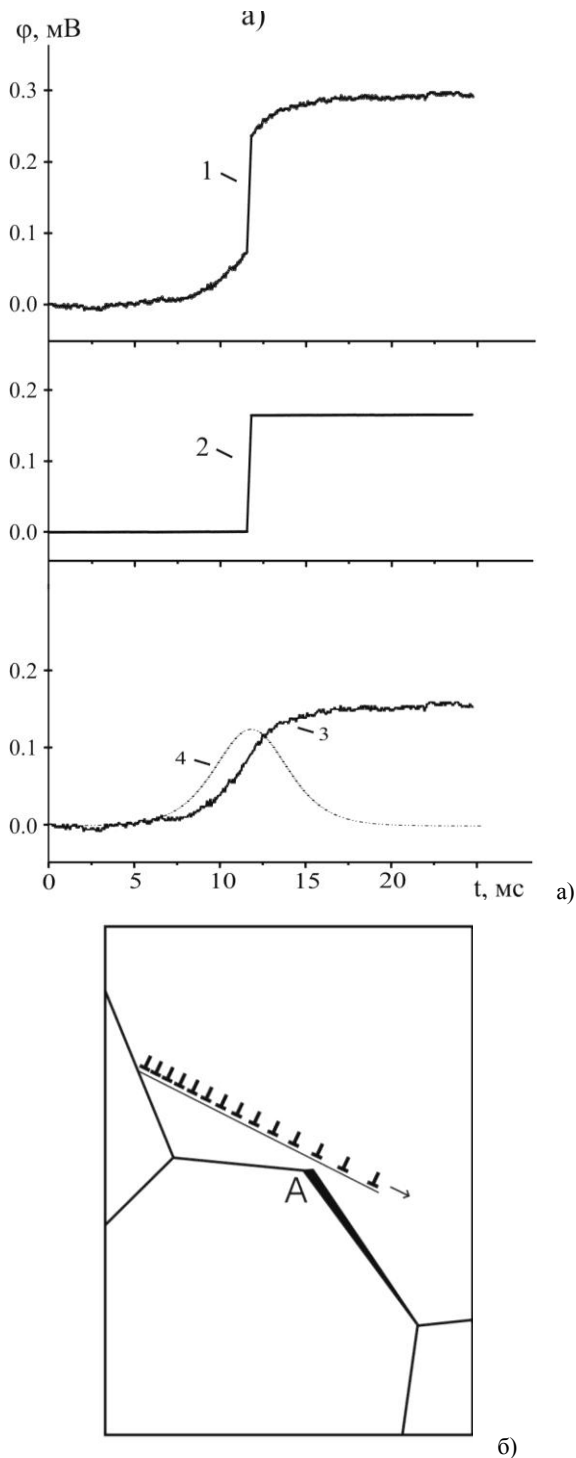
№	Сигнал ЭМЭ	Схема процесса	Комментарий
1			<p>зарождение и распространение полосы скольжения</p>
2			<p>прорыв скопления через барьер (малоугловую границу с примесной атмосферой)</p>
3			<p>зарождение, распространение и блокировка полосы скольжения</p>
4			<p>"переизлучение" полосы скольжения поверхностью кристалла</p>
5			<p>эстафетная передача сдвига в соседние зерна</p>
6			<p>развитие одиночной микротрещины</p>



Продолжение таблицы 1

№	Сигнал ЭМЭ	Схема процесса	Комментарий
7			развитие и остановка трещины с пластической релаксацией в вершине
8			распространяющаяся полоса скольжения упругим полем головной группы дислокаций запускает источник (типа концентратора напряжения А) микротрещины
9			последовательное образование двух микротрещин
10			заблокированная полоса запускает источник микротрещины
11			эстафетная (во времени и пространстве) передача сдвига с участием большого числа полос скольжения в различных зернах
12			множественное докритическое разрушение поликристалла

Примечание: точка А обозначает источник мезоэффекта – полосы скольжения или трещины.



**Рис. 7.** а) Наложение во времени сигналов ЭМЭ I и II типа: 1 – форма «сложного» сигнала ЭМЭ, представляющего собой сумму сигналов разного типа; 2 – сигнал II типа, вызванный образованием трещины, 3 – сигнал I типа сигмовидной формы, вызванный эволюцией полосы скольжения, 4 – временная зависимость скорости сдвига в полосе в относительных единицах. б) Схема процесса: распространяющаяся полоса скольжения в фазе максимальной скорости роста упругим полем головной группы запускает источник микротрещины

9) последовательность двух сигналов II типа связана с образованием двух микротрещин в соседних зернах поликристалла; 10) последовательность сигналов I и II

типов отображает последовательность мезособытия скольжения и последующего образования микротрещины: распространение и блокировка полосы скольжения провоцирует зарождение микротрещины по границе зерна; 11) последовательность большого количества сигналов I типа обусловлена, по-видимому, эстафетной передачей полос скольжения в соседние зерна, аналогично п. 5; 12) фрактальная пачка сигналов II типа отображает множественное растрескивание поликристаллического льда, связанное со спонтанным образованием фрактальной сетки трещин, в основном, по границам зерен (рис. 3и).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе методами электромагнитной и акустической эмиссии в сочетании с традиционным поляризационно-оптическим методом исследовалась скачкообразная пластическая деформация и разрушение моно- и поликристаллического льда в условиях одноосного сжатия в мягкой деформационной машине. Установлено, что деформирование льда сопровождается генерированием дискретных импульсов потенциала  $\Phi$  нестационарного электрического поля вблизи поверхности образца – сигнала электромагнитной эмиссии. Показано, что измерение сигнала ЭМЭ позволяет производить отображение сложного процесса формирования структуры мезодефектов кристалла на одну степень свободы – временной ряд  $\Phi(t)$ . Установлено, что сигнал ЭМЭ представляет собой суперпозицию «элементарных» сигналов – импульсов I и II типа, отображающих динамику различных процессов структурной релаксации на мезоскопическом уровне – дислокационных скоплений и трещин, которые играют важную роль в общей картине пластической деформации кристалла. Составлен «альбом ЭМЭ-отображений», который позволяет идентифицировать *in situ* по сигналу ЭМЭ наиболее важные события в пластически деформируемом кристалле с участием дислокационных скоплений и трещин (табл. 1). Такой альбом, образующий своего рода «электромагнитный язык» процессов структурной релаксации, дает возможность непосредственно в ходе деформирования контролировать эволюцию популяций дефектов определенного вида (полос скольжения, консервативных скоплений, микро- и макротрещин), устанавливать корреляционные связи между ними, проводить статистический, мультифрактальный и динамический анализ соответствующих временных рядов и исследовать по сигналу ЭМЭ явления самоорганизации, динамического хаоса, самоорганизующейся критичности и «подготовку» системы к глобальной катастрофе – макроскопическому разрушению образца.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Качурин Л.Г., Григоров И.О., Кузин Ю.И. и др. // ДАН СССР. 1979. Т. 248. № 3. С. 41-50.
2. Берри Б.Л., Грибов В.А., Григоров И.О. и др. // Склоновые процессы. М.: МГУ, 1980. № 9. С. 18-21.
3. Берри Б.Л., Грибов В.А. // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1982. № 2. С. 15-21.
4. Беляев Л.М., Набатов В.В., Мартышев Ю.П. // Кристаллография. 1962. Т. 7. № 4. С. 576-580.
5. Головин Ю.И., Шибков А.А. // Физ. тверд. тела. 1986. Т. 28. № 11. С. 3492-3499.

6. Головин Ю.И., Шибков А.А. // Кристаллография. 1990. Т. 35. № 2. С. 440-445.
7. Головин Ю.И., Дьячек Т.П., Долгова В.М. // Физ. тверд. тела. 1986. Т. 28. № 8. С. 2502-2505.
8. Головин Ю.И., Шибков А.А. // Кристаллография. 1987. Т. 32. С. 1206-1210.
9. Golovin Yu.I., Dyachek T.P. // Phys. Stat. Sol. A. 1985. V. 92. № 1. P. 61-64.
10. Шибков А.А. Исследование динамики дислокационных коллективов в ионных кристаллах оптическими и электромагнитными методами: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Воронеж, 1988. 143 с.
11. Мальиков Ю.И., Гордеев В.Ф., Дмитриев В.П. и др. // Ж. техн. физ. 1984. Т. 54. № 2. С. 336-341.
12. Головин Ю.И., Шибков А.А., Тюрин А.И. и др. // Физ. тверд. тела. 1988. Т. 30. № 11. С. 3491-3493.
13. Головин Ю.И., Горбунов А.В., Шибков А.А. // Физ. тверд. тела. 1988. Т. 30. № 7. С. 1931-1937.
14. Golovin Yu.I., Lebyodkin M.A., Shibkov A.A., Zheltov M.A., Skvortsov V.V., Koltsov R.Yu. // «Single crystal growth and heat & mass transfer» ICSC-01. Proceedings of the Fourth International Conference. Obninsk, 2001. V. 2. P. 543-552.
15. Головин Ю.И., Шибков А.А. // Кристаллография. 1987. Т. 32. № 2. С. 413-416.
16. Чаркина О.В., Чижко К.А. // Физ. тверд. тела. 2001. Т. 43. № 10. С. 1821-1827.
17. Weiss J., Grasso J.R. // J. Phys. Chem. B. 1997. V. 101. P. 6113-6117.
18. Petrenko V.F. // IAHN 92. Proceedings of the 11th International Symposium on Ice. June 15-19. 1992. Banff, Alberta. Canada. V. 2. P. 1140-1154.
19. Fifolt D.A., Petrenko V.F., Schulson E.M. // Phil. Mag. B. 1993. V. 67. № 3. P. 289-299.
20. Petrenko V.F. // Phil. Mag. B. 1993. V. 67. № 3. P. 301-315.
21. Головин Ю.И., Шибков А.А., Желтов М.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 1997. Т. 61. № 5. С. 913-918.
22. Higashi A., Koinuma S., Mae S. // Jap. J. of Applied Phys. 1964. V. 3. P. 610-616.
23. Jones S.J., Glen J.W. // J. of Glaciology. 1969a. V. 8. P. 463-473.
24. Higashi A., Koinuma S., Mae S. // Jap. J. of Applied Phys. 1965. V. 4. P. 575-582.
25. Shearwood C., Whitworth R.W. // Phil. Mag. A. 1991. V. 64. № 2. P. 289-302.
26. Petrenko V.F., Whitworth R.W. Physics of Ice. Oxford: Oxford University Press, 1999. 373 p.
27. Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. М.: Наука, 1982. 167 с.
28. Шибков А.А. Головин Ю.И., Желтов М.А. и др. // Кристаллография. 1999. Т. 44. № 5. С. 924-929.
29. Gutenberg B., Richter C.F. // Ann. di Geophysica. 1956. V. 9. P. 1-15.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 04-02-16143) и Минобразования РФ (проект № E02-3.4-113).

Поступила в редакцию 29 апреля 2004 г.