

ВЛИЯНИЕ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ЛОЖЕ НА ДВИЖЕНИЕ ЛЕДНИКА

канд. физ.-мат. наук В.П.ЕПИФАНОВ¹, д-р геогр. наук Л.М.САВАТЮГИН²

¹ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского, г. Москва, e-mail: evr@ipmnet.ru

² – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: savat@aari.ru

Исследуются спектрограммы сигналов акустической эмиссии (АЭ) при контактном разрушении примороженного к подложке льда на препятствиях различной формы при сдвиге в условиях стеснения. В диапазоне частот от 15 Гц до 20 кГц измеряли частоту, амплитуду, длительность сигналов АЭ и их последовательность во времени. В качестве подложки применен серпентинит и другие материалы. Определена адгезионная прочность соединения льда с серпентинитом, исследована кинетика накопления дефектов на препятствиях. Препятствие на порядок увеличивает осевую силу сдвига и изменяет условия граничного трения. К адгезионному разрушению на пятнах контакта добавляются пластические деформации, которые сопровождаются образованием трещин в контактном слое льда. Определены два характерных времени инкубационного периода для адгезионного и когезионного разрушения льда. В акустических спектрах, полученных от удаленных источников в леднике Альдегонда (Шпицберген) и в модельных экспериментах, обнаружены общие закономерности в механизмах разрушения, проявляющиеся в уменьшении частоты сигналов АЭ и периодических пульсациях.

Ключевые слова: ледник, акустическая эмиссия, адгезионная прочность, концентраторы напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что неровности коренного ложа ледников в значительной мере обуславливают механику их движения. Прямое изучение взаимодействия ледника с препятствиями на ложе затруднено из-за ограниченного доступа к объекту исследования. В последнее время для целей локализации источников упругих волн на ледниках, называемых в англоязычной литературе *icequakes*, используют сейсмические методы [Roux et al., 2008; Jerome et al., 2011]. Применение акустических волн, длина которых соизмерима с масштабом источника излучения, открывает принципиально новые возможности. Так, при использовании диапазона частот от 15 Гц до 20 кГц становится возможным изучать не только процесс образования трещин в ледниковом льде [Епифанов, Саватюгин, 2011], но и кинетику разрушения адгезионного контакта [Епифанов, Глазовский, Осокин, 2013].

Установлено, что прочность адгезионного соединения льда с подстилающей горной породой уменьшается в два раза при незначительном (0,002) изменении отношения поперечных к продольным сдвиговым напряжениям. Этот экспериментальный факт проясняет особенность движения ледника по ложу с боковым уклоном. Однако пока недостаточно исследовано, как влияют форма и геометрия препятствий на движение ледника и как это отражается на параметрах АЭ (рис. 1).



Рис. 1. Взаимодействие ледника с «бараньим лбом».

Постановка задачи. Данные по акустическим характеристикам ледникового льда опубликованы в работах [Макаревич и др., 1984; Bently, Kohnen, 1976]. Решены методические задачи, связанные с выполнением акустических измерений на ледниках, включая учет искажений, вносимых ледниковым льдом как волноводом, и требования к измерительным акустическим линиям [Епифанов, Саватюгин, 2011; Епифанов, Глазовский, 2010]. Показано, что с помощью метода акустической эмиссии можно определять не только масштаб разрушения, но и исследовать кинетику накопления трещин во льду и других горных породах в процессе кратковременной ползучести [Епифанов, 1980; Зарецкий, Чумичев, 1982; Епифанов, 1982]. Цель настоящего исследования – сопоставить спектры сигналов АЭ от удаленных источников в ледниках со спектрами сигналов АЭ при контактном разрушении соединения льда с подложкой при сдвиге в условиях стеснения на препятствиях различной формы. В качестве основной концепции принимается, что увеличение масштаба разрушения отражается в спектрах АЭ как сдвиг частоты в низкочастотную часть спектра и увеличение амплитуды сигнала [Епифанов, 2007; Епифанов, 1980].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные измерения выполнены на леднике Альдегонда (Западный Шпицберген) в летнее время. Аппаратура была размещена на площадках на высоте ~230 м над уровнем моря с координатами: 77,98137° с.ш. 14,08380° в.д. и 77,98058° с.ш. 14,08046° в.д. По данным радиозондирования максимальная толщина льда в этой части ледника составляет 180 м [Василенко и др., 2001]. Физическое моделирование взаимодействия ледника с ложем выполнено в Институте проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Физическое моделирование разрушения льда на контакте с ложем ледника. Задача моделирования сведена к упрощенному воспроизведению условий на ложе (поперечных и продольных сдвиговых напряжений, температуры и структуры льда). Для раздельного регулирования осевых и поперечных сдвиговых напряжений были разработано устройство, которое вместе с исследуемым образцом помещали на опорную плиту испытательной машины. Схема устройства показана на рис. 2.

Устройство для испытания льда на сдвиг. Зазор между круглым гладким стержнем 1 и конической втулкой 3 допускает ее перемещение по стержню с минимальным трением. Торец втулки 3 плотно сопряжен с цилиндрической оболочкой 2, образуя в нижней части сборки герметически замкнутую полость при коаксиальном расположении стержня. При замораживании воды в полости (зазоре между стержнем и оболочкой) в формирующемся льде 4 создается боковое стеснение, имитирующее давление ледникового льда на ложе. Толщина свода ледяного образца не менее 6 мм. Для льда со средним диаметром кристаллов 0,3 мм и менее отношение толщины свода к диаметру кристаллов составляет более десяти, что по этому параметру исключает влияние толщины образца на результат измерений. Разрушение адгезионного контакта лед–стержень именно по боковой поверхности стержня гарантируется конической втулкой с углом при вершине около 7° . При испытаниях регистрировали осевое смещение стержня, осевую силу P , температуру льда и спек-

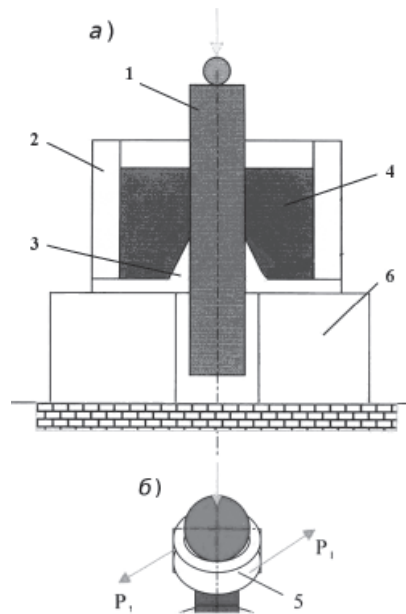


Рис. 2. Схема устройства для определения адгезионной прочности соединения льда с различными материалами на сдвиг (а), поворотное приспособление (б): 1 – стержень, 2 – оболочка, 3 – коническая втулка, 4 – лед, 5 – поворотное приспособление, 6 – опора.

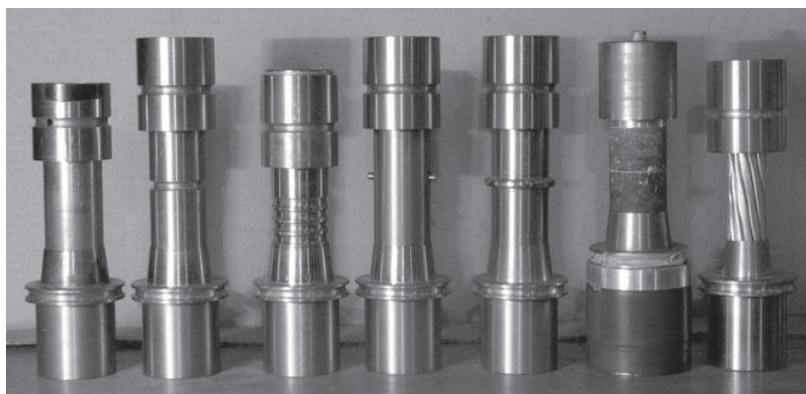


Рис. 3. Подложки с концентраторами напряжений.

Таблица 1

Максимальное значение силы $P_{\max}$ при осевом сдвиге замороженного на подложку льда в зависимости от материала подложки, а также формы и размера размещенного на ней препятствия

№	Форма и размер подложки	Материал	Форма препятствия и его диаметр, мм	$P_{\max}$, кН	σ_a , МПа
1	Прямой цилиндр $D = 20$ мм, $h = 60$ мм	Сталь-45	–	375 ± 25	0,24
2	То же	Сталь-45	Кольцевое углубление, 3	2540 ± 130	–
3	”	Сталь-45	4 кольцевых углубления, 3	4720 ± 240	–
4	”	Сталь-45	2 выступа, 2,5	3860 ± 170	–
5	”	Сталь-45	Выступ в виде тора, 3	4360 ± 210	–
6	”	Серпентинит	–	1580 ± 120	1,1
7	Прямой цилиндр $D = 20$ мм, $h = 60$ мм из проводов	Алюминий	Витая поверхность, 3	440 ± 30	–

тральные характеристики сигналов АЭ. В испытаниях на сложный сдвиг (имитация поперечного уклона ложа) дополнительно измеряли момент пары сил $P_1 P_1$, который прикладывали к стержню в плоскости, ортогональной к его оси. Оснастку при этом дополняли поворотным приспособлением (рис. 2б), состоящим из захвата 5 с подшипником и направляющей втулки (на схеме не показана). Методика испытаний льда на сдвиг изложена в работах [Гольдштейн, 2011, 2012], характеристики измерительной аппаратуры даны в [Епифанов, Саватюгин, 2011].

Концентраторы напряжений На рис. 3 показаны подложки, на которые намораживали лед. Подложки изготовлены в виде прямых цилиндров с различными концентраторами напряжений (препятствиями) в виде выступов и впадин (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Влияние формы препятствия на сдвиг льда по подложке. В таблице 1 приведены результаты испытаний на сдвиг льда, замороженного на гладкие стержни из стали (образцы 1–5), серпентинита (образец 6) и алюминия (образец 7). Все стержни (диаметром 20 мм) отполированы мелким абразивом (нулевкой), а на стержнях 2–5 созданы «препятствия». Так, на образце 2 сделано одно кольцевое углубление диаметром 3 мм, на образце 3 – четыре таких углубления. Образец 4 имеет два симметричных выступа в виде цилиндрических штифтов диаметром 3 мм и высотой 3 мм. Образец 5 имеет выступ в виде тора диаметром 3 мм и высотой 3 мм. Сопротивление сдвигу на образце 7 создается поверхностью контакта, образованной навивом провода диаметром 3 мм. И только образцы 1 и 6 не имеют дополнительных препятствий сдвигу.

Чтобы сдвинуть лед, примороженный к подложке без препятствий (образцы 1 и 6), требуется сила $P_{\max}$, значение которой почти на порядок меньше, чем для образцов с препятствиями. Если препятствия отсутствуют, то сила сдвига определяется физико-механическими свойствами материала подложки (молекулярная составляющая адгезии) и микронеровностями, образовавшимися при абразивной полировке поверхности (механическая составляющая адгезии). Измеренное значение адгезионной прочности в этом случае не противоречит данным, полученным другими исследователями. Например, адгезионная прочность соединения сталь–лед для первого

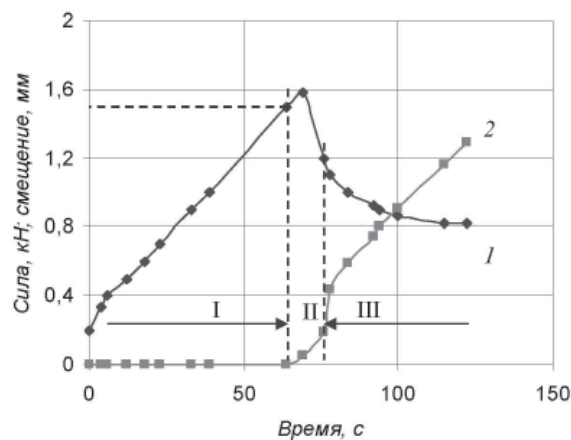


Рис. 4. Зависимости осевой силы и смещения льда, намороженного на круглый стержень из серпентинита, от времени нагружения: I – предварительное смещение; II – срыв; III – скольжение.

образца $\sigma_a = 0,24$ МПа в пределах точности эксперимента сопоставима со значением $\sigma_a = 0,2$ МПа, опубликованным в работах [Лууга, 1986; Meuler, 2010].

В зависимости от значения максимальной силы сдвига образцы располагаются в следующей последовательности: $P_{\max}^{(3)} > P_{\max}^{(5)} > P_{\max}^{(4)} > P_{\max}^{(2)} > P_{\max}^{(6)} > P_{\max}^{(7)} > P_{\max}^{(1)}$. При отсутствии препятствий оказывает большее влияние на сопротивление сдвигу (эффект до 2300 %), чем физико-механические свойства подложки. Поскольку препятствия в первом приближении могут рассматриваться как некоторое подобие скальных выступов или углублений на ложе ледника, то представляет интерес рассмотреть механизмы контактного взаимодействия льда с такими препятствиями на подложке в условиях сдвига и стеснения.

На рис. 4 показаны типичные зависимости осевой силы и смещений от времени нагружения (образец 4) для льда, полученного послойным намораживанием дистиллированной воды. На кривых выделены характерные участки I–III, аналогичные стадиям трения скольжения на кривой Штрибека [Мур, 1978]. Микросдвиг льда, пропорциональный приложенной силе, обозначен как предварительное смещение I. Тангенциальное усилие, соответствующее предельному осевому смещению, – сила статического трения или трения покоя. При достижении предельного смещения происходит сдвиг льда относительно подложки, срыв II, за которым начинается скольжение III (стадия граничного трения, по Штрибеку).

По мере приближения к предельному значению смещения нарастают быстрее сдвигающей силы и зависимость становится нелинейной. В режиме предварительного смещения происходит диссипация упругой энергии, возврат не является полным (подтверждается сигналами АЭ).

Особенности контактного разрушения на препятствиях различной формы выявляли не только по деформационным кривым, но также по изменению параметров АЭ и микрошлифам льда из зоны контакта льда с подложкой.

На рис. 5 представлены зависимости силы сопротивления сдвигу от времени нагружения для исследуемых образцов 1–7 (нумерация та же, что в табл. 1, за исключением индекса 1, которым обозначена кривая для образцов 1 и 7). Для удобства кривые смещены по оси времени. Для стадии предварительного смещения в целом наблюдается

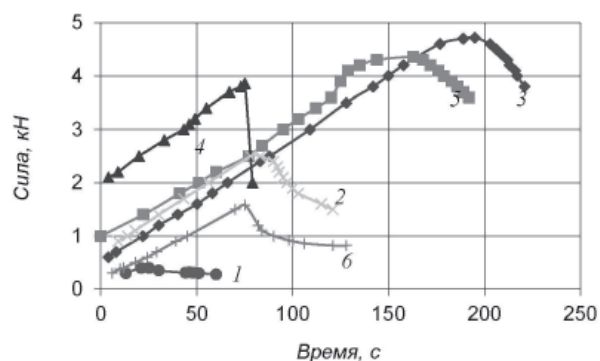


Рис. 5. Зависимости осевой силы от времени нагружения исследуемых образцов (пояснение в тексте).

линейная зависимость сопротивления сдвигу, исключение – кривая 5 (образец с кольцевым выступом в виде тора). Задолго до достижения максимальных значений угол наклона кривой 5 увеличивается, что свидетельствует об увеличении модуля сдвига льда, которое вызвано его упрочнением. Нарушение линейной зависимости силы от времени наблюдается только вблизи предельного сопротивления сдвигу. Переход от предварительного смещения к срыву в условиях стеснения (-20°C , 20 Н/с) происходит в основном пластически (кривые 1–3, 5–7). Исключение представляет кривая 4 (образец с препятствием в виде штифтов), причем срыв для этого образца сопровождается характерным сухим треском, что свидетельствует о хрупком разрушении льда.

Адгезионное разрушение контакта льда с подложкой «в чистом виде» происходит при отсутствии препятствий на подложке (кривые 1, 6). При наличии препятствий определяющим становится механизм когезионного разрушения льда. Разные вклады этих механизмов в сопротивление сдвигу объясняют различие деформационных кривых.

Сочетание высоких удельных давлений и повышение температуры приводит к существенным изменениям геометрических, физических и механических свойств

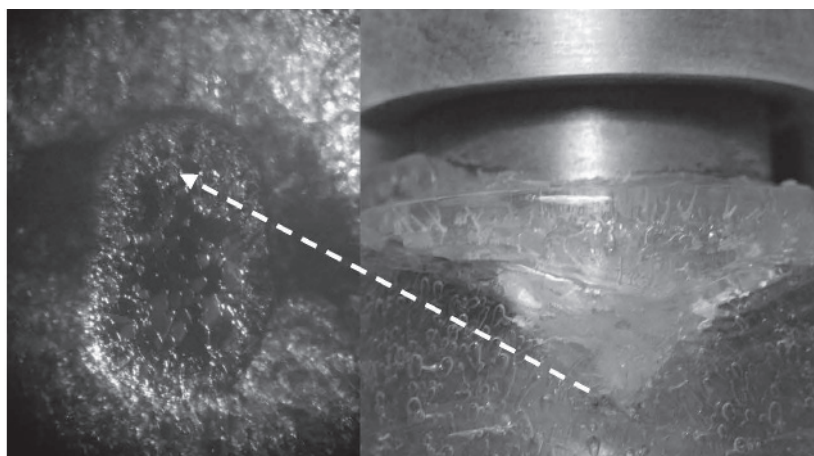


Рис. 6. След от «обтекания» штифта льдом при сдвиге (справа вид сбоку, конус, в вершине которого находится штифт, смещение льда снизу вверх; слева вид изнутри, микрошлиф, увеличение $15\times$).

поверхностного слоя льда в зоне контакта. Результат такого взаимодействия льда с препятствием, например в виде цилиндрического штифта на подложке (образец 4), показан на рис. 6 (увеличение 15×). След, оставленный во льду, имеет форму обратного конуса (если сравнивать с конусом, возникающим при индентировании [Колесников, 1989]). Формирование следа происходит в условиях высокого давления, о чем свидетельствуют радиальные трещины перед штифтом, пластические деформации (наволакивание), а также пластическое отгеснение, переходящее в резание.

Прерывистое скольжение льда по подложке с препятствиями сопровождается излучением повторяющихся сигналов, которые на спектрограмме амплитуда–частота–время в интервале частот ниже 11 кГц имеют вид своеобразных дорожек (рис. 7б). Эти сигналы, как показали исследования шлифов льда, –

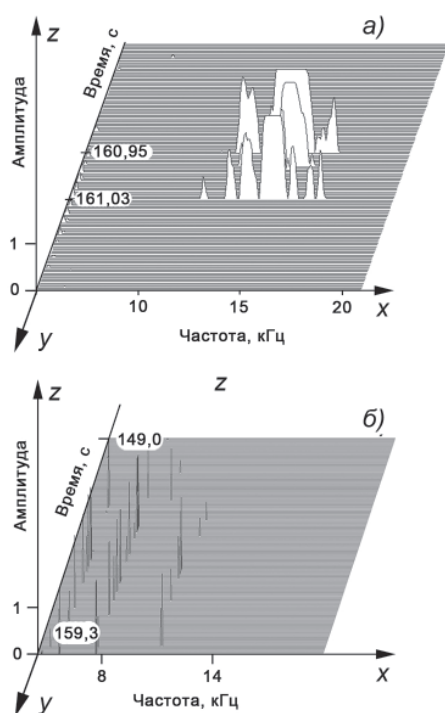


Рис. 7. Сигналы АЭ: а – адгезионное разрушение контакта с подложкой без препятствий (образец 6); б – когезионное разрушение на препятствии при скольжении (образец 4). Z – амплитуда, X – частота, Y – время.

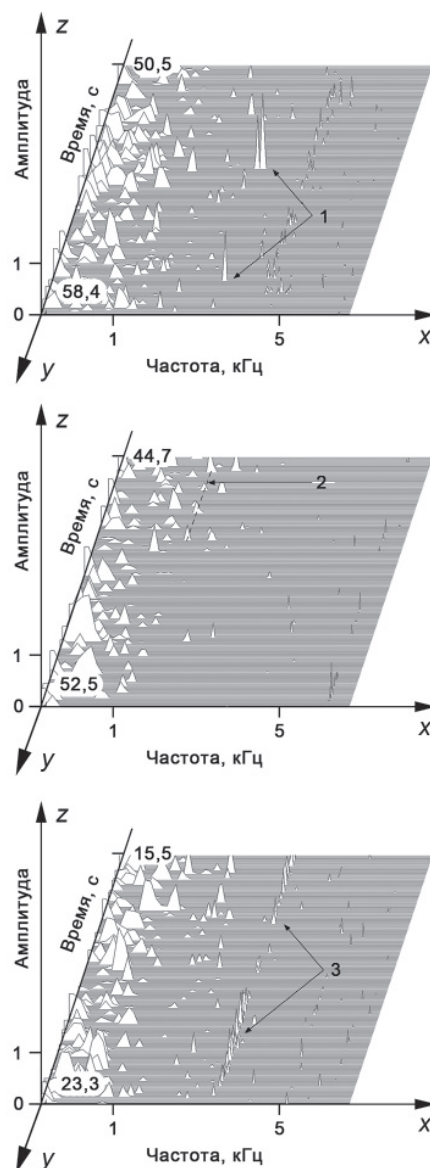


Рис. 8. Спектрограммы сигналов АЭ в леднике Альдегонда: 1 – при ударном взаимодействии шарового индентора с дневной поверхностью на расстоянии 10 м от приемника; 2, 3 – «дорожки» от удаленных источников

результат образования микротрещин в зоне сжатия перед препятствием. Нельзя не отметить, что амплитуда этих сигналов и их количество существенно больше, чем это наблюдается на гладкой поверхности подложки при том же пороге дискриминации, различной оказывается также форма сигналов АЭ для различных препятствий.

На рис. 8 показаны спектрограммы акустических колебаний в леднике Альдегонда (Шпицберген). Тестовые спектрограммы (1), получены в результате ударного взаимодействия шарового индентора с дневной поверхностью ледника (энергия удара 8,5 Дж и 6,8 Дж, расстояние от приемника 10 м). Прерывистые пульсации (2 и 3) в виде «дорожки» на частоте 1,2 кГц (2) и 2,6 кГц (3), а также спонтанные хаотические импульсы в диапазоне частот ниже ~1 кГц являются собственными колебаниями в леднике. Сочетание таких характеристик, как малая амплитуда, малая продолжительность (79 дБ) и частота, указывает на то, что источники собственных колебаний расположены на значительном удалении от акустического приемника. Возможность их расположения на ложе ледников подтверждается сопоставлением расчетного расстояния до источника и толщиной льда в местах расположения акустических приемников.

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Разработан новый метод для исследования контактного взаимодействия льда с подложкой, содержащей препятствия с положительным и отрицательным радиусом кривизны. Метод основан на сдвиге намороженного на стержень льда в условиях бокового стеснения. Разрушение адгезионного контакта контролировали с помощью метода акустической эмиссии в рабочем диапазоне частот от 15 Гц до 20 кГц. В качестве подложки использована горная порода серпентинит, а также сталь и алюминий. Выполнены механические испытания образцов с препятствиями различной формы, определена адгезионная прочность соединения льда с подложкой. Амплитудно-частотные спектры контактных разрушений льда, полученные при испытаниях на сдвиг в условиях стеснения, сравнены со спектрами от удаленных источников в леднике Альдегонда.

Как показали наблюдения, разрушение адгезионного контакта (сигнал АЭ максимальной амплитуды на рис. 7а) и, тем более, единичных пятен касания льда с гладкой подложкой (высокочастотные сигналы АЭ малой амплитуды) не приводит при сдвиге в условиях стеснения к разрушениям в объеме намороженного льда.

Характерное время инкубационного периода для адгезионного разрушения равно ~ (0,05–0,08) с. Оно определено как промежуток времени между повторяющимися импульсами АЭ при переходе от предварительного смещения к срыву (рис. 7а).

Согласно [Крагельский и др., 1977] упругий контакт реализуется на стадии предварительного смещения льда по гладкой подложке при отношении высоты микровыступов (шероховатости) к его радиусу $h/R < 0,01$ (образцы 1 и 7), пластический – при $h/R \geq 0,01$. Необратимые деформации сдвига являются результатом разрушения пятен контакта льда с гладкой подложкой (шлифовка стержней мелким абразивом).

Препятствия на подложке (рис. 3) увеличивают напряжения сдвига почти на порядок (рис. 5) по сравнению с гладким образцом 1 (табл. 1). Если контактные напряжения превышают предел текучести σ_T , то лед обтекает препятствие. Дальнейшее увеличение напряжений сдвига τ нарушает режим обтекания препятствия льдом, $h/R \geq 0,01 \cdot (1 - 2 \tau/\sigma_T)$, и происходит резание, имеющее прерывистый характер. Механизмы деформаций льда становятся более сложными. К адгезионному разрушению льда и диссипативным потерям на трение добавляется его когезионное разрушение

(пластическое оттеснение, переходящее в прорезание, и образование трещин). Семейство деформационных кривых (рис. 5) иллюстрирует сочетание разных механизмов деформаций в зависимости от формы и геометрии исследованных препятствий. Механика когезионного разрушения отражается не только на деформационных кривых (рис. 5), но и на микрошлифах и спектрах сигналов АЭ.

Казалось бы, что сила сдвига должна определяться миделевым сечением препятствия. Действительно, для препятствий одинаковой формы, которые имеют отрицательный радиус кривизны (образцы 2 и 3), сила пропорциональна корню квадратному из миделева сечения: $P_{\max} \sim S_M^{1/2}$. Однако для препятствий разной формы с положительным радиусом кривизны (образцы 4 и 5) миделевы сечения отличаются почти на порядок ($0,18 \text{ см}^2$ и $1,5 \text{ см}^2$), а значения силы сдвига – только на 10 % (табл. 1). Из этого следует, что форма препятствия влияет на сопротивление сдвига более сильно, чем его миделево сечение. К тому же для препятствий с одинаковыми миделевыми сечениями (образцы 2 и 5), но разными, положительным и отрицательным, радиусами кривизны получены разные значения силы сдвига. Это указывает на принципиально разные механизмы разрушения льда в этих случаях.

От миделева сечения препятствия зависит скорость роста локального напряжения на контакте. При малом миделевом сечении скорость роста локальных напряжений оказывается больше, чем обратная величина времени релаксации. В этом случае препятствие прорезает лед, в нем образуются микротрещины (рис. 6). Напротив, вязкое разрушение льда наблюдается при больших миделевых сечениях (пологая форма кривых 3 и 5 на рис. 5 вблизи максимальных напряжений).

Для условий эксперимента видимые трещины зарождаются только перед препятствием (в зоне сжатия) и ориентированы в направлении сдвига. Пластические деформации и микроразрушения локализованы на контакте с препятствием таким образом, что образуют конус разрушения, аналогичный тому, который наблюдается при индентировании.

В собственных акустических спектрах ледника Альдегонда обнаружены акустические эффекты, которые наблюдали в модельных экспериментах и которые отражают общие закономерности механики разрушения льда. Во-первых, обнаружены повторяющиеся сигналы близкой частоты, «акустические» дорожки (*stick-slip*). Во-вторых, обнаружено периодическое смещение частоты сигнала АЭ в низкочастотную часть спектра, которое характерно для роста трещин и расширения масштаба разрушения. Эти акустические эффекты, обнаруженные сначала на леднике Альдегонда, затем были зарегистрированы на ледниках Центральный Туюксу и Молодежный (Северный Тянь-Шань).

Повторяющиеся спектрограммы в виде «дорожки» с частотой 1,2 кГц и 2,6 кГц в собственном акустическом спектре ледников (рис. 8), по-видимому, являются результатом сложного физического явления, которое включает чередование процессов образования трещин, локальную разгрузку и последующее сжатие, приводящее к трещинообразованию на одних и тех же препятствиях (*stick-slip*). Характерное время инкубационного периода, определенное как промежуток между двумя импульсами на акустической дорожке, составляет 0,8–1,0 с. Нельзя не отметить, что время инкубационного периода когезионного разрушения льда более чем на порядок превышает инкубационный период адгезионного разрушения. Вероятно, большему масштабу разрушения соответствует больший инкубационный период.

Согласно модели гармонического осциллятора, масса m источника обратно пропорциональна квадрату частоты сигнала f и прямо пропорциональна жесткости D :

$$m = \frac{D}{4\pi^2 f^2}. \quad (1)$$

Для $D \approx \text{const}$ и почти одинаковых амплитуд сигналов АЭ получаем, что смещение от 2,6 до 1,2 кГц (рис. 8) является результатом увеличения массы источника почти в 5 раз. В пользу того, что смещение частоты «дорожки» обусловлено расширением масштаба разрушения когезионной зоны контакта, свидетельствуют также визуальные наблюдения трещинообразования в прозрачных образцах льда и амплитудно-частотный анализ характеристик сигналов АЭ [Труэлл, 1982].

Из сопоставления спектров разрушения льда, примороженного к подложке с препятствиями, и от удаленных источников на леднике следует, что модельный эксперимент в первом приближении имитирует элементарные акты образования трещин на неровностях коренного ложа ледника.

Идентификация сигнала АЭ источнику излучения включает учет деформации изначального спектра. Зависимость регистрируемого спектра от длины акустического пути проявляется в уменьшении амплитуды сигнала и «обеднении» спектра высокочастотными компонентами [Виноградов, 1989]. Так, тестовая спектрограмма удара индентора в непосредственной близости от акустического приемника имеет максимум на частоте 15,5 кГц (71 дБ), а при удалении на 10 м – 3,05 кГц (79 дБ). Причиной этого является нелинейная зависимость коэффициента ослабления акустической волны от частоты, например, $\alpha \sim f^2$, вызванная диссипационными потерями и геометрическим фактором (расхождением луча)

$$A = A_0 (e^{-\alpha L} / \chi), \quad (2)$$

где A_0 – амплитуда в точке касания полюса шара льда, α – коэффициент ослабления для частоты f , L – длина акустического пути и χ – коэффициент расхождения луча.

Спонтанность возникновения сигналов АЭ в низкочастотной части спектра (менее 1,4 кГц) (рис. 6), малые амплитуды и частоты свидетельствуют об их принадлежности к удаленным источникам разных размеров. Возможно, что эти сигналы являются отражением процессов образования трещин на многочисленных неровностях коренного ложа. В пользу этого свидетельствует рассчитанная, согласно уравнению (2), длина акустического пути L , которая оказывается больше или равной толщине ледника H в точке акустических измерений. Косвенно эту возможность подтверждает также сходство спектров разрушения, полученных в модельных экспериментах, со спектрами сигналов АЭ от удаленных источников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов лабораторных экспериментов следует, что препятствия увеличивают сопротивление сдвигу почти на порядок величины по сравнению с гладкой подложкой. Это увеличение объяснено зависимостью сопротивления от миделевого сечения и формы препятствия, которые определяют механизм контактного разрушения, включая переход от адгезионного к когезионному разрушению льда.

Установлено, что одним из определяющих факторов трещинообразования на препятствиях при сдвиге является инкубационный период подготовки разрыва льда. Выявлены два характерных времени инкубационного периода: для адгезионного разрушения $\sim 0,08$ с и для когезионного разрушения $\sim 1-1,5$ с. Кроме того, обнаружено периодически

повторяющееся смещение частоты заполнения сигналов АЭ в диапазоне частот от 1,2 до 2,6 кГц с характерным временем смещения частоты источника 0,05–0,06 с.

Фактически показано, что акустические эффекты, наблюдаемые в экспериментах по взаимодействию льда с подложкой, имеют общие закономерности (время инкубационного периода, повторяющиеся сигналы и смещение частоты заполнения сигналов АЭ) с теми, которые обнаружены в спектрах от удаленных источников в ледниках.

Разработанный метод и полученные результаты могут быть применены при физическом моделировании взаимодействия ледника с коренным ложем.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-05-00863).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Василенко Е.В., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Наварро Ф.Х., Токарев М.Ю., Калашиников А.Ю., Мирошниченко Д.Е., Резников Д.С. Радиофизические исследования ледника Альдегонда на Шпицбергене в 1999 г. // Материалы гляциол. исслед. 2001. Вып. 90. С. 86–99.

Виноградов С.Д. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений. М.: Наука, 1989. 178 с.

Воронина И.Ю., Епифанов В.П. Акустические исследования структурных изменений гранита при осевом сжатии // Акустический журнал. 1980. Т. XXVI. Вып. 3. С. 371–376.

Гольдштейн Р.В., Епифанов В.П. К измерению адгезии льда к другим материалам // Вестник Пермского гос. техн. университета. 2011. № 2. С. 28–41.

Гольдштейн Р.В., Епифанов В.П. Адгезионная прочность гололедных отложений на элементах металлических конструкций // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика. 2012. Т. 12. Вып. 4. С. 22–41.

Епифанов В.П., Глазовский А.Ф., Осокин Н.И. Физическое моделирование контакта ледника с ложем (эксперименты) // Лед и снег. 2013. № 1 (121). С. 43–52.

Епифанов В.П., Саватюгин Л.М. Акустические исследования абляционного слоя ледника на примере ледника Альдегонда (Шпицберген) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 4 (90). С. 87–98.

Епифанов В.П., Глазовский А.Ф. Акустические характеристики как индикатор особенностей движения льда в ледниках // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 4. С. 42–55.

Епифанов В.П. Физические механизмы контактного разрушения льда // Доклады РАН. Техническая физика. 2007. Т. 412. № 1. С. 39–43.

Епифанов В.П. Разрушение поликристаллического льда // Доклады РАН. Техническая физика. 1982. Т. 267. № 6. С. 1364–1367.

Зарецкий Ю.К., Чумичев Б.Д. Кратковременная ползучесть льда. Новосибирск: Наука, 1982. 116 с.

Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. 224 с.

Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

Макаревич К.Г., Вилесов К.Н., Головкова Р.Г., Денисова Т.Я., Шабанов П.Ф. Ледники Туюксу (Северный Тянь-Шань). Л.: Гидрометеиздат, 1984. 172 с.

Мур Д. Основы применения трибоники / Пер. с англ. Под ред. Крагельского И.В. М.: Мир, 1978. 488 с.

Труэлл Р., Эльбау Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 308 с.

Bently C.R., Kohnen H. Seismic refraction measurements of internal friction in Antarctic ice // J. Geophys. Res., 1976. Vol. 81. № 8. P. 1519–1526.

Faillettaz J., Martin F., Didier S. Icequakes coupled with surface displacements for predicting glacier break-off // *Journal of Glaciology*. 2011. Vol. 57. № 203. P. 453–460.

Lyyra M., Jantti M., Launiainen J. Adhesive Strength of Spray Accreted Ice on Materials and Coatings // *International Offshore and Navigation Conference and Exhibition*. ESPOO. 1986. P. 484–496.

Meuler A.J., Smith J.D., Varanasi K.K., Mabry J.M., McKinley G.H., Cohen R.E. Relationships between Water Wettability and Ice Adhesion // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2010. Vol. 2 (11). P. 3100–3110. doi: 10.1021/am1006035.

Roux P.F., Marsan D., Metaxian J.F. et al. Microseismic activity within a serac zone in an alpine glacier (Glacier d'Argentiére, Mont Blanc, France) // *Journal of Glaciology*. 2008. Vol. 54. № 184. P. 157–168.

V.P.EPIFANOV, L.M.SAVATYUGIN

BED OBSTACLES IMPACT ON GLACIER MOVEMENT

The acoustic emission (AE) spectrogram signals at contact destruction of the ice frozen to substrate on various shape obstacles shifted on the constrained conditions are investigated. The frequency, amplitude, duration of AE signals and their sequence in time are measured within the 15 Hz-20 kHz frequency range. The serpentine and other materials are used as substrates. The ice/serpentine adhesive junction strength is determined and the defect accumulation kinetics on obstacles is investigated. The obstacles increase the axial shifting force and change the boundary friction conditions by an order. The plastic deformations accompanied by crack formation in ice contact layer are added to the adhesive destruction on contact patches. Two characteristic incubation time periods of adhesive and cohesive ice destruction are determined. Common regularities in the destruction mechanisms characterized by AE signal frequency reduction and periodic pulsations are found out in acoustic spectra obtained from remote sources in the Aldegonda glacier (Spitzbergen) and the model experiments.

Keywords: *Glacier, acoustic emission, adhesive strength, contact of ice with a stress concentrator.*