

УДК 551.324.5:551.321:620.179.17

## Физическое моделирование контакта ледника с ложем (эксперименты)

© 2013 г. В.П. Епифанов<sup>1</sup>, А.Ф. Глазовский<sup>2</sup>, Н.И. Осокин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва; <sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва

*evp@ipmnet.ru*

*Статья принята к печати 2 декабря 2012 г.*

Акустическая эмиссия, ледник, методы испытания, поверхностная скорость, реология, физическое моделирование.  
Acoustic emission, glacier, physical modelling, rheology, surface velocity, test methods.

Проведены комплексные исследования адгезионной прочности соединения льда с подложкой, предусматривающие анализ амплитудно-частотных характеристик сигналов акустической эмиссии (АЭ) в диапазоне частот от 15 до 20 тыс. Гц. Данные физического моделирования процессов адгезионного разрушения льда подтверждены результатами полевых исследований ледников Центральный Туяксу и Молодежный в Заилийском Алатау. Получена экспериментальная зависимость адгезионной прочности соединения льда с серпентинитом (подложкой) от температуры (от 0 до  $-25$  °С) при осевом сдвиге в условиях стеснения. Показано, что адгезионный контакт лёд–подложка начинает разрушаться намного раньше достижения максимальных напряжений сдвига, причём для участков деформационных кривых (трение покоя и скольжения) получены диаграммы сигналов АЭ в координатах амплитуда–частота–время. Показано влияние соотношения продольных и поперечных сдвиговых напряжений на адгезионную прочность соединения льда с подложкой. В среднем диапазоне частот собственных акустических спектров ледников установлено периодическое уменьшение частоты заполнения сигналов АЭ. Аналогичный эффект смещения сигналов АЭ по оси частот в сторону низкочастотного диапазона получен при испытании образцов пресноводного льда и обусловлен расширением масштаба разрушения. Результаты исследований можно использовать для дистанционного изучения кинетики накопления трещин в придонных слоях ледникового льда.

### Введение

До настоящего времени проблема взаимодействия ледника с ложем остаётся наименее изученной ввиду затруднённого доступа к объекту исследования. При попытках установки измерительной аппаратуры в тоннелях, проходящих по ложу, нарушалось естественное поле напряжений; кроме того, они носили точечный характер [14], а измерительная аппаратура недостаточно соответствовала задаче исследования. Теоретические исследования также не позволяли получить достоверные ответы на интересующие вопросы, поскольку базировались на значительных допущениях и либо на примерзании льда к ложу, либо на его скольжении по нему [15]. В настоящем исследовании разрабатывается комплексный подход, основанный на использовании деформационной акустической эмиссии (АЭ) в сочетании с физическим моделированием движения льда по ложу, определении реологических свойств льда при сложном сдвиге, оценке влияния соотношения продольных и поперечных сдвиговых напряжений, определении адгезионной прочности соединения льда с подстилающей горной породой и измерениях физико-механических характеристик ледникового льда. Методические основы такого подхода заложены в исследованиях

пресноводного льда [3–9]. Принципиально новое в данном исследовании – использование акустического диапазона частот вместо сейсмического, что позволяет не только оценивать расстояние до источника излучения, но и получать сведения о механизмах деформаций. Это возможно благодаря соизмеримости длины акустической волны с масштабом процессов разрушения на разных уровнях структурной организации льда.

Можно предложить несколько способов идентификации источника излучения и сигнала АЭ. К наиболее наглядным относится физическое моделирование процессов, происходящих в источнике. В предварительных экспериментах показано, что каждому процессу/источнику соответствуют свои характеристики сигнала: частота, амплитуда, его форма, длительность и последовательность во времени [8]. По ним можно составить атласы сигналов для типичных источников и, пользуясь основными закономерностями распространения упругих волн во льду, оценить расстояние до источника, а также деформацию/трансформацию сигнала при распространении в леднике [9]. С точки зрения практической целесообразности, проще и дешевле дистанционно регистрировать на ледниках сигналы АЭ с помощью относительно простой современной аппаратуры, чем проводить сложные подледниковые экспери-

менты. В перспективе фундаментальное изучение процессов взаимодействия ледникового льда с ложем позволит разработать дистанционный метод оценки локальной устойчивости ледников и прогноз их подвижек.

#### Постановка проблемы и объекты исследований

В процессе исследований по взаимодействию ледникового льда с ложем необходимо было выполнить следующее:

1) оценить влияние термодинамических условий на ложе и его уклоне (соотношение продольной и поперечной сдвиговой компонент напряжений во льду) на реологические характеристики льда, адгезионную прочность соединения льда с подстилающей горной породой и спектры АЭ в состоянии трения покоя и трения скольжения;

2) записать акустические колебания в ледниках от удалённых источников и наметить пути исследования механизмов движения льда на ложе ледников с помощью АЭ;

3) оценить возможность использования выявленных закономерностей для дистанционного контроля кинетики накопления повреждений во льду в зоне контакта с ложем ледника.

Площадки для измерений сигналов АЭ и комплексных измерений на ледниках Центральный Туюксу и Молодежный выбирали с учётом поля поверхностной скорости движения льда (рис. 1). Особенности ледника Центральный Туюксу – крайне редкая сетка поверхностных трещин в области абляции (ниже 3600 м) и явно выраженный поперечный уклон его поверхности, особенно вблизи сужения русла (на верхней площадке измерений). Поэтому лёд в придонных слоях находится под действием продольных и поперечных сдвиговых напряжений, соотношение которых, по-видимому, должно существенно влиять на адгезионную прочность соединения льда с подстилающей горной породой.

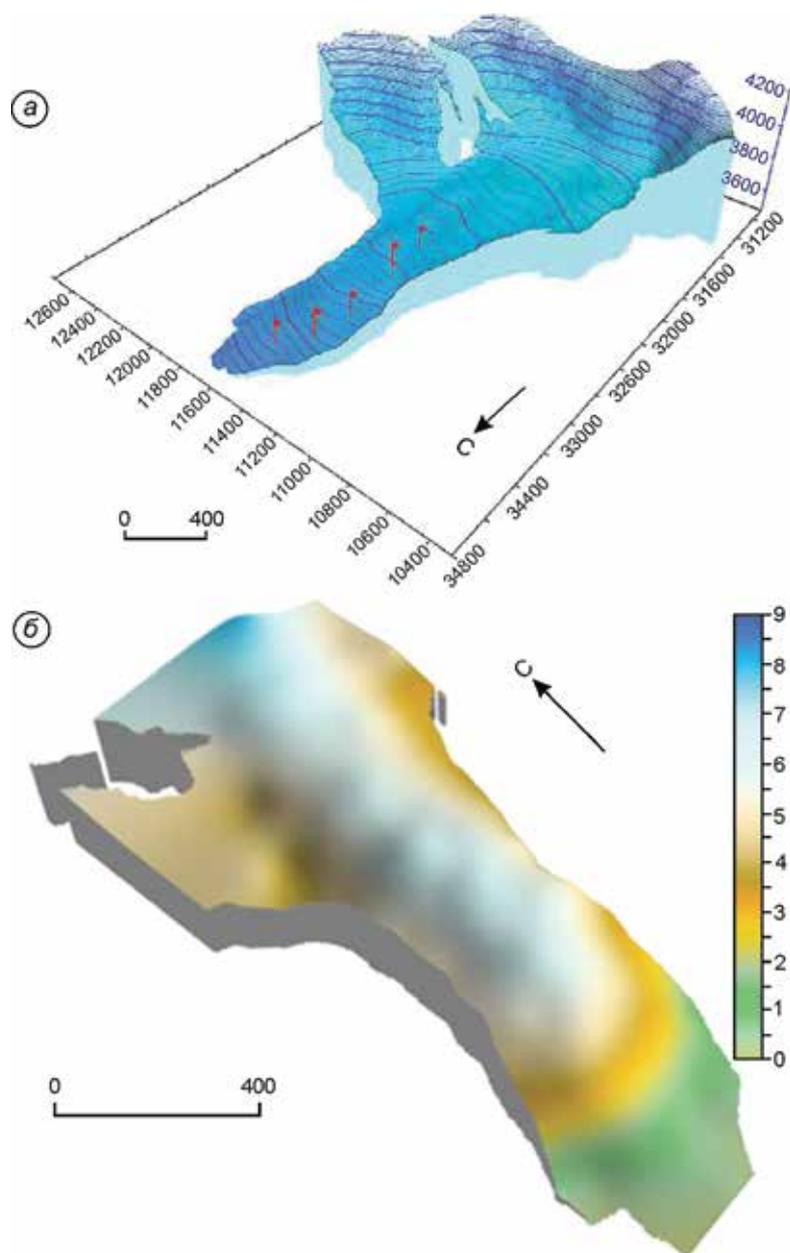
#### Методика экспериментальных исследований

Для количественной оценки совместного влияния сдвиговых компонент напряжений на адгезионную прочность соединения льда с ложем выполнены модельные эксперименты по испытанию льда на осевой и сложный сдвиги в условиях бокового стеснения, имитирующие движение льда по ложу, с записью параметров АЭ.

Устройство для испытаний льда на сдвиг (рис. 2) представляет собой круглый в плане гладкий стержень 1 из серпентинита, коаксиально расположенный в цилиндрической оболочке 2. Снизу на стержень надет концентратор в виде кони-

ческой втулки 3 с углом при вершине около 7°. Сопряжение конической втулки со стержнем выполнено так, чтобы втулка перемещалась вдоль оси стержня с минимальным трением. Торцевая сторона втулки контактирует с оболочкой, при этом в нижней части образуется герметически замкнутая полость. Боковое стеснение создавалось замораживанием воды в зазоре 4 между оболочкой и стержнем. Толщина свода сформировавшейся ледяной корки – не менее 2,5 мм. Для мелкокристаллического льда со средним диаметром кристаллов 0,3 мм и меньше отношение толщины свода к диаметру кристаллов составляет более восьми, что по этому параметру исключает влияние толщины на результат измерений. Разрушение непосредственно по поверхности контакта лёд–серпентинит обеспечивалось с помощью концентратора напряжений [3]. После замораживания воды собранное устройство (стержень с замороженным льдом, оболочкой и концентратором напряжения) помещали на опору 6 плиты испытательной машины таким образом, чтобы стержень, к которому прикладывали осевую силу  $P$ , мог смещаться вдоль своей оси, а втулка при этом оставаться закреплённой на плите, т.е. неподвижной. При испытании регистрировали осевое смещение стержня, осевую силу и характеристики сигналов АЭ. Подобная схема испытания имитировала условия на ложе ледника при отсутствии поперечного уклона. В случае испытаний льда на сложный сдвиг базовую оснастку, которую использовали при испытаниях на осевое нагружение, дополняли приспособлением 5, позволяющим раздельно прикладывать осевую силу  $P$  и крутящий момент пары сил  $P_1P_1$  в плоскости, ортогональной оси образца. В приспособление 5 входили: шаровая опора, захват, подшипник скольжения и направляющая втулка (на схеме не показаны), что позволяет создавать в адгезионном слое контролируемые сдвиговые продольные и поперечные напряжения и соотносить измеренные реологические характеристики пресноводного льда, полученные на лабораторных образцах, с аналогичными характеристиками ледникового льда в условиях залегания.

Измерительная акустическая линия для записи АЭ состояла из акустического пьезопреобразователя типа KD или B10 [8], предусилителя типа CEFC (model № SB1140), акустической платы, ноутбука и соединительных электрических кабелей [1]. При лабораторных исследованиях акустический датчик жёстко крепили к исследуемому образцу; в полевых условиях акустический контакт обеспечивали с помощью ледобура, на котором крепили датчик. Первичную обработку



**Рис. 1.** Топография ледника Туюксу (а) и распределение поверхностных скоростей, м/год (б).  
Координатная шкала на (а) дана в метрах  
**Fig. 1.** Tuoyuksu Glacier topography (а) and surface velocity ( $\text{m a}^{-1}$ ) pattern (б).  
Scale coordinates on (а) are given in meters

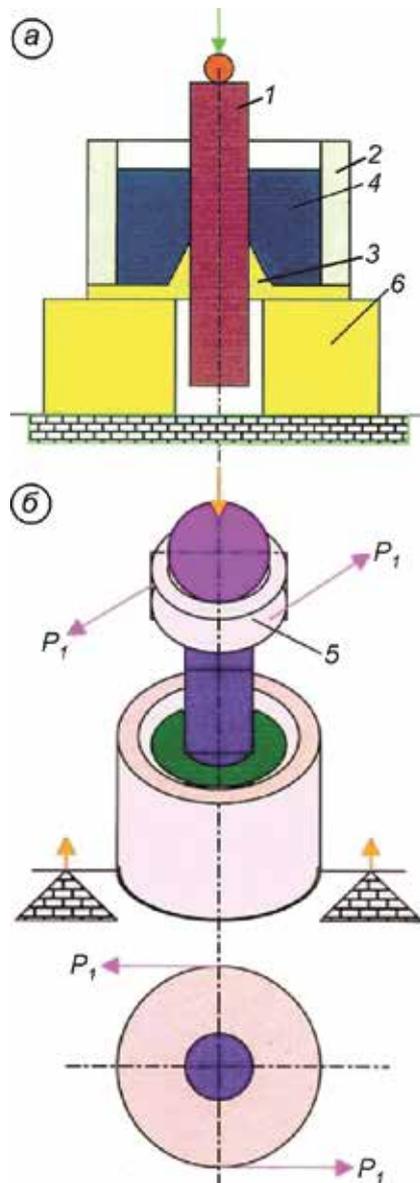
сигналов вели с помощью программы SpectraLab. Подробное описание устройств, схемы измерительной акустической линии, а также методики измерений АЭ даны в работах [8, 9].

#### Результаты измерений

##### *Переход от трения покоя к трению скольжения.*

На рис. 3 приведены деформационные кривые для пресноводного льда при осевом сдвиге в функции времени в условиях бокового стеснения и

характерные диаграммы сигналов АЭ для фиксированных отрезков времени (в системе координат частота–амплитуда–время). В первом приближении этот эксперимент можно рассматривать как физическое моделирование локальной подвижки льда по ложу ледника. Переход от трения покоя к трению скольжения проявляется на кривых зависимости осевой силы от времени (кривая 1) и смещения от времени (кривая 2) в виде экстремальных точек (обозначен стрелкой). Сигналы АЭ



**Рис. 2.** Схема устройства для определения адгезии льда, примороженного к образцу:

*a* – простой сдвиг; *b* – сложный сдвиг; 1 – стержень; 2 – оболочка; 3 – коническая втулка; 4 – лёд; 5 – поворотное приспособление; 6 – опора

**Fig. 2.** Diagram of device for adhesion testing of ice frozen to sample:

*a* – in simple shear; *b* – in complex shear tests; 1 – rod; 2 – shell; 3 – conical sleeve; 4 – ice; 5 – rotary jig; 6 – support

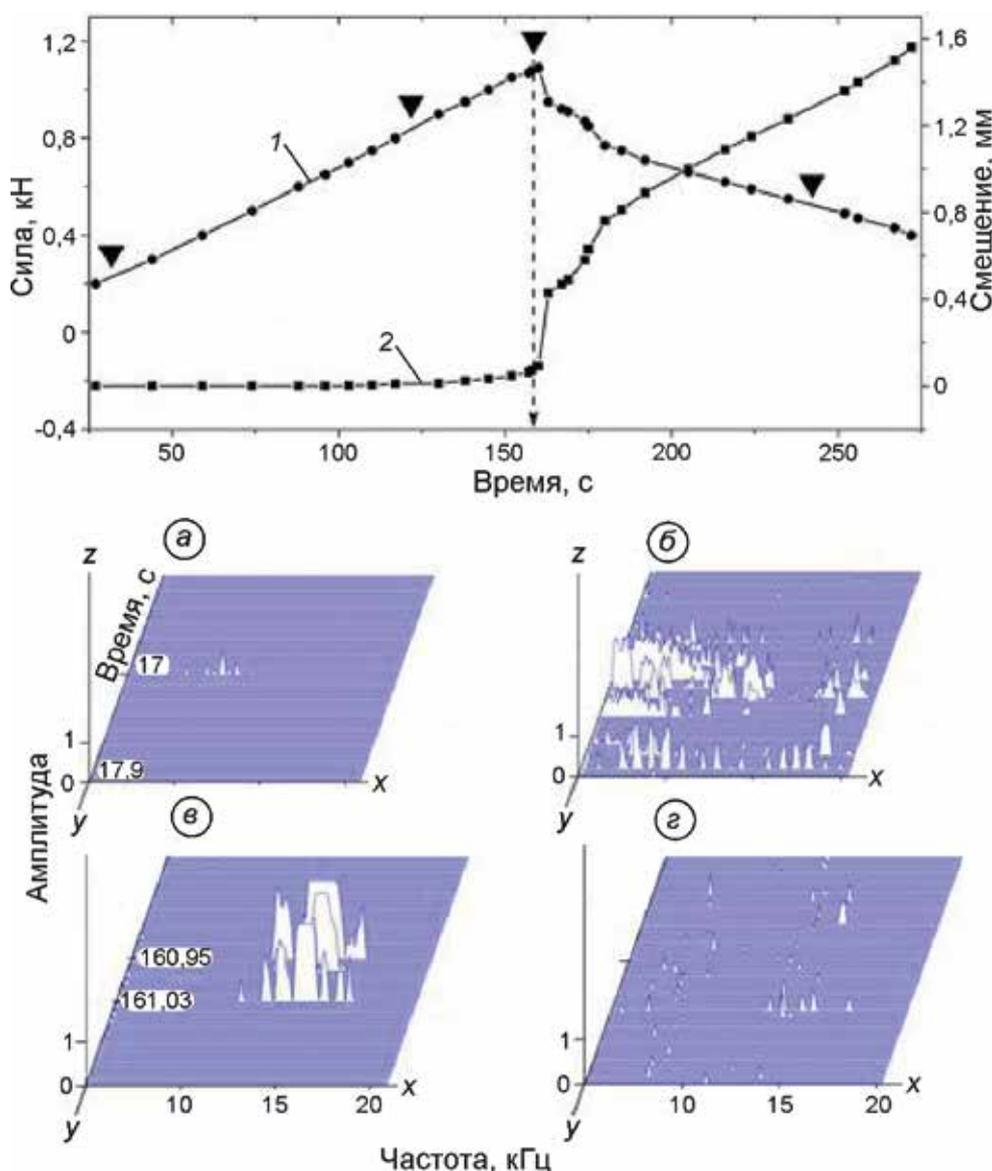
коррелируют с деформационными зависимостями и отражают более тонкую структуру этого перехода – его механизмы. Во-первых, параметры АЭ отражают кинетику накопления дефектов, т.е. процесс «созревания льда», достижения состояния, предшествующего сдвигу; во-вторых – переход от трения покоя к трению скольжения и особенности кинетики трещинообразования на

разных стадиях разрушения адгезионного контакта лёд – подстилающая горная порода.

Отметим, что сигналы АЭ возникают ещё на стадии неподвижного контакта, т.е. локально сплошность нарушается задолго до его разрушения. Сначала амплитуда этих сигналов небольшая (диаграмма *a* на рис. 3), что подтверждает малый размер кинетических единиц (разупрочнение и упрочнение, а также рекристаллизация). С повышением напряжений амплитуда сигналов увеличивается и частотный диапазон излучения расширяется (диаграмма *b*); при этом интенсивность АЭ также резко возрастает. Это показывает, что разрушения происходят на разных уровнях структуры льда – больших и малых и что образующиеся трещины начинают взаимодействовать друг с другом. Слиянию трещин отвечает максимальное выделение упругой энергии (диаграмма *в*). Этот признак служит своеобразным сигналом разрушения адгезионного соединения льда с ложем и перехода от трения покоя к трению скольжения.

Специально поставленные эксперименты [8] позволили установить, что непосредственно вблизи предельных напряжений, при сдвиге на границе адгезионного контакта во льду происходит интенсивный процесс рекристаллизации. Это согласуется с предположением, что *локальные разрушения льда накапливаются преимущественно в тонком слое, на границе раздела льда с подстилающей породой (на ложе)*. Скольжение льда по серпентиниту (диаграмма *г* на рис. 3) происходит при существенно меньших напряжениях сдвига, что обусловлено переходом от трения покоя к трению скольжения. Тонкая структура восходящей ветви кривой 2 (см. рис. 3) указывает на пульсирующий характер скольжения, что подтверждается сигналами АЭ (диаграмма *г*). Наблюдаемые закономерности изменения акустических характеристик, безусловно, полезны для методологии обнаружения и исследования процессов трещинообразования в ледниках.

**Влияние поперечных сдвиговых напряжений на адгезионную прочность.** На рис. 4 показаны деформационные зависимости адгезионной прочности соединения льда и серпентинита. Кривая 1 получена при испытаниях на осевой («чистый») сдвиг, кривая 2 – на сложный сдвиг, когда приложен вращающий момент 0,25 Н·м. Отметим, что вначале углы наклона кривых совпадают (эффективные модули льда одинаковые), но перед разрушением на кривой 2 появляется площадка текучести, причём это достигается при вдвое меньших напряжениях, чем при чистом сдвиге. Таким образом, приложение даже небольшого вращающего



**Рис. 3.** Зависимости силы трения и смещения от времени при испытании на одноосный сдвиг и частотно-амплитудные характеристики сигналов акустической эмиссии, соответствующие времени испытания при температуре  $-5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

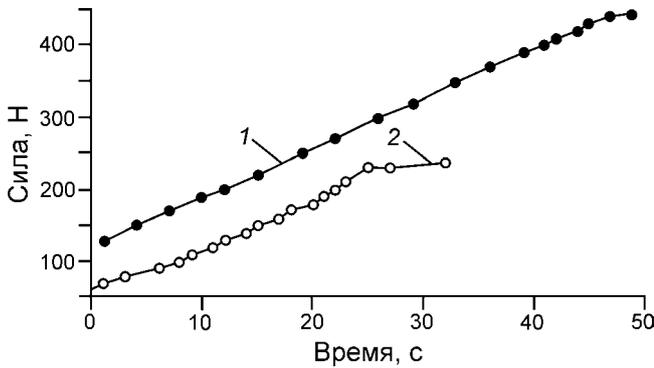
*a* – 30,5 с; *б* – (139–140) с; *в* – 161,5 с; *г* – 230–231 с

**Fig. 3.** Relation of friction force and displacement with time at single axis shear tests and frequency-amplitude characteristics of AE signals corresponding to different test times at  $-5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

*a* – 30.5 s; *б* – 139–140 s; *в* – 161.5 s; *г* – 230–231 s

момента (0,25 Н·м), создающего поперечные сдвиговые напряжения  $\sigma_{st} = 92\text{ Па}$  (при максимальных продольных сдвиговых напряжениях  $\sigma_{st} = 470\text{ Па}$ ), в 2 раза уменьшает предельно допустимую адгезионную прочность соединения льда с серпентинитом. Полученный результат – ключевой не только в расчётах реологических характеристик придонных слоёв ледникового льда, но и для решения ряда практических задач [12]. Отметим также, что при сложном нагружении предел текучести для льда одной и той же структуры меньше, чем

при одноосном сдвиге (площадка текучести на кривой 2). Этот эффект, по-видимому, можно объяснить многими причинами, например возможностью скольжения не только по базисным, но и по другим плоскостям кристаллической решётки; вероятна активизация и других механизмов скольжения. Чтобы выяснить это, необходимы дополнительные исследования и специально поставленные эксперименты. Выполненный эксперимент однозначно показывает зависимость адгезионной прочности от соотношения попе-

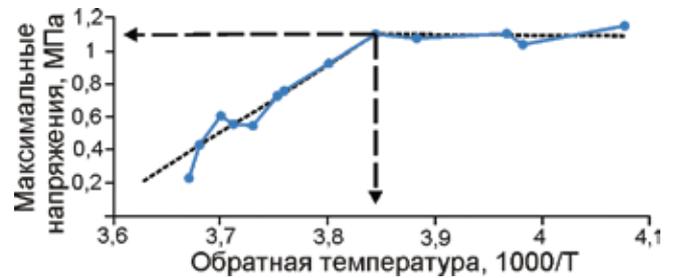


**Рис. 4.** Зависимости силы сдвига от времени испытания при осевом сдвиге (кривая 1) и сложном сдвиге (кривая 2)  
**Fig. 4.** Shear strength with time tests under axial shear (curve 1) and complex shear (curve 2)

речных и продольных сдвиговых напряжений на контакте, что позволяет объяснить влияние бокового уклона ложа на реологические характеристики ледникового льда.

**Зависимость адгезионной прочности соединения льда с серпентинитом от температуры.** На рис. 5 показана зависимость адгезионной прочности соединения пресноводного льда с серпентинитом от температуры. На экспериментальной кривой выделены два отрезка, соответствующие двум механизмам деформаций льда: справа – область хрупкого разрушения (прочность соединения практически не зависит от температуры); слева – область вязкого разрушения льда с сильной зависимостью адгезионной прочности от температуры. Точка смены механизмов деформаций имеет координаты 1,2 МПа и  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отметим, что зависимость получена при скорости приложения осевой силы  $\sim 10^{-3}\text{ с}^{-1}$ . С возрастанием скорости деформации точка перегиба смещается по шкале температур влево (в область более высоких температур), что соответствует принципу температурно-временной суперпозиции [7].

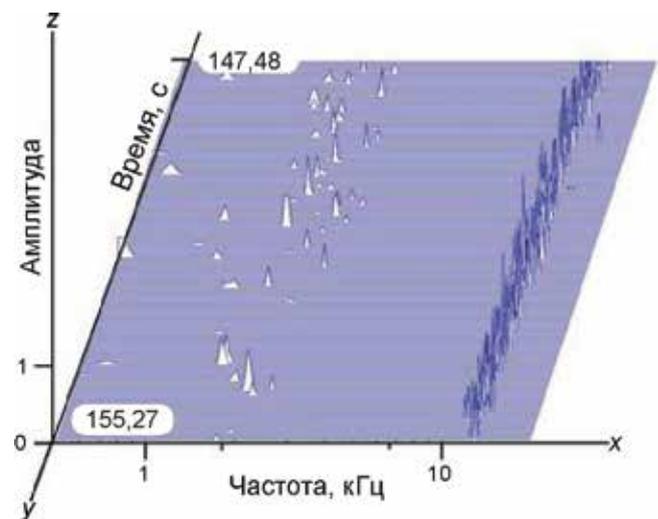
Модельные расчёты показали, что, действительно, в условиях эксперимента при напряжении 1,2 МПа и температуре  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$  возможно плавление льда на пятнах адгезионного контакта (а при сдвиге льда по ложу – образование плёнки талой воды в местах контакта). Анализ зависимости адгезионной прочности от температуры показал, что в летний период при малых скоростях движения поверхностного льда (менее 6 м/год) образование поверхностных трещин маловероятно, что подтверждают наблюдения на леднике Центральный Туюксу (ниже 3600 м) [10, 11]. Таким образом, при выполнении расчётов для коэффициентов трения или определении момента перехода от



**Рис. 5.** Зависимость адгезионной прочности соединения пресноводного льда с серпентинитом от температуры  
**Fig. 5.** Relation of adhesive bond strength of freshwater ice and serpentinite with temperature

трения покоя к трению скольжения необходимо учитывать не только компоненты сдвиговых напряжений, но и зависимость адгезионной прочности соединения льда с подстилающей горной породой от температуры.

**Собственные акустические колебания в ледниках.** Собственные акустические колебания в леднике Центральный Туюксу показаны на трёхмерной диаграмме время–амплитуда–частота (рис. 6). Сигналы отличаются не только по частоте, но и по форме, амплитуде, длительности и времени наблюдения. Условно можно выделить три группы сигналов в следующих диапазонах: 1) около 12 кГц; 2) от 2 до 3 кГц (центральная дорожка); 3) 100–800 Гц. Для определения источника их излучения использовали комплексный подход, т.е. весь арсенал данных по движению льда в ледниках (от классических решений задачи



**Рис. 6.** Диаграмма собственных акустических колебаний в леднике Туюксу  
**Fig. 6.** Recording of natural acoustic vibrations in Tuyuksu Glacier

распространения упругих волн в сложных средах до эвристических решений).

Так, измерение скорости движения поверхностного льда ледника показывает, что на выбранных площадках этот параметр не превышает 6–7 м/год. Экспозиция ледника исключает значительные суточные термические напряжения в поверхностном слое льда, как это наблюдается, например, на леднике Альдегонда (Шпицберген) [9]. Поэтому источников излучения акустических волн в поверхностном слое не должно быть, что подтверждается отсутствием высокочастотных сигналов на диаграмме даже при коэффициенте усиления измерительной линии 79 дБ. Дорожка из высокочастотных сигналов около 12 кГц – резонансные колебания акустического датчика, возбуждаемые всеми имеющимися источниками нарушения сплошности льда в леднике. Из-за малой амплитуды при заданном коэффициенте усиления сигналы второй и третьей групп частотного диапазона (от 2 до 3 кГц и 100–800 Гц) можно уверенно отнести к удалённым от приёмника источникам излучения [2].

В качестве примера искусственно созданного источника на рис. 7 приводится сигнал АЭ от удара жёстким индентором по льду. Удар выполнен на расстоянии первых метров от приёмника акустических колебаний. Аналогичные тесты (физическое моделирование) выполнены для разных источников сигналов АЭ, например, при образовании трещины в толще ледника и на ложе. По ним идентифицировали акустический импульс с его источником. Имитация источников излучения сигналов АЭ на разном удалении от акустического приёмника позволила наблюдать деформацию его видеобраза в зависимости от удалённости от приёмника, а также от степени трещиноватости льда, его толщины и других характеристик. Так, по мере удаления от приёмника в спектре удара (см. рис. 7) при фиксированном коэффициенте усиления амплитуда высокочастотных составляющих компонент спектра излучения сначала уменьшалась, а затем сигнал вообще пропадал из-за их большого поглощения. Амплитуды сигналов на средних и низких частотах при этом изменялись меньше.

Продолжительные исследования собственных сигналов АЭ позволили выявить на леднике Центральный Туюксу периодически повторяющееся смещение частоты заполнения сигналов АЭ в диапазоне частот от 1 до 2,5 кГц (рис. 8). Характерное время изменения частоты источника – 0,05–0,06 с. Этот эффект коррелирует со смещением сигналов АЭ в сторону низкочастотного диапазона при испытании образцов

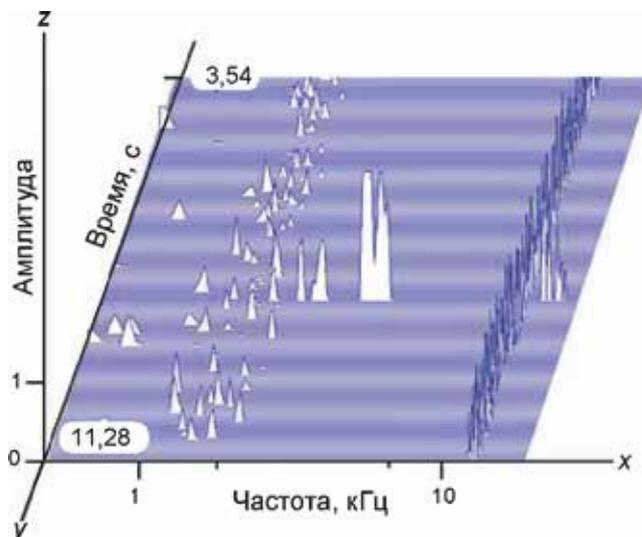


Рис. 7. Диаграмма удара по льду на фоне собственных колебаний ледника

Fig. 7. Record of impact with ice against the natural oscillations of the glacier

пресноводного льда на сжатие и обусловлен расширением зоны повреждения во льду [4].

#### Обсуждение результатов

Исследованы адгезионная прочность на сдвиг соединения льда с подстилающей горной породой (серпентинит) на разных стадиях его разрушения в зависимости от температуры, а также соотношения продольных и поперечных сдвиговых напряжений. Кинетику разрушения соединения/контакта контролировали по сигналам АЭ в рабочем диапазоне частот, соответствующем образованию трещин. Масштаб кинетических элементов, вовлечённых в процесс разрушения, а также механические и прочностные свойства льда отражаются в сигналах АЭ – их частоте, амплитуде, длительности и интенсивности. Подобные процессы, по-видимому, происходят при разрушениях адгезионного контакта ледникового льда с ложем. Это подтверждается тем, что выявленные в модельных образцах закономерности изменения параметров сигналов АЭ обнаружены также и в сигналах АЭ от удалённых источников на ледниках Центральный Туюксу и Молодежный. Акустические колебания от разных источников создают в леднике диффузное акустическое поле, из которого выделяют полезный сигнал. Расшифровка сигналов АЭ основывается на физическом моделировании процессов и законах распространения акустических волн в леднике. Основные параметры: частота  $f$ ; амплитуда  $A$ ; длительность импульса  $\Delta t$ ; коэффициент

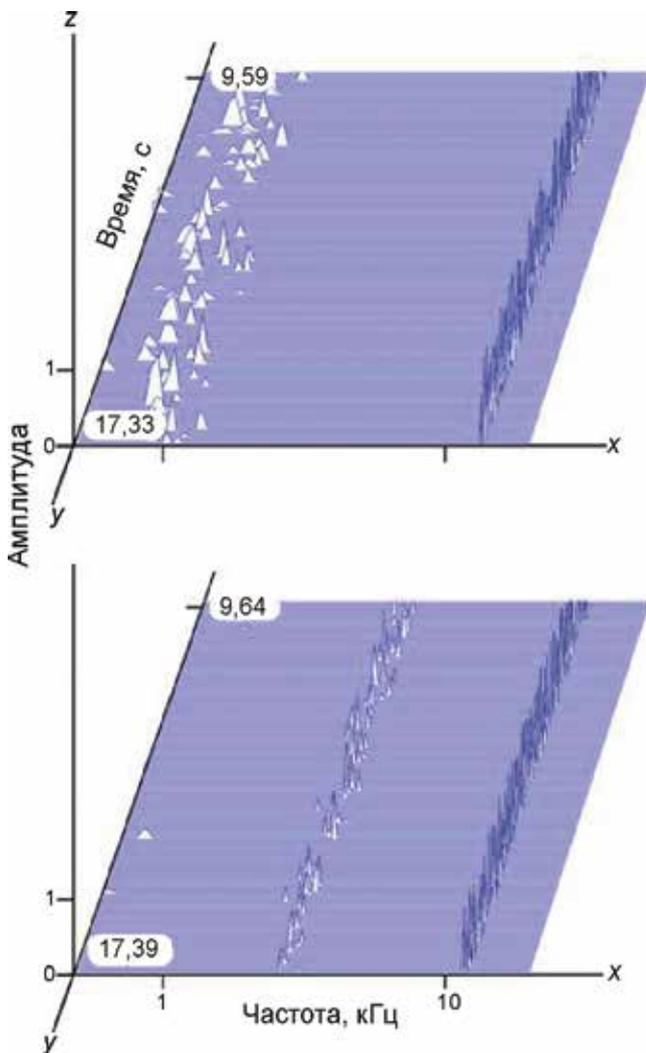


Рис. 8. Смещение частоты заполнения сигналов акустической эмиссии

Fig. 8. Offset of carrier frequency of the AE signals

ослабления  $\alpha$ ; скорость распространения  $V_{p,s}$  ( $p$  – продольная,  $s$  – сдвиговая волна).

Так, для частот 0,1 и 20 кГц рассчитанные длины продольных волн соответственно равны  $\lambda_1 = 35$  м и  $\lambda_{15,5} = 0,18$  м. Длина волн существенно больше максимальных размеров кристаллов льда  $D = 2 \div 3$  мм. В масштабе длины звуковой волны поверхностный слой ледникового льда на площадках измерений может рассматриваться акустически однородной средой для всего рабочего диапазона частот. Достоверность оценочных расчётов в придонных слоях ледников можно повысить путём учёта закономерностей, полученных при физическом моделировании и механических испытаниях лабораторных образцов и больших объёмов льда на ледниках. Так, согласно модели гармонического осциллятора, частота излучения

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (1)$$

определяется его жёсткостью  $D$  и массой  $m$ . Решая уравнение (1) относительно  $m$  и подставляя значения частот сигналов АЭ (от 2,5 до 1 кГц), для  $D = \text{const}$  получаем, что эффект смещения обусловлен увеличением массы источника более чем в 6 раз. Такой рост массы вполне реален. На небольших образцах подобное увеличение массы разрушения подтверждается визуальными наблюдениями.

Сигналы АЭ от удалённых источников (второй и третьей группы в низкочастотной части спектра – см. рис. 4–6) в рамках модели (1) и с учётом механики распространения упругих волн в сплошной среде можно рассматривать как спонтанное трещинообразование при концентраторах разного масштаба и разной удалённости от приёмника. Такое предположение вполне реально и не противоречит сложному рельефу ложа ледника, что следует из измерений толщины льда (бурение) и расчётов по данным геофизических методов. Так, согласно данным бурения, толщина льда вблизи точек акустических измерений (зона сужения) определена в интервале 78–118 м. Расчётные значения толщины льда в той же части области абляции изменяются в интервале 40–102 м [10, 11].

**Смена механизмов деформирования.** Напряжение, необходимое для плавления льда при температуре  $-13^\circ\text{C}$  ( $T = 258,15$  К) с учётом теплоты его плавления  $L = 64,79$  ккал/кг, гомологической температуры  $Tm$  и плотности  $\rho = 910$  кг/м<sup>3</sup>, согласно известному термодинамическому соотношению [13], составляет:

$$\sigma = 0,427 L \rho \ln(Tm/T) = 1,2 \text{ МПа.}$$

Рассчитанное значение напряжения плавления льда не противоречит полученному в эксперименте (точка перегиба на кривой рис. 3).

### Заключение

Исследованы собственные акустические колебания на ледниках Северного Тянь-Шаня: Центральном Туяксу и Молодежном в диапазоне частот от 15 Гц до 20 кГц. Параллельно выполнено физическое моделирование адгезионного взаимодействия ледника с ложем, определены прочностные характеристики льда на контакте, а также измерены скорости движения поверхностных слоёв льда. Решён ряд методических и гляциологических задач.

1. Разработан комплексный метод определения адгезионной прочности соединения льда с подложкой при сдвиге в условиях бокового стес-

нения и кинетики разрушения адгезионного контакта, основанный на амплитудно-частотном анализе сигналов акустической эмиссии в рабочем диапазоне частот от 15 Гц до 20 кГц.

2. С помощью этого метода получена экспериментальная зависимость параметров акустической эмиссии (частота, амплитуда, длительность импульсов и их последовательность во времени) как в области трения покоя, так и при скольжении. Показано, что акустические импульсы, возникающие при разрушении адгезионного контакта лёд–серпентинит, отражают кинетику накопления повреждений в нём. Трещинообразование начинается намного раньше достижения предельных напряжений сдвига и характеризуется большой частотой сигнала АЭ и малой его амплитудой. При увеличении сдвиговых напряжений амплитуда сигналов АЭ возрастает и достигает максимальных значений в момент разрушения адгезионного контакта, в то время как частота сигнала уменьшается. Скольжение льда по подложке сопровождается сигналами АЭ меньшей амплитуды и частоты. Экспериментально установленный эффект уменьшения (смещения по шкале времени) частоты с ростом масштаба разрушения подтверждён теоретической моделью гармонического осциллятора. Эффект увеличения амплитуды сигнала АЭ с ростом масштаба разрушения известен, но количественная его характеристика в наших экспериментах уточнена/выполнена с учётом амплитуды, длительности импульса и его частоты, т.е. в лучшем приближении.

3. Определена зависимость адгезионной прочности соединения льда с серпентинитом (подстилающей горной породой) в интервале температур от 0 до  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и скорости  $\sim 10^{-3}\text{c}^{-1}$ . Выделены две области температур, при которых реализуются преимущественно хрупкое и вязкое разрушения с точкой перехода вблизи  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Показано, что от точки плавления до точки смены механизмов разрушения адгезионная прочность льда на сдвиг увеличивается с уменьшением температуры, а после точки перехода, при более низких температурах, она уже не зависит от температуры, т.е. постоянна в пределах точности эксперимента. Независимость адгезионной прочности льда от температуры при хрупком разрушении обусловлена потерей способности зародившейся трещины к «залечиванию». Смена механизмов деформации на адгезионном контакте, как подтверждает термодинамическая модель, обусловлена плавлением льда на пятнах контакта.

4. Установлено влияние соотношения сдвиговых продольных  $\sigma_{sl}$  и поперечных  $\sigma_s$  напряжений

на механизм разрушения адгезионного соединения льда с подстилающей горной породой (серпентинит). Так, при  $\sigma_{sl}/\sigma_s = 2 \cdot 10^{-3}$  адгезионная прочность соединения льда с подложкой уменьшается в 2 раза. Фактически показано, что при малых поперечных уклонах ложа следует ожидать существенное уменьшение адгезионной прочности. Этот экспериментальный эффект проясняет особенность реологических свойств ледникового льда при его движении по ложу с боковым уклоном. Эффект может быть использован в практических приложениях, например при разрушении ледяной корки или примёрзшего к металлической конструкции льда или снега [12].

5. Периодическое смещение частоты заполнения сигналов АЭ в диапазоне частот от 2,5 до 1 кГц от удалённого источника обнаружено в полевых исследованиях на ледниках Центральный Туюксу и Молодежный, что подтверждает результат физического моделирования адгезионного взаимодействия ледника с ложем. Аналогичное смещение сигналов АЭ по оси частот в сторону низкочастотного диапазона получено при испытании образцов пресноводного льда и обусловлено расширением масштаба разрушения [4].

Результаты комплексных исследований адгезионной прочности соединения пресноводного льда с подстилающей горной породой (серпентинит) и выявленные акустические эффекты, характеризующие кинетику трещинообразования на контакте лёд – горная порода, а также влияние соотношения продольных и поперечных сдвиговых напряжений на этом контакте можно использовать для дальнейшего изучения взаимодействия ледников с ложем. К ближайшим перспективным задачам, которые могут быть решены с помощью разработанного комплексного подхода, базирующегося на методе акустической эмиссии, – дальнейшее физическое моделирование процессов взаимодействия ледникового льда с ложем, например исследование влияния неровностей на ложе на движение ледника. Основываясь на выявленных закономерностях изменения параметров АЭ, можно определять момент «созревания» льда, который предшествует потере локальной устойчивости и подвижке, и создавать дистанционные акустические системы мониторинга локальных процессов в придонных слоях ледника.

**Благодарности.** Авторы признательны сотрудникам Института географии Казахстана: Игорю Васильевичу Северскому, Николаю Евгеньевичу Касаткину, Юрию Александровичу Реброву за помощь в проведении полевых измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 10-05-01146\_a, 11-05-00863\_a.

### Литература

1. А.с. 1608600. Способ прогнозирования лавинной опасности / Епифанов В.П., Кузьменко В.П. Приоритет изобретения от 16 мая 1988 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 22 июля 1990 г. Бюл. № 43 от 23.11.90.
2. *Виноградов С.Д.* Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений. М.: Наука, 1989. 178 с.
3. *Гольдштейн Р.В., Епифанов В.П.* К измерению адгезии льда к другим материалам // Вестн. Пермского гос. техн. ун-та. 2011. № 2. С. 28–41.
4. *Епифанов В.П.* Разрушение поликристаллического льда // ДАН. 1982. Т. 267. № 6. С. 1364–1367.
5. *Епифанов В.П.* Разрушение льда при ударных взаимодействиях // ДАН. 1985. Т. 284. № 3. С. 599–603.
6. *Епифанов В.П.* Разрушение льда при контактных взаимодействиях // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1986. № 6. С. 177–185.
7. *Епифанов В.П.* Применение принципа температурно-временной аналогии к проблемам разрушения льда и снега // МГИ. 1990. Вып. 68. С. 9–12.
8. *Епифанов В.П., Глазовский А.Ф.* Акустические характеристики как индикатор особенностей движения льда в ледниках // Криосфера Земли. 2011. Т. XIV. № 4. С. 42–55.
9. *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.
10. *Макаревич К.Г., Пальгов Н.Н., Тогмагамбетов Г.А., Вилесов Е.Н., Судаков П.А., Головков Р.Г., Денисова Т.Я., Егорова Н.Д.* Оледенение Заилийского Алатау. М.: Наука. 1969. 288 с.
11. *Макаревич К.Г., Вилесов Е.Н., Головкова Р.Г., Денисова Т.Я., Шабанов П.Ф.* Ледники Туюксу (Северный Тянь-Шань). Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 172 с.
12. Патент 2460188. Способ удаления снега и/или льда с проводов линий электропередач и устройство для его осуществления / Гольдштейн Р.В., Епифанов В.П. Приоритет изобретения от 15 июля 2011 г. Зарегистри-

ровано в Государственном реестре изобретений СССР 27 августа 2012 г.

13. *Пехович А.И.* Основы гидроледотермики. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 200 с.
14. *Van der Veen C.J.* Fundamentals of Glacier Dynamics. Rotterdam/Brookfield: A. A. Balkema, 1999. 462 p.
15. *Schulson E.M., Duval P.* Creep and fracture of ice. New York: Cambridge University Press, 2009. 402 p.

### Summary

Studies of the adhesive strength of glacial ice connection with bedrock has been studied using the analysis of the amplitude-frequency characteristics of acoustic emission (AE) in the frequency range from 15 Hz to 20,000 Hz. Identification of signal source on bed is based on physical modeling of adhesive ice fracture at the complex shear and patterns of elastic waves propagation in the ice using data on ice thickness of the ice and its acoustic properties. The experimental dependence of the ice and serpentinite substrate adhesive strength with temperature (from 0 °C to –30 °C) has been obtained at constraint axial shear. It is shown that the destruction of adhesive ice contact with substrate begins long before the maximum shear stress achieved, and AE signals in the coordinates amplitude-frequency-time have been obtained for the for static friction and sliding parts of deformation curves. Influence of shear to normal stresses ratio on the adhesive ice/substrate strength has been shown. Influence of the ratio of longitudinal and transverse shear stresses on the adhesive bond strength of ice to the substrate has been shown. The natural glacier spectra revealed periodic reduction of AE signals frequency in the middle range of frequencies. The similar effect of AE signals shifting along the frequency axis to the low frequency domain was obtained by testing of freshwater ice samples and related with expansion of the destruction scale. Practical application of the strain AE results for remote determination of the local glacial stability and for studies of glacier ice mechanics is discussed.