

Исследования ледников на основе акустических измерений

© 2013 г. В.П. Елифанов¹, А.Ф. Глазовский²

¹Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

²Институт географии РАН, Москва

evp@ipmnet.ru

Статья принята к печати 22 апреля 2013 г.

Акустическая эмиссия, ледник, неустойчивость, реология льда, условия на ложе, физическое моделирование.
Acoustic emission, bedrock conditions, glacier, instability, physical modeling, rheology of ice.

Рассмотрены возможности исследования движения льда в леднике и его анализа с помощью метода акустической эмиссии в диапазоне частот 15–20 кГц. Создана портативная измерительная акустическая линия и решён ряд методических вопросов. Выполнены акустические исследования ледникового льда, имитированы камнепад, трещинообразование в леднике и его движение по ложу. Установлены соответствия параметров акустической эмиссии определённому источнику. Обобщены результаты акустических исследований на ледниках Альдегонда (Шпицберген), Центральный Тууксу и Молодёжный (Северный Тянь-Шань). Рассмотрена зависимость адгезионной прочности соединения льда с гладкой подложкой (серпентинит) от скорости сдвига, оценено влияние препятствия в виде тора на силу сдвига. В собственных акустических спектрах исследованных ледников обнаружены акустические эффекты, характерные для разрушения льда на препятствиях. Полученные результаты можно использовать для создания мобильной ледниковой лаборатории и системы дистанционного акустического мониторинга процессов в придонных слоях ледника.

Введение

При движении льда на ложе ледника и в его толще, и на поверхности нарушается сплошность. Эти нарушения сопровождаются излучением упругих волн, т.е. сигналами акустической эмиссии. Параметры таких сигналов физически связаны с их источником, поэтому они могут служить ценным источником информации о кинетике образования трещин и механизмах движения в ледяной толще и на ложе [4, 5]. Однако ледниковый лёд – неоднородная среда, содержащая пузырьки воздуха, фильтрационные каналы и трещины. Она служит фильтром высокочастотных гармоник для сигналов акустической эмиссии. Наиболее «благоприятен» для решения гляциологических задач, связанных с пластичностью льда, вариант, когда диаметр включений \bar{D} меньше длины λ акустической волны. При $\bar{D} \ll \lambda$ ледниковый лёд можно рассматривать как акустически однородную сплошную среду с нелинейной зависимостью коэффициента ослабления α от частоты f , $\alpha \sim f^2$. Более информативны для исследования механизмов движения льда в леднике частоты, при которых $\bar{D} \approx \lambda$, напротив, менее информативны частоты сейсмического диапазона, когда $\bar{D} \ll \lambda$.

Настоящая работа продолжает исследования, касающиеся изучения акустических свойств лед-

никового льда как волновода-фильтра [6], а также физического моделирования адгезионно-когезионного разрушения придонного льда [7]. Обобщение новых экспериментальных данных и ранее полученных результатов позволяет наметить круг первоочередных задач по применению акустических методов для исследования взаимодействия ледников с коренным ложем.

Основные положения и постановка проблемы

Проходя через лёд, звуковая волна вызывает упругое смещение каждой частицы льда относительно её равновесного положения, поэтому акустические методы чрезвычайно чувствительны к структуре льда. Если частицы смещаются вдоль волнового вектора \vec{K} , то волна определяется как продольная p , если поперёк – то как сдвиговая s . К основным параметрам звуковой волны относятся скорость V (м/с), длина λ (м) и частота f (1/с). Они связаны следующим основным акустическим соотношением:

$$V_{p,s} = \lambda f. \quad (1)$$

Измерения скорости звука позволяют рассчитать динамический модуль льда $E_d = \rho V_{p,s}^2$, где ρ – плотность. Методика измерений основана на положениях физики «бесконечно малых амплитуд», когда энергия акустической волны мала и не

вызывает необратимых изменений в структуре льда. Диссипация упругой энергии характеризуется коэффициентом ослабления звука

$$\alpha = 20 \lg(A/A_0)/(8,68\Delta L), \quad (2)$$

где A и A_0 – соответственно амплитуды на удалении L от источника звука и на источнике; ΔL – длина акустического пути.

Уравнение (2) представляет собой результат решения зависимости амплитуды волны от длины акустического пути, записанный в виде $A = A_0 e^{-\alpha L}$. В акустике звуковое давление измеряется в децибелах; 1 дБ – уровень, при котором выполняется соотношение $20 \lg(p/p_0) = 1$. Обычно за пороговый уровень отсчёта принимается давление $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па. Коэффициент ослабления включает в себя поглощение звука на молекулярном уровне и потери вследствие геометрического расхождения звукового луча. В физике бесконечно малых амплитуд ($\alpha\lambda \ll \pi$) в рамках классической теории выражение для коэффициента поглощения α в случае продольной волны имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{4\pi^2 f^2}{2\rho V^3} \left[\frac{4}{3} \eta' + \eta'' + \chi \left(\frac{1}{C_V} - \frac{1}{C_P} \right) \right], \quad (3)$$

где η' , η'' – соответственно сдвиговая и объёмная вязкость; C_V , C_P – соответственно теплоёмкости при постоянном объёме и давлении; χ – коэффициент теплопроводности.

Из уравнения (3) следует, что акустические характеристики связаны не только с упругими и вязкими характеристиками кристаллической решётки льда, но и с его теплоёмкостью. Акустические измерения позволяют также определять плотность дислокаций и длину петли во льду как функцию его термодинамического состояния [10] и выделять стадии пластичности на деформационных кривых льда и гранита [3].

Собственные акустические колебания в ледниках возникают при нарушениях сплошности льда. Эти колебания исследуют в разных диапазонах частот. Сейсмический диапазон лежит в пределах 100–300 Гц и в основном используется для локации источников [12]. Акустический диапазон охватывает гораздо более высокую область частот – до 20 кГц. Акустические измерения позволяют определить не только расстояние до источника колебаний, но и механизмы, их вызывающие [11]. С этой целью в реальном масштабе времени регистрируют амплитуду каждого сигнала

и определяют его спектральный состав. Расшифровка сигналов акустической эмиссии основана на физическом моделировании источников и закономерностях распространения упругих волн в ледниковом льде, прежде всего в поверхностном абляционном слое, наиболее доступном для размещения акустических приёмников.

Задача данной работы – рассмотреть возможность изучения взаимодействия ледника с ложем с помощью метода акустической эмиссии в диапазоне частот от 15 до 20 кГц для случая сухого трения. Чтобы наметить подход к решению этой задачи, необходимо решить ряд частных задач:

1) используя приёмы физического моделирования, оценить влияние скорости сдвига на адгезионную прочность соединения льда с гладкой подложкой (серпентинит) и влияние препятствия на подложке в виде тора на силу сдвига;

2) выявить различия параметров сигналов акустической эмиссии для адгезионного и когезионного разрушения льда при сдвиге в условиях стеснения;

3) сравнить акустические эффекты, наблюдаемые при моделировании (когезионном разрушении льда на препятствиях), с собственными акустическими колебаниями в ледниках от удалённых источников;

4) проанализировать и обобщить полученные результаты акустических исследований спектров акустической эмиссии от удалённых источников в ледниках Альдегонда [1, 6] и Центральный Туяксу [8, 9], а в качестве тестовых измерений использовать имитацию движения по ложу, трещинообразования в леднике и камнепада;

5) сопоставить результаты лабораторных и полевых измерений и определить первоочередные задачи для дальнейших исследований.

Аппаратура, подходы и методика исследований

Для акустических исследований на ледниках нами разработана измерительная акустическая линия (рис. 1, а), в полевой вариант которой входят (см. рис. 1, в): ледобур 1 с закреплённым на нём акустическим датчиком 2; предварительный усилитель 3; акустическая плата 4, размещённая в ноутбуке 5; программа SPECTRLAB 6 и высокочастотный кабель. Все элементы измерительной акустической линии достаточно удобны и надёжны. Их проверка не вызывает особых трудностей. Для крепления ледобура (см. рис. 1, б) выбирают достаточно сухую площадку без близко расположенных трещин. Затем ледобур вворачивают в лёд и изолируют от воздействия солнечных лучей и

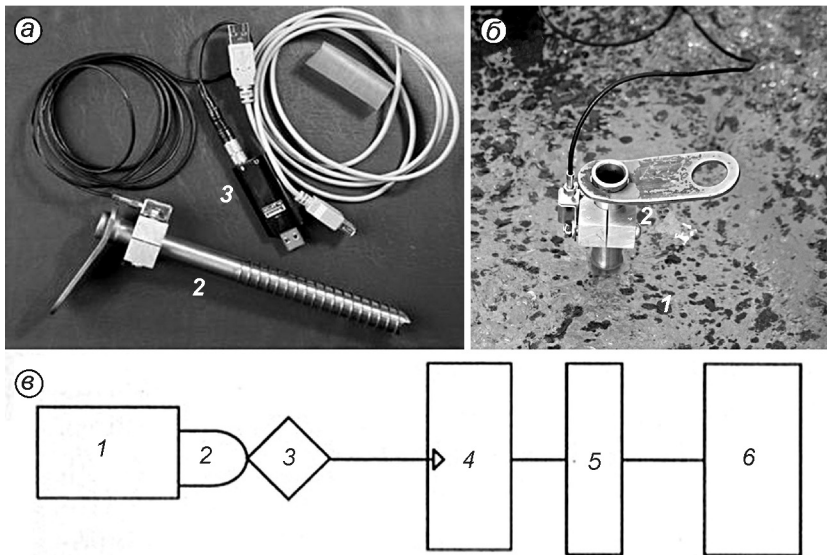


Рис. 1. Измерительная акустическая линия: *a* – элементы акустической линии; *b* – крепление пьезоэлектрического датчика/приёмника ко льду (ледобур ввёрнут в лёд); *в* – блок-схема (пояснения см. в тексте)

Fig. 1. Acoustic measurement set: *a* is set elements; *b* is mounted piezoelectric sensor screwed into the ice; *c* is a block diagram (explanations see in text)

потоков воздуха. С помощью разъёма устанавливают контакт акустического датчика с измерительной линией. В зависимости от задачи исследования выбирают коэффициент усиления и режим записи сигналов акустической эмиссии на компьютере с помощью программы SPECTRLAB. Запись может продолжаться от нескольких минут до нескольких часов. В результате получают спектрограмму, по осям которой обозначены частота X , амплитуда Z и время Y .

Для записи сигналов акустической эмиссии использовали датчики типа KD 91 и KB 10 (VeB Metra Mess- und Frequenztechnik Radebeul im VE Kombinat-Pracitronik), а также предусилитель типа SOUND CEFC model № S81140. Функциональный контроль измерительной акустической линии осуществляли в полевых условиях. Координаты точки измерений фиксировали с помощью GPS-мар-приёмника типа 60Сх. Линейные размеры определяли с помощью ленты 7,5 м с ценой наименьшего деления 1 мм. Температуру измеряли термометром типа RST с ценой деления 0,1 °С. Для питания аппаратуры (220 В) использовали генератор Honda EU 10i.

Перед началом и после окончания полевых работ выполняли калибровку измерительной акустической линии с помощью пистонфона в лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций Института проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН (Москва). На ледниках для тестовых измерений применяли ударное возбуждение упругих волн с помощью жёсткого индентора-пробника с фиксированными энергией и длиной акустического пути между

полосом индентора и приёмником на очищенных площадках ледника.

Кроме того, при исследованиях использовали и другие методы: резонансный – для определения скорости распространения упругих волн; импульсный – для нахождения коэффициента ослабления и скорости на высоких частотах; определения вязкости разрушения – устанавливали прочность льда и оценивали напряжения в вершинах поверхностных трещин; пенетрации – для измерения поверхностной твёрдости льда; инфракрасной термометрии – для оценки поверхностной температуры льда; методы измерения плотности и микроскопических исследований шлифов.

Для установления соответствия наблюдаемого сигнала акустической эмиссии источнику использовали два независимых подхода. Первый – теоретический, опирается на модель гармонического осциллятора:

$$f = \frac{k}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}}, \quad (4)$$

где f – частота; k – номер гармоники; D – жёсткость; m – масса.

Согласно этой модели, источники в низкочастотной области спектра (менее 1,4 кГц) должны иметь большую массу и малую жёсткость. Малая амплитуда A этих сигналов и низкая частота указывают, что источник расположен далеко (удалён) от приемника:

$$A = A_0 e^{-\alpha L}, \quad (5)$$

где A_0 – амплитуда в точке излучения; L – длина акустического пути.

Зная акустические свойства ледникового льда, можно оценить расстояние до источника:

$$L = \frac{\log \frac{A}{A_0}}{8,68\alpha}, \quad (6)$$

где α – коэффициент ослабления для частоты f .

Второй независимый подход – сопоставление параметров сигнала акустической эмиссии, характерных для модельного источника, с параметрами сигнала акустической эмиссии, зарегистрированного в ледниковом льду. Здесь под физическим моделированием источников акустической эмиссии понимается имитация образования характерного типа дефекта и условий его роста в ледниковом льде. Источник разрыва льда в глубинных слоях ледника или на ложе имитировали разрушением ледяной клавиши, а камнепад на леднике – ударом шарового индентора о дневную поверхность ледника. Зная такие параметры сигнала акустической эмиссии, как амплитуда A , его частота f и длительность Δt , можно определить эффективное сечение S излучателя:

$$S = A^2 f^2 \Delta t. \quad (7)$$

Например, подставляя в уравнение (7) значения соответствующих величин, находим, что сечение потенциального источника $S = 20 \text{ м}^2$, а его радиус $\sim 2 \text{ м}$. Полученные значения вполне правдоподобны для точек адгезионного контакта на ложе ледника [6].

Объекты исследования и эксперименты

Тестовые испытания. Соответствие спектрограммы источнику устанавливали на ледяном покрове пресного водоёма, а также на ледниках Альдегонда (Шпицберген) и Центральный Туюксу (Северный Тянь-Шань). В механических испытаниях льда на сдвиг, удар и изгиб моделировали: 1) источник на ложе ледника – движением ледяного блока по поверхности твёрдого тела; 2) источник в толще льда – разрушением ледяной клавиши при её изгибе; 3) камнепад – ударом жёсткого индентора о лёд.

Спектрограмма удара (рис. 2, а) представлена одиночным импульсом 1 с частотой 15,5 кГц на фоне импульсов, соответствующих спонтанным разрушениям контакта с ложем 2 и на бортах поверхностных трещин 3. Разрушение ледяной клавиши сечением $\sim 200 \text{ см}^2$ представлено сложным частотно-амплитудным спектром, который ограничен узким интервалом времени и имеет несколько «пикув» в диапазоне частот 1,2–19,3 кГц (см. рис. 2, б). Сигналам, которые генерируются при скольжении

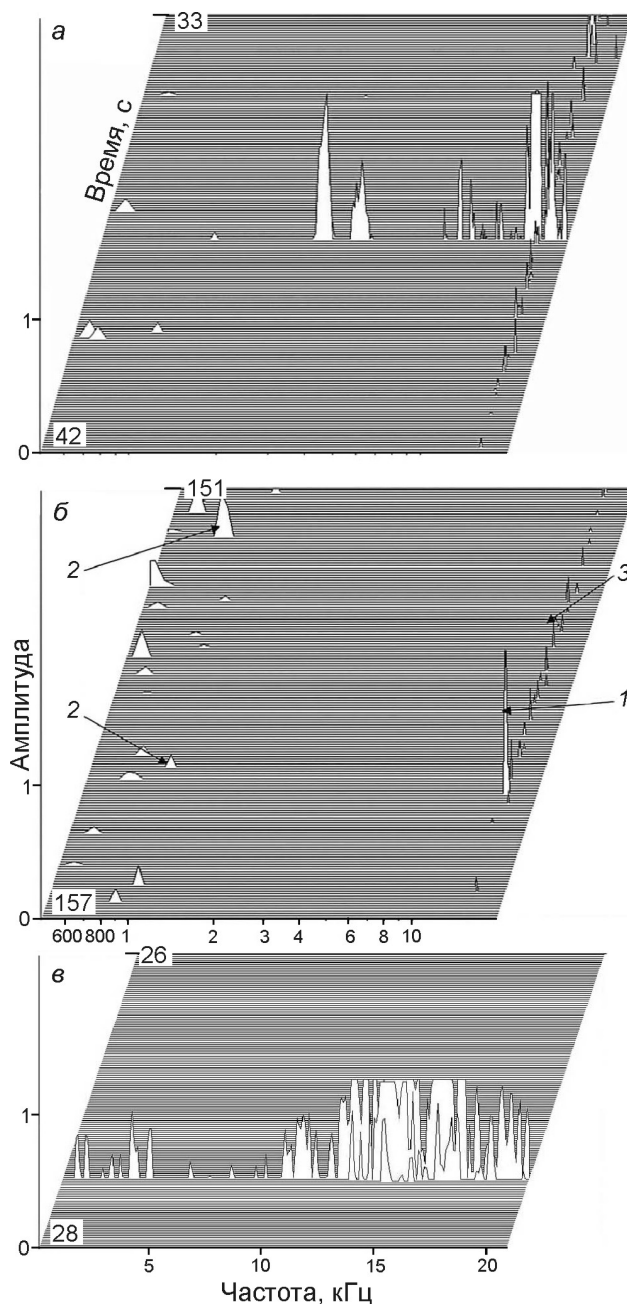


Рис. 2. Спектрограмма сигналов акустической эмиссии, генерируемых:

а – при разрушении ледяной клавиши с поперечным сечением $\sim 200 \text{ см}^2$ в месте заделки при изгибе; б – при ударе; в – прорастание макротрещины; пояснения см. в тексте

Fig. 2. Spectrogram of acoustic emission signals generated by: а – the destruction of the ice key with a cross section of $\sim 200 \text{ cm}^2$ at the site of termination of bending; б – impact; в – macrocrack germination; explanations see in text

льда по грунту (см. рис. 2, в), свойственно монотонное увеличение интенсивности их спектральных характеристик во времени. Эти признаки взяты за основу при идентификации сигнала источнику.

Многочисленные эксперименты, выполненные нами на леднике, а ранее — другими исследователями на речном льду, подтверждают, что спектрограмма каждого источника (процесса разрушения) имеет характерные признаки, присущие конкретному процессу. Тем не менее, мы провели дополнительные комплексные исследования, чтобы можно было при анализе спектрограмм учитывать особенности ледникового льда. Так, поверхностный изменённый слой («абляционный слой») ледника Альдегонда имеет слоистую структуру с пузырьками воздуха разных размеров, с системой каналов и волосяных трещин, а также с сетью продольных и поперечных трещин на поверхности. Эти неоднородности определяют условия распространения упругих волн в поверхностном слое. Характерные значения плотности льда в этом слое составили $0,867\text{--}0,826\text{ г/см}^3$; скорости распространения продольных акустических волн — $V_p = 3348 \pm 15\text{ м/с}$, поперечных — $V_s = 1810 \pm 15\text{ м/с}$. Сопоставление длины трещины с длиной акустических волн показало, что абляционный слой — акустически однородная среда для частот ниже 1 кГц.

Среднее значение критического коэффициента напряжений при 0 °C равно $85 \pm 7\text{ кН/м}^{3/2}$, и оно не выходит за рамки значений $50\text{--}100\text{ кН/м}^{3/2}$, определённых другими исследователями. Этим значениям соответствуют критические напряжения образования поверхностных трещин, составляющие $0,3\text{--}0,54\text{ МПа}$. По-видимому, одна из причин их возникновения — термические напряжения ($\sim 0,4\text{ МПа}$). Полученные в тестовых испытаниях видеообразы источников (диаграммы акустической эмиссии) позволяют распознавать источник по характерным параметрам этого сигнала для ограниченных длин акустического пути. Первичный спектр от удалённых источников искажается из-за ослабления высокочастотных гармоник (пропорционально квадрату частоты). Распознавание удалённых сигналов, по нашему мнению, должно основываться на физическом моделировании движения льда по ложу ледника, а также на общих закономерностях механики разрушения льда.

Акустические спектры ледников. Измерения собственных акустических колебаний на ледниках Альдегонда и Центральный Туюксу показали, что существует широкий спектр упругих колебаний, низкочастотная часть которых соответствует удалённым источникам. На рис. 3 показаны спектрограммы собственных акустических колебаний, записанные на леднике Туюксу в Заилийском Алатау [7]. В среднем диапазоне частот (сигналы акустической эмиссии частотой 2,6 кГц) установлены повторение сигналов (дорожка 1) и периодическое уменьшение частоты их заполнения. Аналогичная дорожка при сдвиге (stick-slip), а также смещение сигналов по оси частот получены при увеличении масштаба разрушения в случае механических испытаний образцов льда. Сигналы этих частот отнесены к удалённым источникам из-за низкой частоты и малой их амплитуды при большом коэффициенте усиления измерительной линии (уравнение 5) [2].

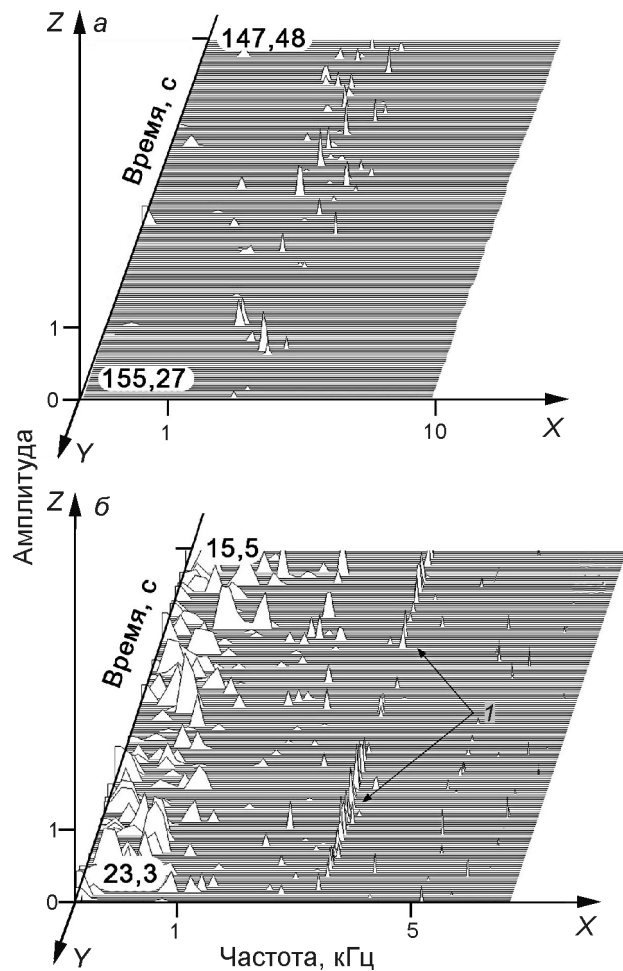


Рис. 3. Трёхмерные спектрограммы акустической эмиссии, полученные на ледниках Альдегонда (а) и Туюксу (б): X — частота; Z — амплитуда; Y — текущее время наблюдений
Fig. 3. Three-dimensional spectrograms of acoustic emission obtained on the Aldegondabreen (a) and Tyuksu (b) glaciers: X — frequency; Z — amplitude; Y — the current time of observation

Для проверки принадлежности низкочастотной части акустического спектра удалённым источникам использовали данные по бурению скважин и геодезическим оценкам толщины ледникового льда. Установлено, что рассчитанная по материалам тестовых и акустических измерений длина акустиче-

ского пути сопоставима с толщиной ледникового льда, полученной для площадки наблюдений [1]. Таким образом, косвенно подтверждается, что сигналы в низкочастотной части спектра могут излучаться удалёнными источниками, расположенными в придонных слоях ледника. Независимые доказательства (приведены далее) получены при исследовании закономерностей образования трещин в придонных слоях ледника, например при разрушении контакта льда с подстилающей горной породой.

Повторяющиеся сигналы акустической эмиссии в виде «дорожки» с частотой 1,2 и 2,6 кГц, обнаруженные сначала на леднике Альдегонда, а затем на леднике Туюксу, по-видимому, результат сложного физического явления, которое включает в себя чередование процессов образования трещин, локальную разгрузку и последующее сжатие на одних и тех же препятствиях (stick-slip). Характерное время инкубационного периода, определённое как промежуток между двумя последующими импульсами на акустической дорожке, составляет 0,8–1,0 с. Смещение частоты заполнения импульсов зафиксировано в диапазоне 2,6–1,2 кГц (ледник Альдегонда). Согласно модели гармонического осциллятора (уравнение 4), для $D = \text{const}$ это смещение – результат увеличения массы осциллятора/источника почти в 5 раз. Как показали эксперименты, наблюдаемый эффект смещения частоты обусловлен расширением зоны повреждения (уравнение 4) и, вероятно, возникает на контакте ледника с ложем, где находится препятствие.

Акустические эффекты, обнаруженные при разрушении ледникового льда и проявляющиеся в уменьшении частоты сигналов акустической эмиссии и их периодическом генерировании, воспроизведены в модельных экспериментах при контактном разрушении примороженного к подложке льда при сдвиге в условиях стеснения.

Результаты физического моделирования. Ранее мы показали, что адгезионная прочность соединения льда с горной породой (серпентинит) существенно зависит от отношения поперечных сдвиговых напряжений к продольным. Получена также зависимость адгезионной прочности льда на контакте с серпентинитом от температуры [7]. В этой работе рассмотрено, как скорость деформации и препятствия на подложке влияют на механизм разрушения контакта лёд–подложка. На рис. 4 показана зависимость силы осевого сдвига (кривые 1, 3) и смещения (2, 4) от времени при скоростях 0,015 (1, 2) и 0,16 мм/с (3, 4) для гладкой подложки (серпентинит). Из экспериментальной зависимости следует,

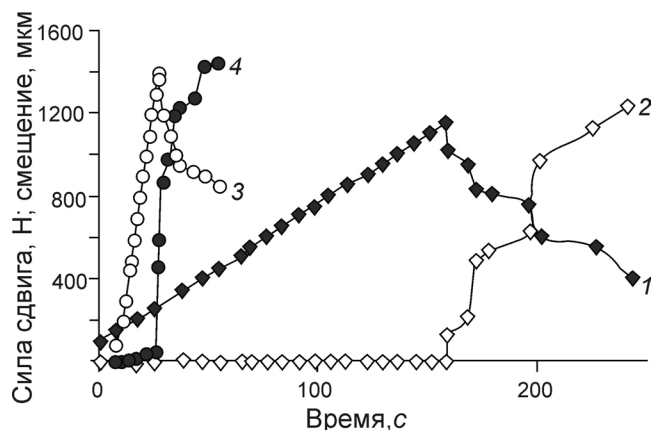


Рис. 4. Зависимости силы осевого сдвига (1, 3) и смещения (2, 4) от времени при скоростях нагружения (испытания на сдвиг):

1, 2 – 0,015 мм/с; 3, 4 – 0,16 мм/с при температуре -7°C

Fig. 4. Relations of axial shear force (1, 3) and displacement (2, 4) with time for different loading rates (shear testing):

1, 2 is 0,015 mm/s; 3, 4 is 0,16 mm/s at -7°C

что лёд проявляет вязкоупругие свойства. При уменьшении скорости деформации на порядок адгезионная прочность соединения льда с серпентинитом уменьшается на 18%, что позволяет, используя принцип температурно-временной суперпозиции, на основании результатов механических испытаний оценить его реологические и прочностные свойства для условий залегания, т.е. на контакте лёд–ложе при скоростях сдвига менее 100 м/год.

На рис. 5 приведены зависимости силы сдвига (кривые 1, 2) и смещения (кривая 3) от времени для гладкой подложки (кривая 2) и для подложки с кольцевым (тор) препятствием (кривые 1, 3). Анализ рис. 5 показывает, что присутствие на гладкой подложке препятствия вызывает резкое (в 2,7 раза) увеличение сопротивления сдвигу, причём переход от предварительного смещения к срыву происходит в основном пластически (кривая 3). При исследовании микрошлифов льда вблизи препятствия обнаружены пластическая зона и микротрещины, ориентированные в направлении распространения фронта этой зоны. Установлено, что один из определяющих факторов трещинообразования на препятствии при сдвиге – инкубационный период подготовки разрыва льда. Выявлены два характерных времени инкубационного периода: для адгезионного разрушения – около 0,08 с, а для когезионного – около 1–1,5 с. Отметим, что время инкубационного периода когезионного разрушения льда более чем на порядок превышает инкубационный период адгезион-

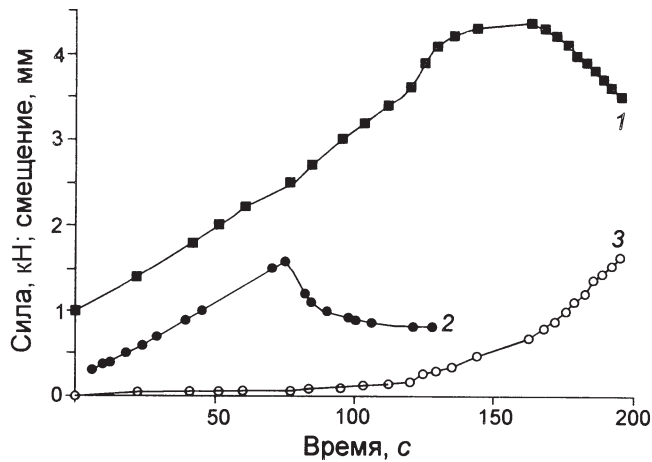


Рис. 5. Зависимости силы сдвига (кривые 1, 2) и смещения (кривая 3) от времени для гладкой подложки (2) и с препятствием в виде тора ($D = 3$ мм) – кривые 1, 3

Fig. 5. Relations of shear strength (curves 1, 2) and displacement (curve 3) with time for a smooth substrate (2) and the substrate with a torus-shaped obstacle ($D = 3$ mm) – curves 1, 3

ного разрушения. Есть основания полагать (уравнение 4), что большему масштабу разрушения соответствует больший инкубационный период.

При наличии препятствий определяющим становится механизм когезионного разрушения. Разные вклады этих механизмов в сопротивление сдвигу объясняют различие деформационных кривых 1 и 2 на рис. 5. Особого внимания заслуживает спектрограмма сигналов акустической эмиссии при сдвиге льда на подложке с препятствием в виде тора (рис. 6), полученная на стадии «трения прорезания» или скольжения, если использовать терминологию Р. Штрибека. К адгезионному разрушению на пятнах контакта добавляются пластические деформации, которые сопровождаются образованием трещин в контактном слое льда. Фактически показано, что акустические эффекты, наблюдаемые при проведении экспериментов по взаимодействию льда с подложкой, имеют те же закономерности, которые характерны для спектров от удалённых источников в ледниках (повторяющиеся в виде акустической дорожки сигналы акустической эмиссии и периодическое смещение частоты этого сигнала в низкочастотную часть спектра).

Выводы

1. Решён ряд методических вопросов, связанных с применением метода акустической эмиссии как основы для создания системы дистанционных наблюдений движения льда в ледниках.

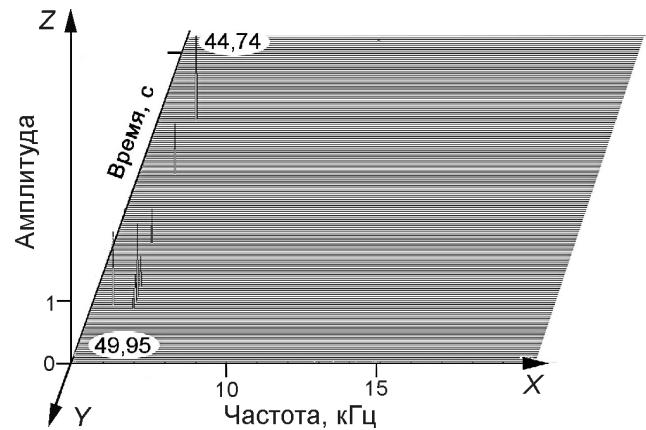


Рис. 6. Спектрограмма сигналов акустической эмиссии при сдвиге льда на подложке с препятствием в виде тора
Fig. 6. Spectrogram of acoustic emission signals generated by ice displacement along the substrate with a torus-shaped obstacle

2. Оценены акустические характеристики поверхностного слоя ледника и влияние его трещиноватой структуры на распространение упругих волн. Отделены помехи, вызванные камнепадом и сейсмическими явлениями.

3. Исследованы спектрограммы сигналов акустической эмиссии в абляционном слое ледника. Для их расшифровки использованы результаты физического моделирования процессов, происходящих в ледниках.

4. Установлена корреляция сигналов акустической эмиссии с различными масштабами движения в леднике. Каждому источнику этих сигналов в леднике соответствуют определённая форма сигнала и характерные акустические параметры, что позволяет по параметрам сигналов акустической эмиссии судить об источнике, а следовательно, о движении льда в леднике.

5. Выполнены комплексные исследования структуры абляционного слоя, его физических и прочностных свойств, необходимые для понимания динамики ледника и механики контактного разрушения ледникового льда.

6. Получена зависимость адгезионной прочности соединения льда с горной породой (серпентинит) от температуры и оценено воздействие на неё скорости деформации. Исследовано влияние формы препятствий на силу сдвига льда по подложке, имитирующее взаимодействие льда с ложем ледника. Установлены характерные закономерности изменения сигналов акустической эмиссии для различных стадий когезионного и адгезионного разрушения льда.

7. Показано, что метод акустической эмиссии – перспективный инструментальный метод,

позволяющий исследовать движение льда даже в деградирующем леднике.

8. Полученные данные можно использовать для создания мобильной ледниковой лаборатории и системы дистанционного акустического мониторинга, в основе которой лежит метод деформационной акустической эмиссии, позволяющий изучать динамику движения льда в ледниках. В разделе «Аппаратура, подходы и методика исследований» приведён перечень методов, который соответствует необходимой в первом приближении комплектации полевой лаборатории для исследований движения льда в ледниках.

9. Первоочередная задача — создание кадастра спектрограмм акустической эмиссии разных ледников. При дальнейших исследованиях целесообразно получить систему дистанционных наблюдений за движением льда в ледниках; провести дистанционное изучение процессов в толще ледника и на его ложе; оценить возможные причины потери устойчивости в теле ледника на основе классификации сигналов акустической эмиссии, установления их эволюции и корреляции этих изменений в зависимости от внешних условий; разработать метод прогноза локальной подвижки ледника.

Благодарности. Авторы признательны за помощь в работе И.И. Лаврентьеву, П.А. Королеву (Институт географии РАН), А.С. Измайлову и А.В. Прохорову из Российского государственного гидрометеорологического университета (Санкт Петербург).

Работы выполнены при поддержке РФФИ, грант 11-05-00863.

Литература

1. 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. // МГИ. 2001. Вып. 90. С. 86–99.
2. Виноградов С.Д., Соловьева М.С. Распространение упругих волн в трещиноватой среде (трехмерное моделирование) // Физика Земли. 1997. № 9. С. 3–10.
3. Воронина И.Ю., Епифанов В.П. Акустические исследования структурных изменений гранита при осевом сжатии // Акустический журнал. 1980. Т. 26. № 3. С. 371–376.
4. Епифанов В.П., Глазовский А.Ф. Акустические характеристики как индикатор особенностей движения льда в ледниках // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 4. С. 42–55.
5. Епифанов В.П., Глазовский А.Ф. Акустические методы в механике движения ледников // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 2. С. 427–429.
6. Епифанов В.П., Саватюгин Л.М. Акустические исследования абляционного слоя ледника: на примере ледника Альдегонда (Шпицберген) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. Т. 90. № 4. С. 87–98.
7. Епифанов В.П., Глазовский А.Ф., Осокин Н.И. Физическое моделирование контакта ледника с ложем (эксперименты) // Лёд и Снег. 2013. № 1 (121). С. 43–52.
8. Макаревич К.Г., Пальгов Н.Н., Тогмагамбетов Г.А., Вилесов Е.Н., Судаков П.А., Головкова Р.Г., Денисова Т.Я., Егорова Н.Д. Оледенение Заилийского Алатау. М.: Наука, 1969. 288 с.
9. Макаревич К.Г., Вилесов Е.Н., Головкова Р.Г., Денисова Т.Я., Шабанов П.Ф. Ледники Туюксу (Северный Тянь-Шань). Л.: Гидрометеоздат, 1984. 172 с.
10. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 307 с.
11. Epifanov V.P., Kuz'menko V.P. Acoustic emission methods applied to avalanche-formation studies // Journ. of Glaciology. 1988. V. 34. № 117. P. 232–235.
12. Roux P.-F., Marsan D., Metaxian J.-P., O'Brien G., Moreau L. Microseismic activity within a serac zone in an alpine glacier (Glacier d'Argentiere, Mont Blanc, France) // Journ. of Glaciology. 2008. V. 54. № 184. P. 157–168.

Summary

The possibility of glacier ice flow studies using the method of acoustic emission (AE) in frequency range from 15 Hz to 20 kHz has been considered. A portable acoustic line system has been developed and a number of methodological issues (mounting of acoustic sensors into glacial ice, their location, reliability of acoustic coupling, etc.) have been solved. Acoustic studies of glacial ice have been performed; rock fall effect, ice cracking and ice movement on bedrock have been simulated. Correspondences of AE parameters to specific sources have been identified. The results of acoustic studies on Aldegondabreen (Spitsbergen), Central Tuyuksu and Molodezhny glaciers (northern Tien Shan) have been summarized. The dependence of the adhesive strength of ice with smooth substrate (serpentinite) on the shear rate has been considered; the effect of tor-shaped obstacle on shear force has been estimated. It is shown that the acoustic effects at cohesive ice failure on obstacles are similar to the observed natural acoustic vibrations generated in glaciers from distant sources. The results might be applied in development of the mobile ice lab and system for remote acoustic monitoring the processes in the bottom layers of glaciers.