

ЛЕДОТЕХНИКА
ICE TECHNOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-406-419>

УДК 552.125



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

*Памяти Н.В. Черепанова — полярника, ледоисследователя и человека
To the memory of Nikolai Vasilyevich Cherepanov — polar scientist, ice explorer
and a remarkable person*

Анизотропия сил трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда

Б.П.Егоров

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия*

egorov.nord@mail.ru

Резюме

Свойства льдов природных водоемов обусловлены их кристаллическим строением. Кроме механических и прочностных характеристик льда как твердого тела, имеют большое значение характеристики поверхностей льда, проявляемые в процессе трения. В работе исследовалось трение двух монокристаллов льда друг относительно друга как основа для понимания закономерностей трения натурального, поликристаллического льда. В работе приведены результаты измерения характеристик сухого трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда. Из искусственно выращенной пластины монокристалла льда для эксперимента изготавливались образцы монокристаллов льда с определенной ориентацией С-оси. Измерение коэффициента трения покоя монокристалла льда реализовалось по классической схеме регистрации минимального угла, при котором монокристалл начинал скатываться по наклонной поверхности второго монокристалла. Была обнаружена зависимость коэффициента трения покоя монокристаллов льда от взаимной ориентации С-осей монокристаллов друг относительно друга. Коэффициенты трения покоя в случае, когда С-оси монокристаллов льда параллельны друг другу, значительно превысили коэффициенты трения покоя в случае, когда С-оси монокристаллов льда перпендикулярны друг другу.

Проведенные исследования показали наличие анизотропии сил трения пары монокристаллов льда.

Ключевые слова: анизотропия, базисные плоскости, монокристалл льда, С-ось монокристалла, трение покоя, трение скольжения.

Для цитирования: *Егоров Б.П.* Анизотропия сил трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 4. С. 406–419. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-406-419>.

Поступила 14.04.2022

После переработки 31.08.2022

Принята 19.10.2022

Anisotropy of the friction forces of rest and sliding friction of single crystals of ice

Boris P. Egorov

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

egorov.nord@mail.ru

Summary

The properties of the ice of natural reservoirs are due to its crystalline structure. The dependence of the mechanical and strength characteristics of single ice crystals on the angle between the direction of application of force to a single crystal and the direction of its C-axis is known. Basically, this dependence is due to the possibility of the base plates of a single crystal of ice sliding relative to each other. In physics, in addition to the mechanical and strength characteristics of a solid, the properties of the surfaces of a solid state, manifested in the process of friction, are of great importance. The friction of two single crystals of ice relative to each other has been investigated in experiments on rest friction and sliding friction. From an artificially grown plate of a single ice crystal, samples of single crystals of ice with a certain orientation of the C-axis were made for the experiment. The measurement of the rest friction coefficient of a single ice crystal was realized according to the classical scheme of recording the minimum angle at which the single crystal began to roll down an inclined surface. The dependence of the rest friction coefficient of ice single crystals on the mutual orientation of the C-axes of single crystals relative to each other was discovered. The coefficients of rest friction in the case that the C-axes of single ice crystals are parallel to each other significantly exceed those obtained when the C-axes of single ice crystals are perpendicular to each other. Measurements have shown that the anisotropy of sliding friction increases with increasing initial velocity of the single crystal on the surface of the second single crystal. This is explained by the fact that with the growth of the path traveled by the M_2 crystal, the time of interaction of single crystals of ice also increases, during which the properties of the anisotropy of single crystals of ice relative to sliding friction are manifested. Studies have shown the presence of anisotropy of the friction forces of rest and friction of sliding of a pair of single crystals of ice.

Keywords: anisotropy, base planes, C-axis of single crystal, rest friction, single ice crystal, sliding friction.

For Citation: Egorov B.P. Anisotropy of the friction forces of rest and sliding friction of single crystals of ice. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (4): 406–419. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-406-419>.

Received 14.04.2022

Revised 31.08.2022

Accepted 19.10.2022

ВВЕДЕНИЕ

Анизотропия — это зависимость физических свойств вещества (механических, электрических, оптических) от направления. Анизотропия механических свойств кристаллов состоит в различии твердости, упругости, прочности в разных направлениях. Причиной анизотропии кристаллов является упорядоченное расположение частиц в них, при котором расстояние между соседними частицами, а следовательно, и силы связи между ними различны в разных направлениях. Поликристаллические материалы, состоящие из большого числа случайно ориентированных мелких кристаллов, изотропны.

Трение, возникающее при поступательном перемещении одного тела по поверхности другого, называется *трением скольжения*. Трение между взаимно неподвижными телами называется *трением покоя*. Оно проявляется в том, что для возник-

новения относительного перемещения двух соприкасающихся тел нужно приложить внешнюю силу $F > F_0$, где F_0 — так называемая предельная сила трения покоя [1].

Существуют два принципиально различных механизма трения — жидкое, или аэрогидродинамическое, и сухое. В работе рассматривается сухое трение покоя и сухое трение скольжения. Сила сухого трения скольжения вызывается в основном механическим зацеплением между неровностями поверхностей тел и сцеплением между молекулами обоих тел в областях непосредственного соприкосновения [2].

Характеристики сил трения покоя и трения скольжения льда определяются свойствами его поверхности.

В работах [3, 4] автор исследует механические свойства льда в субмикророботах, тонких приповерхностных слоях и пленках. В работе [5] были проведены измерения анизотропии сил кинетического трения, возникающих при скольжении шарика из карбида вольфрама в различных направлениях по поверхности монокристалла льда. Основное внимание исследователи уделили характеристикам поверхности монокристалла.

В данной работе рассмотрены некоторые вопросы взаимодействия поверхностей двух монокристаллов льда.

Цель исследования — измерить анизотропию сил сухого трения покоя и трения скольжения пары монокристаллов льда.

Силы трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда друг о друга опосредованно вносят свой вклад в прочностные характеристики поликристаллического льда. Исследование характеристик сил трения покоя и трения скольжения кристаллов льда представляет научный интерес и имеет практическое значение. Эти знания необходимо учитывать при моделировании растекания ледников, их скольжения по внутренним плоскостям и ложу, также они важны для понимания особенностей взаимодействия отдельных зерен льда в механизме деформации ледяных тел.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели работы необходимо было решить следующие задачи:

- вырастить блок монокристалла пресного льда;
- из блока монокристалла льда изготовить образцы монокристаллов с размерами и ориентациями С-осей, необходимыми для постановки экспериментов;
- разработать методику измерения коэффициентов сил трения покоя;
- разработать методику измерения коэффициентов сил трения скольжения;
- провести эксперименты по измерениям коэффициентов сил трения покоя при различных ориентациях С-осей монокристаллов и при различных временах выдержки соприкосновения монокристаллов поверхностями друг с другом;
- провести эксперименты по измерению коэффициентов сил трения скольжения при различных ориентациях С-осей монокристаллов;
- проанализировать полученные результаты.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Объектом исследования были образцы монокристаллов льда, предназначенные для проведения экспериментов по измерению сил трения покоя и трения скольжения. Образцы изготавливались из блока монокристалла льда, выращенного в холодной ледоисследовательской лаборатории по методике, разработанной Николаем Васильевичем Черепановым.

Методика выращивания блока монокристалла льда следующая. Емкость размерами $100 \times 100 \times 100$ см³ имела термоизолированные стенки толщиной 10 см. Внутренние стенки емкости собраны из бакелизированной фанеры толщиной 10 мм. Емкость располагалась на бетонном кубе $110 \times 110 \times 70$ см³, расположенном на песчаной подушке толщиной 50 см, насыпанной на поверхности земли. В загородной одноэтажной холодной лаборатории для этой цели был вскрыт пол и смонтирована данная конструкция, значительно снижающая вибрацию емкости с водой при движении наружного наземного транспорта. Емкость по высоте на 90 см заполнялась отфильтрованной и дегазированной водой. Для дегазации воды она нагревалась до температуры $+80$ °С и выдерживалась в таком состоянии в течение часа.

В воде на дне емкости располагался плоский нагревательный элемент с электрической регулировкой нагрева. Регулирование нагрева осуществлялось по электрическим проводам, выведенным из емкости на пульт управления.

Во внутренней части емкости монтировалась термокоса для измерения профиля температуры воды по вертикали с шагом 10 см.

Температура воздуха в холодной лаборатории составляла -10 °С.

Когда на поверхности воды нарастает монокристалл льда, внутри емкости увеличивается давление воды. Для компенсации давления оборудование располагало системой сброса избыточного объема воды. Для этого нижние слои воды соединены термоизолированной трубкой с наружной поверхностью емкости и выведены на уровень верхней поверхности монокристалла льда. Внутри трубки уложена в две жилы токопроводящая проволока, по ней подается ток, вызывающий незначительный нагрев проволоки, при котором ее температура на несколько градусов превышает температуру плавления льда. При этом избыток воды, возникающий с ростом монокристалла, вдоль «теплой» проволоки вытекает из емкости, не вызывая в ней роста давления воды.

С течением времени температура воды в емкости понижалась. Когда температура поверхностного слоя воды выравнивалась на отметке 0 °С, температура нижнего слоя воды в емкости составляла $+0,4$ °С. В это время с емкости снималась крышка, и начиналось интенсивное выхолаживание верхнего слоя воды. Работа проводилась в ночные часы для исключения колебаний емкости с водой, вызванных движущимся транспортом. При отсутствии вибрации воды в емкости по прошествии некоторого времени верхний тонкий слой воды становился переохлажденным, то есть его температура опускалась ниже 0 °С. Вопросам физики возникновения слоя переохлажденной воды и ее взаимодействия с нижележащими слоями воды посвящена работа [6]. Со временем в связи с попаданием на поверхность переохлажденного верхнего слоя воды пылинок начинался процесс кристаллизации воды. На поверхности образовывался монокристалл льда. В начальный период скорость роста монокристалла льда достаточно велика, затем начинает снижаться. В процессе роста монокристалла необходимо поддерживать положительную температуру $+0,4$ °С в нижнем слое воды посредством подогрева ее электрическим нагревателем. Необходимо следить за тем, чтобы не повысить температуру нижнего слоя воды выше $+4$ °С. В противном случае возникнет конвективный перенос «теплой» воды вверх, к нижней поверхности растущего монокристалла, что приведет к нарушению его структуры. С-ось растущего в емкости монокристалла ориентирована перпендикулярно поверхности замерзания льда, а базисные плоскости монокристалла ориентированы параллельно поверхности замерзания.

Достаточно крупные монокристаллы льда встречаются и в природных условиях. Их можно наблюдать во льдах природных водоемов, относящихся ко льдам типа А-1 по классификации Н.В. Черепанова [7]. Однако вырезать из ледяного покрова образцы монокристаллов льда с размерами, необходимыми для проведения эксперимента, без нарушения их целостности не представляется возможным. Это обстоятельство предопределило необходимость выращивать монокристалл льда в лабораторных условиях.

При достижении блоком монокристалла льда необходимой толщины он извлекался из емкости и разрезался на образцы с размерами, необходимыми для проведения экспериментов. При этом недопустимо пользоваться режущим инструментом, таким, как, например, ручная ножовка, поскольку это приведет к образованию в монокристалле крупных и мелких трещин. Монокристалл разрезался на образцы разогретой электрическим током нихромовой проволокой. Проволока имела пружинное натяжение, компенсирующее ее провисание, связанное с удлинением при нагревании. Перед началом работы следует в термостате установить температуру блока монокристалла в пределах $-0,2 \dots -0,4$ °С. В противном случае вода, образующаяся при расплавлении льда разогретой нихромовой проволокой, понизит свою температуру от контакта с «холодным» объемом монокристалла до температуры ледообразования, что приведет к замерзанию реза. Разрезание блока монокристалла льда на образцы следует проводить по возможности быстро. Отрезанные куски насухо протирались хлопчатобумажной тканью, для того чтобы убрать с их поверхности остатки воды. При изготовлении необходимых для эксперимента образцов монокристаллов льда из блока учитывалось то обстоятельство, что С-ось блока монокристалла льда, выращенного на горизонтальной поверхности воды, направлена вертикально. Направления С-осей изготовленных образцов монокристаллов льда контролировались в поляризованном свете.

Перед измерением сил трения покоя и трения скольжения образцов монокристаллов льда должным образом обрабатывались их поверхности. Сначала поверхности монокристаллов, которые будут находиться во время эксперимента в соприкосновении, шлифовались на наждачной бумаге, затем слегка оплавливались на «теплой» полированной латунной плите и насухо протирались хорошо впитывающей воду хлопчатобумажной тканью. Температура полированной латунной плиты подбиралась экспериментальным путем и была несколько выше температуры плавления пресного льда. Недопустима высокая температура латунной плиты, при которой плавление льда происходит интенсивно. Не следует устанавливать и низкую температуру, при которой процесс плавления льда затягивается на 10 и более секунд. Время плавления тонкого приповерхностного слоя монокристалла льда на поверхности «теплой» латунной плиты составляло от 1,5 до 2 секунд. При этом монокристалл интенсивно перемещался рукой по поверхности плиты. После оплавления рабочей поверхности монокристалла на латунной плите он быстро перемещался на ровную поверхность, покрытую тканью, хорошо впитывающей воду. Монокристалл интенсивно перемещался в течение 3 секунд по поверхности ткани, для того чтобы тонкий слой воды, остающийся на нижней поверхности монокристалла после оплавления на латунной плите, быстро и равномерно впитался в ткань. Так достигались ровные, гладкие поверхности скольжения монокристаллов льда.

Эксперименты проводились в холодной лаборатории при температуре воздуха $-9 \dots -11$ °С. Холодная лаборатория представляла собой термоизолированное

помещение с размерами $3 \times 2 \times 2$ м³. В этом помещении был установлен охлаждающий воздух радиатор.

Проведенная работа носит характер феноменологического исследования.

«Другим общим методом подхода к исследованию движения материальных тел является построение феноменологической макроскопической теории, основанной на общих, добытых из опыта закономерностях и гипотезах. Макроскопические теории являются эффективным средством решения практически важных задач, и добытые с их помощью сведения согласуются с опытом» [8, с. 19].

Применение феноменологического метода позволяет установить закономерности между параметрами, которые описывают данное явление. При этом вещество рассматривается как сплошная среда, без учета его микроскопического строения.

То есть в работе, проводимой в рамках феноменологического исследования, не рассматривались вопросы молекулярной ориентации, структуры и формы шероховатостей поверхности монокристалла. По результатам этого феноменологического исследования можно выдвинуть гипотезу (обоснованное предположение) относительно характеристик микроструктуры поверхности монокристалла. Для подтверждения либо опровержения этой гипотезы возникает необходимость проведения отдельных, тонких измерений, например, с использованием оптических либо электронных микроскопов.

Измерение коэффициента трения покоя проводилось по следующей методике. В эксперименте использовались два монокристалла льда. Первый монокристалл льда M_1 имел размеры $200 \times 200 \times 10$ мм³, а второй монокристалл льда M_2 имел размеры $50 \times 50 \times 10$ мм³. Поверхности скольжения были соответственно 200×200 мм² и 50×50 мм². Монокристалл M_1 располагался горизонтально. Имеющий меньшие размеры монокристалл M_2 помещался на верхнюю поверхность монокристалла M_1 . При помещении монокристалла M_2 на поверхность монокристалла M_1 до начала эксперимента давалась некоторая выдержка по времени Δt . Эта выдержка составляла 5, 60 и 600 секунд. Затем большой монокристалл M_1 начинал поворачиваться вокруг горизонтальной оси. При определенном угле поворота меньший монокристалл льда M_2 , расположенный на верхней поверхности большого кристалла, начинал скатываться с него вниз. Измерялось минимальное значение этого критического угла наклона. Коэффициент трения покоя f связан с λ — наименьшим критическим углом наклона плоскости к горизонту, при котором монокристалл M_2 начинал скользить вниз под действием собственного веса, соотношением $f = \operatorname{tg} \lambda$ [1]. Из формулы видно, что коэффициент трения покоя не зависит от веса монокристалла M_2 .

Вращение кристалла M_1 вокруг оси вращения осуществлялось вручную через блок со скоростью вращения 0,25 рад/с. Начало движения монокристалла M_2 по наклонной поверхности монокристалла M_1 фиксировалось визуально. В этот момент вращение монокристалла M_1 прекращалось, и при помощи механического универсального угломера с погрешностью измерения $\pm 1,0^\circ$ измерялся угол наклона монокристалла M_1 .

Была проведена серия экспериментов с различной ориентацией С-осей монокристаллов льда друг относительно друга. Схемы расположения в этих экспериментах С-осей монокристаллов M_1 и M_2 друг относительно друга представлены на рис. 1.

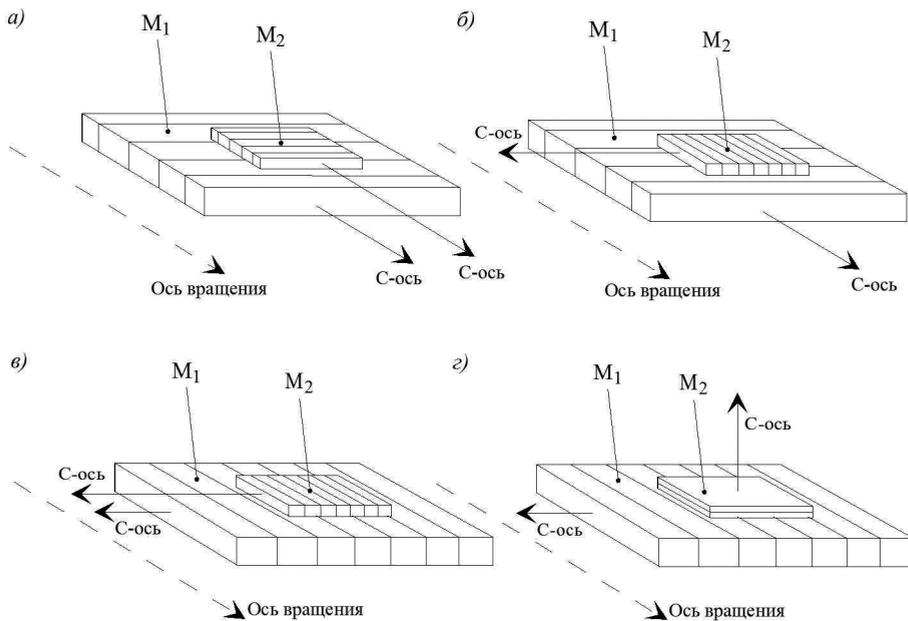


Рис. 1. Четыре схемы (а, б, в и з) ориентаций С-осей монокристаллов M_1 и M_2 в экспериментах по измерению коэффициентов трения покоя монокристаллов льда

Fig. 1. Four schemes (a, б, в and з) orientations of the C-axes of single crystals M_1 and M_2 in experiments to measure the friction coefficients of rest of single crystals of ice

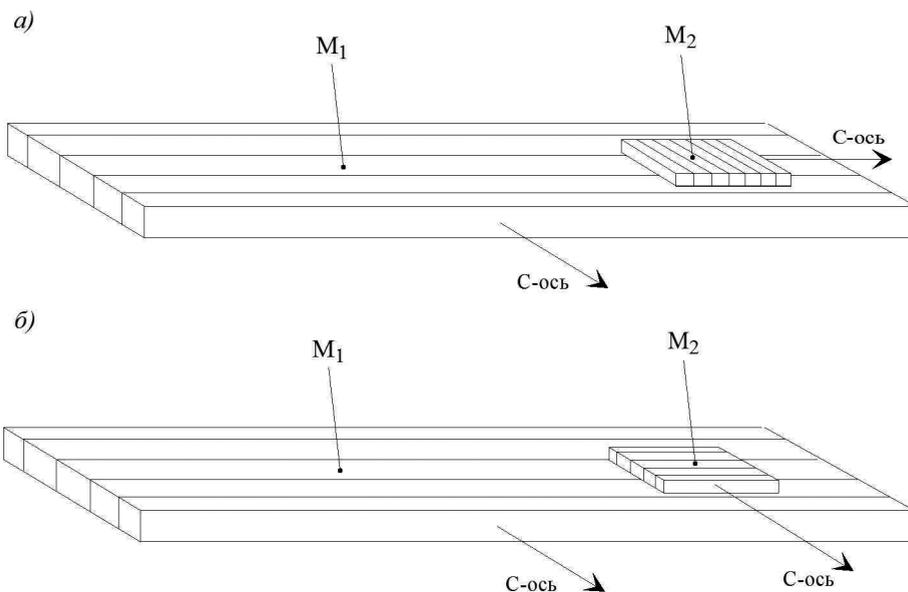


Рис. 2. Две схемы (а и б) ориентаций С-осей монокристаллов M_1 и M_2 в экспериментах по исследованию трения скольжения монокристаллов льда

Fig. 2. Two schemes (a and б) orientations of the C-axes of single crystals M_1 and M_2 in experiments to study the friction of sliding single crystals of ice

Следующая серия экспериментов заключалась в измерении анизотропии сил трения скольжения монокристаллов льда. Схему эксперимента поясняет рис. 2, где представлена схема расположения С-осей монокристаллов M_1 и M_2 в экспериментах по исследованию сил трения скольжения.

Сила трения скольжения оценивалась по длине пути, пройденного монокристаллом M_2 по поверхности монокристалла M_1 . Чем больше расстояние, пройденное при скольжении монокристаллом льда по поверхности другого монокристалла при прочих равных условиях, тем меньше сила трения скольжения. Была реализована следующая методика исследования силы трения скольжения. Монокристалл M_2 помещался на полиэтиленовую пленку, расположенную на поверхности монокристалла M_1 . Монокристалл M_2 располагался вплотную к сжатой на определенную длину небольшой пружине. Распрямляясь, пружина приводила монокристалл M_2 в движение. Монокристалл M_2 соскальзывал с полиэтиленовой пленки и начинал двигаться по поверхности монокристалла M_1 . Расстояние, которое проходит монокристалл M_2 по поверхности монокристалла M_1 до остановки, измерялось линейкой с точностью ± 1 мм. Это расстояние определялось силой трения скольжения.

Относительно просто измерить коэффициент трения покоя по описанной выше классической методике. Измерить коэффициент трения скольжения значительно сложнее. Коэффициент трения скольжения двух тел равен отношению силы трения скольжения к весу движущегося тела. Коэффициент трения скольжения зависит от скорости движения тела. Для каждой скорости движения тела он свой. Этим обусловлена необходимость измерять коэффициент трения скольжения при равномерном прямолинейном движении тела. Чтобы обеспечить равномерное прямолинейное движение монокристалла льда с определенной скоростью при наличии трения скольжения, к движущемуся монокристаллу необходимо прикладывать силу с отрицательной обратной связью относительно скорости движения монокристалла. То есть, если скорость движения монокристалла льда увеличивается, то силу, действующую на него, необходимо уменьшить. Для реализации такого измерения потребуется сложный комплекс лабораторного оборудования ледовой лаборатории и специальный высокочувствительный измерительный комплекс.

В поставленном эксперименте исследовалась анизотропия сил трения скольжения монокристалла льда при его движении с замедлением от начальной скорости движения до остановки. Поэтому был введен условный коэффициент трения скольжения H . Этот коэффициент рассчитывался как отношение расстояния, пройденного монокристаллом M_2 в эксперименте, при котором С-оси перпендикулярны друг к другу, к расстоянию, при котором С-оси монокристаллов M_1 и M_2 параллельны. При этом начальные скорости движения кристаллов были одинаковы.

Максимальной начальной скоростью движения монокристалла M_2 соответствует максимальный пройденный им путь. Положим, что в первом эксперименте длина пройденного монокристаллом пути равна l_1 , а во втором эксперименте начальная скорость движения монокристалла была меньше и меньше был пройденный им путь l_2 . Введем L — относительную начальную скорость движения монокристалла, равную l_2/l_1 , как отношение длин пройденных путей (пропорциональных начальным скоростям движения монокристалла). Эту величину будем использовать при исследовании зависимости анизотропии трения скольжения монокристаллов льда от скорости их движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты измерения коэффициента трения покоя монокристаллов льда при различной ориентации С-осей монокристаллов друг относительно друга представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость коэффициента трения покоя монокристаллов льда f от взаимной ориентации С-осей (рис. 1) монокристаллов льда при различных временах выдержки Δt

Table 1

The dependence of the rest friction coefficient of single ice crystals f on the mutual orientation of the C-axes (fig. 1) of single ice crystals at different exposure times Δt

Схема ориентации С-осей	Δt , с	λ , град.	f
<i>a</i>	5	31, 43, 28, 31, 33, 33, 25, 26, 36	0,55±0,15
	60	65, 75, 73	4±1
	600	90, 90, 90	→∞
<i>б</i>	5	18, 25, 18, 16, 18, 27, 18	0,36±0,05
	60	45, 57, 55, 48	1,3±0,3
	600	89, 90	→∞
<i>в</i>	5	58, 38, 46, 50, 38, 40	1,0±0,3
	60	90, 90, 90	→∞
	600	90, 90, 90	→∞
<i>г</i>	5	18, 24, 25, 16, 18, 22, 18	0,36±0,07
	60	32, 33, 22, 27, 41	0,59±0,16
	600	83, 66, 77	4,8±2,8

Примечание. В первом столбце — схемы ориентации С-осей монокристаллов согласно рис. 1; Δt — время пребывания монокристалла M_1 на поверхности монокристалла M_2 ; λ — критический угол наклона в градусах, при котором по поверхности монокристалла льда M_1 начинал скользить монокристалл льда M_2 ; f — коэффициент трения покоя.

Note. The first column contains the orientation schemes of the C-axes of single crystals according to Fig. 1; Δt is the residence time of a single crystal M_1 on the surface of a single crystal M_2 ; λ is the critical angle of inclination in degrees at which a single crystal of ice M_2 began to slide on the surface of a single crystal of ice M_1 ; f is the rest coefficient of friction.

Из таблицы видно, что коэффициент трения покоя зависит от взаимной ориентации С-осей монокристаллов M_1 и M_2 . Коэффициент трения покоя изменялся от 0,36 до 1,0 при времени выдержки Δt , равной 5 секунд, и от 4,8 до ∞, при времени выдержки Δt равной 600 секунд.

Коэффициент трения покоя достаточно стабилен для каждой конкретной ситуации. Максимальный коэффициент вариации (схема *в*, $\Delta t = 5$ секунд) составил 0,3.

Эксперимент показал, что после 4–5 измерений поверхности монокристаллов изменяют свои свойства, при этом перестает проявляться анизотропия сил трения покоя. При этом критический угол наклона в любой из схем расположения С-осей при выдержке, равной 5 секундам, составлял 30–35°. Если обработать поверхности монокристаллов снова, как указано выше, значения коэффициентов трения покоя восстанавливаются в соответствии с данными, указанными в табл. 1.

Так же, как и в случае с трением покоя, при исследовании трения скольжения поверхности монокристаллов после 4–5 опытов изменяют свои свойства, и анизотропия сил трения скольжения перестает проявляться. При этом длины путей, которые проходят монокристаллы льда, одинаковы и уже не зависят от взаимной ориентации их С-осей друг относительно друга. После повторной обработки поверхностей монокристаллов по вышеописанной методике анизотропия трения скольжения монокристаллов восстанавливалась.

Было обнаружено, что после нахождения на воздухе в холодной лаборатории в течение 12–15 минут особенности поверхностей монокристаллов льда, проявляющиеся в анизотропии сил трения покоя и трения скольжения, сводились на нет.

В табл. 2 представлены результаты измерений анизотропии монокристаллов льда при трении скольжения. Каждой ситуации в таблице (№ эксперимента) соответствует определенная начальная скорость движения монокристалла льда, определяемая первоначальной деформацией пружины.

Таблица 2

Зависимость расстояния S , которое проходит монокристалл M_2 при скольжении по поверхности монокристалла M_1 , от взаимной ориентации С-осей кристаллов M_1 и M_2 (рис. 2) для различных значений начальной скорости движения монокристалла M_2
Table 2

The dependence of the distance S travelled by a single crystal M_2 when sliding along the surface of a single crystal M_1 on the mutual orientation of the C-axes of the crystals M_1 and M_2 (fig. 2) for different values of the initial velocity of the single crystal M_2

№ эксперимента	Ориентация С-осей монокристаллов льда M_1 и M_2	S , см	$S \pm \Delta S$, см
1	<i>a</i>	65, 70, 80, 80	$74 \pm 7,5$
	<i>b</i>	45, 42, 40, 40	$42 \pm 2,4$
2	<i>a</i>	45, 55, 65	55 ± 10
	<i>b</i>	29, 35, 38	$34 \pm 4,6$
3	<i>a</i>	31, 42	$36,5 \pm 7,8$
	<i>b</i>	26, 28	$27 \pm 1,4$
4	<i>a</i>	24, 26, 25	25 ± 1
	<i>b</i>	18, 19, 17	18 ± 1

Примечание. S — расстояния, пройденные монокристаллом M_2 , см; $S \pm \Delta S$ — средние значения и стандартные отклонения расстояний, пройденных монокристаллом M_2 , см

Note. S is the distances covered by the M_2 single crystal, cm; $S \pm \Delta S$ is the average values and standard deviations of the distances traveled by the M_2 single crystal, cm

Результаты измерения зависимости коэффициента трения скольжения монокристалла H от относительной скорости его движения L представлены на графике рис. 3.

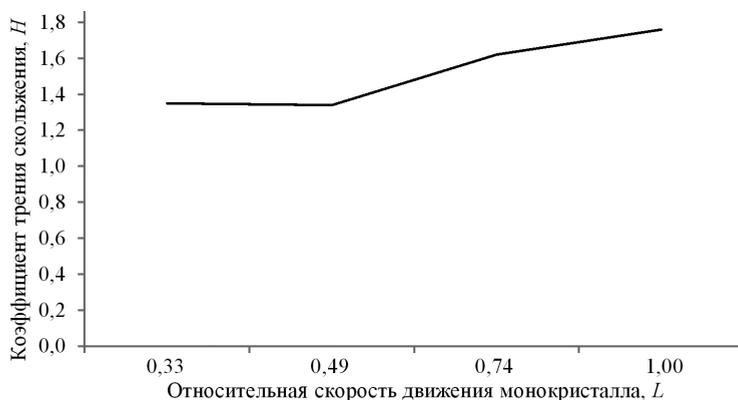


Рис. 3. График зависимости коэффициента анизотропии трения скольжения H от L — относительной начальной скорости движения монокристалла M_2

Fig. 3. Graph of the dependence of the coefficient of anisotropy of sliding friction H on L — the relative initial speed of motion of the single crystal M_2

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДЫ

Льды природных водоемов: речные, озерные, морские — в верхних слоях ледяного покрова, там, где они мелкокристаллические, как правило, изотропны. В нижних слоях ледяного покрова кристаллы льда значительно крупнее и вытянуты по вертикали. Базисные плоскости этих кристаллов перпендикулярны поверхности замерзания льда [9]. Анизотропия прочностных и реологических характеристик льда нижних слоев ледяного покрова ярко выражена и обусловлена анизотропией механических характеристик кристаллов льда. Известно, что монокристалл льда состоит из базисных пластин — элементарных пластин, разделенных между собой плоскостями ослабления или трансляции. В работах [10, 11] была исследована анизотропия механических, прочностных и реологических характеристик монокристаллов льда. Было показано, что основным механизмом, определяющим анизотропию механических свойств монокристалла льда, является способность базисных пластин монокристалла скользить друг относительно друга.

Проведенное исследование носит феноменологический характер, поэтому можно лишь высказать предположение, объясняющее анизотропию сил трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда. Допустим, что базисные пластины определяют также и анизотропию сил трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда. Предположим, что при оплавлении монокристалла льда на латунной плите промежутки между базисными пластинами (объемы ослабления) расплавляются несколько интенсивней, чем базисные пластины. Это придаст микроструктуре поверхности монокристалла льда вид «стиральной доски». Такое предположение позволяет в первом приближении объяснить основные закономерности, обнаруженные в данной работе, при измерениях сил трения покоя и трения скольжения для различных ориентаций S -осей монокристаллов. При параллельном расположении S -осей монокристаллов льда силы трения покоя и трения скольжения превышают силы трения в случаях, когда S -оси монокристаллов перпендикулярны.

Из табл. 1 и рис. 1 видно следующее. Если S -оси монокристаллов льда параллельны друг другу (эксперименты по схеме a и по схеме b), то коэффициенты трения покоя значительно превышают коэффициенты трения покоя в случае, если S -оси монокристаллов льда перпендикулярны друг другу (эксперименты по схеме b и по схеме z).

В экспериментах, проведенных по схемам a и b , S -оси обоих монокристаллов параллельны. Но различно было направление движения монокристалла M_2 по поверхности M_1 . Если в эксперименте по схеме a направление движения монокристалла M_2 было перпендикулярно S -осям монокристаллов M_1 и M_2 , то в эксперименте по схеме b направление движения монокристалла M_2 было параллельно S -осям монокристаллов.

Эксперимент показал, что коэффициент трения покоя в случае, когда направление движения монокристаллов друг относительно друга параллельно S -осям монокристаллов (эксперимент по схеме b), превышает коэффициент трения покоя монокристаллов, движущихся перпендикулярно S -осям (эксперимент по схеме a). Первоначально монокристаллы находились в одинаковых условиях, в обоих случаях базисные пластины монокристаллов были параллельны друг другу. Оказалось, что для приведения в движение монокристаллов друг относительно друга параллельно базисным пластинам требуется меньшая сила, чем для приведения в движения монокристаллов перпендикулярно базисным пластинам.

В экспериментах по схеме b коэффициент трения покоя растет быстрее с увеличением времени пребывания Δt монокристалла M_2 на поверхности монокристалла M_1 ,

чем в экспериментах по схеме *a*. При реализации экспериментов по схеме *b* было обнаружено, что только в этом случае коэффициент трения покоя $f \rightarrow \infty$ уже при времени выдержки монокристалла M_2 на поверхности монокристалла M_1 , равной 60 секундам. То есть только в этом случае монокристаллы смерзаются уже через 60 секунд.

Результаты измерения показали, что коэффициенты трения покоя при реализации экспериментов по схемам *b* и *z*, то есть когда С-оси монокристаллов M_1 и M_2 перпендикулярны друг другу, значительно меньше, чем в случаях при параллельном расположении С-осей монокристаллов M_1 и M_2 .

Сравнивая результаты экспериментов, проведенных по схеме *b* и *z*, можно увидеть, что коэффициенты трения покоя при временной выдержке $\Delta t = 5$ секунд у них равны, затем начинают проявляться различия. Так, если временная выдержка увеличивается до 60 секунд, то коэффициент трения покоя в экспериментах по схеме *b* увеличивается в 5,1 раза, а в экспериментах по схеме *z* увеличивается всего лишь в 1,6 раза.

При еще более длительной выдержке $\Delta t = 600$ секунд коэффициент трения покоя монокристаллов льда в экспериментах, проведенных по схеме *b*, равен бесконечности (монокристаллы смерзлись), а коэффициент трения покоя в экспериментах, проведенных по схеме *z*, равен 4,8. Монокристаллы не смерзлись, и это единственный случай, когда монокристаллы льда, пребывая в соприкосновении в течение 10 минут, не смерзлись. Этот эффект обусловлен основным свойством роста монокристалла льда: молекула H_2O легко присоединяется к краям базисной плоскости, а образование новой базисной плоскости затруднено, поскольку этот процесс более энергозатратный (снежинки плоские; по мере роста ледяного покрова кристаллы с С-осью, параллельной поверхности ледяного покрова, становятся преобладающими [9]). В рассмотренном случае один из монокристаллов, а именно M_2 граничит с монокристаллом M_1 плоскостью базисной пластины, присоединение к которой молекул H_2O затруднено энергетически. Поэтому монокристаллы не смерзлись, даже пребывая в соприкосновении в течение 10 минут.

Нахождение монокристалла льда на воздухе в холодной лаборатории приводит к уменьшению и затем к полному исчезновению анизотропии сил трения покоя и скольжения. Проведенные эксперименты дают основания предположить, что это объясняется конденсацией водяного пара на поверхностях монокристаллов. При этом на поверхности монокристалла образуются участки, покрытые пленкой воды, при замерзании которой образуется лед. Эти пленки воды и «корочки» льда скрадывают уникальные особенности поверхности монокристалла льда, проявляющиеся в анизотропии сил трения. В случае нахождения монокристалла M_2 на поверхности монокристалла M_1 этот механизм уменьшения анизотропии исключается, так как к поверхностям соприкосновения монокристаллов льда не поступает воздух, содержащий водяной пар.

Вопросам тонкой структуры поверхности льда посвящена работа [3]. В ней автор пишет: «Структура и свойства поверхности льда, граничащей с паром, остается во многом неясной. Одна из наиболее интригующих гипотез, выдвинутая еще М. Фарадеем, заключается в существовании на поверхности льда квазижидкого слоя толщиной в десятки-сотни ангстрем. Основанием для этого являются не только умозрительные построения и теории структуры приповерхностных слоев из сильно поляризованных молекул H_2O , но и тонкие измерения (методом ядерного магнитного резонанса) фазового состояния поверхности льда, а также его поверхностной проводимости. Однако в большинстве практически важных случаев свойства поверхности льда, скорее всего, определяются наличием макроскопической водяной пленки, а не

квазижидкого слоя» [3, с. 70]. В работе [4] автор рассматривает методики измерения характеристик тонких поверхностных слоев и пленок.

Таким образом, в этих работах подтверждается наше предположение об образовании из водяного пара тонкой пленки воды на поверхности монокристалла, приводящей к уменьшению анизотропии сил трения монокристаллов льда.

Результаты измерений сил трения покоя в первом приближении объясняются нашим предположением о волнообразной микроструктуре поверхности монокристалла, обусловленной базисными пластинами и зонами ослабления между ними.

В работе [5] были проведены измерения анизотропии сил кинетического трения, возникающей при скольжении шарика из карбида вольфрама в различных направлениях по поверхности монокристалла льда. Также измерялась ширина дорожки, образующейся на поверхности монокристалла. Анизотропия была обнаружена как в коэффициенте трения, так и в ширине дорожки. Ширина дорожки была максимальной при скольжении шара по нормали к базисным плоскостям и минимальной при движении параллельно им. Хотя коэффициент трения был минимальным при скольжении по нормали к базисным плоскостям и максимальным параллельно им. Анизотропию ширины дорожки автор объяснил с точки зрения величины вклада механизма скольжения в деформацию образца.

Из графика на рис. 3 видно, что коэффициент анизотропии трения скольжения H растет с ростом начальной скорости движения монокристалла M_2 по поверхности монокристалла M_1 (от пройденного пути, определяемого начальной скоростью движения M_2 по поверхности M_1). Это можно объяснить ростом пройденного кристаллом M_2 пути и увеличением времени взаимодействия монокристаллов льда, в течение которого и проявляются свойства анизотропии, растет и площадь поверхностей монокристаллов, пребывающих в соприкосновении.

В работах [6, 7] было продемонстрировано наличие анизотропии механических характеристик монокристаллов льда, которые обусловлены скольжением базисных пластин монокристалла друг относительно друга.

В настоящей работе показана определяющая роль базисных пластин монокристалла льда в формировании особой характеристики микроструктуры его поверхности, проявляющейся в макроскопической анизотропии сил трения покоя и трения скольжения.

Обнаруженная анизотропия сил трения покоя может опосредованно проявляться при исследовании прочностных характеристик льдов, состоящих из крупных, вертикально ориентированных кристаллов. В ледяном покрове, состоящем из этого типа льда, уже с уровня 40 см и ниже кристаллы льда вертикально ориентированы. Их S -оси параллельны верхней поверхности ледяного покрова и расположены хаотично. В случае, если S -оси двух соприкасающихся кристаллов перпендикулярны друг другу, то, при возникновении во льду напряжения, эти кристаллы с большей вероятностью смогут перемещаться друг относительно друга, чем пара соприкасающихся кристаллов с параллельной ориентацией S -осей.

Основным результатом данного исследования является экспериментальное подтверждение наличия у монокристаллов льда анизотропии сил трения покоя и трения скольжения.

Проведенная работа по измерению характеристик сил трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда представляет научный интерес и практическое значение.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена по теме «Исследование крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов» ЦНТП 052626 раздел 5.1.5.

Competing of Interest. The author declares that there is no conflict of interest.

Funding. The work was carried out on the topic “Study of large-scale dynamics, physical processes, mechanics of deformation and destruction of sea ice” CSTC 052626 section 5.1.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1964. 847 с.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
3. Головин Ю.И. Вода и лед — знаем ли мы о них достаточно? // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 9. С. 67–72.
4. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрорежимах, тонких приповерхностных слоях и пленках // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. № 12. С. 2113–2141.
5. Tusima K. Anisotropy of the kinetic friction on a single crystal of ice // Journal of Glaciology. 1978. V. 21. № 85. P. 661–668.
5. Mishima O., Stanley E. The Relationship between Liquid, Supercooled and Glassy Water // Nature. 1998. V. 396. P. 329–335.
7. Черепанов Н.В. Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 77–99.
8. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1970. Т. 1. 492 с.
9. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед: Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 384 с.
10. Steinemann S. Results of preliminary experiments on the plasticity of ice crystals // Journal of Glaciology. 1954. V. 2. № 16. P. 404–412.
11. Higashi A. Mechanical properties of ice single crystals // Physics of snow and ice: Proc. of int. symposium. Munich; N.Y., 1969. P. 197–212.

REFERENCES

1. Yavorsky B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike*. Handbook of Physics. Moscow: Nauka, 1964: 847 p. [In Russian].
2. Khaikin S.E. *Fizicheskie osnovy mehaniki*. Physical Foundations of Mechanics. Moscow: Nauka, 1971: 752 p. [In Russian].
3. Golovin Yu.I. Water and Ice — do we know enough about them? Soros Educational Journal. 2000, 6 (9): 67–72. [In Russian].
4. Golovin Yu.I. Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers and films. Physics of solid state. 2008, 50 (12): 2113–2141. [In Russian].
5. Tusima K. Anisotropy of the Kinetic Friction on a Single Crystal of Ice. Journal of Glaciology. 1978, 21 (85): 661–668.
6. Mishima O., Stanley E. The Relationship between liquid, supercooled and glassy water. Nature. 1998, 396: 329–335.
7. Cherepanov N.V. Classification of ice in natural waters. *Trudy AARI*. Proc. of AARI. 1976, 331: 77–99. [In Russian].
8. Sedov L.I. *Mehanika sploshnoj sredy*. Mechanics of continuous medium. Moscow: Nauka, 1970, 1: 492 p. [In Russian].
9. Bogorodsky V.V, Gavrilov V.P. *Led. Fizicheskie svoystva. Sovremennye metody glyatsiologii*. Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 384 p. [In Russian].
10. Steinemann S. Results of preliminary experiments on the plasticity of ice crystals. Journal of Glaciology: 1954, 2 (16): 404–412.
11. Higashi A. Mechanical properties of ice single crystals. Physics of snow and ice: Proc. of int. symposium. Munich; N.Y., 1969: 197–212.