

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ И В ДРЕЙФУЮЩЕМ ЛЬДУ АРКТИКИ

**В. Н. Смирнов, М. С. Знаменский, В. В. Алексеев, В. В. Иванов**

*Арктический и Антарктический НИИ,  
Россия, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38,  
e-mail: smirnov@aari.ru*

Морской лед в Арктике является одним из основных динамических элементов во взаимодействующей системе атмосфера–лед–океан. В настоящее время теоретические и экспериментальные исследования дрейфующего и припайного льда используются для разработки прогностических моделей механического состояния морского льда. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования физико-механических процессов на поверхности Северного Ледовитого океана. Полевые работы проводились с использованием автономных сейсмических станций непосредственно на дрейфующем льду. Получены данные о поверхностных гравитационных волнах океана, сопровождаемых периодическими деформациями изгиба и сдвига в ледяных полях. На основе амплитудных спектров скорости смещения во льду рассмотрены особенности процесса распространения штормовых волн зыби в ледяном покрове и выполнен сравнительный анализ с картами приземного атмосферного давления и значительных высот морских волн. Существенным фактором является использование микросейсмических колебаний, зафиксированных на прибрежных станциях Гренландского моря для определения времени и места мощного шторма. Амплитудные спектры волн в ледяном покрове указывают на увеличение частоты колебаний, обусловленное дисперсией поля волн. Получены новые данные по крупномасштабной механике возникновения трещин в ледяном покрове и дискретных изгибно-гравитационных волн, как одних из основных показателей разрушения льда. Результаты исследования важны для совершенствования моделей, связанных с прогнозированием погоды и климата, а также для решения инженерных задач на арктическом шельфе.

**Ключевые слова:** Атлантика, шторм, микросейсмы, зыбь, дисперсия, дрейфующий лед, механика разлома льда

### Введение

За последние десятилетия одним из самых заметных последствий современного изменения климата стало уменьшение объема арктического морского льда, отмеченного в экспедиционных измерениях толщины ровного льда и торосов. Динамика дрейфующего морского льда вносит существенный вклад в климатическую систему Арктики. Процессы воздействия на лед поверхностных и внутренних гравитационных волн, пространственные и временные масштабы механики деформирования и разрушения льда являются одними из главных звеньев арктической системы. Спутниковые изображения блоковой сетки каналов и разводий во льду, а также характер

подвижек на большой площади, свидетельствуют о проявлении сдвиговых форм разрушения льда (Легеньков, 1988; Смирнов, Чмель, 2006). Появляющиеся разломы и сдвиги образуют обширные разводья в ледяном покрове, приводящие к термодинамическим изменениям в общей арктической системе.

Особый интерес представляют исследования явлений зарождения и распространения поверхностных гравитационных волн в морских льдах Арктики, для совершенствования метода изучения крупномасштабной механики разрушения льда и образования разводий. При возникновении трещин и разломов во льду генерируется широкий спектр различного рода колебаний и волн. Если энергии в источнике достаточно, чтобы возбудить гравитационные колебания льда, т. е. колебания совместно с водой, то в результате образуются изгибно-гравитационные волны (flexural-gravity waves – FGW), (Hunkins, 1960; Смирнов, 1996; Wadhams, Doble, 2009). Серии спектров поверхностных волн от шторма в Атлантическом океане указывают на эффект уменьшения периода волны с 20 до 17 секунд в течение 14 часов (Munk, 1947). В работе (Robin, 1963) с помощью судового волнографа были измерены волны на открытой воде, при прохождении через битый лед, скопление ледяных полей и при проникновении в припайный лед. Диапазон периодов волн составлял от 2 до 30 сек. В сплошном льду энергия волн убывает с расстоянием пропорционально отношению  $h_i^3 / \lambda^4$ , где  $h$  – толщина льда,  $\lambda$  – длина волны (Robin, 1963). Для волн с периодом 16 сек. и более заметных потерь энергии не происходит. В Северном Ледовитом океане (СЛО) волны зыби с периодом до 50 сек., фазовой скоростью распространения до 60 м/с и длиной волны до 2 км вызывают резонансные явления в диапазоне изгибно-гравитационных волн, обусловленных ветровым воздействием на лед (Сытинский, Трипольников, 1964). У штормовых волн зыби, распространяющихся через зону разрушенных льдов и в сплошном ледяном покрове было зарегистрировано уменьшение периода колебаний со временем до 20 сек., что позволило оценить расстояние до источника волн (Wadhams, Doble, 2009). Волны зыби, образовавшиеся после шторма, в результате дальнейшего распространения в океане и трансформации при нелинейном взаимодействии с морским дном шельфовых районов, были названы инфрагравитационными волнами (IGW). Существуют сложности в понимании процесса образования IGW даже с учетом известных траекторий циклона, поэтому предполагалось, что в рассматриваемом районе одновременно действовали стационарные источники волн широкого спектра (Wadhams, Doble, 2009). На пространстве в тысячи километров не отмечается существенного затухания IGW во льдах с частотой до 0.03 Гц. В работе (Bromirski et al., 2010) в серии частотных спектров гравитационных волн в морях Антарктики также указывается на эффект увеличения частоты волн зыби со временем. Выводные шельфовые ледники с установленными на них сейсмометрами чувствительны к воздействию IGW. В работе (Marsan et al., 2019) были отмечены две моды колебаний льда. Режим дисперсионных IGW с периодами до 30 сек. связан с волнами зыби от штормов на удаленном расстоянии. Не дисперсионный режим отмечается волнами без частотной дисперсии (типа волн-SH), т. е. горизонтально-поляризованными колебаниями во льду при сдвиговой деформации вдоль разломов и разводий

вне станций наблюдения на пространстве сотни километров. Горизонтальные колебания типа SH-волн (shear wave – поперечная упругая волна-S) могут распространяться когерентно, по крайней мере, до расстояния 30–80 км. Следует отметить, что этот режим может быть вызван сдвиговыми деформациями в ледяном покрове на значительной площади в удаленных районах с возникновением горизонтальных автоколебательных процессов во льду (Смирнов и др., 2019).

Зародившиеся в шторме волны зыби, двигаясь по чистой воде, трансформируются в IGW, которые затем проходят через кромку льдов в сплошной ледяной покров, где и регистрируются в виде серии спектров со сдвигом пика частоты. Особенность этого спектра заключается в увеличении частоты пика IGW в течение 36 ч. Можно предложить использовать термин IGW в условиях распространения в арктических морских льдах применительно к периодам более 20 сек. (Wadhams, Doble, 2009). Как уже указывалось, при длительном распространении на большие расстояния волны зыби регистрировались в дрейфующем льду с периодами до 50 сек. Несмотря на небольшие амплитуды в океане, волны зыби при прохождении на шельфе могут разрушать припайный лед.

Настоящая статья является продолжением анализа волновых явлений на поверхности Северного Ледовитого океана, отмеченных в экспедиции MOSAIC-19 (Смирнов и др., 2022). Для исследования источников волновых процессов в океане рассматривается период возникновения мощного шторма в Северной Атлантике. Приводятся характеристики волн в дрейфующем ледяном покрове в одном из самых интенсивных ледовых событий 16–17 февраля 2020 г. Показаны возможности изучения крупномасштабной механики деформирования и разрушения льда инфрагравитационными волнами.

### Методы наблюдений

Измерение волновых процессов в морском льду проводилось с использованием методов сейсмометрического мониторинга состояния льда. Описание измерительной техники и методики наблюдений можно найти в работах (Смирнов и др., 2021, 2022). В наблюдениях использовалась система мониторинга динамики льда, разработанная в ААНИИ с расстановкой трех сейсмостанций Альфа, Бета и Гамма по треугольной схеме со сторонами до 600 м. Форма записи у всех станций почти синхронна, и для построения временных ходов достаточно данных от любой станции. Колебания льда измерялись при помощи трехкомпонентных датчиков скорости смещения модели СМЕ–4311 с чувствительностью  $4000 \text{ В/мс}^{-1}$  и с линейной амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне 0.017–50 Гц. Данные регистрировались с дискретностью 100 Гц. Временная синхронизация данных, трекинг геопозиции осуществлялись с помощью спутниковых систем геопозиционирования GPS/GLONASS. Источником электропитания сейсмостанций служили заменяемые аккумуляторные батареи. Поток собранных данных передавался на базовую станцию, размещенную на судне «Polarstern»,

по радиоканалу в режиме реального времени. В состав первичной обработки данных входили методы построения профилей компонент скоростей смещения льда, методы построения и анализа амплитудно-временных спектров волновых процессов, анализ метеорологических, синоптических, океанологических и сейсмологических данных. Локальные метеорологические элементы были получены из архива метеостанции судна «Polarstern». Микросейсмические данные были получены из архива наблюдений GEOFON–EIDA со станций Датской национальной сейсмологической сети.

## Результаты

Рассмотрим основные результаты исследования процессов зарождения и распространения штормовой зыби в дрейфующем морском льду Арктики 16–17 февраля 2020 г. Мощный шторм располагался в Северной Атлантике на широте  $60^\circ$  с. ш., дрейфующая станция находилась в районе Северного Полюса в точке с координатами  $88.07^\circ$  с. ш.,  $87.68^\circ$  в. д. Данное событие явилось одним из самых интенсивных проявлений поверхностных гравитационных волн за все время наблюдений в экспедиции MOSAIC. Несколько более слабых событий на дрейфующем льду были отмечены ранее в работе (Смирнов и др., 2022).

В штормовой области, рассматриваемой нами как генератор волновой энергии, образуются, как будет показано далее, свободные поверхностные гравитационные волны широкого спектра частот. Поле волн от шторма способно преодолевать большие расстояния по чистой воде и проникать в сплошной дрейфующий ледяной покров.

На рисунке 1 представлены временной ход волновых характеристик льда и метеоданных за период наблюдений 9–18 февраля 2020 г., где отмечаются два события: колебания льда, связанные с ветром 12.02–14.02, и интенсивный цуг вертикальных колебаний 16.02.2020–17.02.2020. В первом случае возникло повышение амплитуды колебаний льда из-за воздействия ветра со скоростью 14 м/с и образование FGW.

Во втором случае в результате удаленного шторма образовались поверхностные гравитационные волны, прошедшие большое расстояние по чистой воде, через кромку льдов и, как будет показано далее на рисунке 3, зарегистрированные на дрейфующей станции в диапазоне частот 0.030–0.048 Гц. Выборочные оценки характеристик волн зыби, измеренные по трем точкам на льду, составляли: фазовая скорость – до 40 м/с, длина волны при периоде 30 сек. могла достигать 1200 м. Оценка величины вертикального смещения в гравитационной волне, полученная с помощью метода расчета истинного смещения, составила более 20 мм (рисунок 2).

Кроме вертикальных колебаний льда на рисунке 1 отмечены горизонтальные компоненты скорости смещения, представляющие собой как составляющие орбитального движения частиц льда при изгибе ледяного поля волной, так и самостоятельные смещения льда при горизонтальных подвижках в ледяном покрове. В настоящей статье эти колебания детально не анализируются, но используются как вспомогательные характеристики для выявления особенностей динамических процессов.

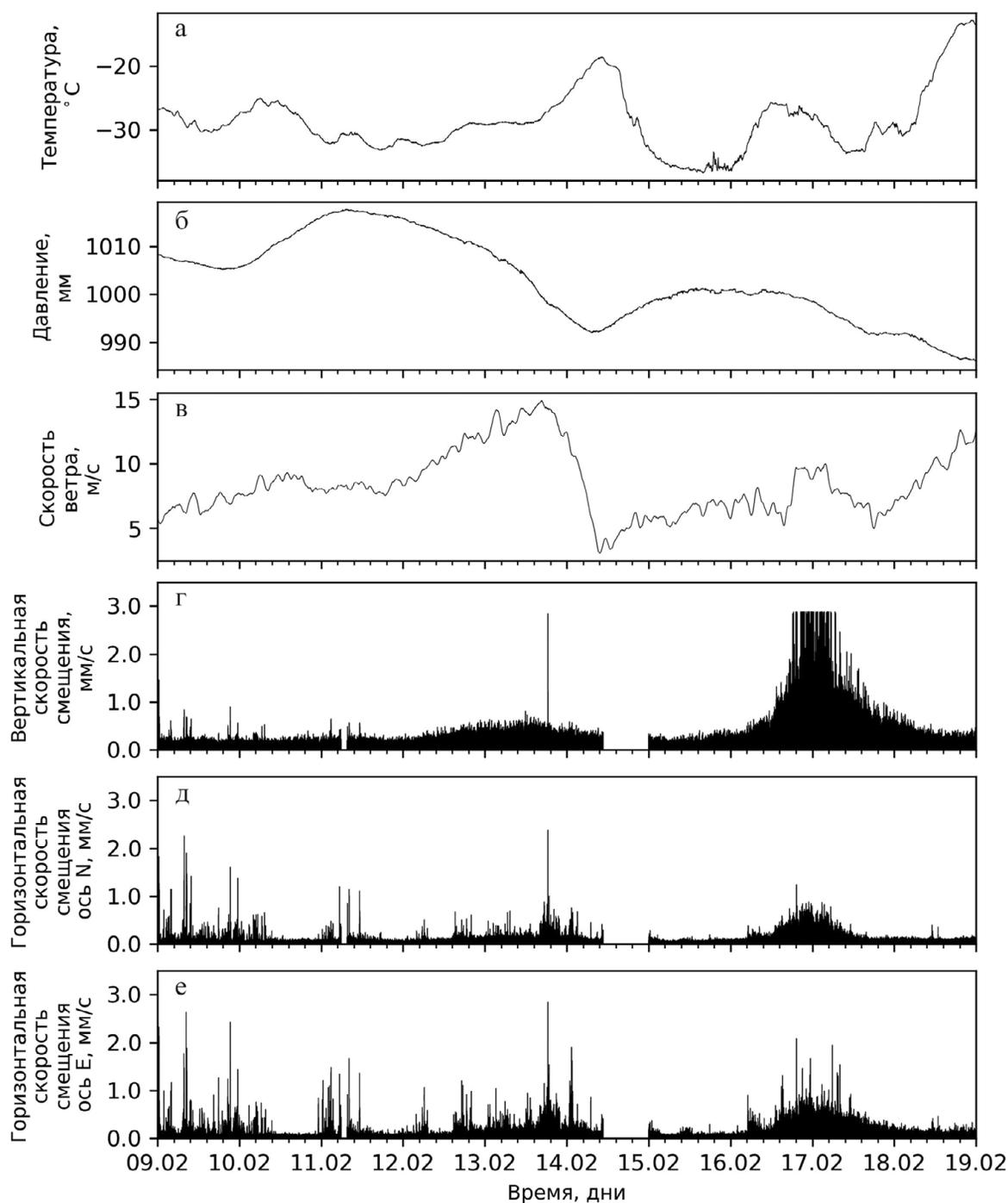


Рис. 1 – Метеорологические и ледовые характеристики за период 09.02.2020–18.02.2020:  
а – температура; °С; б – давление, мм рт. ст.; в – скорость ветра, м/с;  
г – вертикальная скорость смещения, мм/с; д, е – горизонтальные компоненты скорости смещения льда по осям N и E, мм/с

Как показано на рисунке 2, амплитудно-временной сигнал вертикальной скорости смещения демонстрирует резкое увеличение амплитуды вертикальных колебаний после 18 часов 16 февраля.

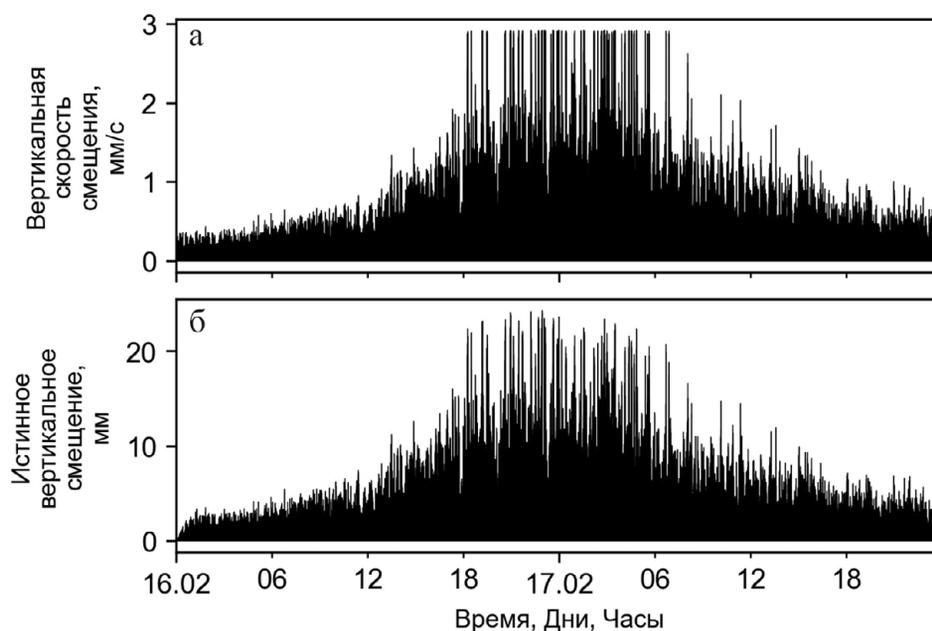


Рис. 2 – Сопоставление значений амплитуд колебаний различной размерности на льду в период 16–17 февраля 2020: а – вертикальной скорости смещения, мм/с; б – истинного вертикального смещения, мм льда на станции Бета

Форма огибающей сигнала вертикальной скорости указывает на то, что величина сигнала достигла критических для датчика значений в 3 мм/с. Это является верхней границей его динамического диапазона. Можно предположить, что в состав сигнала вертикальной скорости входили импульсы с величиной скорости, превышающей значение 3 мм/с.

На рисунке 3 представлена серия спектров рассматриваемого процесса, полученная методом преобразования Фурье сигнала вертикальной скорости смещения льда. Процесс имеет оформленные границы, за пределами которых переходит в фоновые значения. Частотный диапазон рассматриваемого волнового процесса, в котором располагалась основная энергия колебаний, составляет 0.030–0.050 Гц, что позволяет отнести его к IGW. На основании ранее полученных результатов интенсивный цуг вертикальных колебаний был обусловлен приходом океанических волн зыби от удаленного шторма (Смирнов и др., 2022). Можно предположить, что поле зыби, зародившееся в мощном шторме, прошло по чистой воде, трансформировалось в IGW и было зарегистрировано в дрейфующем льду с периодами 20–30 сек. Поле волн изменяло свои частотные характеристики во время развития процесса. Спектрограмма на рисунке 3а указывает на эффект увеличения частоты волнового сигнала от 0.036 до 0.048 Гц в течение 36 часов. Волновой сигнал характеризуется импульсами определенной периодичности и большой амплитуды, выходящей за рамки рабочей характеристики датчика вертикальной скорости.

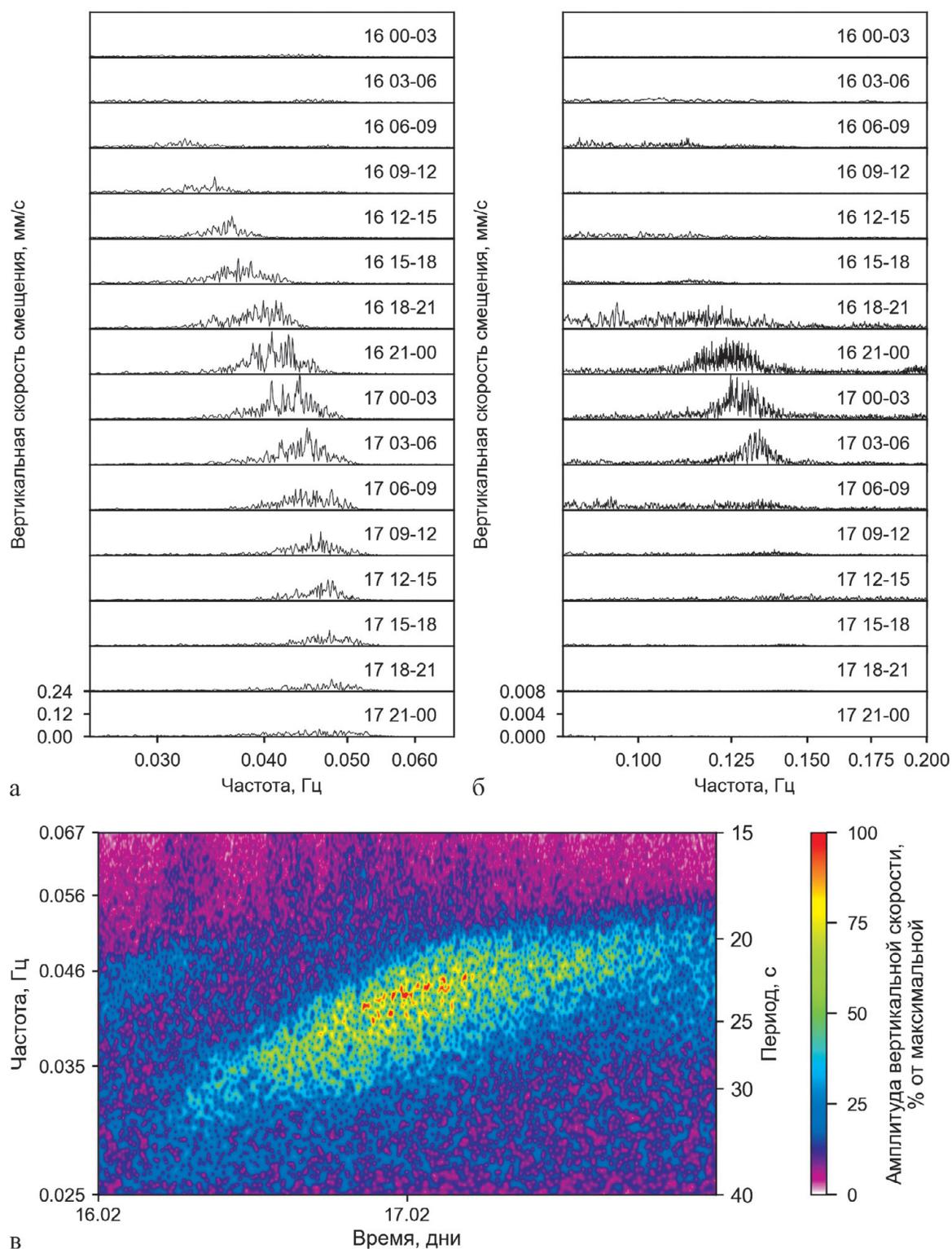


Рис. 3 – Серия амплитудных спектров скорости вертикальной компоненты поля волн в ледяном покрове в период 16.02.2020–17.02.2020:

**а** – в диапазоне частот 0.025–0.067 Гц IGW, мм/с; **б** – в диапазоне FGW 0.1–0.2 Гц, мм/с;  
**в** – вэйвлет спектрограмма вертикальной скорости в диапазоне поверхностных гравитационных волн, % максимальной амплитуды вертикальной скорости

На рисунке 3б представлена серия спектров диапазона изгибно-гравитационных волн, которые можно рассматривать как один из основных признаков механики разрушения льда. Важно отметить, что FGW возникали с 18 часов 16 февраля до 6 часов 17 февраля под воздействием волн инфрагравитационного диапазона. При этом также наблюдался эффект увеличения частоты FGW со временем и, как будет показано далее на рисунке 6, обусловленный повышением частоты IGW. Процесс повышения частоты FGW со временем можно объяснить на основании проявления источником волн упругих импульсов, возникающих с периодичностью половины периода IGW. Уменьшение периода IGW, т. е. увеличение частоты, отражается на динамике спектра FGW. При повышении частоты инфрагравитационных волн от действующего источника пик спектра изгибно-гравитационных волн оказывается так же смещен в область высоких частот, что наблюдается в спектре FGW на рисунке 3б. Особый эффект дисперсии волн отражается в вэйвлет спектрограмме в диапазоне IGW (рисунок 3в): цуг волн начинается с периодом около 35 сек., заканчивается с периодом 20 сек.

#### ***Особенности атмосферных процессов, ветрового волнения, микросейсм в земной коре и поверхностных гравитационных волн в океане***

В настоящей работе природа увеличения частоты свободной гравитационной волны на поверхности океана раскрывается на основе данных о циклонической деятельности в Северной Атлантике и теории распространения волн зыби с дисперсией в океане. С этой целью нами использованы данные приземного давления и карта максимальных значений высот морских волн в зоне формирования штормовых ветров. Анализ развития крупномасштабных атмосферных процессов и особенностей их проявления в западном секторе полярного района Арктики показывает следующее.

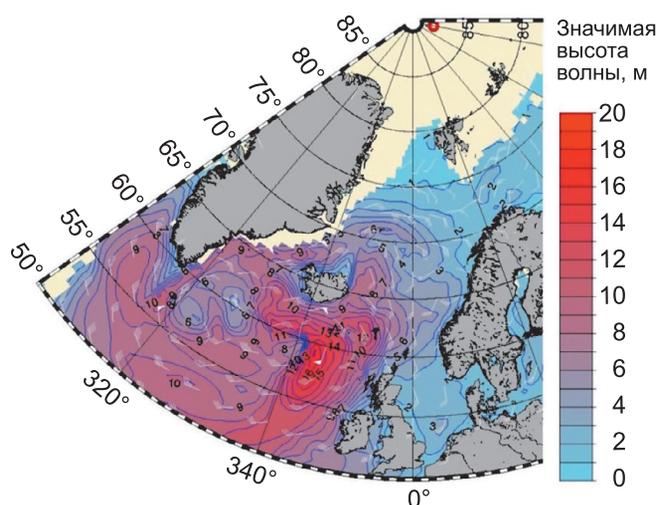


Рис. 4 – Карта значимых высот ветровых волн, скоростей ветра, границ льдов в Северной Атлантике на 15.02.2020 12:00, рассчитанная по модели ветрового волнения AARI-PD2 в разрешении  $1^\circ \times 0,5^\circ$ , ветер NCEP GFS

14 февраля 2020 г. произошло резкое углубление циклона в районе Исландии. Давление в центре циклона понизилось до 936 гПа, что ниже среднего многолетнего значения (нормы) на 49 гПа. В зоне формирования высоких значений градиентов давления отмечалось усиление ветра до штормовых значений. В период 14–16 февраля циклон смещался в северо-восточном направлении. На рисунке 4 представлены результаты расчета значимых высот волн (13 % обеспеченности) с помощью модели ветрового волнения AARI-PD2 по прогностическим данным о ветре на 10-метровом горизонте от мирового центра погоды National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Глобальная версия спектрально-параметрической модели AARI-PD2 выполняла расчет в пространственном разрешении  $1^\circ \times 0.5^\circ$  в оперативном режиме; кромка льда отмечена из реанализа состояния ледяного покрова ЦЛГМИ ААНИИ. На рисунке 4 видно развитие штормовых условий при скоростях ветра до 25 м/сек. и длиной разгона более 1000 км. На 12 часов 15 февраля 2020 г. высота волн 13 % обеспеченности достигала 15 м. Расчетные максимумы этого шторма прогнозировались на акватории между островами Исландия и Ирландия.

Как указано в работе (Wadhams, Doble, 2009), благоприятные условия для развития инфрагравитационных волн могут достаточно хорошо осуществляться в районе между проливом Фрама и центральной Арктикой, где существует относительно прямой глубоководный канал для входа инфрагравитационной волны в Северный Ледовитый океан. Приведенная на рисунке 4 карта указывает на возникновение интенсивного шторма в районе северной Атлантики. Однако подобные карты не дают полной информации о том, что штормовое волнение происходило в реальных временном и пространственном масштабах. С этой целью был использован метод микросейсмического мониторинга микросейсмических данных Датской национальной сейсмологической сети наблюдения на побережье Гренландского моря (рисунок 5). Согласование микросейсмической «бури» в районе предполагаемого шторма 14 февраля 2020 г. позволило получить новые данные о природе и источнике штормовых волн, прошедших затем большое расстояние и зафиксированных в дрейфующем льду.

На рисунке 5 показаны синхронизированные по времени спектрограммы амплитуд волнового процесса в ледяном покрове и микросейсмической бури за период 14–18 февраля 2020 г., полученные методом непрерывного вэйвлет преобразования. Границы области спектров позволяют оценить длительность штормового процесса, породившего диапазон свободных поверхностных гравитационных волн, которые затем трансформировались в диапазон IGW и достигли дрейфующей станции. Имеющиеся данные от других окрестных сейсмостанций дают аналогичные спектры, которые между собой синхронны и сопоставимы по времени и амплитуде. Это позволяет предположить, что площадь, охваченная штормом, создающим микросейсм, могла достигать тысячи квадратных километров. В соответствии с рисунком 5 в период возникновения шторма расширение спектра микросейсм отмечалось в диапазоне периодов 5–10 сек. По спектрограммам гравитационных волн и штормовых микросейсм выполнена оценка времени распространения гравитационных волн из области шторма до точки наблюдения. Получена следующая информация: продолжительность

шторма составляла 36 часов, запаздывание зыби относительно микросейсмической бури не превышало 48 часов, длительность цуга волн зыби в ледяном покрове составила 36 часов, продолжительность самого шторма могла быть намного меньше длительности цуга волн зыби во льду.

Предполагается, что шторм действовал как стационарный процесс, началом которого было время 14 февраля в 12:00 час. К концу суток высота волн достигала максимального развития. Это можно видеть по максимальному расширению полосы спектра микросейсм. Границы полосы микросейсм могут быть оценены в диапазоне периодов 9–7 сек., или полосы частот 0.11–0.14 Гц.

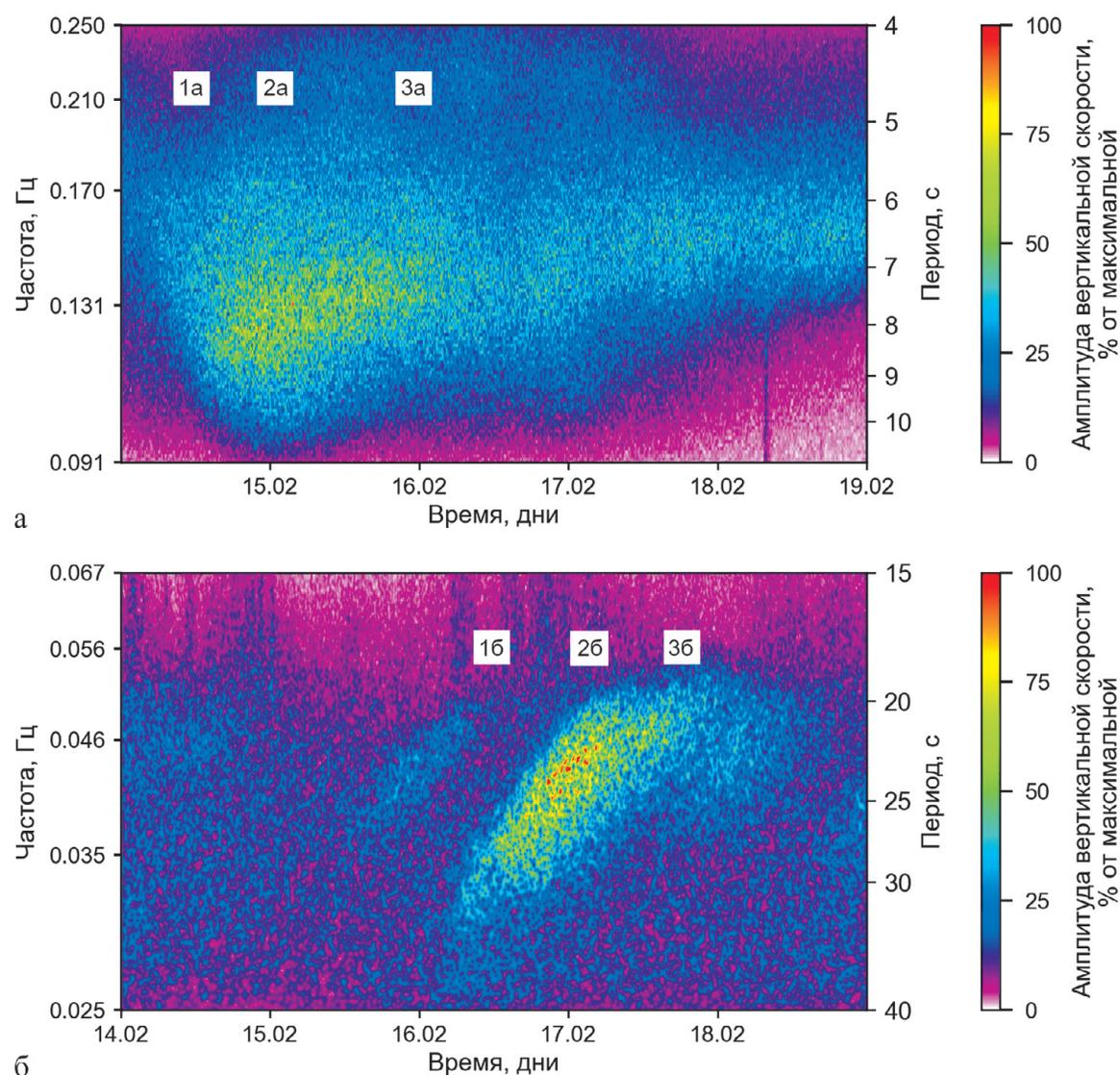


Рис. 5 – Сравнительные спектрограммы процессов в дрейфующем льду и в земной коре: **а** – интенсивность вертикальной компоненты скорости микросейсм на сейсмостанции DK.SCO, расположенной в Гренландии ( $70.48^\circ$  с. ш.,  $21.95^\circ$  з. д.), % максимальной амплитуды вертикальной скорости смещения; **б** – интенсивность вертикальной компоненты скорости IGW на льду в районе Северного Полюса, % максимальной амплитуды вертикальной скорости смещения

Микросейсмическая буря является прямым показателем места и времени действующего шторма с образованием широкого спектра волн и штормовой зыби. Рассмотрим применительно к шторму 14–16 февраля механизм зарождения микросейсм и волн в шторме. Если диапазон периодов микросейсм в буре был в пределах 7–9 сек., то диапазон периодов свободных поверхностных гравитационных волн, покидающих зону шторма, находился в пределах 14–18 сек. По микросейсмическому спектру на рисунке 5 видно, что шторм создал поле свободных поверхностных гравитационных волн.

На дрейфующей станции цуг зыби появился 16 февраля 2020 г. в районе 6 часов. Волны в пределах частотного диапазона 0.036–0.048 Гц были зарегистрированы через 36 часов после зарождения шторма. В соответствии с этими данными волны прошли путь почти в 3000 км до дрейфующей станции, расположенной вблизи Северного Полюса. На синхронизированной по времени спектрограмме на рисунке 5 показаны моменты начала и окончания процессов и их связи между собой. В момент 1а начала развиваться микросейсмическая буря. Можно считать, что это соответствует времени начала шторма. В момент 2а произошло максимальное расширение спектра микросейсм, что, по нашему мнению, свидетельствует о достижении кульминации рождения микросейсм. В штормовой области генерировался спектр широкого диапазона периодов волн. В момент 3а интенсивность шторма начала уменьшаться до фоновых значений и произошло сужение спектра колебаний до почти монохроматического. Микросейсмический «портрет» шторма позволяет оценить его временные масштабы развития в 36 часов. Поле свободных поверхностных волн достигло лагеря дрейфующей станции и было зарегистрировано. В момент 1б пришли первые волны низкочастотной области спектра. Далее по времени на станцию прибывали волны со все более высокой частотой вплоть до момента 2б, когда на станцию прибыли самые высокочастотные волны с наименьшей групповой скоростью волн зыби. К моменту 3б интенсивность ледового динамического события стала снижаться до фоновых значений.

Поверхностные гравитационные волны при распространении от штормового источника диспергируют. Дисперсия – это зависимость скорости распространения (групповой скорости) от длины (периода) волны. Явление увеличения частоты со временем в спектре IGW в ледяном покрове может быть обусловлено несколькими причинами, которые в настоящее время объяснить сложно. Можно остановиться на следующем варианте. Шторм способствует генерации морских волн, распространяющихся концентрически, в том числе и в сторону дрейфующей станции. При этом, в зависимости от длины волны и соответствующей ей скорости, волны приходят на станцию в разное время. Длинноволновая часть спектра приходит раньше, коротковолновая часть – позже. Это четко отражается в амплитудном спектре волн в ледяном покрове со временем. Можно надеяться, что модель механизма трансформации поверхностных волн зыби в инфрагравитационные волны в арктическом льду будет совершенствоваться на основе теоретических и экспериментальных исследований.

Далее для завершения общей картины волновых процессов в СЛО в течении 36 часов приведем предварительные результаты механики деформирования льда волновыми процессами.

### ***Особенности механики деформирования и разрушения льда на основе волновых процессов***

Одними из основных критериев исследования механизма образования трещин во льду являются характеристики объемных и плоских упругих продольных и поперечных волн, а также изгибные колебания в системе лед–вода. Эти признаки указывают на особенности механики деформирования и разрушения льда, отмечая присутствие и изгибно-гравитационных волн. Методика выделения различных типов колебаний и волн в ледяном покрове представлена в монографии (Смирнов, 1996). На основе исходных данных с применением соответствующих полосовых фильтров в широком диапазоне частот можно выделять сигналы, обусловленные трещинообразованием, сдвигами по трещинам и волнами зыби при ветровом сжатии льдов. Дискретные сигналы могут регистрироваться с периодичностью от 5 до 60 сек. В рассматриваемом нами событии дискретные сигналы изгибно-гравитационных волн регистрировались с периодом 13 сек. (рисунок 6).

В соответствии с рисунками 3 и 6 в интервале времени 16.02–18:00 до 17.02–06:00 отмечается цуг изгибно-гравитационных волн в диапазоне частот 0.1–0.2 Гц. Механизм такого процесса может быть обусловлен вертикальным перемещением стенок сжатой трещины при действии изгибной деформации ледяного поля. Это явление происходит под воздействием сформировавшейся инфрагравитационной волны. Стабильность по амплитуде и по интервалам вертикальных импульсов изгибно-гравитационных волн позволяют подойти к описанию механики крупномасштабного процесса деформирования льда. Такое деформирование может происходить на протяженном контакте лед–лед, например, на сквозной сжатой трещине во льду.

Выборочные оценки характеристик упругих продольных волн и изгибно-гравитационных колебаний, измеренные по трем точкам в ледяном покрове во время трещинообразования и дискретного процесса, составляли: скорость распространения – от 10–50 м/с в изгибно-гравитационных волнах и до 500–3000 м/с для акустического диапазона; длина волны на частоте 1 Гц могла достигать 3000 м. Следует отметить, что при такой оценке затруднение в расчетах оказывает наблюдаемая трехмерность волн в ледяном покрове (Сытинский, Трипольников, 1964). Как видно из рисунка 6, дискретные импульсы изгибно-гравитационной волны следуют непосредственно за гребнем и впадиной IGW. Это свидетельствует о механизме сброса напряжений и образовании упругого импульса во льду при условии существующего напряженного состояния льда вследствие термического сжатия и разрежения. Когда волновой пакет повышенной амплитуды покидает пределы измеряемой области, то деформации льда не превышают критических пределов его механической прочности, и сбросы напряжений не происходят. Это еще раз указывает на механику

образования разрушения льда периодической силой от инфрагравитационной волны, в данном случае с периодом 26 сек.

При анализе механики деформирования льда важно учесть внутреннее напряженное состояние ледяного покрова и процесс динамического сжатия и разрежения во льду. Когда волновой пакет повышенной амплитуды покидает пределы измеряемой области, то деформации льда не превышают критических пределов его механической прочности, и сбросы напряжений не происходят.

Согласно характеристикам упругих волн, проявляется механизм образования узкого спектра плоских продольных/поперечных и изгибных колебаний и образование FGW (рисунок б).

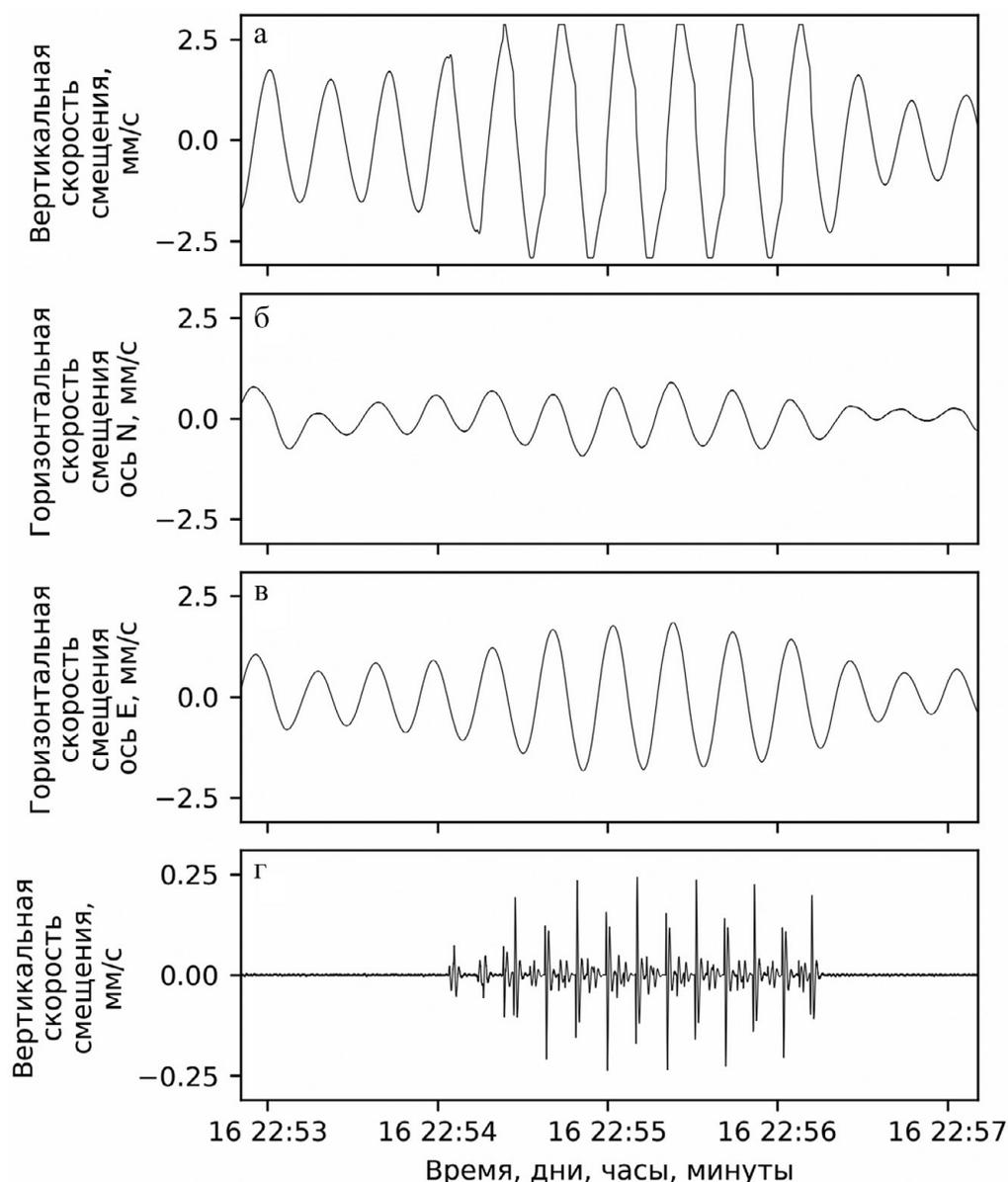


Рис. 6 – Фрагмент записи IGW и дискретных импульсов во льду:  
а – вертикальная компонента скорости смещения, мм/с; б, в – горизонтальные компоненты скорости смещения IGW, мм/с; г – вертикальная скорость смещения FGW, мм/с

Следует отметить, что в событии 16.02.2020–17.02.2020 вместе с основным энергонесущим процессом на частоте 0.04 Гц на всех трех станциях возникали импульсы на частотах 0.1–0.2. Гц (рисунок 3б). Это указывает на одновременное возникновение упругих изгибно-гравитационных волн на расстоянии несколько сотен метров (согласно расстановке сейсмостанций по треугольной схеме). Как будет показано далее, дискретные события 16.02–17.02 являются моментами вертикального сдвига на контакте стенок сквозной сжатой трещины в ледяном покрове.

В соответствии со спектром (рисунок 3) можно оценить возможное значение амплитуды вертикальных колебаний со значением большим, чем 3 мм/с. Каждые вершина и впадина волн зыби при изгибе ледяного поля создавали вертикальное перемещение льда на контакте стенок трещины. Тем самым возбуждались упругие горизонтальные и вертикальные импульсы, т. е. генерировались периодические импульсы FGW от поступающих гребней и впадин IGW.

Итак, механический циклический процесс с периодичностью около 13 сек. обусловлен вертикальным смещением стенок сквозной сжатой трещины во льду. Естественно, следует учитывать, что лед был в напряженном состоянии из-за низкой температуры воздуха в течение нескольких дней (рисунок 1). Таким образом, IGW могла быть спусковым механизмом разрушения льда на контакте стенок трещины.

На основании методики оценки волновых характеристик при деформировании ледяной пластины изгибом можно определить максимальную амплитуду волны и возникающие при этом напряжения во льду, приводящие к образованию трещин. Полученные максимальные значения смещения в волне 16 февраля 2020 г. 22:40 с периодом 25 сек., амплитудой смещения 23 мм и длиной волны около 1 км можно трактовать как основной фактор возникновения вертикального сдвига в ледяном покрове, зафиксированного изгибно-гравитационными волнами. Вычисленные ускорения в дискретном процессе демонстрируют серии скачкообразных изменений колебательного ускорения до 3 мм/с<sup>2</sup>.

Согласно метеоданным, в течение нескольких дней усилилось напряженное состояние льда (температура воздуха была около 30 градусов). Прохождение гравитационной волны создало во льду толщиной в диапазоне 1–1.5 м циклические сжимающие и растягивающие напряжения. Как уже указывалось, время циклического деформирования льда на сжатие и растяжение составляло половину периода волны, т. е. 13 сек. Циклические напряжения, вызываемые волной, могут накладываться на уже имеющиеся внутренние напряжения. При значительных внутренних напряжениях внешняя волновая добавка может служить спусковым механизмом, приводящим либо к мгновенному разлому ледяного покрова, либо к релаксации внутренних напряжений за счет образования множества мелких трещин. Перевес в ту или иную сторону будет определяться параметрами волн и уровнем предварительных внутренних напряжений.

Как отмечалось участниками экспедиции 17.02.202 «...от метеостанции через ВПП прошла трещина/разводье шириной 30–40 см». Важно отметить время начала

раскрытия трещины и образования развода. Из рисунка 7 можно видеть, что раскрытие трещины началось после 10 часов 17.02.2020. В этом случае практически исчезли сигналы горизонтальных компонент колебаний. На аэроснимке лазерного профилирования 17.02.2020 канал от образовавшегося развода отчетливо заметен и простирался на несколько километров.

Описание механизма возникновения цуга дискретных сигналов FGW может быть дополнено данными от протяженной трещины в ледяном покрове, зарегистрированной 16.02.2020 в 05:00, т. е. почти в тот же момент, когда отмечается вступление IGW. В соответствии с рисунком 3 можно предположить, что трещина была обусловлена появлением IGW с периодом 35 сек.

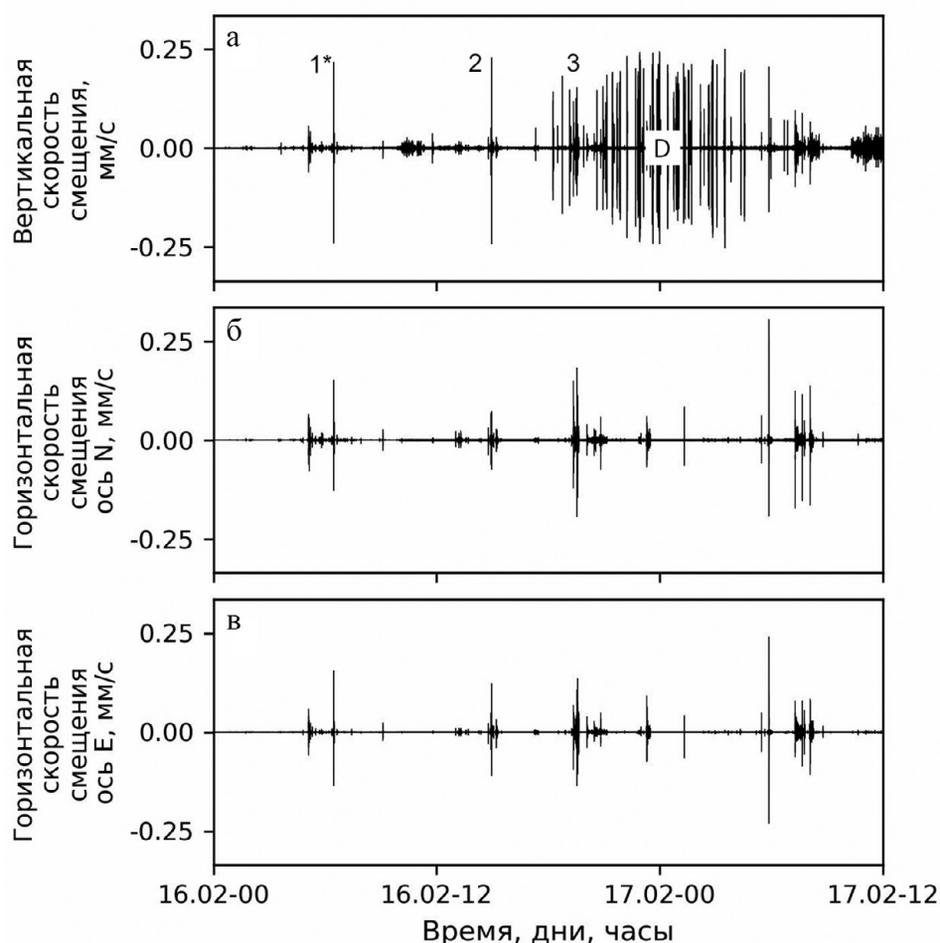


Рис. 7 – Сигналы упругих волн во льду 16.02.2020:

**а** – вертикальная компонента скорости смещения, мм/с; **б, в** – горизонтальные компоненты скорости смещения по осям N, E, мм/с сейсмодатчика станции Гамма 15.02.2020–17.02.2020.

Импульсы в момент образования и развития трещин в ледяном покрове: 1 – 5–6 час.;

2 – 15 час.; 3 – 19 час.; \* – максимальная амплитуда 0.22 мм/с; D – цуг дискретных

импульсов FGW волн с периодичностью 13 сек. от воздействия IGW волн с периодом 26 сек., применен фильтр Баттерворта высоких частот 4 порядка с частотой среза 0.5 Гц

Как показано на рисунке 7, 16 февраля были зарегистрированы сигналы с характеристиками упругих колебаний во льду. Сигналы 1, 2, 3 могли быть вызваны первыми вступлениями IGW с периодом 35 сек. Очевидно, что образованию трещины способствовало повышенное термически напряженное состояние ледяного покрова. Волна являлась спусковым механизмом разрушения льда. Представления о механике образования термической трещины во льду 16.02 в 6 час можно трактовать в данном случае как реализацию реологической модели Кулона-Мора, когда максимальное напряжение сдвига  $\tau = C + \sigma \operatorname{tg}\phi$ , где  $C$  – когезия/сцепление, параметр, соответствующий прочности льда при нулевом значении нормального напряжения на поверхности сдвига;  $\operatorname{tg}\phi$  – тангенс угла внутреннего трения;  $\sigma$  – эффективные нормальные напряжения на поверхности сдвига. Естественно, что при реализации такой модели во льду возникают поля волн как акустического диапазона, так и изгибно-гравитационного процесса.

На всех трех сейсмостанциях, расположенных на льду треугольником со сторонами примерно 600 м, фиксировались когерентные по амплитуде и по фазе колебания с частотой в диапазоне 1–5 Гц. Пример развернутого по времени импульса на одной из станций показан на рисунке 8.

Оценки по корреляционному сдвигу времени фаз всех станций (Альфа, Бета и Гамма) составляли не более 0.5 сек. Подобные данные позволяют считать, что были зафиксированы упругие волны при сбросе напряжений во льду. Такой крупномасштабный механический процесс может быть обусловлен образованием хрупкого разрыва во льду, т. е. зарождения трещины в ледяном покрове. Для описания общей картины процессов в период 16–17 августа 2020 г. данные следует дополнить результатами натурных измерений термических напряжений во льду.

В соответствии с локальными метеоусловиями в течение нескольких дней 13.02–17.02 температура воздуха составляла минус 38 °С. При резком повышении температуры воздуха, естественно, во льду возникли термические напряжения, которые привели к возникновению сдвиговых напряжений, превышающих прочность льда. Этот процесс образования трещины и, соответственно, сброс напряжений создали цуг плоских продольных/поперечных и изгибно-гравитационных волн в системе лед–вода (рисунки 3, 7, 8). Экспериментальные данные о сбросе напряжений во льду в этот же период наблюдений в экспедиции были зарегистрированы датчиком давления, вмороженным в лед на расстоянии около 200 м от сейсмостанции Гамма. Нами были использованы имеющиеся данные о сбросе напряжений во льду из работы (Haase et al., 2021, Fig. 4), где показан график хода напряжений во льду в рассматриваемый нами период 16.02. Отмечено, что давление во льду уменьшилось на 5 кПа. Можно считать, что этот сброс напряжения во льду мог служить источником упругих изгибно-гравитационных волн FGW, подтверждающих время образования первых сквозных трещин во льду в районе наблюдений 16.02.2020 около 6 часов. Таким образом, можно считать термические напряжения во льду одним из главных источников образования и развития трещины.

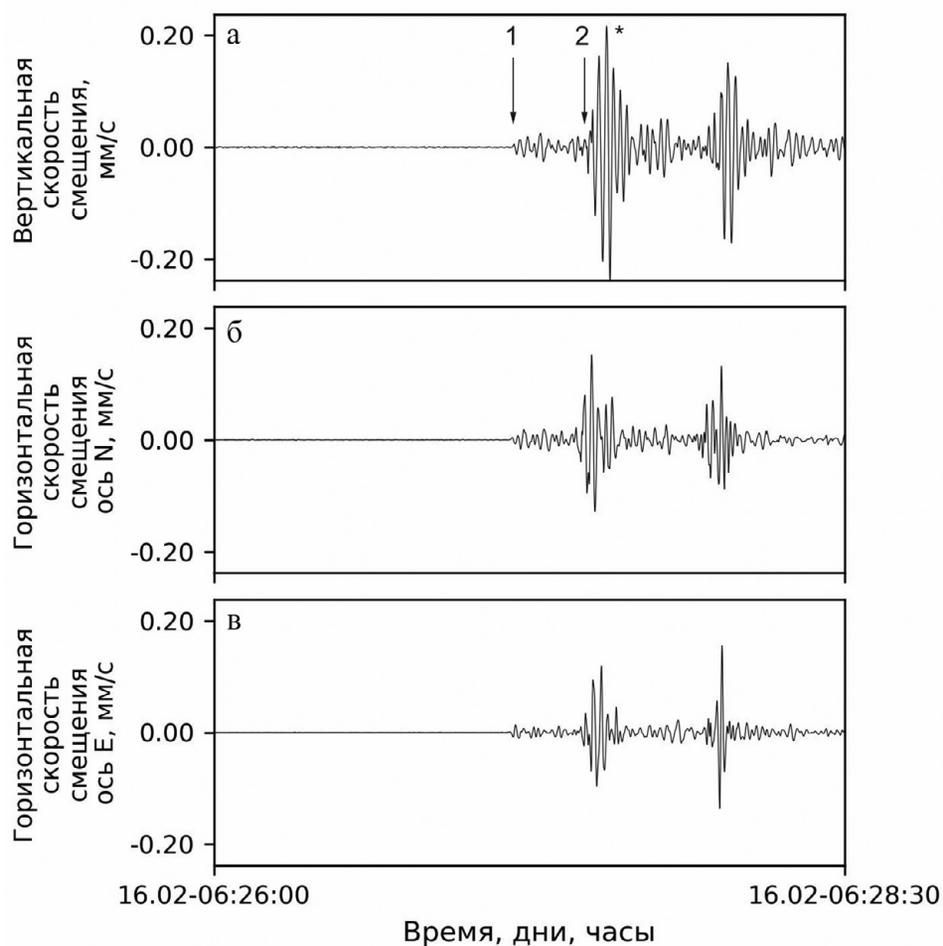


Рис. 8 – 3 компоненты сигнала упругого импульса 1 из рисунка 7:  
**а** – вертикальная компонента скорости смещения, мм/с; **б, в** – горизонтальные компоненты скорости смещения по осям N, E, мм/с, образованного сбросом напряжений при образовании термической трещины 16.02 в 06:26, увеличенный масштаб времени:  
 1 – вступление плоской продольной волны; 2 – вступление изгибно-гравитационной волны;  
 \* – максимальная амплитуда 0.22 мм/с. Частота в импульсе 0.1–0.2 Гц, был применен полосовой фильтр Баттерворта 4 порядка с частотами среза 0.5–10 Гц

В соответствии с рисунками 7 и 8, во льду зафиксированы упругие смещения льда в низкочастотном акустическом диапазоне, при этом сброс напряжений мог генерировать объемные и плоские волны во льду. Подобное ледотрясение является индикатором образования трещины 16.02 в 6 час.

Следует отметить на рисунке 8 время интервала между вступлениями волн (между стрелками), которое составило 15 сек., указывая на различие скоростей продольных или поперечных и изгибных компонент волнового процесса. По этому признаку расстояние до «эпицентра ледотрясения» может быть определено по значениям скоростей объемных и изгибных волн.

## Обсуждение

Увеличение периода волн в океане является природным явлением геофизического масштаба, которое можно наблюдать только на значительных расстояниях и для больших интервалов времени их распространения. Шторм в море 16.02.2020–17.02.2020 действовал подобно непрерывному источнику, возбуждая на поверхности бесчисленное множество импульсов. В первом приближении можно принять, что начальная деформация поверхности быстро переходит в ряд квазисинусоидальных волн. Если взять значительное число следующих друг за другом волн, то они могут быть представлены синусоидой. Каждая волна после шторма постепенно ускоряется, передние волны становятся длиннее, чем задние и двигаются быстрее. Вследствие этого, все волны становятся длиннее и «разбегаются», а периоды спектра волн со временем уменьшаются. Дальнейший характер движения поля волн в морском льду, очевидно, может отражать частотную дисперсию до 0.02 Гц, т. к. максимальный пик периода волн в некоторых случаях достигал 50 сек.

На явлении дисперсии волн основан метод определения расстояния до штормовой области. Зная скорость изменения частоты  $f$  за время  $t$  в точке наблюдения, можно определить расстояние  $X$  до зоны зарождения волны по формуле (Wadhams, Doble, 2009)  $X = g(t - t_0)/4\pi f$ , где  $g$  – ускорение свободного падения;  $f$  – наблюдаемая пиковая частота;  $t$  – время наблюдения;  $t_0$  – время появления волн. Проведенные расчеты расстояния источника океанических волн составляли тысячи километров (Wadhams, Doble, 2009).

Как уже отмечалось, к общей картине процессов дисперсии волн на чистой воде и во льдах следует добавить микросейсмические бури. Данные основаны на теории образования микросейсм морскими стоячими волнами при штормовых процессах в океанах (Longuet-Higgins, 1950). Это может происходить как вблизи отвесных берегов, когда образуются отраженные волны, так и в штормовой области на поверхности океана. В области значительного минимума атмосферного давления возникает генерация морских волн, движущихся от периферии к центру шторма. Распространяясь навстречу друг другу и складываясь, они образуют стоячие волны, вызывающие переменное давление на дно с равнодействующей, равной произведению площади, на которой наблюдаются волны, на величину давления. В стоячей волне положение узлов становится устойчивым/фиксированным, а движение воды в пучностях происходит так, что максимальные амплитуды наблюдаются синхронно. При этом квадрат скорости движения воды имеет один и тот же знак как при отклонениях вверх, так и вниз. Поэтому частота изменения давления на дно становится в два раза больше частоты штормовых волн. В математическом описании, согласно (Longuet-Higgins, 1950), переменная составляющая движения будет пропорциональна произведению  $2a_1a_2\cos 2\omega t$ , где  $a_1$  и  $a_2$  – амплитуды волн в шторме,  $\omega$  – угловая частота. Отсюда видно, что при  $a_1$  или  $a_2$  равных нулю, т. е. при одной поверхностной волне, переменное давление на дно отсутствует и микросейсм не генерируются. Зыбь, выходящая из области

шторма, является прогрессивной волной, и при ее дальнейшем распространении микросейсм не образуются.

Во время микросейсмической бури происходил процесс распространения упругих сейсмических волн по земной коре. Как показано на рисунке 5, сейсмические станции, особенно на побережье Гренландского моря, регистрировали эти колебания. Естественно, что из-за большой разницы скоростей распространения микросейсм и волн зыби, происходила практически мгновенная передача колебаний в морском дне от шторма, т. е. можно считать, что микросейсмическая буря является предвестником инфрагравитационных волн в арктическом льду.

В первом приближении можно считать, что все описанные нами события с дисперсией штормовой зыби произошли при неподвижном шторме. Предполагается, что шторм действовал сравнительно короткое время на определенной площади. В реальных условиях шторм мог двигаться, и его волновое поле становилось другим по сравнению с полем от неподвижного источника. В случае движения шторма в сторону района наблюдения со скоростью близкой к групповой скорости зыби, ее частота будет сдвинута в область высоких частот. В нашем случае, в соответствии с картой волнения (рисунок 4) и спектром микросейсм (рисунок 5), можно предположить, что источник поверхностных гравитационных волн перемещался по направлению к дрейфующей станции.

В соответствии с рисунком 5, период волны на дрейфующей станции уменьшился на 7 секунд за время в течение 48 часов. Результаты наблюдений в работе (Munk, 1947) указываются на движущийся циклон, создающий спектр волн с увеличивающейся частотой. Серии амплитудных спектров поверхностных волн от движущегося мощного шторма в Атлантическом океане указывали на эффект уменьшения периода волны с 20 сек. до 17 сек. в течение 14 часов.

По задаче с циклоном, движущимся по направлению к ледовой станции, возникают сложности с анализом подобных результатов, поэтому желательно иметь новые данные наблюдений.

Рассмотрение изгибно-гравитационных волн как индикатора процессов локального или среднемасштабного разрушения льда выполняется с целью обнаружения разломов в ледяном покрове. Физико-механические процессы на сжатом контакте лед-лед, т. е. на стенках сквозной трещины в сравнительно толстом льду, создают возможность образования вертикального сдвига при воздействии внешней силы в виде движения вершины и впадины волн зыби с периодом 26 сек. Таким образом, происходит резкий сброс напряжений на контакте и излучение изгибно-гравитационных волн.

В нашей работе подобные результаты с дискретными свойствами сигналов получены впервые и, естественно, могут возникать вопросы, решение которых способствует уточнению моделей крупномасштабной механики разрушения льда.

### Заключение

С помощью пространственной расстановки сейсмостанций на морском дрейфующем льду получены данные о волновых процессах с дискретностью отсчета 100 Гц в частотном диапазоне 0.02–10.0 Гц. Анализ изменчивости частоты волн в ледяном покрове со временем указывает на явление дисперсии волн на больших временных и пространственных масштабах. Феномен увеличения частоты колебаний в спектре поверхностных гравитационных волн объясняется образованием в мощном удаленном шторме широкого спектра свободных гравитационных волн, которые распространялись в сторону дрейфующей станции. Расстояние, которое прошла волна зыби от кромки льда до точки наблюдения, составляло около 1100 км. Время/длительность регистрации поля волн во льду – 36 часов. Спектр поля волн регистрируется в ледяном покрове с определенным сдвигом частот, т. е. волны приходят в разное время в зависимости от длины волны и соответствующей ей групповой скорости. Длинноволновая часть спектра приходит раньше его коротковолновой части. Именно поэтому в начале амплитудного спектра регистрируются волны с частотой 0.03 Гц и в конце спектра с частотой 0.05 Гц.

Волны от мощного шторма в Северной Атлантике достигают кромки льдов, проникают в дрейфующий лед и, проходя около 1100 км в течение 36 часов, достигают района Северного Полюса и регистрируются во льду согласно сделанным оценкам с вертикальной амплитудой до 23 мм. При такой ситуации в ледяном покрове в масштабе нескольких сотен метров зафиксированы изгибно-гравитационные волны, являющиеся откликом на образование трещин в ледяном покрове. Намечаются подходы к разработке метода оценки волновых напряжений во льду и решению задач прогнозирования времени разрушения льда волнами зыби в условиях предварительно напряженного состояния льда.

Использование микросейсмического метода определения времени и места действия шторма и образования поля поверхностных гравитационных волн позволяет решать комплекс океанологических и геофизических задач. Микросейсмические бури и волны зыби способны давать информацию о времени разлома в дрейфующем льду с заблаговременностью несколько часов. Причинно-следственная связь процессов в Северном Ледовитом океане дает принципиальную возможность широкого использования применяемых методов для количественной оценки крупномасштабных ледовых событий в научной и прикладной деятельности в Арктике.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность участникам экспедиции Е. Шиманчуку, А. Ньюбому, И. Шейкину, получившим исходные данные от измерительной системы динамики льда. Работа выполнялась в рамках темы 5.1.5 ЦНТП Роскомгидромет с привлечением метеоданных международной многопрофильной дрейфующей обсерватории по изучению арктического климата (MOSAIC) с пометкой MOSAIC20192020. Идентификатор экспедиции AWI\_PS122 00. Использование данных по микросейсмам и метеорологии было упомянуто в разделе методы.

### Список литературы

1. *Легеньков А. П.* Подвижки и приливные деформации дрейфующего льда. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 104 с.
2. *Мунк В.* Увеличение периода волн, прошедших большие расстояния (приложение к цунами, зыби и сейсмическим волнам). Сб. статей. Предсказания ветровых волн, зыби и прибоя. Ред. И. Б. Штокман. 1951. С. 88–123. Перевод из *Trans. Am. Geophys. Union*. 28, № 2. 198, 1947.
3. *Смирнов В. Н.* Динамические процессы в морских льдах. СПб.: Гидрометиздат, 1996. 162 с.
4. *Смирнов В. Н., Чмель А. Е.* Самоподобие и самоорганизация в дрейфующем ледяном покрове Арктического бассейна // Доклады Академии наук. 2006. Т. 5. С. 684–687. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06080204>.
5. *Смирнов В. Н., Ковалев С. М., Ньюбом А. А.* Автоколебания в дрейфующем ледяном покрове Северного Ледовитого океана // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47. № 3. С. 122–138. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(3\).11](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).11).
6. *Смирнов В. Н., Ковалев С. М., Ньюбом А. А., Знаменский М. С.* Механика колебаний и волн во льдах Северного Ледовитого океана при явлениях сжатия и торошения // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66. № 3. С. 321–336. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-321-336>.
7. *Смирнов В. Н., Знаменский М. С., Шейкин И. Б.* Волновые процессы в дрейфующем льду Северного Ледовитого океана в экспедиции MOSAIC. Зимний период // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022. Т. 68. № 1. С. 6–27. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-26-47>.
8. *Сытинский А. Д., Трипольников В. П.* Некоторые результаты исследований естественных колебаний ледяных полей Центральной Арктики // *Изв. АН СССР, Геофизика*, 1964. № 4. С. 210–212.
9. *Bromirski, Peter D., Olga V. Sergienko, Douglas R. MacAyeal* Transoceanic infragravity waves impacting Antarctic ice shelves. // *Geophysical Research Letters*. Jan. 2010. Vol. 37. Iss. 2. <https://doi.org/10.1029/2009GL041488>.
10. *Haase, Andrea, Hoppe, Felix, and Jan Manuel Kubiczek* Long Term Measurements of Internal Level Ice Pressure in Vicinity of Structures or (Land) Fast Ice // Paper presented at the The 31<sup>st</sup> International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes. Greece. June 2021.
11. *Hunkins K.* Seismic studies of sea ice // *J. Geophys. Res.* Oct. 1960. Vol. 65 Iss. 10. P. 3459–3472. <https://doi.org/10.1029/JZ065i010p03459>.
12. *Longuet-Higgins Michael Selwyn* A theory of the origin of microseisms // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. Sept. 1950. Vol. 243. Iss. 857. P. 1–35. <http://doi.org/10.1098/rsta.1950.0012>.
13. *Marsan D., Weiss J., Moreau L., Gimbert F., Doble M., Larose E., Grangeon J.* Characterizing horizontally-polarized shear and infragravity vibrational modes in the Arctic sea ice cover using correlation methods // *J. Acoust. Soc. Am.* Mar. 2019. Vol. 145. Iss. 3. P. 1600–1608. <https://doi.org/10.1121/1.5094343>.
14. *Munk W. H.* Increase in the period of waves traveling over large distances: with application to tsunamis, swell, and seismic surface waves // *Trans. Amer. Geophys. Union* Apr. 1947. Vol. 28. Iss. 2. P. 198–217. <https://doi.org/10.1029/TR028i002p00198>.
15. *Robin G. Q.* Wave propagation through fields of pack ice // *Phil. Trans. Roy. Soc. London. ser A*. Feb. 1963. Vol. 255. Iss. 1057. P. 313–339. <https://doi.org/10.1098/rsta.1963.0006>.
16. *Wadhams P., Doble M. J.* Sea ice thickness measurement using episodic infragravity waves from distant storms // *Cold Reg. Sci. Technol.* May 2009. Vol. 56. Iss. 2–3. P. 98–101. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.12.002>.

Статья поступила в редакцию 20.07.2023, одобрена к печати 09.10.2023.

**Для цитирования:** Смирнов В. Н., Знаменский М. С., Алексеев В. В., Иванов В. В. Поверхностные гравитационные волны с Северной Атлантике и в дрейфующем льду Арктики // Океанологические исследования. 2023. № 51 (3). С. 106–128. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(3\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(3).5).

## SURFACE GRAVITATIONAL WAVES IN THE NORTH ATLANTIC AND IN THE DRIFTING ICE OF THE ARCTIC

V. N. Smirnov, M. S. Znamensky, V. V. Alekseev, V. V. Ivanov

*Arctic and Antarctic Research Institute,  
38, st. Bering, Saint Petersburg, 199397, Russia,  
e-mail: [smirnov@aari.ru](mailto:smirnov@aari.ru)*

Sea ice in the Arctic is one of the main dynamic elements in the interacting atmosphere–ice–ocean system. Currently, theoretical and experimental studies of drifting and soldered ice are used to develop predictive models of the mechanical state of sea ice. This paper presents the results of an experimental study of physical and mechanical processes on the surface of the Arctic Ocean. Field work was carried out using the spatial placement of autonomous seismic stations directly on the drifting ice. Data on surface gravitational waves of the ocean, accompanied by periodic deformations of bending and shear in the ice, have been obtained. On the basis of amplitude spectra, the features of the process of propagation of storm waves of swell in the ice cover are considered and a comparative analysis with map of maximum heights of sea waves is performed. A significant factor is the use of microseismic oscillations recorded at coastal stations of the Greenland Sea to determine the time and place of a powerful storm. The spectrum of the wave field in the ice sheet indicates an increase in the frequency of oscillations due to the dispersion of the wave field. New data have been obtained on the large-scale mechanics of the occurrence of cracks in the ice cover and discrete flexural-gravity waves as one of the main indicators of ice destruction. The results of the study are important for improving weather and climate forecasting models, as well as for solving engineering problems on the Arctic shelf.

**Keywords:** Arctic, storm, sea waves, microseismic storms, swell dispersion, ice break

**Acknowledgements:** The authors express their gratitude to the expedition participants E. Shimanchuk, A. Nyubom, I. Sheikin, who received the initial data from the ice dynamics measuring system. The work was carried out within the framework of the topic 5.1.5 of the Roskomhydromet Targeted Scientific and Technical Program with the involvement of meteorological data from the international multidisciplinary drifting Observatory for the study of the Arctic climate (MOSAIC) marked MOSAIC20192020. Expedition ID AWI\_PS122 00. The use of data on microseisms and meteorology was mentioned in the methods section.

### References

1. Bromirski, P. D., O. V. Sergienko, and D. R. MacAyeal, 2010: Transoceanic infragravity waves impacting Antarctic ice shelves. *Geophysical Research Letters*, **37** (2), <https://doi.org/10.1029/2009GL041488>.

2. Haase A., F. Hoppe, and J. M. Kubiczek, 2021: Long Term Measurements of Internal Level Ice Pressure in Vicinity of Structures or (Land) Fast Ice. *Paper presented at the The 31<sup>st</sup> International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, June 2021.
3. Hunkins, K., 1960: Seismic studies of sea ice. *J. Geophys. Res.*, **65** (10), 3459–3472, <https://doi.org/10.1029/JZ065i010p03459>.
4. Legen'kov, A. P., 1988: *Podvizhki i prilivnye deformatsii dreifuiushchego lda (Shearings and tidal deformations of drifting ice)*. Leningrad, Hydrometeoizdat, 104 p.
5. Longuet-Higgins, M. S., 1950: A theory of the origin of microseisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **243** (857), 1–35, <http://doi.org/10.1098/rsta.1950.0012>.
6. Marsan, D., J. Weiss, L. Moreau, F. Gimbert, M. Doble, E. Larose, and J. Grangeon, 2019: Characterizing horizontally-polarized shear and infragravity vibrational modes in the Arctic sea ice cover using correlation methods. *J. Acoust. Soc. Am.*, **145** (3), 1600–1608, <https://doi.org/10.1121/1.5094343>.
7. Munk, W. H., 1947: Increase in the period of waves traveling over large distances: with application to tsunamis, swell, and seismic surface waves. *Trans. Amer. Geophys. Union*, **28** (2), 198–217, <https://doi.org/10.1029/TR028i002p00198>.
8. Robin, G. Q., 1963: Wave propagation through fields of pack ice. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **255** (1057), 313–339, <https://doi.org/10.1098/rsta.1963.0006>.
9. Smirnov, V. N., 1996: *Dinamicheskie protsessy v morskikh ldakh (Dynamic processes in sea ice)*. Saint Petersburg, Gidrometizdat, p. 162.
10. Smirnov, V. N. and A. E. Chmel', 2006: Samopodobie i samoorganizatsiia v dreifuiushchem ledianom pokrove Arkticheskogo basseina (Self-similarity and self-organization in drifting ice cover of the Arctic basin). *Doklady Akademii nauk (Proc. of the Academy of Sciences)*, **5**, 684–687, <https://doi.org/10.1134/S1028334X06080204>.
11. Smirnov, V. N., S. M. Kovalev, and A. A. Niubom, 2019: Avtokolebaniia v dreifuiushchem ledianom pokrove Severnogo Ledovitogo okeana (Self-excited oscillations in the drifting ice cover of the Arctic Ocean). *Okeanologicheskie issledovaniya (Journal of Oceanological Research)*, **47** (3), 122–138, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(3\).11](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).11).
12. Smirnov, V. N., S. M. Kovalev, A. A. Nubom, and M. S. Znamenskiy, 2020: Mekhanika kolebani i voln vo ldakh Severnogo Ledovitogo okeana pri iavleniiakh szhatiia i torosheniia (Mechanics of oscillations and waves in the ice of the Arctic ocean during compression and ridging). *Problemy Arktiki i Antarktiki (Arctic and Antarctic Research)*, **66** (3), 321–336, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-321-336>.
13. Smirnov, V. N., M. S. Znamenskii, and I. B. Sheikin, 2022: Volnovye protsessy v dreifuiushchem ldu Cevernogo Ledovitogo okeana v ekspeditsii MOSAIC Zimnii period (Wave processes in the drifting ice of the Arctic Ocean in the MOSAIC expedition. Winter period). *Problemy Arktiki i Antarktiki (Arctic and Antarctic Research)*, **68** (1), 6–27, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-26-47>.
14. Sytinski, A. D. and V. P. Tripol'nikov, 1964: Nekotoryie rezul'taty issledovaniia yestestvennykh kolebani ledyanykh poley tsentral'noy Arktiki (Some results of research of natural oscillations of ice fields of Central Arctics). *Izvestiya akademii nauk SSSR, Geofizika (Reports of Academy of Science USSR, Geophysics)*, **4**, 210–212.
15. Wadhams, P. and M. J. Doble, 2009: Sea ice thickness measurement using episodic infragravity waves from distant storms. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **56** (2–3), 98–101, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.12.002>.

Submitted 20.07.2023, accepted 09.10.2023.

**For citation:** Smirnov, V. N., M. S. Znamenskiy, V. V. Alekseev, and V. V. Ivanov, 2023: Surface gravitational waves in the North Atlantic and in the drifting ice of the Arctic. *Journal of Oceanological Research*, **51** (3), 106–128, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(3\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(3).5).