

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-321-336>
УДК 504.4:551



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

МЕХАНИКА КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН ВО ЛЬДАХ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ПРИ ЯВЛЕНИЯХ СЖАТИЯ И ТОРОШЕНИЯ

В.Н. СМІРНОВ, С.М. КОВАЛЕВ, А.А. НЮБОМ, М.С. ЗНАМЕНСКИЙ*

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

**smirnov@aari.ru*

Резюме

Одной из основных научных и прикладных проблем в Северном Ледовитом океане является разработка методов краткосрочного прогнозирования явлений сжатия и торошения морских льдов, образования во льду локальных и протяженных разломов и разводей. Выявление связи процессов в системе атмосфера — лед — океан необходимо для совершенствования моделей климата. В связи с этим важны результаты по натурным инструментальным измерениям параметров крупномасштабной механики и динамики льда, которые позволят объяснить природу наблюдаемых ледовых процессов. В экспедиции «Трансарктика-2019» с помощью пространственной расстановки сейсмометров и наклономеров на дрейфующем ледяном покрове проводились исследования колебаний и волн в системе лед — вода. Получены новые научные результаты по широкому спектру физико-механических явлений в океане: воздействие на лед океанической зыби, сжатие и торошение, разлом ледяных полей, приливные сжатия.

Ключевые слова: волны, дрейфующий лед, колебания, мониторинг, приливные сжатия, разломы льда, трещины.

Для цитирования: *Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Нюбом 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>.

Поступила 6.06.2020

После переработки 2.09.2020

Принята 5.09.2020

MECHANICS OF OSCILLATIONS AND WAVES IN THE ICE OF THE ARCTIC OCEAN DURING COMPRESSION AND RIDGING

VICTOR N. SMIRNOV, SERGEY M. KOVALEV, ALEXEY A. NUBOM, MAXIM S. ZNAMENSKIY*

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

**smirnov@aari.ru*

Summary

One of the main scientific and practical problems in the Arctic is the study of the dynamic state of the sea ice cover. The main parameters in the general model of drifting ice are the drift velocity vector, friction stress at the air-ice and ice-water interfaces, and the forces of dynamic interaction of ice fields. Establishing the connection between the large-scale processes in the atmosphere-ice-ocean system is necessary for developing methods of forecasting ice compression and ridging and the formation of local and extended fractures and leads, which help improve the existing climate models. The main aim is to obtain results of full-scale instrumental measurements of parameters of ice large-scale mechanics and dynamics, which provide a physical basis for explaining the nature of observed large-scale ice processes and allow one to perform physical parametrization. To accomplish this aim and evaluate the physicomechanical condition of the drifting ice cover of the Arctic Ocean, the “Transarktika-2019” expedition performed a real-time ice monitoring in April 2019. The investigation was conducted using seismometers and tiltmeters installed on the ice such that they formed a triangle with the sides measuring up to two kilometers. Data has been obtained on the wave and oscillation processes of crack formation, compression and ridging of ice. The possibilities of deciphering the initial data on the physics of wave and oscillatory processes in the ice-water system considerably increase when using the known methods of processing seismic signals. With use of spectral Fourier analysis wavelet-transformation of oscillations significantly extending possibilities of the seismic method at revelation of prognostic signs of crack formation and compression was applied. It is shown that the dynamics of ice processes can be connected with oceanic swell and tidal events. A possibility is created for obtaining new results in the investigation of large-scale mechanics of sea ice.

Keywords: cracks and fractures in ice, drifting ice, fluctuations and waves, monitoring methods, tidal compressions.

For Citation: Smirnov V.N., Kovalev S.M., Nubov A.A., Znamenskiy M.S. Mechanics of oscillations and waves in the ice of the Arctic ocean during compression and ridging. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 321 — 336. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-321-336>.

Received 6.06.2020

Revised 2.09.2020

Accepted 5.09.2020

ВВЕДЕНИЕ

Механика деформирования морского ледяного покрова Северного Ледовитого океана (СЛО) и образование упорядоченных ледовых структур обусловлены крупномасштабными процессами в системе атмосфера — лед — океан [1 — 3]. Выявление физических связей процессов в такой системе необходимо для совершенствования моделей и методов прогнозирования сжатия и торошения льдов, образования во льду локальных и протяженных разломов и разводий. Перестройка структурных связей в ледяном покрове сопровождается колебаниями и волнами на поверхности океана. Фрагментация структуры льдов обусловлена циклическими процессами во льду, которые, в силу их регулярности, поддерживают постоянные состояния разрушения по большим пространственным и временным масштабам [4, 5]. Одними из основных процессов формирования структуры льдов являются периодические горизонтальные подвижки, проявляющиеся через разномасштабные деформационные процессы и возникающие при этом упругие волны во льду. Явление периодических горизонтальных смещений в сплоченном ледяном покрове СЛО можно представить как крупномасштабные релаксационные автоколебания [6]. Процесс может длиться несколько часов и состоять из периодических сбросов напряжений с интервалами от единиц до десятков минут. Полученные данные позволяют подойти к разработке модели явления автоколебаний для случая сплошного ледяного покрова при сжатии на контакте протяженного разрыва.

В настоящее время одной из важных задач в исследованиях морского льда остается выявление связей крупномасштабных физико-механических процессов с явлениями в атмосфере и океане в режиме реального времени. Особенно это касается выявления прогностических признаков сжатия и торошения льдов и сопутствующих этому океанических волн зыби и приливо-отливных явлений в океане. С этой целью в настоящей работе основное внимание уделено описанию методов регистрации волновых и колебательных процессов в дрейфующем ледяном покрове с помощью сейсмометров, наклономеров и дистанционной измерительной системы и некоторым результатам натуральных наблюдений.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Для регистрации колебаний и волн в ледяном покрове в широком частотном диапазоне от 0,0167 до 50 Гц применялись трехкомпонентные молекулярно-электронные сейсмометры СМЕ-4311ЛТ. Наклонометры (измерители угла наклона в двух горизонтальных координатах) ИН-Д3а-360 могут также регистрировать горизонтальные ускорения при низкочастотных колебаниях. Сейсмометры и наклонометры устанавливались на специально изготовленные деревянные постаменты, вмороженные в лед на глубину до 30 см. Электропитание приборов осуществлялось от аккумуляторов. Для сбора и экспресс-анализа поступающих данных использовались АЦП Е14-140, логгеры «Байкал», компьютеры-регистраторы и дистанционная система мониторинга динамики дрейфующего морского льда, разработанная в лаборатории физики льда ААНИИ [7].

Сейсмометр. Сейсмометр характеризуется низким шумом, высокой чувствительностью, компактными размерами и небольшим весом. Он работает до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и имеет высокое значение чувствительности — 4 кВт/мс^{-1} . Регистрация сигналов в диапазоне частот 0,02 — 100 Гц (или периодов от 0,01 до 50 с) осуществляется через плату АЦП на специализированный накопитель информации с привязкой к абсолютному времени. В зависимости от поставленной задачи сигналы от сейсмометра могут быть отражены в размерностях скорости смещения, смещения или ускорения. На рис. 1 показан пример записи волнового процесса в ледяном покрове от вертикальной компоненты сейсмометра в трех соответствующих размерностях. Во многих примерах обработки исходных данных такая информация играет важную роль при расшифровке природы того или иного процесса в системе лед — вода.

По зарегистрированному явлению с орбитальным движением льда на волне зыби следует сказать следующее. Известно, что в океане у поверхностной волны каждая частица воды движется по кругу в вертикальной плоскости, смещаясь вперед, когда она на гребне волны, и назад, когда она находится во впадине. В рассматриваемом примере со льдом, когда горизонтальная компонента совпадает с направлением движения волны, четко отмечается орбитальное движение льда в волне (рис. 1б). Если движение происходит по часовой стрелке, то можно считать, что направление движения самой волны происходит в направлении слева направо (показано на рисунках стрелкой). В течение минут-часов ось этого эллипса отклоняется от вертикали и меняется с периодичностью 5 — 10 градусов. Отклонение от вертикали и периодические колебания оси эллипса обусловлены, по-видимому, механикой взаимодействия слоя воды и нижней поверхности льда. В другое время наблюдений ось диаграммы эллипса вообще имеет незначительное отклонение от вертикали.

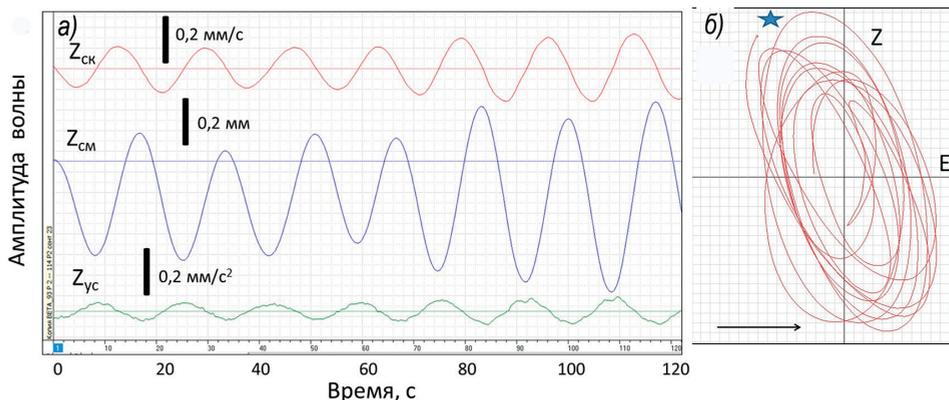


Рис. 1. Пример записи волнового процесса в ледяном покрове от вертикальной компоненты сейсмометра Z (a) и схема орбитального движения частиц льда в вертикальной плоскости в разное время ZE (б).

Размерности скорости смещения (Z_{ck}) мм/с, смещения (Z_{cm}) мм и ускорения (Z_{yc}) мм/с². Горизонтальная стрелка (б) — направление движения волны, звездочка — головная движущаяся точка в вертикальной плоскости. Станция Бета, 03.04.2019

Fig. 1. An example of recording the wave process in the ice cover from the vertical component of the seismometer Z and the scheme of the orbital motion of ice particles in the vertical plane

Dimensions of the displacement velocity Z_{ck} (mm/s), Z_{cm} — displacement (mm) and acceleration Z_{yc} (mm/s²) —; ellipse in the plane ZE — (б). Horizontal arrow (б) — direction of the wave, asterisk — the head moving point in the vertical plane. Beta station 03.04.2019

Здесь уместно привести выдержку из статьи норвежских ученых, проводивших исследования на припайном льду архипелага Шпицберген. «Было бы интересно исследовать, связано ли движение поверхности с напряжениями во льду, подобное случаю волновых напряжений в океане, поскольку этот фазовый сдвиг между вертикальными и горизонтальными движениями может быть важным компонентом быстрого разрушения прибрежного морского льда» [8, с.1996]. Этот вопрос будет рассмотрен в планируемой статье совместно с анализом данных по подледным течениям, по волнам зыби и короткопериодным внутренним волнам.

Наклономер ИН-Д3а-360. Применяемые в экспедиции измерители угла наклона в двух горизонтальных координатах ИН-Д3а-360 работают при температуре до -50 °С и могут измерять также горизонтальные ускорения при низкочастотных колебаниях в дрейфующем ледяном покрове. Наклономер на выходе имеет сумму показаний в виде ускорений и наклонов. Диапазон измерения наклонов ± 360 угловых секунд или ± 1746 мкрад. Максимальное горизонтальное ускорение может достигать $17,5$ мм/с² при динамическом диапазоне 60 дБ.

На протяжении всего мониторинга динамического состояния ледяного поля горизонтальными составляющими сейсмометра и наклономера отмечено, что в диапазоне периодов 10 — 25 с кинематические характеристики волны зыби в горизонтальной плоскости почти одинаковы. При установке приборов ось N направлялась на магнитный север, ось E — на восток.

На рис. 2a представлены диаграммы скорости смещения и наклона льда при волне с периодом около 20 с. Из диаграмм видно, что движение волны преобладает по направлению оси E. На рис. 2б и 2в приведены диаграммы наклона E_2 — N_1

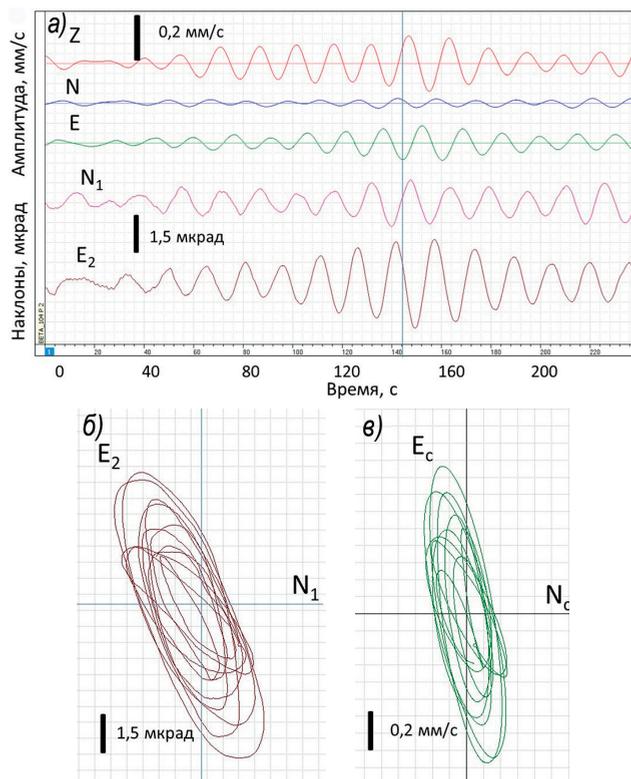


Рис. 2. Пример записи от сейсмометра (Z — вертикальная компонента, N , E — горизонтальные взаимно-перпендикулярные компоненты) и накломера (N_1 и E_2) (а), диаграммы наклона E_2 — N_1 (б) и смещения E_c — N_c (в) льда в горизонтальной плоскости при волне с периодом около 20 с, 14 — 15.04.2019

Fig. 2. Example of recording from the seismometer (Z is vertical component, N , E are horizontal mutually perpendicular components) and the tilt meter (N_1 and E_2) (а), the diagram of the slope of E_2 — N_1 (б) and the displacement of E_c — N_c (в) of ice in the horizontal plane at a wave with a period of about 20 s, 14 — 15.04.2019

и смещения E_c — N_c льда в горизонтальной плоскости. Различие в направлениях движения волны, полученных двумя методами, незначительно.

При обработке цифровых данных применялась операция дифференцирования по времени показаний горизонтальных компонент сейсмометра. На рис. 3 приведены записи продольных и изгибно-гравитационных волн при образовании трещины во льду. Для визуального сходства ускорений с наклонами горизонтальные компоненты сейсмометра размещены парами с записями накломера. Фазовые соотношения указывают на то, что все четыре канала зарегистрировали колебательное ускорение. При этом получены результаты, хорошо соотносящиеся с показаниями соответствующей компоненты накломера. Максимальное значение амплитуды колебательного ускорения на составляющей по оси E достигали $0,05 \text{ мм/с}^2$. Можно считать, что наклономер кроме наклонов способен регистрировать вектор ускорения в горизонтальной плоскости. Процесс на рис. 3 характеризуется импульсами упругих волн

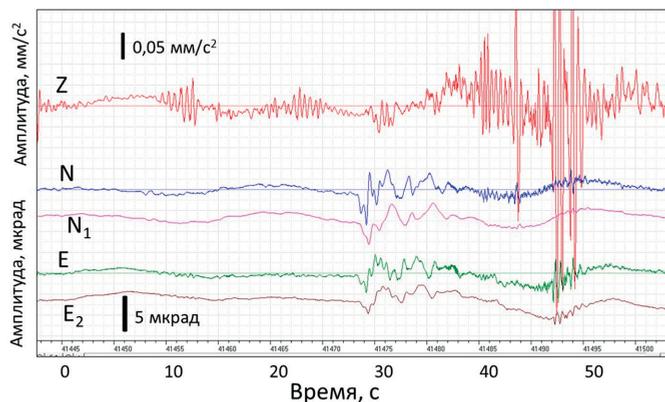


Рис. 3. Пример записи колебательного ускорения в колебаниях и волнах в ледяном покрове от сейсмометра Z, N, E и наклономера N_1 и E_2 .

Горизонтальные компоненты N и E размещены парами с N_1 и E_2 соответственно. 12.04.2019, станция Гамма

Fig. 3. An example of recording the oscillatory acceleration in the wave processes in the ice cover from the Z, N, E seismometer and the N_1 and E_2 tiltmeters.

The horizontal components N and E are placed in pair with N_1 and E_2 , respectively. 12.04.2019, Gamma station

при образовании трещины во льду, дальнейшее развитие разрушения льда сопровождается образованием вертикальных изгибно-гравитационных волн с амплитудой до $\pm 0,2 \text{ мм/с}^2$ и частотой около $0,2 \text{ Гц}$.

Методика вейвлет-преобразования колебаний (CWT). Возможности расшифровки исходных данных по физике волновых и колебательных процессов в системе лед — вода существенно расширяются при использовании известных методик обработки сейсмических сигналов. Например, наряду с использованием спектрального анализа Фурье применялось вейвлет-преобразование колебаний, значительно расширяющее возможности сейсмического метода при выявлении прогностических признаков трещинообразования и сжатия.

На рис. 4 представлены сравнительные данные по трещинообразованию во льду. Следует отметить, что вертикальные компоненты на всех станциях практически равны нулю, т.е. зарегистрирован процесс плоских упругих импульсов одновременно в трех точках ледяного поля при образовании сквозной трещины (рис. 4а). Визуально сотрудниками экспедиции были отмечены образовавшиеся трещины 12.04 в 11:28 МСК. На рис. 4б исходные данные приведены в диаграммах вейвлет-преобразования. Внизу рис. 4б прослеживаются периодические дуги волн зыби с периодом около 18 с. Как уже указывалось, в 11:28 МСК возникли короткие импульсы, зарегистрированные тремя станциями.

Связаны ли изгибные деформации льда от волн зыби с образованием трещин, покажет анализ результатов исследования механики образования трещин. Серия подобных измерений показывает, что при расчете характеристик волны с учетом геометрии треугольника сдвиг по времени между станциями может характеризовать скорость упругих волн.

Методика расчета вектора скорости и направления распространения волн. В натуральных экспериментах по изучению физики распространения волн во льду используются различные схемы расстановки первичных датчиков на ледяном поле.

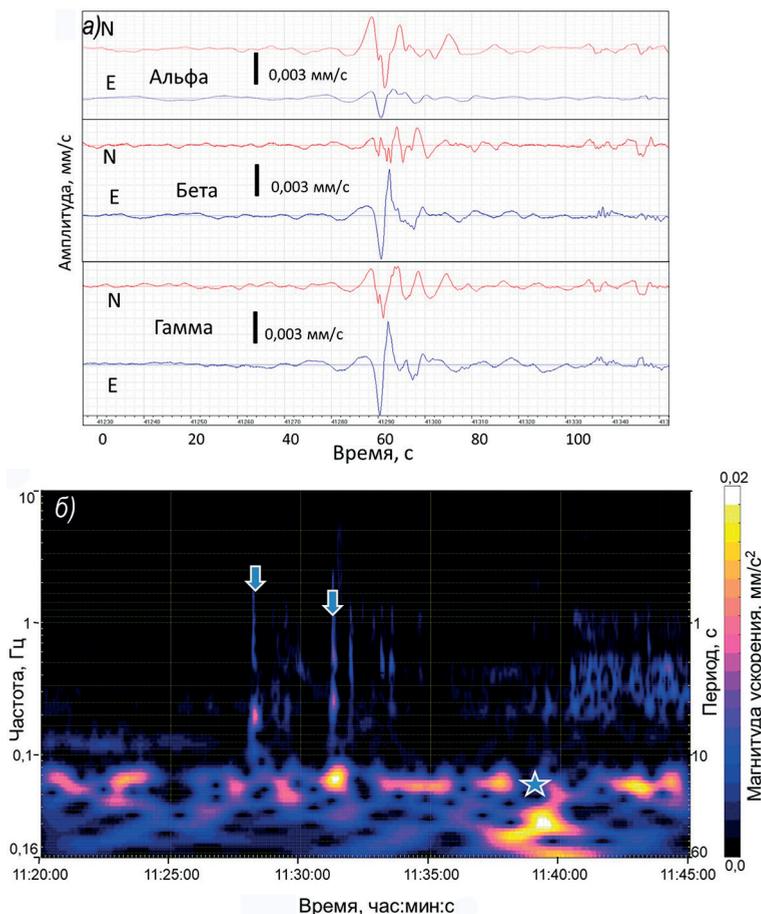


Рис. 4. Процесс регистрации упругих импульсов одновременно на трех станциях Альфа, Бета и Гамма при образовании сквозной трещины в ледяном поле — (а) и вейвлет-преобразование фоновых значений волн зыби и двух импульсов при образовании трещин — (б).

N, E — горизонтальные взаимно-перпендикулярные составляющие. Стрелки — импульсы при образовании трещины. Звездочка — цуг колебаний с периодом до 1 мин. Станция Гамма, канал N, 12.04.2019

Fig. 4. The process of registering elastic pulses simultaneously at three stations, Alpha, Beta and Gamma, during the formation of a through crack in the ice field — (a) and wavelet transformation of the background values of swell waves and two pulses during the formation of cracks — (b).

N, E are horizontal mutually transverse components. The arrows are pulses during the formation of cracks. The asterisk is a train of fluctuations with a period of up to 1 min. Gamma station, channel N, 12.04.2019

Линейные расстановки с интервалом между датчиками от 2 до 500 м позволяют определять скорость распространения упругих и гравитационных волн в широком частотном диапазоне. В экспериментах с заранее известным расположением источника волн фазовая скорость C определяется по коррелируемым фазам групп волн из простого соотношения $C = X/\Delta t$, где X — расстояние, пройденное волной по линии датчиков, Δt — время прохождения волной пути X . При изучении физико-механических процессов образования волн естественного происхождения, когда неизвестно расположение источника волн, используются расстановки приборов по треуголь-

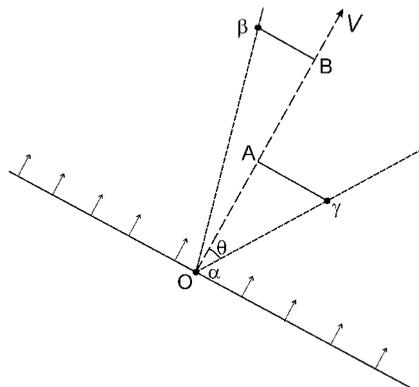


Рис. 5. Расчетная схема определения скорости и направления волны зыби в дрейфующем ледяном покрове при пространственной расстановке полевых станций α , β и γ .

A и B — проекции сторон треугольника на вектор скорости волны; θ — угол между одной из сторон треугольника и вектором скорости волны

Fig. 5. Calculation scheme for determining the velocity and direction of the swell wave in the drifting ice cover with a spatial arrangement of the field stations α , β and γ .

A and B are projections of the sides of the triangle on the wave velocity vector; θ is the angle between one of the sides of the triangle and the wave velocity vector

нику со сторонами от 30 м до 5 км. В самом общем виде для любой треугольной расстановки приборов и безотносительно к направлению распространения плоской волны методика расчета фазовой скорости и азимута определяется из схемы (рис. 5).

Методика взаимной корреляции двух временных рядов позволяет при последовательном сдвиге по времени относительно друг друга определять временной сдвиг Δt и характеризовать «кажущуюся» скорость распространения волны между станциями. Для определения истинной скорости V разработаны методики определения азимута и скорости распространения волнового процесса. В данной методике для расчета вектора скорости волн зыби (V) получена формула:

$$V = \frac{L_\gamma \cdot \cos(\theta)}{\Delta t_1},$$

где L_γ — расстояние между α и β , Δt_1 — время прохождения волной расстояния L_γ . θ — угол, отсчитываемый против часовой стрелки от луча, выходящего из станции Альфа на станцию Гамма, определялся по формуле:

$$\theta = \arccos \left(\pm \frac{\sqrt{(L_\beta \cdot \sin(\angle\alpha))^2}}{\sqrt{\left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \cdot L_\gamma - L_\beta \cdot \cos(\angle\alpha)\right)^2 + (L_\beta \cdot \sin(\angle\alpha))^2}} \right),$$

где $\angle\alpha = 11,24^\circ$, $L_\beta = 1904,72$ м — расстояние между α и β , $L_\gamma = 1273,28$ м, Δt_2 — время прохождения волной расстояния L_β . Значения $\angle\alpha$, L_β и L_γ определяются расстановкой приборов по схеме треугольника. Время Δt определялось по коррелируемым фазам цуга волн станций, например, Альфа и Бета, что позволяло оценить истинные скорости волны зыби. Проведенные расчеты показали, что скорость волн зыби изме-

нялась в пределах от 30 до 33 м/с. Подобные значения соответствуют проведенным ранее измерениям на дрейфующих станциях «Северный полюс» и теоретическим дисперсионным соотношениям фазовых и групповых скоростей изгибно-гравитационных волн [8, 9, 10]. Азимут, как правило, менялся в соответствии с источником зарождения волн.

Пример расчета оценки напряжений в ледяном покрове при изгибе его волнами зыби. Напряжения при изгибе ледяного поля волнами зыби могут достигать разрушающих напряжений. Вертикальные смещения (z) любой точки ледяного поля при изгибе его гравитационной волной определяются как $z = z_0 \cdot \sin kx$, где z_0 — амплитуда волны, м; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны, м; x — расстояние, м. Оценка несущей способности ледяного покрова путем расчета максимальных изгибных напряжений во льду основана на теории изгиба жестких пластин [3, 4].

Ниже приводится пример оценки напряжений в верхнем слое ледяной пластины, т.к. именно с него начинается образование и рост трещин при разрушении верхнего слоя гребня волны разрывом. Конечно, в этом случае не учитываются пластические свойства льда, и для расчета напряжений берется модуль Юнга. Напряжения сжатия — растяжения σ_x в ледяном поле можно оценивать по формуле:

$$\sigma_x = \frac{Ehz_0k^2}{2(1-\mu^2)},$$

где E — модуль упругости, МПа; h — толщина льда, м; μ — коэффициент Пуассона. При использовании этого выражения предполагается, что кривая профиля волны близка к цилиндрической. При следующих характеристиках льда и параметрах волны изгиба: $E = 3 \cdot 10^3$ МПа; $h = 1,0$ м; $\mu = 0,34$; $V = 30$ м/с; $T = 20$ с; $\lambda = CT$; $z_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м определено механическое напряжение сжатия ледяной пластины при фоновых/спокойных значениях амплитуд колебаний во льду. Согласно приведенной формуле, фоновые колебательные напряжения во льду составляли 0,3 кПа. Это очень незначительная величина, однако при интенсивных короткопериодных волнах с большой крутизной волновые напряжения могут достигать десятков кПа и приводить к разлому ледяного поля. Трудности определения разрушающих напряжений связаны также с выявлением визуальной связи появления трещин и записями приборов на ледяном поле. Рассмотренный пример оценки фоновых и разрушающих напряжений будет закладываться в алгоритм обработки данных с соответствующим оповещением трещинообразования и разломов льда в режиме реального времени.

Дистанционная измерительная система мониторинга состояния морского дрейфующего льда. Разработанная в лаборатории физики льда система позволяет следить за крупномасштабной механикой деформирования и разрушения ледяных полей. Практическое применение данной системы мониторинга дает возможность оценить степень динамичности ледяного покрова и на основании этого дать прогностические оценки степени устойчивости льда в данном районе в ближайший промежуток времени. Первичными звеньями системы являются полевые сейсмические станции сбора данных от присоединенных датчиков — сейсмометров и наклономеров [7]. Полевые станции сбора данных производят операцию оцифровки данных от датчиков с заданной частотой. При этом сбор всех каналов данных на станциях синхронизирован с помощью часов глобальной системы позиционирования. Данные сохраняются в локальном хранилище, а также по радиоканалу отправляются на сервер

сбора данных базовой станции в режиме реального времени. Каждая полевая станция сбора данных оснащается геолокационным модулем, который собирает и передает координаты станции через спутниковый радиоканал на судно, что позволяет всегда знать точное расположение полевой станции вне зависимости от работоспособности основного радиоканала. На льду станции расставляются по схеме треугольника. Такое размещение позволяет определять физические параметры прогрессивных волн. Важнейшими из них являются фазовая скорость и азимут распространения волны.

Все данные передавались на базовую станцию, находящуюся на НЭС «Академик Трёшников», состоящую из приемника/передатчика основного радиоканала, вторичного радиоканала для локальной передачи данных между выносным передатчиком основного радиоканала и сервером сбора данных. Сервер сбора данных принимал по радиоканалу данные от полевых станций в режиме реального времени и сохранял их в архиве. Также сервер сбора данных осуществлял вывод получаемых данных на графический дисплей в виде волновых профилей, принимаемых от всех полевых станций, с возможностью частотной обработки и выделения интересующей информации. Блок радиопередачи включает в себя основной радиоканал, радиомодуль 900 МГц с антенной, резервный радиоканал WI-FI, радиомодуль 2,4 ГГц с антенной. Управление полевой сейсмостанцией осуществляется с помощью защищенного ноутбука Panasonic CF-31. Регистратор основных каналов данных имеет в своем составе внутреннюю карту памяти объемом 8 Гб, на которую записывается собираемая информация. Регистрация сигналов базировалась на методике круглосуточного проведения инструментальных измерений. Применяемая в экспедиции «Трансарктика-2019» измерительная система с пространственной расстановкой приборов на льду обладает малым потреблением мощности от внешнего аккумулятора, большой емкостью энергонезависимой памяти, встроенным высокостабильным генератором и модулем GPS в совокупности с аналого-цифровым трактом, что обеспечивает качественные эксплуатационные характеристики для широкого круга научных и прикладных задач. В проведенных исследованиях круглосуточный мониторинг состояния дрейфующего ледяного покрова сопровождался визуальным осмотром ледяного поля лагеря станции, обнаружением, по возможности, сквозных трещин, подвижек и торошений. Особое внимание уделялось первичной информации, возникающей перед сжатием и торошением льдов. Прогностические признаки экстремальных характеристик динамики льда позволяют принимать меры безопасности в ледовом лагере.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изгибно-гравитационные волны. На рис. 6 представлена картина колебательных и волновых процессов в системе лед — вода при воздействии ветра и волн океанической зыби. Все компоненты сейсмометра отражают колебания в широком диапазоне частот и обусловлены воздействием как локального ветра, так и приходящей зыби от далеких штормов на открытой воде. На горизонтальных компонентах сейсмометров отмечаются периодические импульсы, обусловленные полусуточными приливными сжатиями и подвижками в ледяном покрове, создающими упругие волны.

Квазистатические наклоны (каналы N_1 и E_2) ледяного поля отражали изменчивость его изостатического равновесия. Кроме того, наклонометры регистрировали динамические процессы с периодами до 30 мин. Объяснение природы длительного наклона ледяного поля 15 — 16.04.2019 на основании записей трех станций пока не дано. Сравнительно быстрые наклоны, по-видимому, были связаны с усилением

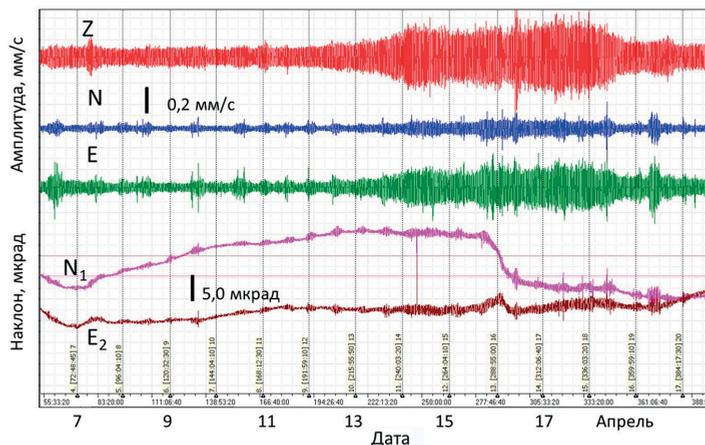


Рис. 6. Изменчивость динамических явлений при мониторинге состояния дрейфующего ледяного покрова в период 7 — 19.04.2019, станция Бета.

Z, N, E — исходные сигналы вертикального и горизонтальных компонент сейсмометра; N_1 , E_2 — исходная запись от двух компонент наклономера; масштаб меток наклономера 5,0 мкрад

Fig. 6 Variability of the dynamic phenomena when monitoring the state of the drifting ice cover, 7—19.04.2019. Beta Station.

Z, N and E are source signals of the vertical and horizontal components of the seismometer; N_1 and E_2 are the original recording from two components of the tiltmeter. The scale of the tiltmeter labels is 0.1 $V = 50$ mkrad

ем ветра, разломами и подвижками льда. Процесс деформирования ледяного поля отразился на записях наклономера в течение нескольких часов с последующим возвращением в исходное устойчивое состояние. Комплексный подход к обработке природных метеорологических (скорость и направление ветра) и океанологических (скорость течения, короткопериодные внутренние волны, приливные явления...) данных позволит в дальнейшем выявить механику этого крупномасштабного ледового процесса.

Из общей картины динамики дрейфующего льда уверенно выделяются основные виды колебаний и волн при использовании полосовых фильтров. Как правило, применялись следующие полосовые фильтры: 0,2 — 2 Гц, 0,1 — 0,2 Гц, 0,047 — 0,060 Гц, 0,020 — 0,047 Гц. Например, на уровне сравнительно спокойного фона четко выделяются периодические узкополосные сигналы от ветрового воздействия и изгибно-гравитационных волн от приливных явлений в океане. Как показало сравнение полученных данных с локальными метеорологическими характеристиками, сигналы 15 — 16 апреля были обусловлены возникновением волн при воздействии ветра, разломах и подвижках льда.

Очевидно, что использование программы полосовых фильтров, спектрального анализа, кинематики волн дает возможность выявления природы волновых процессов и обнаружения возможных источников их зарождения. Естественно, что при обработке исходных данных следует учитывать периоды воздействия самого судна на лед при различного рода его маневрах или включении механизмов.

Волновые характеристики при сжатии льдов во время приливных явлений в океане. Известно, что сжатия морских льдов обусловлены ветром, приливами, уровнем моря, толщиной льда и его торосистостью. Все эти процессы и свойства

льда подвержены изменчивости, поэтому прогнозирование сжатия и торошения льдов является сложной задачей. Известно, что приливные сжатия в арктических льдах создаются в основном градиентами приливного течения, передающими силовое воздействие ледяному покрову через касательные напряжения на границе лед — вода. Несмотря на значительные успехи в изучении этого явления, можно констатировать, что природа возникновения и основные режимные характеристики сжатий понятны, но крупномасштабная механика сжатий требует более глубокого изучения [11]. Поэтому постановка инструментальных наблюдений динамического состояния морского льда в экспедиции «Трансарктика-2019» является существенным шагом в изучении явления сжатия и торошения льдов при приливных явлениях в СЛЮ.

На рис. 7 показаны периодические всплески амплитуды волн как от сейсмометров, так и от наклономера с периодичностью около 12 часов. Из показаний приборов, установленных на полигоне размером до двух километров, следует, что волновые явления с частотами в диапазоне 0,05 — 10 Гц, а также квазистатические наклоны ледяного поля дрейфующей станции совершают коррелируемые движения на больших пространствах ледяного покрова. На рис. 8 представлен пример типичной картины спектра колебаний льда при мониторинге состояния дрейфующего ледяного покрова в течение сравнительно длительного времени. Длина блока выборки сигнала для обработки составляла 48 часов. Все это позволило выделять волны зыби и инфранизкочастотный шум в диапазоне инфразвуковых частот (до 1 Гц) длительностью 4 — 5 часов и с периодичностью 12 часов.

Все это позволяет говорить нам о том, что зарегистрированные процессы обусловлены полусуточными приливо-отливными явлениями в океане. Можно определить рассматриваемое явление как эффект приливного сжатия.

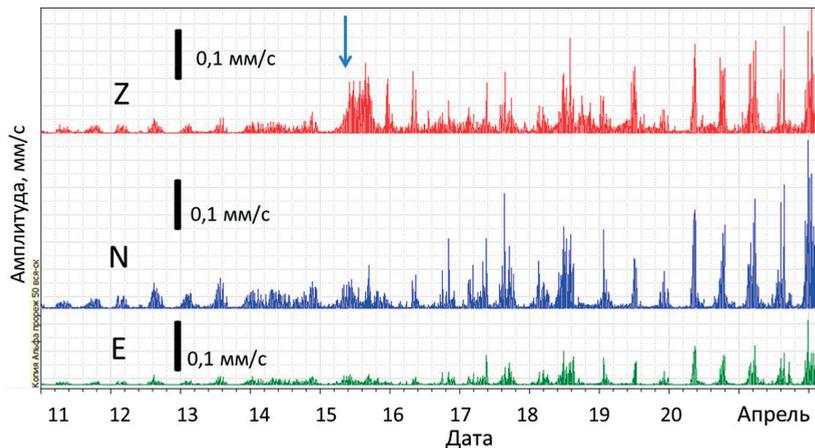


Рис. 7. Общая картина динамического процесса в дрейфующем ледяном покрове при приливных явлениях в СЛЮ, 11 — 22.04.2019.

Z, N, E — амплитудная огибающая сигналов вертикального и горизонтальных компонент сейсмометра. Стрелка — период усиления ветра и волн зыби

Fig. 7. A general picture of the dynamic process in the drifting ice cover during tidal phenomena in the Arctic Ocean, 11—22.04.2019.

Z, N and E are the amplitude envelope of the signals of the vertical and horizontal components of the seismometer. The arrow is the period of increasing wind and swell waves

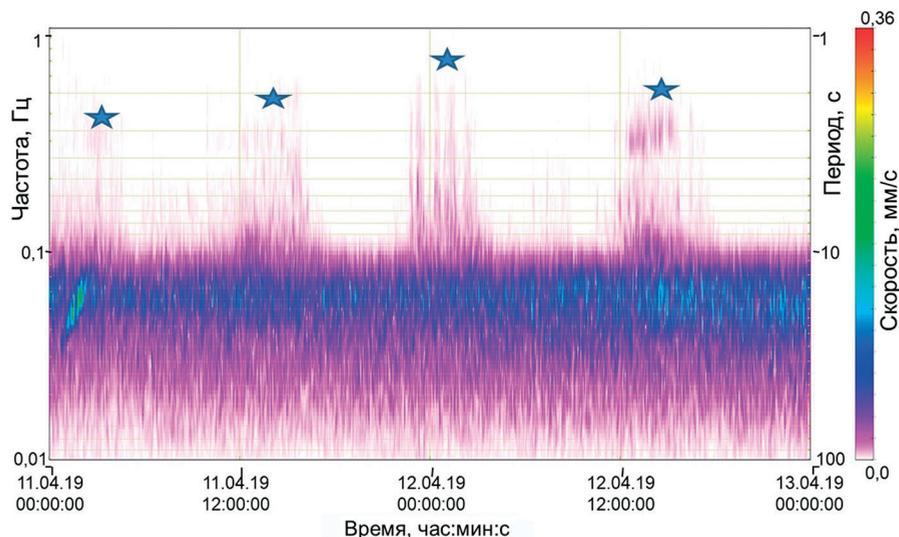


Рис. 8. Пример обработки исходных данных вейвлет-преобразованием колебательной скорости при приливных явлениях, станция Бета, 11 — 12.04.2019.

Звездочки — периоды появления инфразвуковых колебаний

Fig. 8. An example of processing the initial data by a wavelet transformation of the oscillatory velocity in tidal phenomena in the AO. Beta station, 11 — 12.04.2019.

The asterisks are the occurrence periods of the infrasound vibrations

При необходимости, особенно при обнаружении прогностических признаков сжатия и торошения, в данной методике можно делать уточняющие расчеты в коротких временных промежутках с уменьшенной степенью прореживания сигнала и выделения высокочастотной составляющей.

Естественно, возникают вопросы по поводу обнаруженного эффекта. Какого рода деформации льда происходят на значительных ледовых масштабах океана во время прилива? Каким образом при этом возникают упругие и гравитационные волны во льду? Какова природа упругих и вязкопластических крупномасштабных деформаций? Все эти задачи доступны для решения, если исследуются не только волновые процессы с помощью сейсмометров, но и относительные деформации льда при сжатии и разломах с помощью наклономеров и деформометров. На выбранном фрагменте общей записи рис. 9 отражена механика деформирования ледяного поля на одной из станций, где длительность процесса с излучением колебаний и волн при приливах составляла 3 — 5 часов. Одновременно зарегистрированные процессы на всех трех станциях обладают преимущественно горизонтальной направленностью, в то время как вертикальные колебания в этот же период практически отсутствуют. Периоды изменчивости квазистатических наклонов длились по несколько часов и сопровождалась сравнительно короткими периодами возврата в первоначальное состояние. Увеличение наклона сопровождалось сигналами от сейсмометров и наклономеров с горизонтальной поляризацией при практически слабом проявлении их на вертикальных компонентах сейсмометра. Как видно из рис. 8, эти процессы сопровождаются возникновением инфразвуковых волн в ледяном покрове.

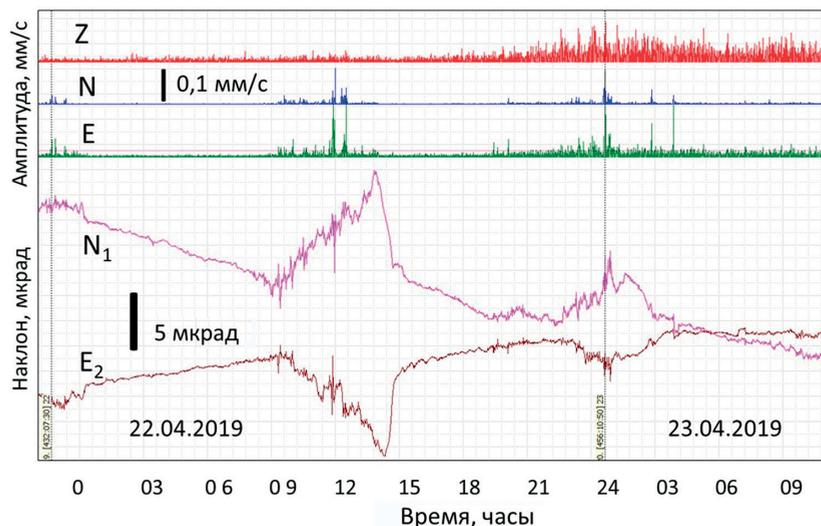


Рис. 9. Фрагмент записи упругих волн и наклонов в дрейфующем ледяном покрове с периодичностью 12 часов, станция Бета, 22 — 23.04.2019.

Z, N, E — амплитудная огибающая исходных сигналов от трехкомпонентного сейсмометра; N_1 , E_2 — запись от двухкомпонентного наклономера

Fig. 9. A fragment of recording elastic waves and tilts in a drifting ice cover with a frequency of 12 hours. Beta Station. 22 — 23.04.2019.

Z, N, E are the amplitude envelope of the initial signals from a three-component seismometer (scale 0.5 V); N_1 , E_2 are recording from a two-component tiltmeter

На основании полученных данных можно считать, что сжатия с периодичностью около 12 часов сопровождаются изгибно-гравитационными волнами в диапазоне 0,1 — 0,03 Гц, включая океаническую зыбь. Выделение зыби осуществлялось построением спектров для всех трех сейсмических станций с частотным максимумом около 0,05 Гц. Весь процесс наклонов сопровождался низкочастотными шумами волн в диапазоне частот 0,25 — 0,07 Гц и вертикальными изгибно-гравитационными колебаниями с частотой 0,07 — 0,10 Гц.

ВЫВОДЫ

В экспедиции «Трансарктика-2019» на морском дрейфующем ледяном покрове проведены наблюдения с помощью пространственной расстановки трех станций с сейсмометрами и наклономераами по схеме треугольника со сторонами до 2 км.

Описаны методы полевых дистанционных наблюдений и обработки исходных данных с применением спектрального анализа вейвлет-преобразованием колебательных процессов в ледяном покрове.

Выявлен широкий спектр волновых процессов в ледяном покрове, обусловленных явлениями в системе лед — вода. Созданы методики выделения прогностических признаков в виде характеристик упругих волн при сжатии, трещинообразовании и разрушения ледяного поля.

Разработанный метод инструментальных наблюдений позволяет раскрыть механику образования полусуточных приливных сжатий в режиме реального времени. Приливные явления сопровождаются периодическим деформированием ледяного

покрова и возбуждением волновых процессов в диапазоне плоских упругих и изгибно-гравитационных волн. Можно назвать это явление эффектом приливного сжатия.

Выполнены подходы к выявлению особенностей распространения океанской зыби в ледяном покрове СЛО и связи колебательных процессов во льду с периодами до 30 с и более с атмосферными процессами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных ранее на дрейфующих станциях «Северный полюс» исследованиях инструментальный мониторинг состояния льда сопровождался визуальным осмотром ледяного поля лагеря станции, обнаружением, по возможности, первых сквозных трещин, подвижек и пр. Особое внимание уделялось сигналам, возникающим перед сжатием и торошением льдов. Естественно, что ранние признаки экстремальных характеристик динамики льда помогают принимать меры безопасности в ледовом лагере.

Важно отметить, что до настоящего времени не существует инструментального метода регистрации физических характеристик крупномасштабных процессов сжатия в режиме реального времени. Процессы сжатия и торошения льдов уверенно регистрируются сейсмометрами, акселерометрами и наклономерами в сочетании с разработанной в лаборатории физики льда ААНИИ дистанционной измерительной системой.

Представленное описание методов исследования и основных результатов в экспедиции «Трансарктика-2019» дает возможность изучать ледовые явления в системе атмосфера — лед — океан с привлечением результатов других научных материалов. Комплексные результаты мониторинга состояния морского дрейфующего ледяного покрова будут способствовать совершенствованию физико-механических моделей и численных моделей прогнозирования природных явлений в СЛО.

Дальнейшая обработка натурных данных и анализ результатов по каждому из описанных явлений будут проводиться с привлечением данных по метеорологии, океанологии и спутниковых изображений льда.

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Финансирование. Обработка данных выполнена в рамках плановой научной тематики ААНИИ по проекту 5.1.5 ЦНТП Росгидромета «Исследование крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов с целью совершенствования методов краткосрочного прогнозирования сжатия и торошения».

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. The data processing was carried out as part of the AARI planned research topic within project 5.1.5 of the Targeted Scientific and Technical Program of Roshydromet (TSTP) “Research of large-scale dynamics, physical processes, mechanics of deformation and destruction of sea ice with the aim of improving methods for short-term forecasting of compression and ridging”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Легеньков А.П.* Подвижки и приливные деформации дрейфующего льда. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 104 с.
2. *Гудкович З.М., Доронин Ю.П.* Дрейф морских льдов. СПб.: Гидрометеоздат, 2001. 110 с.

3. Тимохов Л.А., Хейсин Д.Е. Динамика морских льдов (математические модели). Л.: Гидрометеоздат, 1987. 272 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.
5. Weiss J., Dansereau V. Linking scales in sea ice mechanics // Philos. Trans. R. Soc. A. 2017. V. 375. Paper 20150352. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0352>
6. 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.
7. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Бородкин В.А., Ньюбом А.А., Шушлебин А.И. Инструментальный мониторинг и краткосрочный прогноз явлений сжатия и торшения. СПб.: ААНИИ, 2017. 174 с.
8. Sutherland G., Rabault J. Observations of wave dispersion and attenuation in landfast ice // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2016. V. 121. P. 1984 — 1997.
9. Смирнов В.Н. Динамические процессы в морских льдах. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 162 с.
10. Wadhams P. Ice in the ocean. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2000. 351 p.
11. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 328 с.

REFERENCES

1. Legen'kov A.P. *Podvizhki i prilivnye deformacii drejfujuushhego l'da*. Shifts and tidal deformations of drifting ice. Leningrad: Gydrometeoizdat, 1988: 104 p. [In Russian].
2. Gudkovich Z.M., Doronin Ju.P. *Drejfmorskih l'dov*. Sea ice drift. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2001: 110 p. [In Russian].
3. Timohov L.A., Hejsin D.E. *Dinamika morskikh l'dov (matematicheskie modeli)*. Dynamics of sea ice (mathematical models). Leningrad: Gydrometeoizdat, 1987: 272 p. [In Russian].
4. Smirnov V.N., Chmel' A.E. Self-similarity and self-organization in the drifting ice cover of the Arctic basin. *Doklady Akademii nauk*. Proc. of the Russian Academy of Sciences. 2006, 5: 684–687. [In Russian].
5. Weiss J., Dansereau V. Linking scales in sea ice mechanics. Philos. Trans. R. Soc. A. 2017, 375. Paper 20150352. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0352>.
6. Smirnov V.N., Kovalev S.M., Njubom A.A. Self-oscillations in the drifting ice cover of the Arctic Ocean. *Okeanologicheskie issledovanija*. Oceanological studies. 2019, 47 (3): 122 — 138. [In Russian].
7. Smirnov V.N., Koval'ov S.M., Borodkin V.A., Njubom A.A., Shushlebin A.I. *Instrumental'nij monitoring i kratkosrochnyj prognoz javlenij szhatija i toroshenija*. Instrumental monitoring and short-term forecast of compression and ridging phenomena. St. Petersburg: AARI, 2017: 174 p. [In Russian].
8. Sutherland G., Rabault J. Observations of wave dispersion and attenuation in landfast ice. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2016, 121: 1984–1997.
9. Smirnov V.N. *Dinamicheskie processy v morskikh l'dah*. Dynamic processes in sea ice. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1996: 162 p. [In Russian].
10. Wadhams P. Ice in the ocean. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2000: 351 p.
11. *Opasnye ledovye javlenija dlja sudohodstva v Arktike*. Hazardous ice phenomena for shipping in the Arctic. E.U. Mironov (ed.). St. Petersburg: AARI, 2010: 328 p. [In Russian].