МЕХАНИКА ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ЛЬДАХ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Смирнов В.Н., Ньюбом А.А.

*Арктический и Антарктический НИИ, Санкт-Петербург, 196337, ул. Беринга,
38, тел. +7 812 337-3118, e-mail: smirnov@aari.ru*

The results of observations on drifting stations “North Pole”: compression and ridging, surface and internal waves in the ice cover considered. Data about periodic shearings on the extensive fracture in the consolidated ice cover are obtained. The shearings are accompanied with emission of horizontally polarized waves.

Выявление связи динамических процессов во льдах Северного ледовитого океана с процессами в атмосфере и океане является важной задачей в проблеме прогноза погоды и климата. Разрушение льда и сдвиговые подвижки происходят непрерывно, создавая и изменяя структуру ледяного покрова, тем самым регулируя теплообмен между океаном и атмосферой. Одним из основных результатов наблюдений на дрейфующих станциях «Северный полюс» являются новые физико-механические данные о процессах сжатия и торошения льдов, воздействия поверхностных и внутренних волн на ледяной покров, выявления прогностических признаков разрушения льда [1]. На аэрофотоснимках и спутниковых изображениях ледяного покрова (рис. 1) прослеживаются мозаичные образования с линейными размерами от сотен метров до сотен километров. Ряд признаков пространственных и временных изменяющихся параметров указывают на то, что совокупность трещин, разрывов и гряд торосов является иерархической системой. Масштабная инвариантность динамики льдов в сочетании с их фрактальной организацией позволяют рассматривать ледяной покров как самоорганизующийся фрактальный пространственно-временной домен [2].

В Арктическом и Антарктическом институте крупномасштабная физика и механика деформирования и разрушения ледяного покрова изучаются на основе натурных измерений параметров деформаций и напряжений в ледяных полях с помощью деформометров, наклономеров, сейсмометров, измерителей напряжения [3]. Об активной жизни

Рис. 1. Спутниковый снимок ледяного покрова в период движения циклона. В «окошке» видны ромбовидные образования в дрейфующем льду; размеры: стороны ромба до 150 км, углы пересечения разлома 30° .

Рис. 2. Аэрофотоснимок фрагмента дрейфующего льда при сжатии и горизонтальной подвижке на разломе и образовании развода. 1 – протяженный контакт в системе лед-лед при сдвиге и образовании гряды торосов; 2 – линия первоначальной трещины отрыва.

ледяного покрова свидетельствуют колебания и волны во льдах в широком диапазоне частот и амплитуд. В известный обобщенный амплитудный спектр К. Ханкинса внесены характеристики упругих и гравитационных волн и колебаний (рис.3).

Ниже представлены характеристики основных волновых процессов в ледяном покрове различной природы возникновения.

Поверхностные изгибно-гравитационные волны. В ледяном покрове Северного Ледовитого океана присутствуют изгибно-гравитационные волны в диапазоне периодов от 0.01 до 30 секунд. Волны возникают от воздействия ветра, при торошении льдов, от штормов на открытой воде. Слабое затухание волн зыби позволяет регистрировать их на удалении сотни километров от источника. При изгибных напряжениях в ледяном поле могут возникать протяженные трещины толщиной до 3 м.

Внутренние гравитационные волны в ледяном покрове. Во льдах СЛО зарегистрированы колебания ледяного покрова в диапазоне периодов от единиц минут до часа. Экспериментально и теоретически показано, что эти колебания обусловлены воздействием

короткопериодных гравитационных внутренних волн океана. Реакция льда проявляется в образовании волнового процесса с фазовыми скоростями распространения около 0,5 м/с («медленные волны»).

Рис. 3. Обобщенный спектр колебаний и волн в морских льдах как индикатор динамических процессов механики деформирования и разрушения морского льда; 1, 2 – микросейсмы и землетрясения; 3 – автоколебания при сжатии льдов; 4 – изгибно-гравитационные волны; 5, 5* – зыбь; 6 – волны при зарождении айсбергов; 7 – короткопериодные внутренние волны; 8 – колебания шельфовых ледников.

Рис. 4. Запись динамического процесса в дрейфующем ледяном покрове при пространственной расстановке трехкомпонентных сейсмометров Y,X,Z по треугольной схеме 1,2,3. Дрейфующая станция «Северный Полюс-40», 6 мая 2013 г.

Механические автоколебательные процессы. В сплоченном ледяном покрове океана возникают периодические горизонтальные подвижки, относящиеся к классу автоколебательных процессов. Процесс взаимодействия при сжатии на протяженной трещине проявляется в регулярной повторяемости процессов накопления и сброса напряжений, характеризующих релаксационные свойства льда в масштабе десятков-сотен километров. На рис. 4 показана типичная запись периодического механического процесса в ледяном покрове при наблюдениях на дрейфующих станциях «Северный полюс». Амплитуда горизонтальных колебаний в цуге в несколько раз больше амплитуды вертикальных колебаний. Это различие амплитуд колебаний вертикальной и горизонтальных компонент является основным признаком колебаний, поляризованных в горизонтальной плоскости. Процесс характеризуется уменьшением интервалов между цугами от 60 до 15 мин. Период горизонтально поляризованных колебаний в цуге составлял 50 сек. Максимальная амплитуда колебательных ускорений достигала 5 мм/с^2 . Механизм развития периодических пульсаций можно описать следующей феноменологической моделью.

В некоторый момент в дрейфующем ледяном покрове образовалась протяженная на десятки-сотни километров прямолинейная сквозная трещина. В результате двумерного поля напряжений в ледяном покрове возникает смещение по вертикальным стенкам сквозной трещины в горизонтальной плоскости. Сдвиг по контакту лед–лед сопровождается сбросом напряжений и излучением упругих волн. При этом в зоне разлома происходит падение давления сжатия, обусловленного коэффициентом кинетического трения и временем релаксации напряжений. С ростом нормальных и касательных напряжений на плоскости разрыва при достижении разрушающих напряжений сдвига на контакте опять происходит относительное смещение по всей длине трещины. Сброс напряжений сопровождается излучением упругих волн. Процесс повторяется до тех пор, пока не отключится действующее напряжение и/или полностью разрушится протяженная контактная система лед–лед.

Результаты натурных исследований масштабных физико-механических процессов в морском ледяном покрове позволяют совершенствовать математические модели явлений сжатия льдов и возникающих при этом автоколебаний локального и геофизического масштаба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашик И.М., Кириллов С.А., Макштас А.П., Смирнов В.Н., Соколов В.Т., Тимохов Л.А. Основные результаты морских исследований Арктики в XXI веке // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 1(84). С. 100–115.
2. Chmel A., Smirnov V. Nonextensive Dynamics of Drifting Sea Ice. ISRN Oceanography. 2013. Volume, Article ID 540407. P. 6.
3. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Бородкин В.А., Ньюбом А.А., Шушлебин А.И. Инструментальный мониторинг и краткосрочный прогноз явлений сжатия и торошения. СПб.: ААНИИ, 2017. 174 с.