

ИССЛЕДОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ, ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МОРСКИХ ЛЬДОВ

В 2021 году были продолжены исследования волновых процессов в дрейфующем льду. Исходные данные были получены в зимний период 2019/20 года на международной многопрофильной дрейфующей станции по изучению арктического климата (MOSAiC) с помощью расстановки автономных сейсмических станций. При обработке материалов сейсмических наблюдений использовались данные метеостанции судна «Поларштерн».

Для сбора и экспресс-анализа данных использовалась система мониторинга динамики дрейфующего морского льда, созданная в ААНИИ в лаборатории физики льда. Для регистрации колебаний и волн в системе лед — вода применялись широкополосные трехкомпонентные низкотемпературные электронно-молекулярные сейсмометры СМЕ-4311 с коэффициентом преобразования 4000 В/м/с. Амплитудно-частотная характеристика сейсмометра СМЕ-4311 столбчатая в частотном диапазоне 0,0167–50 Гц и с более низкой границей до 0,01 Гц. Для регистрации наклонов льда в двух горизонтальных координатах использовались наклономеры типа ИН-Д3а-360. Наклономер на выходе имеет сумму показаний в виде ускорений и наклонов. Диапазон измерения наклонов — ± 360 угловых секунд; диапазон измерения ускорений — 17,5 мм/с² при динамическом диапазоне 60 дБ.

Первичными звеньями системы мониторинга состояния льда являются полевые сейсмические станции сбора данных от присоединенных датчиков — сейсмометров и наклономеров (рис. 1). Полевые станции сбора данных производят операцию оцифровки данных от датчиков с заданной частотой 100 Гц для всех каналов. При этом сбор всех каналов данных на станциях синхронизирован с помощью часов глобальной системы позиционирования. Электропитание всех полевых приборов осуществлялось от аккумуляторных батарей.

В первичную обработку исходных данных входили следующие этапы:

- построение временных ходов скорости смещений в колебаниях и волнах;
- построение спектров колебательных и волновых процессов методом быстрого преобразования Фурье;
- построение спектров колебательных и волновых процессов методами непрерывного вейвлет-преобразования;

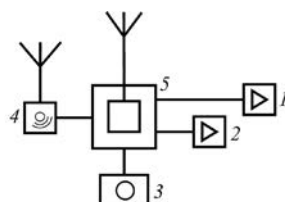


Рис. 1. Блок-схема полевой сейсмостанции:

1 — сейсмометр СМЕ-4311; 2 — наклономер ИН-Д3-360; 3 — аккумуляторная батарея; 4 — приемник GPS-сигнала; 5 — модуль оцифровки данных с радиоканалом

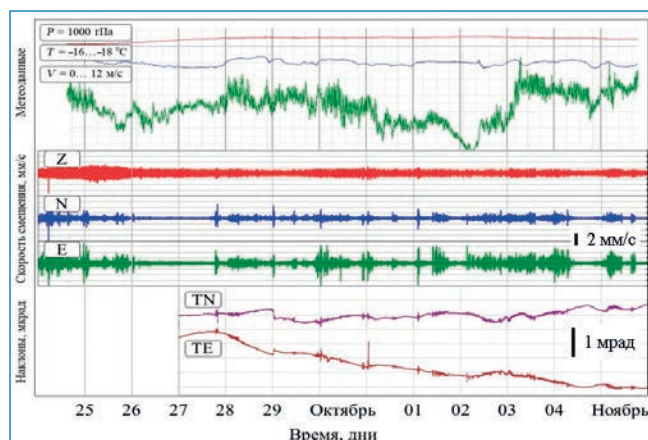


Рис. 2. Временной ход вертикальных и горизонтальных колебаний дрейфующего льда и метеопараметров.

Z, N, E — записи сейсмометра с вертикальным (красные) и горизонтальными (синие и зеленые) колебаниями льда; TN, TE — запись от двух компонент наклономера

– построение синхронных с динамикой льда графиков метеорологических характеристик.

Рассмотрим динамические процессы в системе лед — вода в массиве сплоченных однолетних и двухлетних дрейфующих ледяных полей толщиной до 1,5 м.

На рис. 2 представлен временной ход изменчивости вертикальных и горизонтальных колебаний льда и метеопараметров в начале зимнего периода наблюдений. При сравнительно слабых перепадах скорости ветра не отмечается заметной изменчивости амплитуды вертикальных колебаний льда. В то же время и горизонтальные составляющие колебаний, имея интенсивные сигналы с заметной периодичностью появления, слабо связаны со скоростью ветра.

Кроме вертикальных колебаний в ледяном покрове амплитудный спектр имеет пики горизонтальных сигналов на частотах до 0,01 Гц. Возникновение таких сигналов не коррелирует по времени с вертикальными колебаниями и с метеопараметрами. Природу возникновения горизонтальных колебаний в дрейфующем льду можно рассматривать в связи с образованием протяженных трещин и последующих сдвигов в сплоченном ледяном покрове. Подобные горизонтальные сигналы могут быть как от локальных подвижек льда, так и от масштабных приливных явлений. На данном этапе можно предполагать, что отмеченные на графиках горизонтальные колебательные процессы обусловлены крупномасштабными движениями ледяного покрова, в том числе приливными колебаниями в океане.

На рис. 3 представлено событие 16–18 февраля 2020 года интенсивных колебаний гравитационных волн, достигавших максимума амплитуд более 5 мм/с. Спектральный состав процессов 16–17 февраля с применением вейвлет-преобразования отражает распределение энергии колебаний в диапазоне частот 0,030–0,048 Гц

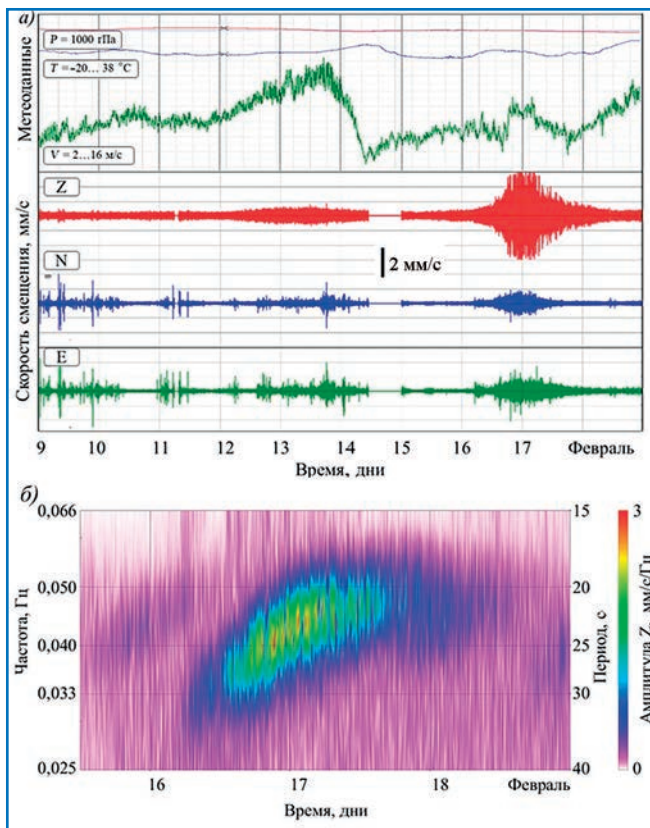


Рис. 3. Динамическое событие с интенсивными поверхностными гравитационными волнами в дрейфующем ледяном покрове в период 9–18.02.2020.

а) — временной ход Z, N, E; б) — спектр непрерывного вейвлет-преобразования («портрет» циклона) за период 16–18.02.2020

(рис. 3б). В течение 15–18 февраля отмечается увеличение частоты колебаний. Скорость ветра составляла 5 м/с. Очевидно, что этот цуг колебаний не мог возникнуть от слабого ветра, колебания являются проявлением распространения океанической гравитационной волны.

В спектре/«портрете» циклона выделяются красные точки, амплитуда в которых достигает 5 мм/с и более. Кроме того, отмечаются периодические с интервалом 30–60 минут как максимальные амплитуды вертикальных колебаний, так и увеличение частоты гравитационных океанических волн. Можно предположить, что во время пиков максимальных значений спектра происходили разрушения льда, т. е. от 18 часов 16 февраля до 06 часов 17 февраля. В событии 16–17 февраля вместе с основным энергонесущим пиком на частоте 0,04 Гц возникали пики на частоте 0,12–0,13 Гц. Это указывает на очевидность трещинообразования и возникновения плоских и изгибных волн в момент локального разрушения льда в районе лагеря станции. Анализ временных рядов колебаний во льду в разных частотных полосах позволяет выявлять детали процесса трещинообразования и разрушения льда. Можно утверждать, что в событии 16–17 февраля основным «виновником» разрушения льда являлся цуг океанической гравитационной волны с периодом 25–27 с. Это новый факт, важный для понимания механики разрушения ледяных полей при незначительной скорости ветра и отсутствии резонансного эффекта.

Из графиков временного хода амплитуды скорости смещений во льду (рис. 2) видно, что в течение 20 дней сохранялся постоянный по амплитуде фон вертикальных колебаний льда. Эти колебания преимущественно с пе-

риодом до 35 с рассматриваются как долгопериодные волновые движения, которые можно отнести к типу инфрагравитационных волн (ИГВ) в океане.

Согласно амплитудному спектру общий фон инфрагравитационных колебаний на поверхности океана оставался постоянным в течение всего периода наблюдений. Четкий и постоянный пик колебаний на частоте 0,03 Гц позволяет сделать предположение о природе зарождения и длительного существования этих волн. Очевидно, что этот фон колебаний может быть обусловлен воздействием атмосферных процессов на поверхность океана и проявлением динамики штормов. Инфрагравитационные волны прямо не зарождаются в штормовом районе. Мощные штормовые волны в виде зыби вначале перемещаются к шельфовым наклонным побережьям, где может происходить нелинейное взаимодействие с излучением ИГВ. Наблюдения в марте 2020 года отмечаются постоянным уровнем инфрагравитационных волн и эпизодическими волнами зыби от динамических циклонов.

В ААНИИ для решения научных и практических задач разрабатываются методики и оборудование для измерения давлений и напряжений, возникающих в ледяных образованиях в результате естественных процессов и при антропогенном воздействии на ледяной покров. Датчики давления применяются для определения давления во льду при естественных процессах, когда направление воздействия на ледяной покров заранее неизвестно.

Плоские датчики напряжений для льда применяются в случаях известного источника напряжений в ледяном покрове и реагируют на напряжения растяжения/сжатия, развивающихся в определенном направлении. Источником таких напряжений могут служить, например, гидротехнические сооружения. Такие датчики имеют поперечные размеры значительно меньше продольных и делятся на датчики с жесткой приемной плитой и мембранные тонкостенные устройства.

В 2021 году был разработан мембранный гидравлический датчик напряжений, который имеет лучшее соотношение толщины и продольного размера, чем датчик с жесткой приемной плитой, постоянную чувствительность во всем диапазоне измерений и упрощенную схему установки в лед.

В ААНИИ разработан, запатентован и внедрен в практику комплекс для исследования характеристик прочности льда в естественных условиях. В комплекс входят:

- зонд-индентор гидравлический для проведения испытаний прочности в естественном ледяном покрове в скважинах;
- полевой гидравлический пресс для испытаний образцов льда на сжатие;
- полевая испытательная машина ПИМ-200, предназначенная для испытания прочности при центральном изгибе образцов льда в виде тонких дисков;
- система для испытаний прочности при изгибе ледяных консольных балок на плаву воздействием вниз;
- установка для вырезания консольных балок на плаву и блоков льда в ровном ледяном покрове.

Комплексная система для определения характеристик прочности льда в естественных условиях предполагает ее дальнейшее развитие и совершенствование. В связи с этим в 2021 году была разработана и запатентована система для испытаний прочности при изгибе ледяных консольных балок на плаву воздействием вверх.

В 2021 году описан алгоритм формирования ровного припайного льда в районе береговой линии. Нарастание льда у берега протекает по другому сценарию, чем нарастание льда на открытых участках акватории. Основными факторами, порождающими эти изменения, являются наличие прибрежных открытых трещин вдоль береговой линии и интенсивное снегонакопление в прибрежной полосе и в районе образовавшихся трещин.

Наличие открытых трещин вдоль береговой линии оказывает существенное влияние на формирование льда, порождая следующие ситуации:

- увеличивает динамичность ледообразования на нижней границе льда, что способствует образованию кристаллов внутриводного льда или обломков льда от соприкосновения краев трещины и приводит к нарастанию на нижней границе ледяного покрова льда генетического типа с более высоким динамическим индексом;

- изменяет тепловой баланс льда в районе трещины;

- способствует натеканию морской воды на поверхность льда при погружении кромки мористой части льда у трещины ниже уреза воды, что является одним из условий нарастания льда сверху в зимний период;

- в летний период способствует стоку талой воды с поверхности льда и снега.

Поверхность берега располагается выше поверхности воды, что способствует снегонакоплению на льду в районе береговой линии. При увеличении снега

в районе приливо-отливной трещины мористый край льда под тяжестью снега опускается ниже поверхности воды. Морская вода проникает через снежный покров и распространяется вдоль поверхности льда, смачивая снег и создавая слой водно-снежной смеси до места, где уровень воды совпадает с поверхностью льда. При замерзании водно-снежной смеси образуется слой льда сверху, над уровнем первоначальной поверхности льда. При повторении ситуации образуется новый слой водно-снежного льда над ранее сформированным. Таким образом, лед сверху нарастает послойно, пока этот процесс повторяется.

Лед в районе береговой линии в местах аккумуляции снега формируется из двух основных слоев: льда, выросшего сверху, и льда, выросшего снизу. Условия ледообразования этих слоев различны, что приводит к различиям в кристаллическом строении и текстуре. В количественном отношении толщина этих слоев меняется по мере удаления от приливной трещины. В районе приливной трещины толщина льда, выросшего сверху, максимальная и может значительно превышать толщину льда, выросшего снизу. По мере удаления от приливной трещины соотношение слоев изменяется с последующим преобладанием льда, выросшего снизу, до полного исчезновения слоя, выросшего сверху. Расстояние, на котором наблюдается отсутствие слоя, выросшего сверху, может быть принято за границу влияния формирования льда под действием снегонакопления у берега.

С.М. Ковалев (АНИИ)

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ НАРУШЕНИЙ СПЛОШНОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Представлены промежуточные результаты по результатам разработки автоматизированных методов оценки состояния морского ледяного покрова, на основе снимков ИСЗ видимого и ИК-диапазонов и радиолокационных данных с различной поляризацией. Тема исследований имеет непосредственное практическое значение. В условиях роста трафика по СМП, проведения масштабных работ по освоению месторождений углеводородного сырья в мелководной зоне арктических морей возрастает потребность в достоверной оперативной информации и надежных краткосрочных прогнозах о состоянии ледяного покрова и наличии благоприятных для ледового плавания районов нарушений сплошности. В связи с ожидаемым переходом на круглогодичную навигацию по СМП потребуются ускоренное создание новых технологий в области мониторинга состояния морского ледяного покрова и прогнозирования ледовых условий. Основным источником данных для таких технологий станет спутниковая информация, полученная как в оптическом диапазоне, так и по радиолокационным снимкам. В настоящее время на уровне Правительства РФ поставлена задача улучшить качество прогнозирования ледообразования на СМП, в том числе за счет использования алгоритмов машинного обучения по распознаванию спутниковых радиолокационных снимков.

Обнаружение нарушений сплошности ледяного покрова по оптическим снимкам

Из-за ограничений по естественной освещенности в Арктике в зимний период (октябрь — начало марта) в оптическом диапазоне для мониторинга ледовой обстановки со спутников используются только тепловые ИК-снимки. В остальное время используются и снимки видимого диапазона, имеющие лучшее пространственное разрешение по сравнению с инфракрасными. Оперативная информация видимого и ИК-каналов доступна в настоящее время со спутников Landsat-8, Sentinel-2, Terra/MODIS, Suomi-NPP. Из отечественных спутников в этих диапазонах можно применять снимки ИСЗ серии «Канопус», «Ресурс-П», «Метеор», «Арктика-М». Для обнаружения нарушений сплошности ледяного покрова (НСЛ) на снимке видимого диапазона могут применяться как градиентный метод поиска аномалий сигнала, так и метод бинаризации сигнала с классификацией изображения на зоны «лед» — «вода».

Алгоритм обнаружения НСЛ по оптическим снимкам с бинаризацией сигнала включает несколько этапов: выделение зон суши; создание облачной маски; сегментация снимка на зоны с разным порогом яркости; бинаризация изображения с подготовкой файла «лед — вода». Зоны