

В.Н.СМИРНОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ И МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛЬДА АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА

Представлены результаты исследования особенностей динамики и механики деформирования ледяного покрова СЛО. Основное внимание обращено на описание физико-механических явлений локального и мезомасштаба. Иерархический характер разрушения и формирующаяся фрактальная структура ледяного покрова Арктического бассейна взаимосвязаны между собой и являются прямым следствием квазистационарных циклических процессов в системе атмосфера–лед–океан. Это может быть обусловлено приливами, градиентами атмосферного давления, поверхностными и внутренними волнами, нелинейными автоколебательными процессами и др. Значение пространственно-временной корреляции процессов состоит в потенциальной возможности предсказывать изменение во времени некоторого пространства ледяного покрова, исходя из предшествующей эволюции системы на меньшем масштабном уровне. Свойства самоподобия и самоорганизации могут служить прогностическим индикатором при крупномасштабном мониторинге динамического состояния ледяного покрова. Изучение рассмотренных явлений важно для решения задач прогноза погоды и климата, а также обеспечения безопасности плавания во льдах и разработки шельфовых месторождений.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение морского льда важно для решения задач прогноза погоды и климата, а также обеспечения безопасности плавания во льдах и разработки месторождений на шельфе Арктики. Ледяной покров Северного Ледовитого океана является динамической диссипативной системой геофизического уровня, в которой одновременно протекают физико-механические процессы различного масштаба и интенсивности, приводящие к образованию дискретной структуры ледяного покрова. Локальный вектор скорости перемещения льда может значительно отличаться от вектора скорости генерального дрейфа. Хаотические флуктуации скорости дрейфа разных масштабов обуславливают турбулентное движение льдов. Значительные ускорения при подвижках льда возникают только при сравнительно кратковременных взаимодействиях ледяных образований при сжатии или сдвиге. Мозаичные фрагменты ледовых образований, наблюдаемых на аэрофотоснимках и спутниковых изображениях, образуют самоподобные фигуры, линейные размеры которых изменяются от сотен метров до сотен километров. Характеру деформаций и разломов во льду способствует неоднородность механических характеристик ледяного покрова.

Пространственно-временная изменчивость строения ледяного покрова связана как с термическими процессами нарастания и таяния льда, так и с динамическими процессами различного масштаба. Непрерывное воздействие этих про-

цессов на ледяной покров вызывает перестройку его структуры и структурных связей между составляющими его элементами. В результате этого ледяной покров имеет сложную иерархическую структуру, которая может значительно изменяться в зависимости от региональных и сезонных особенностей ледового режима и динамики атмосферных и океанических процессов. Описание сил, действующих на ледяной покров и вызывающих его дрейф, торошение льдов и образование разводий, представлены во многих работах [2, 3, 8, 9]. Общее уравнение движения льда рассматривается в соответствии со вторым законом механики Ньютона:

$$\tau_a + \tau_w + C + G + T_s + R = \rho_l h_l \frac{dV}{dt},$$

где τ_a – касательное напряжение трения со стороны воздуха на поверхности раздела воздух–лед; τ_w – касательное напряжение трения со стороны воды на поверхности раздела лед–вода; C – горизонтальная составляющая отклоняющей силы вращения Земли; G – проекция силы тяжести на поверхность моря; T_s – горизонтальная составляющая приливообразующей силы; R – сила внутреннего взаимодействия между ледяными полями; ρ_l – плотность льда; h_l – толщина льда; V – вектор скорости дрейфа.

Определению основных характеристик по динамике ледяного покрова Арктики посвящены многочисленные экспедиции на дрейфующих льдах. Используются спутниковая информация, совершенствуются теоретические модели взаимодействия в системе атмосфера–лед–океан. В настоящее время подходы к решению этих задач основываются на совершенствовании технологии изучения крупномасштабных физико-механических процессов в этой системе. Особое внимание уделяется натурным исследованиям на дрейфующих станциях «Северный полюс» динамических процессов, приводящих к сжатию и торошению льдов, возникновению и развитию разводьев.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Известно, что неравномерность распределения полей приземного атмосферного давления и *эффекты приливных движений* изменяют сплоченность ледяного покрова, приводящую к деформированию льда. При анализе результатов инструментальных измерений деформаций и напряжений во льду выявлены пики с периодичностью от 11,9 час до 12,4 час [14]. Очевидно, что эти пики в ледяных полях обусловлены приливными ускорениями в системе лед – вода (рис. 1).

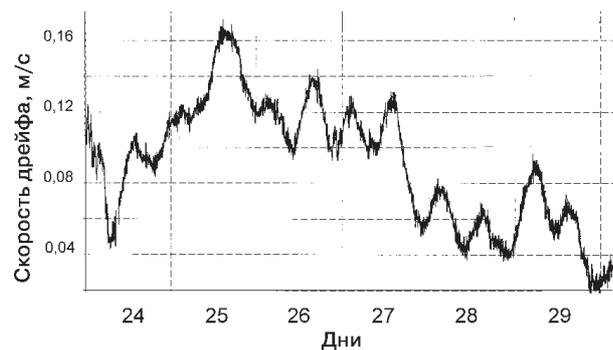


Рис. 1. Модуль скорости перемещения ледяного поля дрейфующей станции СП-33 (август 2005 г.) в Северном Ледовитом океане. Выделяются составляющие ветрового и полусуточного приливного дрейфа. Данные получены из определения координат станции СП с помощью системы спутникового позиционирования (GPS) с интервалом 10 минут

При измерении наклонов дрейфующего ледяного поля и сравнении полученных на дрейфующих станциях данных с траекториями прохождения циклонов отмечены флюктуации наклонов уровенной поверхности океана, сопровождаемые актами динамического взаимодействия (рис. 2). В центре циклона поле давления представляет собой систему замкнутых изобар с минимальным давлением в центре. Вследствие этого и воздействия ветра уровень океана может повышаться в виде впадины диаметром в десятки километров. Высота анемобарических колебаний достигает нескольких десятков сантиметров. При средней скорости перемещения циклонов 40–50 км/час отмечаются как замедления, так и ускорения, во время которых уровень может в несколько раз превышать величины равновесного колебания уровня. В этом случае ледяной покров повторяет форму уровенной поверхности океана.

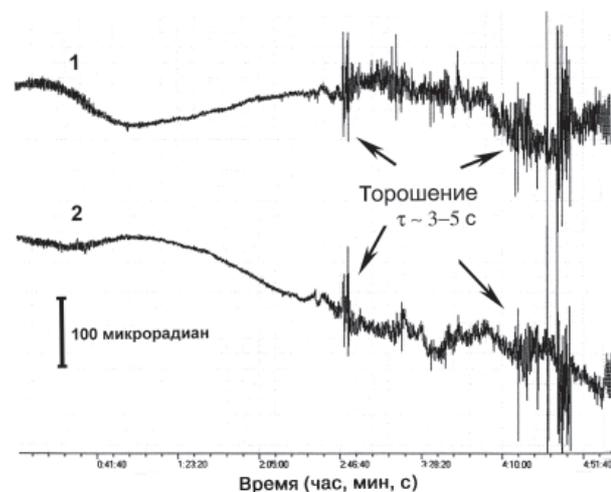


Рис. 2. Пример записи наклонов дрейфующего ледяного поля и процессов торошения (СП-33, 23 августа 2005 г.). Наклоны поля сопровождаются изгибно-гравитационными волнами с периодами от 0,1 до 6,0 с (сеймонаклонометры 1 и 2 ориентированы на С–Ю и З–В, соответственно)

ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ МОРСКОГО ЛЬДА

Процесс разрушения морского льда сопровождается различными формами деформирования: смятием, дроблением, изгибом, срезом со сдвигом и др. Можно выделить следующие масштабы деформирования и разрушения во льдах [6, 13, 14]:

- разрыв связей между отдельными кристаллами и развитие микротрещин (масштаб до 1 м);
- наблюдаемые визуально трещины (десятки-сотни метров, локальный масштаб);
- наблюдаемые на аэрофотоснимках трещины и разводья (1–100 км, мезомасштаб);
- наблюдаемые на спутниковых изображениях протяженные сдвиговые разломы в ледяном покрове (до 1000 км, макромасштаб).

Причиной локальных разрушающих напряжений во льдах являются следующие природные факторы [6, 12]:

- термические напряжения, образующие систему трещин, начиная от мельчайших и кончая сквозными на всю толщу льда; термическое трещинообразование сопровождается широким спектром акустических колебаний;

– разрушение ледяного покрова может быть обусловлено наклонами льда, вызванными совместным действием ветра и течений; в сплоченных морских льдах сравнительно быстро возникают регулярные трещины под прямым углом к направлению дрейфа;

– при изгибных деформациях ледяных полей, обусловленных гравитационными волнами, образуются параллельные трещины на расстоянии половины длины волны друг от друга; простейший случай зарождения волн в ледяном покрове наблюдается от зыби;

– в тонком ровном льде замерзшего разводья при медленном сжатии образуется волнистая поверхность; это явление обусловлено потерей устойчивости формы ледяной пластины при упруго-пластическом деформировании льда; изогнутое таким образом поле может замерзнуть и сохранять свою форму долгое время;

– торошение морских льдов сопровождается сплачиванием обломков в изостатически равновесное нагромождение; там, где имеется большой горизонтальный градиент скорости дрейфа, образуются гряды торосов сдвигового происхождения.

СБРОСЫ НАПРЯЖЕНИЙ

Во время образования сквозных трещин в ледяном покрове отмечаются *сбросы напряжений*, достигающие 30 кПа. Они характеризуют способность ледяного покрова накапливать в себе энергию упругих деформаций и косвенным образом отражают локальную и мезомасштабную прочность льда. Длительные изменения внешних условий ведут к постепенному переходу больших массивов льда в неравновесное состояние, к появлению в них избыточного напряжения и возможного последующего самопроизвольного разрушения. В зимний период лед можно рассматривать как среду с аккумулированной энергией. Разрушение ледяного покрова вызывается не только внешними силами, но и внутренними, действующими изнутри объема льда. В некоторые моменты сочетание этих сил приводит к лавинообразному характеру разрушения. Самопроизвольное разрушение может произойти спустя значительное время после действия внешних сил.

СДВИГОВЫЕ РАЗЛОМЫ

Среди крупномасштабных форм деформирования и разрушения льда (мезо- и макромасштаба) следует выделить сдвиги, вызывающие образование системы крылообразных трещин в узкой протяженной зоне ледяного покрова, затем формирование магистральной трещины и последующее относительное смещение по разрыву с образованием цепочки разводий (рис. 3). Механизм такого процесса во льдах согласуется с основными положениями механики деформирования и разрушения различных сред [4, 5]:

– разлом не пороговое явление, а процесс, развивающийся в пространстве и во времени;

– разрушение осуществляется благодаря возникновению, росту и слиянию трещин в неоднородной среде; развитие трещин происходит как квазистатически, так и динамически;

– формирование макроразрыва приводит к перераспределению напряжений и деформаций в некотором объеме ледяного покрова; макродеформация этого объема состоит из непрерывной и дискретной компонент, обусловленных развитием в объеме трещин;

– образование магистрального разрыва проявляется в виде неустойчивости процесса макродеформации;

– процесс разрушения может протекать с сохранением подобия на разных масштабных уровнях (явления самоподобия и самоорганизации).

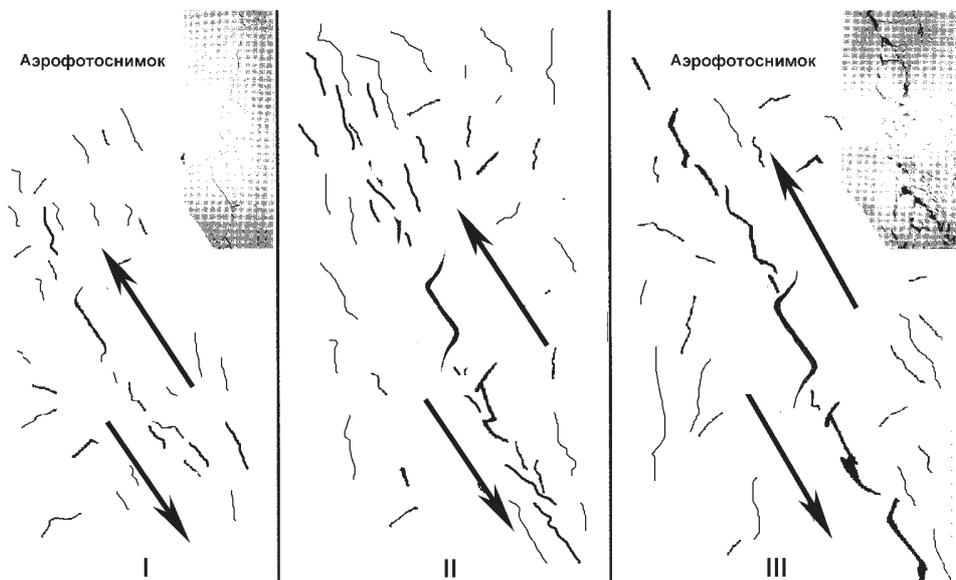


Рис. 3. Примерные этапы возникновения сдвигового разлома в ледяном массиве (обобщенный рисунок с аэрофотоснимков)

Сплоченный консолидированный ледяной покров может быть представлен как связно-сыпучая среда. При сдвиговом разрушении процесс развивается дискретно с образованием системы ступенчато расположенных крылообразных трещин. Магистральный разлом при сдвиге происходит путем соединения этих трещин. Присутствие развитых структур во льдах Арктического бассейна, перекрещивающихся прямолинейных трещин и разводий указывает на вероятность образования относительно быстрых деформаций на больших площадях поверхности океана. Протяженные ледовые ромбовидные образования имеют углы пересечения разрывов в сравнительно узком диапазоне ($30\text{--}40^\circ$). Это говорит о высокой когерентности длины и ширины ледовых образований при деформировании и разрушении ледяного покрова (рис. 4, 5).

Обычно динамика и механика разрушения льда мезо- и макромасштаба анализируются с привлечением соответствующих теорий упругости, вязкости и пластичности [8, 9]. В проблеме масштабного фактора ключевыми являются напряжения в ледяном покрове, или прочность льда, которая может уменьшаться на два-три порядка по величине, когда размер зоны разрушения ледяного покрова смещается от локального масштаба (10–100 м) к мезомасштабному (10–100 км). Это хорошо подтверждается инженерными работами по изучению механики разрушения льда и по определению ледовых нагрузок на широкие шельфовые сооружения: с увеличением размеров площади действующей силы прочность ледяных образований становится на два порядка меньше [12].

Характер динамического взаимодействия ледяных образований между собой и ледяных полей с сооружением имеет общие черты. В обоих масштабах отмечается подобие форм деформирования и разрушения льда, причем при малых относительных скоростях движения лед ведет себя как пластическое тело, при больших — как хрупкое.

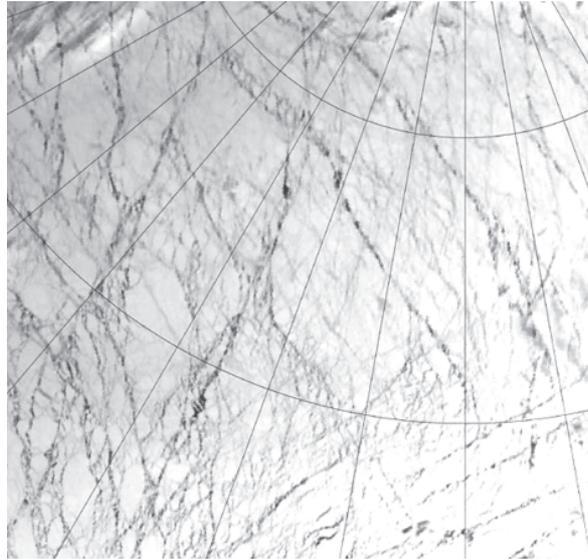


Рис. 4. Фрагмент спутникового снимка NOAA с ромбовидными формами ледяных образований в приполюсном районе (23 мая 2005 г.; размер площади 450 × 450 км)

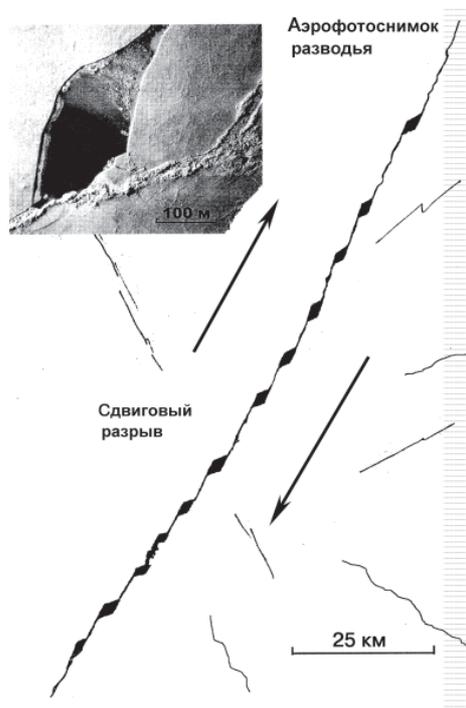


Рис. 5. Протяженный сдвиговый разлом в ледяном покрове с образованием цепочки разводей (рисунок со спутникового снимка NOAA) и аэрофотоснимок типичного развоя с грядой торосов сдвигового формирования (размер сдвига в развье около 200 м)

Самоподобная/фрактальная размерность изрезанных линий гряд торосов и скрытых трещин в ледяном покрове может являться следствием реализации модели Кулона–Мора, согласно которой разрушение среды на сдвиг происходит в том случае, когда касательное напряжение достигает критической величины. При этом параметры мезомасштабной прочности льда выражаются через силу сцепления ледяных образований и угол внутреннего трения на линиях скольжения. Линия сдвига при завершённой консолидации льда описывается выражением

$$\tau_n = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi,$$

где τ_n – предельное сопротивление сдвигу есть функция первой степени от нормального давления σ_n , c – сцепление и φ – угол внутреннего трения. Плоскость разрушения ориентирована по отношению к направлению наименьшего главного напряжения под углами $\pm(45^\circ - \varphi/2)$. С использованием спутниковых снимков ледяного покрова получены оценки угла внутреннего трения и «мезомасштабного сцепления» ледяных образований [11].

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

В ледяном сплоченном массиве при сдвиговой подвижке обнаружены автоколебательные процессы [6]. Прямые измерения горизонтальных смещений и ускорений при подвижках осуществлялись сейсмоаклономерами, установленными непосредственно на ледяных полях. Измеряемый диапазон ускорений составлял $(10^{-1} - 10^{-6})$ м/с². При интенсивных подвижках и торошении горизонтальные ускорения достигали 0,1 м/с². Известно, что одним из явлений, возникающих в реальных диссипативных системах, является генерация незатухающих колебаний, период и амплитуда которых не зависят от характера внешнего воздействия, а определяются свойствами самой системы. Такие колебания называются автоколеба-

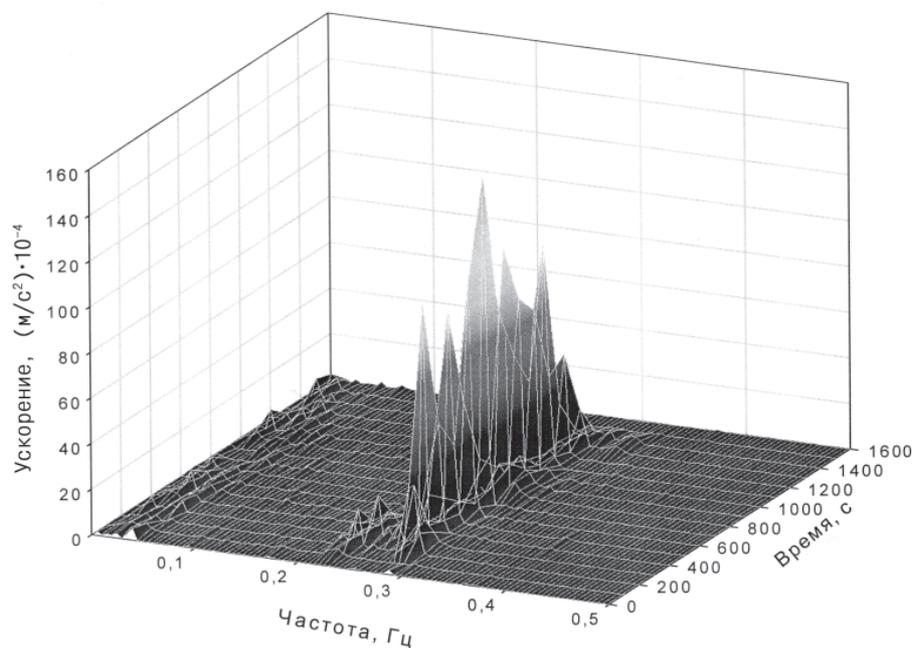


Рис. 6. Текущий трехмерный спектр циклических подвижек ледяного поля, продолжающихся в течение 20 мин. СП-32, 2004 г.

тельными, а генерирующие их системы — автоколебательными системами. Длительность и интенсивность подвижки льда с трением по готовому разрыву формируют деформации льда и структуру излучаемых волн.

Циклические сдвиговые подвижки могут охватывать область значительных размеров [13]. При этом переход от разрывных колебаний к почти синусоидальным зависит от относительной скорости смещения стенок сквозной трещины. При малых скоростях возникают нелинейные импульсы, при сравнительно высоких — почти синусоидальные колебания. Аналогичные процессы возникают при взаимодействии широких инженерных сооружений с движущимся льдом [12].

Внешним источником энергии ледовых автоколебаний являются ветер и поверхностные течения океана. Демпфирующим механизмом служат силы трения ледяных полей относительно друг друга вдоль их общих границ. Процесс прерывистого скольжения характеризуется регулярной повторяемостью процессов накопления и сброса напряжений. На рис. 6 представлены типичные текущие спектры циклических подвижек. В течение 20 минут дрейфующее ледяное поле испытывало горизонтальные подвижки с периодичностью около трех секунд. Связи с локальными метеофакторами отмечено не было, поэтому наблюдаемый процесс относится к разряду природных самоорганизующихся процессов.

Явлениям автоколебаний при взаимодействии ледяных образований сопутствуют аналогичные процессы, связанные с внутренними волнами подо льдом и турбулентностью. На рис. 7 представлена запись наклонов ледяного поля в один из периодов дрейфа станции СП-33. Стабильная периодичность импульсов в течение 10 часов предполагает автоколебательный процесс в системе лед–вода. Время между импульсами составляет около 27 минут. Предварительный анализ показывает, что природа данного явления может быть обусловлена либо крупномасштабным ледовым взаимодействием между ледяными образованиями, либо воздействием на лед гидродинамических эффектов. В первом случае процесс роста давления во льдах сопровождался периодическим продольным изгибом ледяного поля с последующим сбросом давления. Во втором предположении следует рассматри-

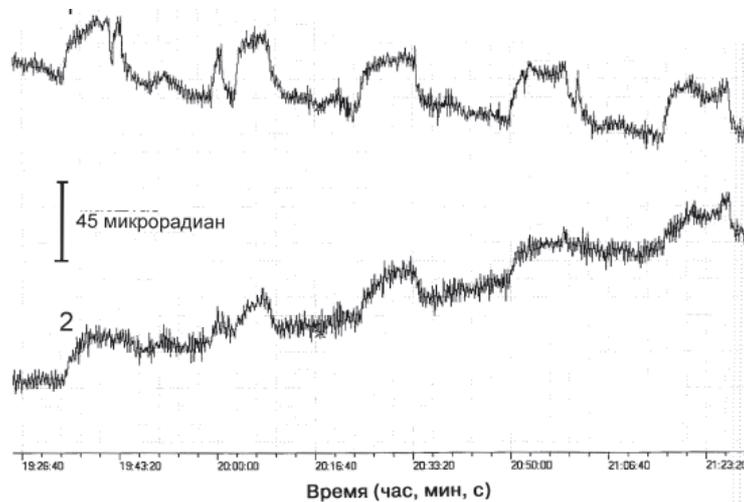


Рис. 7. Фрагмент записи периодических наклонов дрейфующего ледяного поля (СП-33, 28 августа 2005 г.). Процесс длился 10 часов. Отмечается фон волн зыби с периодами в диапазоне 25–30 с и длинами волн до 1500 м (сеймонаклонометры 1 и 2 ориентированы на С–Ю и 3–В, соответственно)

вать короткопериодные гравитационные внутренние волны и течения под ледяным покровом. Внутренние волны тесно связаны с океанской турбулентностью. В зоне максимального градиента плотности иногда происходит резкое изменение скорости течений [1]. В этом случае создаются благоприятные условия для возникновения упорядоченной структуры вод с элементами автоколебательного режима. Можно предположить, что энергией турбулентных флуктуаций обуславливается появление эффективной силы трения и возникновение нелинейного процесса. По-видимому, именно такое явление и зарегистрировано на льду дрейфующей станции. Аналогичное явление проявления короткопериодных внутренних волн в ледяном покрове океана описано в [7]. Здесь снова обнаруживается процесс циклического деформирования ледяного покрова.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На примерах натуральных наблюдений видно, что морской лед является системой, открытой для энергообмена с окружающей средой и подчиняющейся иерархической последовательности. Ледяные образования в системе отделены друг от друга прослойками, построенными, подобно всей системе, из фрагментов разных размеров меньшего масштаба. Такими прослойками могут быть полосы тертого льда, вновь смерзшиеся трещины, гряды торосов и др. Ширина прослоек с низкой прочностью связей может измеряться либо десятками сантиметров, либо десятками и сотнями метров (например, замерзшее разводье). При поступлении энергии из окружающей среды некоторые из систем, достигая состояния неустойчивости, освобождаются от ее избытка в виде сброса внутренних напряжений и генерации колебаний и волн. Эти сбросы энергии, в свою очередь, поглощаются соседними ледяными образованиями. Происходящее таким образом перераспределение энергии при достаточной интенсивности ее поступления из атмосферы или океана может постепенно привести к неустойчивости всю систему.

Иерархическая модель разрушения объектов геофизического масштаба исходит из положения, что процесс накопления трещин на данном масштабном уровне завершается критическим событием — возникновением укрупненных трещин («кластеров»). Далее накопление событий разрушения продолжается на следующем масштабном уровне, где вновь возникшие кластеры играют роль элементарных трещин и т.д. Фундаментальным свойством множественного разрушения дискретной среды является степенной закон распределения числа событий по энергии [4, 5]. На основе этих постулатов обнаружены явления самоподобия и самоорганизации дрейфа морского льда в процессе совместных взаимодействий иерархии ледяных образований [9]. Процесс разрушения на различных уровнях структурной иерархии в принципе единообразен или самоподобен. Отсюда следует автомодельность процесса структурообразования, которая предполагает простые количественные соотношения между размерами области разрушения и энергией процесса разрушения. В качестве очага разрушения можно принять минимальный объем системы взаимодействующих трещин — трещинный кластер (T -кластер, см. рис. 3), при котором происходит потеря структурной устойчивости рассматриваемого уровня системы. Изменение масштаба наблюдения от лабораторных до крупномасштабных проявлений разрушения указывает на подобие процессов с коэффициентом вариации времен ожидания событий энерговыделения. Если время, за которое наблюдается возрастание коэффициента вариации принять за время нестационарного развития очага разрушения, то имеет место связь между временем и линейными размерами этого очага. Выделяются наиболее характерные черты рассматриваемого подхода:

— процессы деформирования и разрушения являются стохастическими дискретными процессами зарождения и развития трещин, взаимодействующих между собой;

– процесс разрушения является автомодельным на всех уровнях проявлений;
– стохастический процесс накопления повреждений локализуется в ограниченном очаге – T -кластере, завершение формирования которого приводит к неустойчивости массива;

– автомодельность процесса предполагает существование констант модели. Для простейшей модели этими константами могут быть плотность энергии, скорость формирования T -кластера и др.

Анализ блоковой структуры ледяных образований выявил ее ранговость и самоподобие/фрактальность, что является важнейшим признаком иерархических систем.

Переходы между метастабильными состояниями осуществляются критическим путем и, как правило, приводят к появлению самоподобных структур, в частности, к фрактальной геометрии продуктов разрушения. Возникновение самоподобия является выражением виртуального «дальнодействия». Например,двигающаяся через ледяной массив трещина в каждый момент времени многократно повторяет свои предыдущие шаги: зарождение на молекулярном уровне — рост на микроскопическом уровне — образование макроскопических разломов и т. д., т.е. сохраняет память о своей истории и воспроизводит ее на последующих масштабных уровнях.

Ряд данных может быть проанализирован с точки зрения оценки роли масштабных факторов как для пространственных, так и временных параметров разрушения. Масштабный ряд событий разрушения ледяных полей может быть выражен степенным законом как для пространственных, так и для временных характеристик. Значение пространственно-временной корреляции состоит в потенциальной возможности предсказывать изменение во времени некоторой области ледяного покрова, исходя из предшествующей эволюции системы на другом масштабном уровне.

Понятие самоподобного множества произвольных геометрических объектов — фрактальных размерностей — включает совокупность линий, поверхностей, имеющих сильноизрезанную форму. Самоподобие по пространству — это статистически одинаковый характер структуры геофизической среды в разных пространственно-временных масштабах рассмотрения. В результате исследования временных и пространственных характеристик ледяного покрова обнаружена самоподобная динамика ускорений ледяных полей, свидетельствующая о статистически эквивалентном распределении времен ожиданий силовых взаимодействий между ледяными образованиями различного масштаба [9].

Представления о фрактальных свойствах ледяного покрова получены из рассмотрения его геометрических свойств по спутниковым изображениям. Известно, что в случае статистического подобия плоских объектов соотношение между их площадью S и периметром L удовлетворяет степенному выражению [10]

$$S^D \approx L^2,$$

где D — фрактальная размерность.

Зависимость S от L представляет собой в логарифмическом масштабе прямую линию, наклон которой равен $2/D$. В результате обработки спутниковых снимков фрактальная размерность D заключалась в диапазоне 1,1–1,3. Приведенное соотношение выполняется во всем доступном для измерений диапазоне. Это означает, что переходы между метастабильными состояниями могут происходить одновременно и идентичным образом на всех масштабных уровнях. Пространственная инвариантность событий в одной статистической системе может быть связана с их временной корреляцией. Самоподобные свойства динамики льда обнаружены при анализе времен ожидания случайных событий: горизонтальных ускорений ледяного поля определенного уровня. Полученные результаты указывают на временную инвариантность дрейфа льда в диапазоне полутора порядков величины по

времени. Последовательность событий, развивающихся согласно степенному закону, указывает на критический характер динамики процесса, в данном случае ветровых и приливных компонент дрейфа. В амплитудном спектре ускорений льда имеются компоненты с устойчивыми периодами, которые являются силовыми факторами разрушения контактных зон взаимодействия ледяных образований. Ледяной покров эволюционирует, поддерживая независимые от масштабного уровня соотношения, определяемые степенным законом в пространственных и временных параметрах происходящих процессов.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов инструментальных наблюдений за динамикой льдов Арктического бассейна показал возможности мониторинга состояния ледяного покрова и его изменчивости. Такой подход позволяет детально исследовать эволюцию динамических событий в морских льдах и их влияние на структуру ледяного покрова. Динамика ледяного покрова проявляется в виде дискретных во времени и пространстве событий, генерация которых свидетельствует о критическом состоянии ледяного покрова. Между динамическими событиями ледяной покров имеет локально равновесное состояние, для которого характерно воздействие колебательного фона.

Иерархический характер разрушения и формирующаяся фрактальная структура ледяного покрова Арктического бассейна взаимосвязаны между собой и являются прямым следствием квазистационарных циклических процессов в системе атмосфера–лед–океан. Это может быть обусловлено приливами, градиентами атмосферного давления, поверхностными и внутренними волнами, нелинейными автоколебательными процессами и др.

Значение пространственно-временной корреляции процессов состоит в потенциальной возможности предсказывать изменение во времени некоторого пространства ледяного покрова, исходя из предшествующей эволюции системы на меньшем масштабном уровне.

Использование теории предельного состояния Кулона–Мора с учетом совместного/одновременного циклического взаимодействия льдов может служить новым подходом к объяснению природы образования упорядоченных структур в ледяном покрове, а также получать оценки геофизической прочности льда.

Сдвиговые разломы в ледяном покрове Арктического бассейна могут быть обусловлены циклическими подвижками льда на значительных пространствах. Циклические подвижки существуют в широком диапазоне смещений и ускорений: от локальных при торошении до мезомасштабных при атмосферных и океанических приливных воздействиях.

Масштабная инвариантность динамики морских льдов в сочетании с их фрактальной организацией позволяют рассматривать ледяной покров как самоорганизующийся фрактальный пространственно-временной домен. Фрактальная размерность может служить прогностическим индикатором при крупномасштабном мониторинге динамического состояния ледяного покрова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты выявляют подходы к организации инструментальных наблюдений по динамике и механике льда в период МПГ. Дальнейшее изучение взаимосвязи между характером динамики и деформаций льда различного масштаба в системе атмосфера–лед–океан с помощью контактных подспутниковых и спутниковых наблюдений является основой для совершенствования моделей динамического поведения морского льда, используемых в прикладных задачах ледовых прогнозов, а также при изучении природы катастрофических явлений локального и геофизического масштабов.

Основные положения настоящей статьи основаны на результатах исследований прошлых лет, а также новых инструментальных наблюдений на дрейфующих станциях «Северный полюс-32, 33, 34», проведенных М.Астаховым, С.Ковалевым и Д.Тузлуковым, которым автор выражает благодарность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляков Л.Н., Нагурный А.П., Савченко В.Г.* Применение линейной теории установившегося движения двухслойной жидкости при исследовании особенностей вертикальной структуры течений в арктических морях // *Тр. АН ИИ. 1972. Т. 306. С. 145–161.*
2. *Лосев С.М., Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н.* Разрывы в ледяном покрове Арктического бассейна по спутниковым данным // *Проблемы Арктики и Антарктики. 2002. Т. 73. С. 36–52.*
3. *Гудкович З.М., Доронин Ю.П.* Дрейф морских льдов. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 111 с.
4. *Куксенко В.С.* Физические причины подобия на различных масштабных уровнях // *Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987. С. 68–73.*
5. *Садовский М.А.* Автомодельность сейсмических процессов // *Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987. С. 6–12.*
6. *Смирнов В.Н.* Динамические процессы в морских льдах. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 162 с.
7. *Смирнов В.Н.* Колебания ледяного покрова, обусловленные внутренними волнами Северного Ледовитого океана // *Докл. АН СССР. 1972. Т. 20. № 5. С. 1105–1108.*
8. *Смирнов В.Н., Чмель А.Е.* Самоподобие и самоорганизация в дрейфующем ледяном покрове Арктического бассейна // *Докл. АН СССР. 2006. Т. 5. С. 684–687.*
9. *Тимохов Л.А., Хейсин Д.Е.* Динамика морских льдов. Математические модели. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 272 с.
10. *Mandelbrot B.B.* The Fractal geometry of Nature. W/H/Freeman and Co., San. Francisco, 1982. 500 p.
11. *Marco J.R., Thomson R.E.* Rectilinear leads and internal motions in the ice pack of the Western Arctic ocean // *J.Geophys. Res. 1977. Vol. 82. № 6. P. 979–987.*
12. *Sanderson T.J.O.* Ice Mechanics: Risks to offshore structure. Graham and Trotman, London, 1988. 253 p.
13. *Smirnov V.N.* The Mechanism of dynamic loads in compressed sea ice during shearing failure. Proc. 16th Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions, POAC. Ottawa, Canada, 2001. Vol. 2. P. 421–429.
14. *Tucker III W.B., Perovich D.K.* Stress measurements in drifting Pack Ice // *Cold regions science and technology. 1992. Vol. 20. № 2. P. 119–139.*

V.N.SMIRNOV

THE FEATURES OF DYNAMICS AND DEFORMATION MECHANICS OF THE ARCTIC BASIN ICE

The results of the research dynamics features and deformation mechanics of the ice cover of the Arctic Ocean are presented. The main attention is paid to the description physical-mechanical phenomena of the local a mesoscale. The hierarchic character of the failure and forming fractal structure of the Arctic Basin ice cover are interconnected and are a direct consequence of the quasi-static cyclic processes in the system atmosphere-ice-ocean. It can be caused by tides, atmosphere pressure gradients, surface and internal waves, non-linear self-oscillating processes and other. The value of the spatial-temporal correlation of the processes consists in the potential possibility to predict the change in time of the some space of the ice cover from the previous system evolution on the smaller scale level. The properties of the self-similarity and self-organization can serve a prognostic indicator at the large-scale monitoring of the ice cover dynamic state.

The study of the considered phenomena is important for solving climate and weather prediction tasks and for navigation safety and development of the shelf deposits.