Мясищев Д.Г.

Кинетика арктических ледовых акваторий в энергетическом аспекте

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В.Ломоносова

doi 10.18411/scc-09-2018-04

idspl 000001:scc-09-2018-04

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы, связанные с состоянием ледяного покрытия, а значит и биологического фактора, морей арктической зоны и внешними техногенным физическими воздействиями на них. За основу исследования приняты базовые положения химической и биологической кинетики. Предложены показатели, позволяющие в историческом аспекте оценить динамику изменения ледяного покрытия арктических морей в зависимости от внешних физических воздействий – тепловое воздействие и механическое разрушение ледяного покрытия океанической акватории. Предложены количественные критерии состояния ледяного покрытия арктических морей в зависимости от внешнего комплексного энергетического воздействия. Приведены примеры прикладного использования полученных результатов.

Abstract

The article deals with issues related to the state of the ice cover, and hence the biological factor, the seas of the Arctic zone and external physical impacts on them. The basis of the study adopted the basic provisions of chemical and biological kinetics. The indicators allowing in historical aspect to estimate the dynamics of changes in the ice cover of the Arctic seas as a function of external physical effects - thermal impact and mechanical destruction of the ice cover of the oceanic area are proposed. Quantitative criteria for the state of the ice cover of the Arctic seas are proposed depending on the external complex energy impact. Examples of applied use of the obtained results are given.

Введение

В основе процессов обмена техногенной системы с внешней средой лежит сложная цепочка организованных определенным образом во времени и пространстве энергетических процессов. При этом физическая сущность этих явлений аналогична глобальным природным энергетическим потокам и их экологическим последствиям. Так, например, активизация солнечной деятельности в виде увеличения теплового излучения приводит к сложным динамическим процессам в условиях Арктических территорий. Это проявляется в экологическом аспекте как неразрывное и постоянное взаимодействие элементов Арктических зон друг с другом, что и определяет текущее поведение целостных экологических арктических систем. А это в свою очередь является основой механизмов их саморегуляции и управления, называемых экологической кинетикой. Рассматривая пример с увеличением теплового излучения солнца, даже на простейшем уровне можно выделить цепь взаимосвязанных сопутствующих процессов. Увеличение температуры атмосферного воздуха; интенсификация таяния льдов; увеличение подвижек ледяных паковых полей; интенсификация образования трещин и разводий; уменьшение средней толщины ледяного покрова; уменьшение площади ледяного покрова арктических зон; многочисленные явления, связанные с трансформациями пищевой биологической цепочки животного мира и т.д. Данный пример относится к сугубо природному входному фактору. Однако, в принципе аналогичные рассуждения могут иметь место и для техногенного входного энергетического фактора, например глобальное потепление в связи с увеличением выбросов в атмосферу углекислого газа. Но могут быть техногенные энергетические воздействия на ледяной арктический покров локального

характера, то есть на ограниченных площадях, но имеющие аналогию в последствиях в сравнении с рассмотренными случаями. На наш взгляд это относится к энергетическим потокам, исходящим от машин, оборудования и технологий надледного типа или в результате explosion факторов. Как и в идеализированном примере с активизацией теплового солнечного потока, а также в случае с глобальным техногенным потеплением, так и при локализованном энергетическом воздействии дискретного надледного оборудования имеет место процесс обмена качественных и количественных характеристик системы ледового арктического поля с окружающей средой. Все эти явления представляют собой совокупность взаимосвязанных переменных величин. Кроме переменных величин, кинетическая система обладает набором определенных параметров, которые не изменяются или незначительно трансформируются во время наблюдения за системой и характеризуют условия протекания обменных процессов и значения их скоростей. В нашем случае это, например, плотность льда, ускорение силы тяжести, плотность морской воды, механическая прочность ледяного покрова и т.п. При этом, если в примере с солнечной активностью процессы обмена не управляемые, а в случае с глобальным потеплением, как пока иллюстрирует современная действительность – малоуправляемые, то при локальном дискретном воздействии надледного оборудования и технологий ситуация требует анализа и последующего синтеза потенциальных экологически рациональных технологических решений.

Объекты и методы исследования

Методология исследования по аналогии с химической и биологической кинетикой для оценки изменения исследуемых переменных величин в каждый момент времени в нашем случае могут быть построены на использовании математических моделей в виде соответствующих дифференциальных уравнений, с последующим анализом их структуры и возможного решения.

В качестве основной идеализации, рассмотренных ниже построений априорно принято, что любое внешнее (надледное) энергетическое техногенное воздействие на арктическое океаническое ледовое поле представимо в виде некоторого потока мощности, который практически реализуется в виде различных физических разрушающих экологическую систему факторов. Это в частности: таяние льдов; образование трещин и разводий (механическое разрушение), то есть «чистой воды» от температурных и механических деформаций, в том числе и от комплексной реакции со стороны водной поверхности и т.п. При этом техногенным источником потока мощности могут быть: факторы глобального потепления; энергетические установки при функционировании надледных технических объектов; технологические процессы, explosion факторы и т.п.

Рассмотрим замкнутую систему некоторого ледяного поля, в которой одновременно происходят процессы избыточного внешнего техногенного энергетического (мощностного) воздействия и как следствие уменьшение площади ледового покрытия. Возникает вопрос, как со временем меняется гидрологическое состояние (покрытие льдом воды) ледового поля и, в конце концов, устанавливается стационарное состояние, когда количество трещин, разводий, полыней (чистой воды) изменяться не будет. А значит, будет сохраняться постоянное количество рапового льда и как следствие диатомовых водорослей как основы пищевой цепочки арктических обитателей. То есть установится экологическое равновесие в рассматриваемой системе. При этом как ограничение можно ввести некоторое «желаемое», например по историческим данным, равновесное состояние.

Пусть в некоторый момент времени t концентрация трещин и разводий на ледовом поле составляет N . Скорость изменения концентрации трещин и разводий в ледяном поле dN/dt ($m^2/га$, или производные единицы) складывается из скорости их появления $VП$ и скорости замерзания $VЗ$.

В нашем случае примем, что скорость появления «чистой воды» в единицу времени пропорциональна ее количеству в каждый момент времени, т.е.

$$V_{\Pi} = \kappa_1 N, \quad (1)$$

где κ_1 – константа пропорциональности, которая в природных условиях зависит прежде всего от времени года, а в случае техногенного воздействия от некоторых технологических внешних факторов. Но в этих обоих случаях мы приводим данную константу к внешнему энергетическому (мощностному) потоку. Временной фактор в нашем случае, учитывая физику образования «чистой воды» целесообразно рассматривать достаточно продолжительным по течению (месяцы, годы).

$$V_3 = \kappa_2 N, \quad (2)$$

где κ_2 – константа пропорциональности, характеризующая интенсивность замерзания, которая практически зависит от тех же факторов, что и κ_1 .

Таким образом

$$dN/dt = \kappa_1 N - \kappa_2 N = \kappa N, \quad (3)$$

где $\kappa = \kappa_1 - \kappa_2$.

Решение уравнения (3) известно:

$$N = N_0 e^{kt}, \quad (4)$$

где N_0 – концентрация трещин и разводий (чистой воды) в начальный момент времени t_0 наблюдения за системой.

Кратко анализируя получим: при $\kappa_1 > \kappa_2$ имеем $\kappa > 0$ и может наблюдаться неограниченный рост количества трещин и разводий, т.е. $N(t) \rightarrow \infty$ при $t \rightarrow \infty$; при $\kappa_1 < \kappa_2 \rightarrow \kappa < 0$ и количество трещин и разводий (чистой воды) будет минимально и постепенно исчезать, то есть в экологическом аспекте произойдет разрушение всей пищевой биологической цепочки данной арктической территории. Однако, при $\kappa_1 = \kappa_2$ справедливо предполагать $N = N_0$, что желаемо, если это соотношение характеризует некоторое экологическое равновесие рассматриваемой арктической системы.

Рассматривая предложенную выше идеализацию одновременно происходящих процессов избыточного внешнего энергетического (мощностного) воздействия и как следствие уменьшения площади ледяного покрытия правомерно обратиться к логистическому уравнению Ферхлюста [3]. Причем в нашем случае это будет желаемое (целесообразное) описание рассматриваемой арктической ледяной территории.

$$dN/dt = \kappa_1 N ((N_{max} - N)/N_{max}), \quad (5)$$

где N_{max} – максимально возможная по условиям экологичности концентрация разводий и трещин на данной арктической площади.

Отсюда, основываясь на предложенной выше гипотезе энергетического воздействия, следует, что любое внешнее надледное техногенное влияние на арктическую территорию требует целенаправленного управляющего воздействия человека для обеспечения

$$N_0 = N_{max} = N_{ОПТ}, \quad (6)$$

где $N_{ОПТ}$ – в нашем случае оптимальная по экологическим предпосылкам концентрация трещин и разводий на данной арктической акватории. С позиции кинетики это есть искомое стационарное состояние системы.

Таким образом, нами рассматривается простая открытая система типа «техногенное внешнее энергетическое надледное воздействие – концентрация «чистой воды» на арктическом ледяном поле». В которой происходит обмен свойства a – концентрация потока мощности надледного техногенного воздействия (кВт) и свойства b – относительная концентрация трещин и разводий – чистой воды ($\text{м}^2/\text{га}$, или производные единицы) по площади ледяного поля с окружающей средой, и кроме того обратимый процесс первого порядка превращения $a \leftrightarrow b$. На рис.1 представлена принципиальная схема рассматриваемой открытой системы. На ней обозначены параметры (помимо указанных выше показателей a и b): A – возможная по

технологическим потребностям общества концентрация надледного энергетического (мощностного) потока: B – допустимая по экологическим соображениям концентрация разводий и трещин на данном арктическом ледяном поле (аналог N_{OIT}). По технологическим потребностям общества решается задача $A \rightarrow a$, в результате чего получаем реактивный процесс $a \rightarrow B$. Кроме того происходит сугубо внутрисистемная реактивная трансформация последствий $a \leftrightarrow b$. Например, изменение режимов притока внешнего техногенного энергетического потока в зависимости от состояния ледового поля, и соответственно наоборот.

Значения констант скоростей k_1 , k_{+2} , k_{-2} и k_3 (рис.1) носят в данном случае феноменологический обобщенный характер.

Рис. 1. Открытая система – модель обменных исследуемых процессов в арктической ледовой акватории
Уравнения кинетики для этой системы имеют следующий вид [3]:

$$\left. \begin{aligned} da/dt &= k_1(A-a) + k_{-2}b - k_{+2}a = f_1(a, b), \\ db/dt &= k_{+2}a - k_{-2}b - k_3(b-B) = f_2(a, b). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Так как в стационарном состоянии системы переменные (a, b) принимают постоянные значения, то

$$da/dt = 0 \text{ и } db/dt = 0.$$

Приравняв к нулю правые части (7):

$$da/dt = f_1(a, b) = 0; \quad db/dt = f_2(a, b) = 0, \quad (8)$$

получаем систему алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -(\kappa_1 + \kappa_{+2})a + \kappa_{-2}b + \kappa_1 A &= 0, \\ \kappa_{+2}a - (\kappa_{-2} + \kappa_3)b + \kappa_3 B &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Решение данной системы дает стационарные точки a' и b' [3]:

$$\begin{aligned} a' &= (\kappa_1(\kappa_{-2} + \kappa_3) + \kappa_3\kappa_{-2}B) / (\kappa_1\kappa_{-2} + \kappa_1\kappa_3 + \kappa_{+2}\kappa_3), \\ b' &= (\kappa_3(\kappa_1 + \kappa_{+2})B + \kappa_1\kappa_{+2}A) / (\kappa_1\kappa_{+2} + \kappa_1\kappa_3 + \kappa_{+2}\kappa_3). \end{aligned} \quad (10)$$

Данные решения указывают на то, что эти величины не зависят от начальных условий системы при $t=0$. Но определяются только величинами констант и параметрами A и B . То есть в каком бы начальном состоянии не находилась система, в ней в конечном итоге установится один стационарный режим, при котором $a = a', b = b'$.

Результаты исследования и их обсуждение

Пусть показатель $b = b'$ (безразмерный) в рассматриваемой арктической системе для конкретной временной ситуации однозначно определен:

$$b=b'=B''/S, \quad (11)$$

где B'' – суммарная площадь разводий и трещин (чистой воды) на рассматриваемой арктической океанской акватории (км^2 , или производная единица), S – общая ледовая (включая чистую воду) площадь рассматриваемой территории арктического океана (км^2). Будем называть этот параметр «коэффициент чистой воды».

Параметр A в рассматриваемой задаче известен из постановки технического задания на конкретный вид рассредоточенного по площади надледного арктического оборудования или технологического процесса.

Допустим момент $t=0$ это временное положение рассматриваемой арктической системы, при котором ее стационарное состояние полностью обеспечивало экологическое равновесие в историческом аспекте, то есть без техногенного влияния, или с его приемлемым уровнем по условию экологических последствий. То есть для данного случая $b=b_0$ некоторым образом определено по историческим сведениям. Это есть желаемое состояние системы.

Тем не менее в данной конкретной техногенной ситуации начало временной оси по сути является своей временной точкой $t=0$, для которой $a=a_0$ задано по технологическим условиям применения надледного оборудования и технологий (техногенного фактора). Причем, этот показатель несет в себе энергетический физический смысл. Пусть это будет «внешняя надледная мощность» воздействия на рассматриваемую арктическую систему. Соответственно данному притоку внешнего энергетического воздействия соответствует некоторая убыль (уменьшение S) ледяного покрова ΔS (км^2 , или производная единица) с образованием чистой воды.

Как отмечалось выше, любая экологическая система стремится в некоторое устойчивое состояние (стационарное состояние), не зависимо от начальных условий a_0 и b_0 , что отражает свойство эквифинальности стационарных состояний экологических процессов. С другой стороны, устойчивые (стационарные) состояния могут быть различными, в зависимости от внешних (управляемых) факторов. Могут быть, например, колебательные стационарные состояния. Значит, с нашей точки зрения (субъективной) могут быть «хорошие» и «плохие» стационарные состояния. Будем исходить из того, что в любом стационарном состоянии рассматриваемой техногенной арктической системы имеется некоторая общность. Для обоснования данной общности введем параметр

$$K_{II}=\Delta S/a_0, \quad (12)$$

имеющий размерность, например $\text{м}^2/\text{кВт}$ (или производная единица). Физически это есть скорость убывания ледяного поля арктической акватории океана в потоке мощности внешнего техногенного энергетического воздействия. В каждом конкретном технологическом случае этот показатель индивидуален. Однако, если данный параметр использовать в комбинации

$$P_{II} = b/K_{II}(\text{кВт}/\text{м}^2 \text{ или } \text{кВт}/\text{км}^2), \quad (13)$$

можно прийти к зависимости

$$P_{II}=(a_0 B'')/(S \Delta S). \quad (14)$$

С учетом раскрытого ранее смысла компонентов соответствия (14), и логического анализа их взаимосвязи, возможен следующий вывод. Синтезированный показатель P_{II} целесообразно определить как предельную (критическую) удельную внешнюю надледную техногенную мощность по условию неизбежного образования чистой воды (трещин и разводий). В стохастическом аспекте для всех рассматриваемых арктических ледовых океанических полей этот показатель одинаков и постоянен, то есть в рассматриваемых системах $P_{II} = \text{const}$.

На рис.2 представлен логистический график, поясняющий качественное содержание полученного результата.

Рис.2. Логисты показателей кинетики техногенного энергетического равновесия ледовых арктических акваторий

Пример результатов моделирования. Дальнейшие рассуждения предполагают стабильность во времени солнечной активности. Известно [6,4], что до 2007 года за 50 прошедших лет (то есть начиная примерно с 1957 года) площадь ледяного покрытия арктической акватории уменьшилась на $\Delta S \approx 2 \times 10^6$ км² и составила $4,3 \times 10^6$ км². При этом средняя толщина ледяного покрытия составляет 1,8 м. Простой расчет показывает, что за этот период, так или иначе «превратилось» в жидкую воду $\approx 3,6 \times 10^{12}$ м³ ледяного массива. Принимая во внимание плотность водяного льда равной величине 916,8 кг/м³ [7], данный ледяной фрагмент имел массу $3300,48 \times 10^{12}$ кг.

С другой стороны, удельная теплоемкость таяния водяного льда составляет 334 кДж/кг [5], что для оцененного ледового массива равняется внешним энергозатратам в количестве $110,2 \times 10^{16}$ кДж. Эта величина реализована за 50 лет, то есть за $1,56 \times 10^9$ с. В формате затраченной внешней техногенной мощности это равно оценочно составляет 70×10^7 кВт. Однако, в реальности лед не только таял, но и дробился механическим путем в результате различных обстоятельств (образование трещин, сталкивание льдин, откалывание айсбергов и т.п.). При этом расход энергии на процесс механического дробления водяного льда оценочно равен 0,25 (кВт ч)/м³ [2]. Или в пересчете затрат мощности на единицу массы эта оценка равна $2,72 \times 10^{-4}$ (кВт)/кг. Принимая во внимание, что 50 лет «потерянный» ледовый фрагмент по массе оценен выше, и идеализируя разрушение ледовой арктической акватории только лишь дроблением ледяного массива, найдем техногенные внешние затраты мощности в количестве $0,9 \times 10^{12}$ кВт.

Предполагая в первом приближении, что убыль ледового покрова в рассматриваемой арктической системе в равной степени складывается из таяния и механического разрушения ледовой акватории, найдем средние затраты мощности на процесс уменьшения исследуемого ледового арктического поля:

$$a = (70 \times 10^7 + 0,9 \times 10^{12}) / 2 = 4,5 \times 10^{11} \text{ кВт.} \quad (15)$$

В соответствии с формулой (11) усредненный коэффициент чистой воды для рассматриваемого расчета составит

$$b_{50} = 2 \times 10^6 / (2 \times 10^6 + 4,3 \times 10^6) + 0,28 = 0,6. \quad (16)$$

Где величина 0,28 обоснована следующим образом.

В качестве координатной временной привязки экологических оценок, возьмем за $t=0$ указанный выше 1957 год. В эти «экологически чистые» годы коэффициент чистой воды уже составлял $b_{0,28} = 0,28$ [1] в формате внешних энергетических техногенных воздействий тех лет.

Используя выражение (12) для указанного 50-ти летнего временного интервала найдем:

$$K_{П50} = (2 \times 10^6) / (4,5 \times 10^{11}) = 0,44 \times 10^{-5} \text{ км}^2/\text{кВт} = 4,4 \text{ м}^2/\text{кВт}. \quad (17)$$

Данная оценка скорости убывания ледяного поля рассматриваемой арктической акватории в потоке мощности внешнего энергетического воздействия позволяет сделать предположение. А именно - обеспечила за прошедшие пять десятков лет существующие нежелательные экологические последствия.

Принимая за основу свойство гомогенности исследуемой арктической системы, и обращаясь к соответствию (14), найдем:

$$P_{П} = b_{0,28} / K_{П0,28} = b_{50} / K_{П50} = 0,6 / 4,4 = 0,136 \text{ кВт/м}^2. \quad (18)$$

Полученный результат позволяет оценить историческое значение скорости убывания ледового поля арктической акватории в потоке мощности внешнего техногенного энергетического воздействия, при которой желаемые отрицательные экологические последствия соответствуют 50-ым годам прошлого века:

$$K_{П0,28} = b_{0,28} / P_{П} = 0,28 / 0,136 = 2,06 \text{ м}^2/\text{кВт}. \quad (19)$$

То есть, принимая полученный показатель в качестве фактора благополучного экологического равновесия в исследуемой арктической системе можно решать реальные практические природоохранные мероприятия.

Например, прогнозировать снижение глобальных выбросов в атмосферу углекислого газа, при которых парниковый эффект уменьшится до степени, обеспечивающей желаемое значение КПО,28 на заданной площади арктических территорий. Таким образом, предполагается потенциальная возможность оптимальным управлением климатом и экологической ситуацией в Арктике.

В локальном приложении возможно планирование экологически чистых по выбранным критериям (образование чистой воды) размеров участков арктической акватории для технологического применения надледного оборудования и технологий. Например, исходя из результата (19) для универсального многокомпонентного (возможно роботизированного) технологического комплекса (бурение и резка льда, постройка аэродрома, сооружение ледяных терминалов и т.п.) с суммарной мощностью энергетических установок 1500 кВт минимально допустимая по указанным критериям площадь применения составляет $1500 \times 2,06 = 3090 \text{ м}^2$. Данный итог может рекомендоваться учитывать при проектировании технологических процессов рассматриваемого виртуального комплекса.

Таким образом, изложенные результаты являются предпосылками для результатов для долгосрочного прогнозирования явлений убыли ледового арктического массива и экологических последствий от данных процессов. Обосновываются предпосылки для целесообразного техногенного управления этими событиями, как в глобальном, так и в локальном масштабах.

1. Плавание подводных лодок в Арктических льдах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.redov.ru (Дата обращения 25.09.16, 11 часов 58 минут)
2. Производство и применение льда [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.bibliotekar.ru (Дата обращения 25.09.16, 13 часов 6 минут)
3. Рубин А.Б. Лекции по биофизике: учеб. Пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 160 с.
4. Сколка. Сколько льда? О том, как меняется в Арктике климат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arctic-blog.livejournal.com> (Дата обращения 25.09.16, 11 часов 27 минут)
5. Удельная теплота таяния льда [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://otvet.mail.ru> (Дата обращения 25.09.16, 11 часов 42 минуты)
6. 6. Ученые удивлены отсутствием льда в Арктике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ostatok.net (Дата обращения 25.09.16, 11 часов 16 минут)
7. Эллиот Л., Уилкокс У. Физика / перевод с английского под редакцией проф. А.И.Китайгородского. – М.: Наука, 1979. – 736 с.