

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРЕЙФА АЙСБЕРГА

А. И. Тюгалева¹, Р. И. Май^{1,2}, канд. геогр. наук

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

NUMERICAL MODELLING OF ICEBERG DRIFT

A. I. Tyugaleva¹, R.I. May^{1,2}, Cand. Sc.

¹Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

Данная статья представляет собой описание модели дрейфа айсберга, которая учитывает изменения различных параметров во время его движения. Модель включает в себя силы воздействия ветра, воды и течения, морского льда, сила градиента давления, и Кориолиса. Верификация модели проходила по данным ветра и течений за 24 июня 1983 года, взятым из работы [Smith, Donaldson, 1987].

This article is a description of the iceberg drift model, which takes into account changes of various parameters during its movement. The model includes effects of wind, water, currents and sea ice, the pressure gradient and the Coriolis force. Data of wind and currents for June 24, 1983 [Smith, Donaldson, 1987] were used for verification.

Введение.

Айсберги всегда несли огромную опасность для судоходства и разработки нефти. Сейчас применяются гидроакустические средства (ГАС) и радиолокационный метод обнаружения айсбергов на пути следования судна. Однако пресная вода вокруг айсберга создает экранирующий эффект, поэтому при помощи ГАС айсберги обнаруживаются на сравнительно небольшом расстоянии. Радиолокационный метод не вполне надежен потому, что для материкового пресноводного льда, из которого состоят айсберги, характера слабая отражательная способность. Так же на определение положения айсберга такими способами влияют его параметры, гидрологические и геофизические условия [1]. Для того, чтобы получить наиболее достоверную информацию об айсберге, необходима модель, которая выстроит траекторию его движения, учитывая все факторы изменения массы и объема ледяного тела, изменения течений, ветра и других параметров.

Описание модели дрейфа айсберга.

Основным уравнением моделей дрейфа айсберга, таких как [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], является уравнение движения, в основе которого лежит второй закон Ньютона

$$M \frac{du}{dt} = F_A + F_W + F_P + F_I + F_C, \quad (1)$$

где M -масса айсберга, u —скорость дрейфа айсберга, F_A — сила воздействия ветра, F_W — сила воздействия воды и течения, F_P — сила градиента давления, F_I — сила воздействия морского льда, F_C — сила Кориолиса. Прочие силы, такие, как тяговое усилие, сила волнового воздействия, взаимодействия грунта и сила градиента давления являются дополнительными и учитываются далеко не во всех моделях.

Сила воздействия ветра.

Величина воздействия ветра пропорциональна квадрату относительной скорости ветра:

$$F_A = \frac{1}{2} \rho_a c_a A_{va} |u_a - u_i| (u_a - u_i), \quad (2)$$

где ρ_a - плотность воздуха, c_a - безразмерный коэффициент сопротивления формы, A_{va} — поперечное сечение айсберга, подверженное ветру [4, 8].

Некоторые модели используют более сложный вариант силы сопротивления ветра, учитывая не только лобовое сопротивление (т.е. действие ветра на вертикальные стенки айсберга), но и сопротивление горизонтальной поверхности (т.е. воздействие ветра на верхушку айсберга), например, модели [3, 6]:

$$F_A = \underbrace{\frac{1}{2} (\rho_a c_a A_{va}) |u_a - u_i| (u_a - u_i)}_{formdrag} + \underbrace{(\rho_a c_{da} A_{ha}) |u_a - u_i| (u_a - u_i)}_{skindrag} =$$

$$\left[\frac{1}{2} (p_a c_a A_{va}) + (p_a c_{da} A_{ha}) \right] |u_a - u_i| (u_a - u_i), \quad (3)$$

где, c_{da} - безразмерный коэффициент поверхностного сопротивления воздуха, A_{ha} - горизонтальные (верхние) участки айсберга, подверженные действию ветра.

Сила воздействия течений.

Сила воздействия течений моделируется так же, как и ветровое сопротивление, но для получения более точных результатов водную толщу, в которой лежит айсберг, разбивают на дискретные слои, а сама сила воздействия воды является суммой сопротивления по всем этим слоям. Тогда сила воздействия воды на айсберг будет выражаться формулой:

$$F_W = \frac{1}{2} p c_w \sum_k A_k |u_w^k - u_i| (u_w^k - u_i), \quad (4)$$

где k – уровень слоя воды ($k=1$ – поверхность воды), A_k - площадь поперечного сечения в k -том слое, u_w^k – скорость воды k -того слоя, c_w - безразмерный коэффициент сопротивления формы [4],[8].

Так же в моделях [3, 6] используется усложненная формула

$$F_W = \underbrace{\frac{1}{2} p_w c_w \sum_{k=1}^n A_k |u_w^k - u_i| (u_w^k - u_i)}_{formdrag} + \underbrace{p_w c_{dw} A_{hw} |u_w^n - u_i| (u_w^n - u_i)}_{skindrag}, \quad (5)$$

где c_w – безразмерный коэффициент сопротивления формы, c_{dw} - безразмерный коэффициент поверхностного сопротивления воды, u_w^n - скорость воды на n -ном слое, A_{hw} - горизонтальная поверхность (основание), которая подвергается воздействию воды, т. е. учитывается поверхностное сопротивление основания айсберга.

Сила, обусловленная наклоном уровня моря.

Под влиянием различных факторов, таких, как неравномерное распределение тепла, солености, давления в толще воды и на ее поверхности, происходит изменение уровня океана. Наклон морской поверхности влияет на траекторию движения айсберга.

Данная сила высчитывается по формуле из работы [6]

$$F_p = -MgV\eta, \quad (6)$$

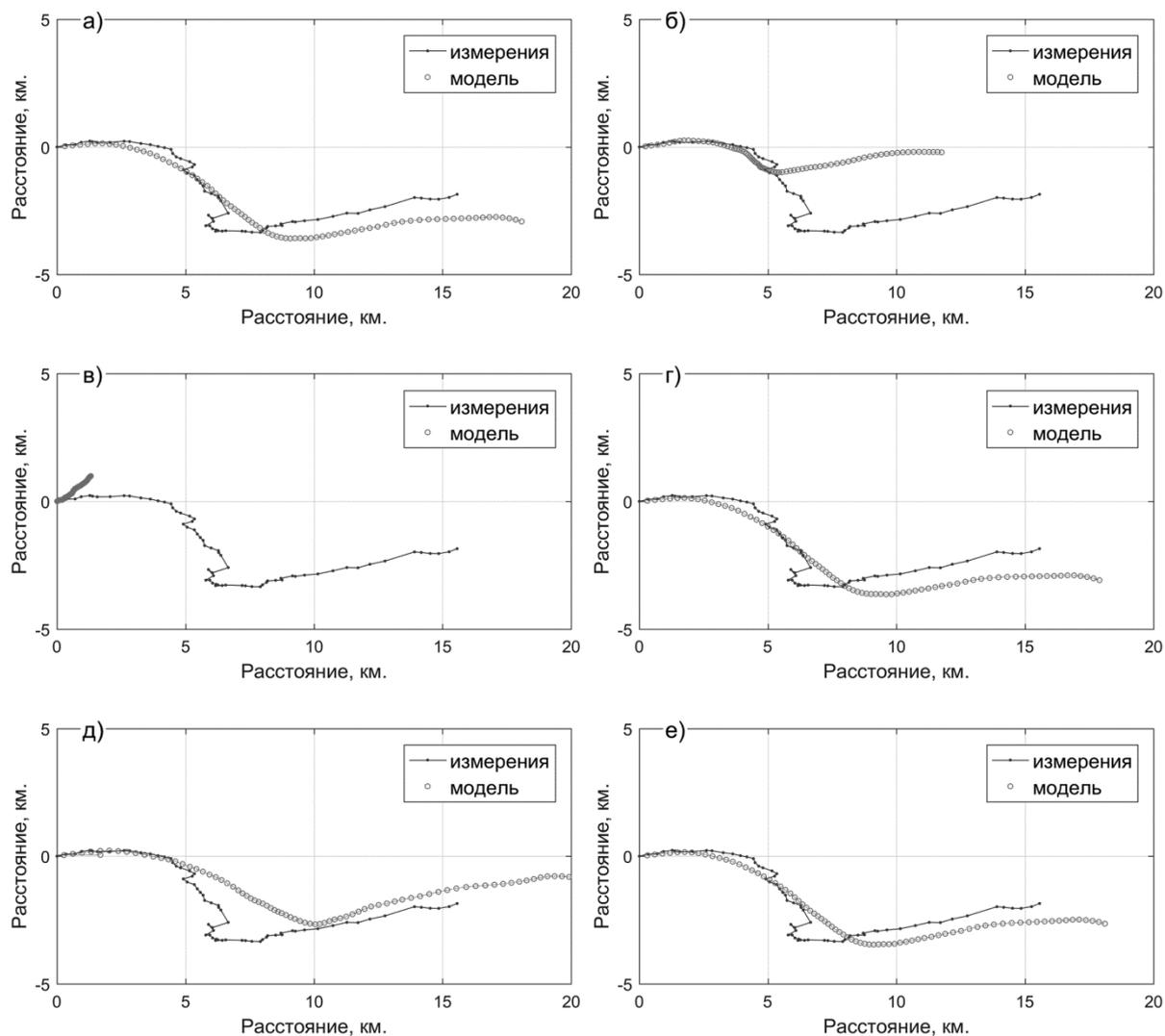
где η — высота морской поверхности.

Реализация модели и численные эксперименты.

Для построения дрейфа айсберга и верификации модели были использованы данные отслеживания айсберга 83-1 за период с 5:00 до 19:10 за 24 июня 1983 года, взятые из работы [7]. Этот небольшой пирамидальный айсберг был обнаружен в проливе Белл-Айл в точке с координатами 51°46'с.ш., 55°55'з.д. Геометрические параметры и масса айсберга опубликованы в работе [7]: высота 19 м, длина 66 м, ширина 37 м, осадка 54 м, масса 85 кт. В течение периода наблюдения за айсбергом, также измерялись ветер и течения на разных горизонтах. Измеренные ветры были легкими и постоянными в направлении, в то время как течения были относительно сильными, вращаясь против часовой стрелки и слегка уменьшаясь с увеличением глубины.

При моделировании траектории дрейфа айсберга в расчет не брались те данные, когда судно находилось на расстоянии более одной морской мили. Это объясняется в работе [7] тем, что течения, измеренные вблизи судна, являлись нерепрезентативными вблизи айсберга. В модели использовались силы воздействия ветра, течений и сила Кориолиса. Этот факт обуславливается отсутствием других данных за этот период времени. Коэффициенты C_a и C_w были взяты равными 0.6 и 2.6 соответственно, были выбраны методом перебора значений. Такие же коэффициенты рекомендуются авторами в статьях [4, 6].

Для численного интегрирования уравнений движения (1) использовалась явная схема. Шаг по времени для расчета сил составил 120 секунд. При увеличении шага возникла численная неустойчивость. При изменении шага от 10 до 120 секунд происходило незначительное смещение трека относительно точки начала, но в основном траектория оставалась неизменной. При $C_w \geq 3.0$ также возникла численная неустойчивость расчетов. Сравнение наблюденной и воспроизведенной моделью траекторий дрейфа айсберга представлено на рисунке 1а.



- а) дрейф айсберга, рассчитанный по модели с учетом силы Кориолиса, воздействия измеренного ветра, и измеренных на различных горизонтах течений (основной эксперимент).
- б) то же что и основной эксперимент, но заданием вертикально осредненных течений.
- в) то же что и основной эксперимент, но скорость течений приравнена нулю на всех горизонтах.
- г) то же что и основной эксперимент, но без учета воздействия ветра (скорость ветра приравнена нулю).
- д) то же что и основной эксперимент, но при завышенной скорости ветра (20 м/с).
- е) то же что и основной эксперимент, но без учета силы Кориолиса.

Рис. 1. Измеренная и смоделированная траектории дрейфа айсберга в результате численного эксперимента на модели дрейфа айсберга

Также была проведена серия численных экспериментов по определению вкладов различных сил в формирование траектории дрейфа айсберга. На рисунке 1 представлена траектория дрейфа, рассчитанная по вертикально осредненным течениям (рис 1б) и без учета течений (рис 1в). Результаты численных экспериментов без учета воздействия ветра и с завышенной скоростью ветра представлены на рисунках 1г и 1д, соответственно. Траектория дрейфа без учета силы Кориолиса показана на рисунке 1е.

Как видно из рисунка 1б, общее направление моделированного трека по осредненным течениям совпадает с действительной траекторией дрейфа, а при отсутствии течений траектория дрейфа кардинально меняется (рис. 1в).

При исключении силы воздействия ветровых потоков траектория дрейфа айсберга претерпевала незначительные изменения (рис. 1г). Конечная точка траектории без учета ветра имеет небольшое смещение на юг (примерно 450-650 м) от траектории, рассчитанной по полной модели (рис. 1а). Воздействие усиленного ветра (скорость ветра приравнена 20 м/с) также незначительно изменило траекторию дрейфа (рис. 1д). Это связано с небольшой высотой айсберга, и малой площадью поперечного сечения, подверженного воздействию ветра.

Без учета силы Кориолиса, как и ожидалось, траектория дрейфа айсберга отклоняется влево (рис. 1е) от траектории, рассчитанной по полной модели (рис. 1а).

Результаты численных экспериментов показали, что траектория айсберга 83-1 из работы [7] в основном определяется воздействием течений. Это обусловлено небольшой площадью поперечного сечения надводной части айсберга (445 м²), подверженной влиянию ветра, сильными течениями приливного характера, и значительной осадкой (54 м) и площадью поперечного сечения подводной части айсберга (2275 м²).

Заключение.

Созданная модель является одной из попыток моделирования дрейфа айсберга с возможностью прогнозирования траектории движения. Модель была выведена на основе уже существующих математических моделей [2,3,4,5,6,7,8]. Верификация модели проводилась по данным отслеживания айсберга за 24 июня 1983 года в проливе Белл-Айл, взятым из работы [7]. В ходе численных экспериментов было установлено, что основной силой, влияющей на движение рассматриваемого айсберга, оказалась сила воздействия течений, причем наиболее эффективным оказался метод разбиения водной толщи и подводной части айсберга по горизонтам с шагом 10 метров. В этом случае моделированный трек имел схожее направление с измеренной траекторией дрейфа айсберга.

В дальнейшем планируется использование данной модели для получения генеральных направлений дрейфа айсберга для конкретных акваторий, для расчета айсберговой опасности, и как инструмента для климатического расчета распределения айсбергов.

Литература

1. Айсберги как элемент навигационной обстановки. Министерство обороны союза ССР Главное управление навигации и океанографии, 1988. 35 стр.
2. Клячкин С. В., Май Р. И. Прогностическая модель дрейфа айсберга//Проблемы Арктики и Антарктики, 2012. №1(91), с.78-88.
3. Abrahamowicz M. A thermodynamic and dynamic lagrangian model for icebergs: a data-model intercomparison for the Southern Ocean. Montreal, Quebec: McGill University, 2007. с. 35-39
4. Keshouche I., Bertino L., Lisaeter A. Parameterization of an iceberg drift model in the Barents Sea // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 2009. № 26 (10). с. 2216–2227.
5. Keshouche I., Counillon F., Bertino L. Modeling dynamics and thermodynamics of icebergs in the Barents Sea from 1987 to 2005 //Journal of geophysical research, vol. 115, C12062, doi:10.1029/2010JC006165, 2010
6. Pavac M., Coche E. A stochastic model of iceberg drift including wave effect//ROGTEC, May, с.86-97
7. Smith S.D., Donaldson N.R. Dynamic modeling of iceberg drift using current profiles., //Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences, №91., 1987.
8. Smith S.D. Hindcasting iceberg drift using current profiles and winds // Cold Regions Science and Technology. 1993. № 22. P. 33–45.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-60109 «Исследование процессов формирования и эволюции опасных ледовых явлений и ледяных образований в Арктике при современных изменениях климата».

This work was supported by the RFBR grant 18-05-60109 “Study of the formation and evolution of dangerous ice phenomena and ice formations in the Arctic under current climate change”.