

УДК 517.928

## АНАЛИЗ МОДЕЛИ СТОММЕЛЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ОКЕАНА

© Ивахнова А.А., Щепаккина Е.А.

*Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация*

e-mail: ivahnova.anna@mail.ru

В представленной работе исследуется математическая модель Стоммеля, описывающая глобальную циркуляцию океана, обусловленную различиями в плотности морской воды. Эта модель учитывает взаимное влияние показателей солёности и температуры океана (так называемая термохалинная модель).

Концепция термохалинной циркуляции была изучена Генри Стоммелом в 1961 году на системе с двумя ящиками. В этой простой модели два сообщающихся сосуда представляют собой поверхностные воды экваториальных (горячая и солёная вода) и полярных (более холодная и менее солёная вода) регионов соответственно [1]. В этой простой модели тепловая и халинная силы противопоставлены. Фактически в капилляре один только температурный градиент вызовет движение, идущее от полюсов к экватору с возвратом на поверхность от экватора к полюсам. Напротив, один только градиент солёности вызовет движение, идущее от экватора к полюсам в капилляре, с возвратом на поверхность полюсов к экватору. В безразмерной форме модель представляет собой сингулярно возмущённую систему дифференциальных уравнений с дополнительными параметрами:

$$\begin{cases} \dot{x} = \mu - x - A|y - x|x, \\ \varepsilon \dot{y} = 1 - y - \varepsilon A|y - x|y. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $x$  – безразмерная разница солёности воды,  $y$  – безразмерная разница температур,  $(y - x)$  – переменная циркуляции,  $\mu$  – так называемый параметр потока пресной воды, отношение воздействия солёности к воздействию температуры,  $A$  – параметр зависимости скорости потока от солёности и температуры,  $\varepsilon$  – малый положительный параметр [2].

Целью исследования системы (1) является изучение динамики решений в зависимости от значений параметров модели и выявление возможных бифуркаций. Исследование модели проводится методами качественной теории дифференциальных уравнений, а также численными методами.

Качественный анализ системы включает нахождение особых точек, координаты которых зависят от дополнительных параметров системы, определение их типа и условий устойчивости. Было установлено, что при изменении значений параметров меняется количество особых точек. Были определены условия в виде соотношения между значениями параметров  $\mu$  и  $A$ , при которых происходит седло-узловая бифуркация, дана физическая интерпретация полученных математических результатов. Были определены условия, при которых происходит циркуляция воды. Численные результаты исследования подтверждают выводы, полученные качественными методами. Так, например, на рисунке приведены результаты численного исследования модели для случая  $\varepsilon = 0,001$ ,  $\mu = 1,5$  и  $A = 4$ . Из графика можно увидеть, что над потоком сначала доминирует температура, а затем солёность. Этот результат означает, что сначала вода течёт от холодных высоких широт в более тёплые низкие широты, затем

на экваторе происходит изменение движения воды, и вода перемещается из более теплых низких широт в более холодные высокие широты.

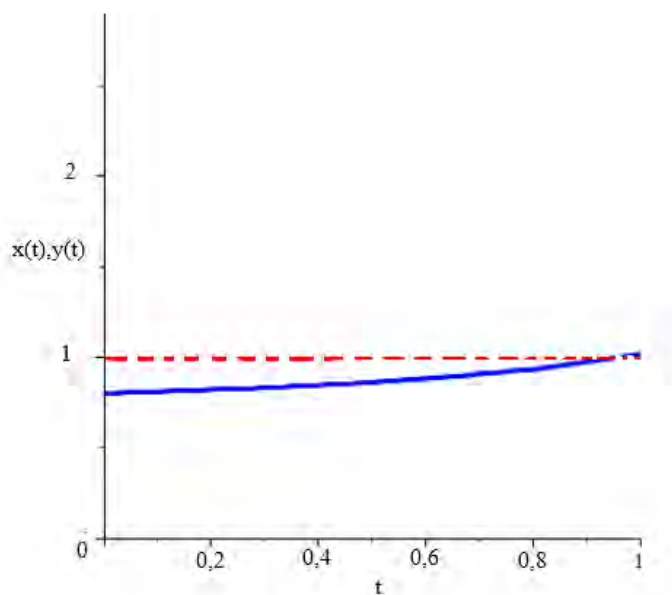


Рисунок – Графики компонент решений системы (1) с начальными условиями  $x(0) = 1,34$ ,  $y(0) = 1$ . Пунктирная кривая –  $y(t)$  (температура), сплошная кривая –  $x(t)$  (соленость)

С физической точки зрения модель Стоммеля не учитывает связь субполярной части Северной Атлантики с другими океанами или с атмосферой. Тем не менее тот факт, что такая простая модель демонстрирует переход от одного режима циркуляции к другому под влиянием изменения параметров воздействия, оказал значительное влияние на науку о климате и океанографии [3].

### Библиографический список

1. Бебиева Я.С. Анализ модели Стоммеля глобальной циркуляции океана // Всероссийский журнал научных публикаций. 2011. № 1. С. 109–110.
2. Glendinning P. View from the pennines: Box models of the oceanic conveyor belt / Paul Glendinning // Mathematics Today (Southend-on-Sea). 2009. Vol. 45. P. 230–232. URL: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=list\\_works&hl=en&hl=en&user=U3WbH3EAAAAJ&sortby=pubdate](https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=en&hl=en&user=U3WbH3EAAAAJ&sortby=pubdate) (дата обращения: 05.03.2023).
3. Полонский А.Б. Развитие теории циркуляции мирового океана для решения климатических задач : Современные проблемы динамики океана и атмосферы: сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П.С. Линейкина / под ред. А.В. Фролова и Ю.Д. Реснянского. М.: ТРИАДА ЛТД, 2010. С. 227–250.