

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗАМЫКАНИЙ  
ДЛЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ  
ПРОЦЕССОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ  
В МОДЕЛЯХ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ОКЕАНА

**Мортиков Е.В.<sup>1,2</sup>, Дебольский А.В.<sup>1,3</sup>, Глазунов А.В.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

<sup>2</sup>*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва*

<sup>3</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва*

*evgeny.mortikov@gmail.com*

Процессы турбулентного перемешивания определяют динамику верхнего слоя океана, процессы переноса примесей и взаимодействие с атмосферой как на суточных, так и на сезонных масштабах. Важной задачей является уточнение параметризаций турбулентной динамики в крупномасштабных моделях океана. Наибольшего развития на сегодняшний день получили схемы, в которых рассматриваются прогностические уравнения для вторых моментов гидродинамических полей, а старшие моменты (например, скорость диссипации кинетической энергии турбулентности или моменты, определяющие перенос дисперсии поля флуктуациями скорости), входящие в эти уравнения, параметризуются. Несмотря на то, что такие замыкания были предложены для нейтрально стратифицированной турбулентной динамики более полувека назад [1], они по-прежнему требуют уточнения для стратифицированных течений [2]. При этом из-за вычислительных ограничений в климатических моделях общей циркуляции океана, как правило, используются замыкания лишь первого порядка [3, 4].

В работе обсуждаются преимущества применения двухпараметрических замыканий, включающих прогностические уравнения для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации, по сравнению с замыканиями первого порядка, для описания вертикального перемешивания в океане. Известно, что двухпараметрические схемы, в которых турбулентные коэффициенты рассчитываются из соотношений подобия, позволяют воспроизвести основные особенности изменения температуры и солености в верхнем слое океана (см., например, [5, 6]). В работе [7] было показано, что модели данного типа для устойчиво стратифицированной турбулентности приближенно описывают релаксацию к безразмерным градиентам скорости и скаляров, согласованным с ло-

кальным обобщением теории подобия Монина-Обухова. Данный результат позволяет рассмотреть возможность параметризации вертикального перемешивания с помощью простой модели первого порядка, аппроксимирующей стационарные решения двухпараметрической модели. При условии малости времени релаксации такое упрощение представляется достаточным приближением более сложных и вычислительно затратных замыканий. Определение турбулентного масштаба длины в модели первого порядка согласовывалось с данными прямого численного моделирования [8, 9]. Для задания масштаба длины в нейтральной стратификации используется обобщение теории локального подобия [10] для потока, ограниченного двумя параллельными плоскостями.

Рис. 1. Изменение приповерхностной температуры для северо-восточной части Тихого океана (50.1° N, 114.9° W, Ocean Station Papa) за 2019 год по данным численного моделирования с помощью предложенного замыкания первого порядка (зеленая линия), двухпараметрической модели (красная линия) и по данным измерений (черная линия).

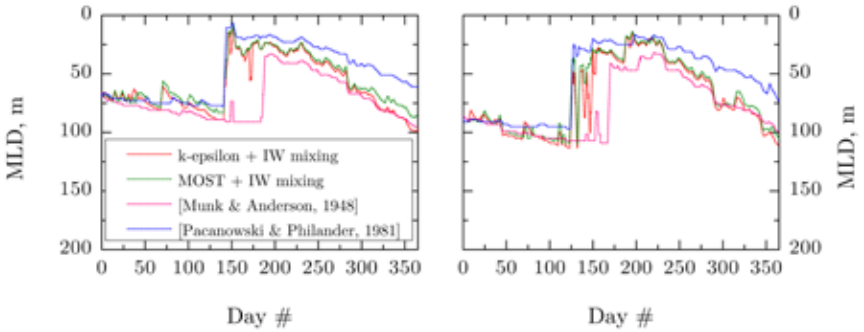
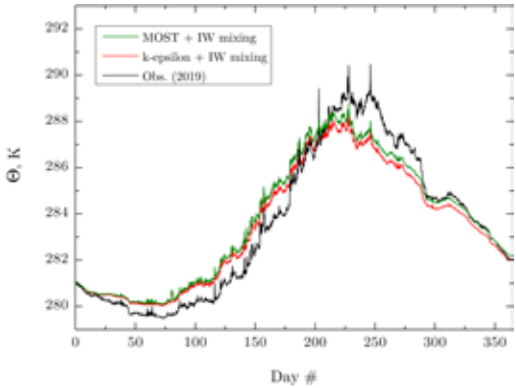


Рис. 2. Толщина перемешанного слоя для северо-восточной части Тихого океана (50.1° N, 114.9° W, Ocean Station Papa) за 2015 год (слева) и 2019 год (справа) по данным численного моделирования с помощью предложенного замыкания первого порядка (зеленая линия) и двухпараметрической модели (красная линия). Дополнительно приведены расчеты с эмпирическими замыканиями первого порядка, которые используются в климатической модели INMCM [3, 4].

Численные эксперименты по воспроизведению заглужения перемешанного слоя под действием ветра демонстрируют, что расчеты с замыканием первого порядка согласуются с известными результатами прямого численного моделирования и лабораторных экспериментов. С использованием данных измерений в северо-восточной части Тихого океана показано, что модель воспроизводит характерную сезонную изменчивость термической структуры верхнего слоя океана (рис. 1 и 2) и является хорошей аппроксимацией решений двухпараметрической схемы. Предложенное замыкание первого порядка может быть использовано в моделях общей циркуляции океана для решения задач оперативного прогноза и климатических исследований.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНТП «Исследование процессов в пограничных слоях атмосферы, океана и вод суши и их параметризация в моделях Земной системы» в рамках мероприятия «Усовершенствование глобальной модели Земной системы мирового уровня для исследовательских целей и сценарного прогнозирования климатических изменений».

#### Литература

1. Колмогоров А.Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1942. Т. 6. № 1-2. С. 56-58.
2. Cuxart J., Holtstg A., Bearle R., Bazile E., Beljaars A., et al. Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer // Bound.-Layer Meteorol. 2013. V. 118. N 2. P. 273-303.
3. Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С., Гусев А.В., Дианский Н.А. и др. Математическое моделирование Земной системы. М.: МАКС Пресс. 2016. 328 с.
4. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Ya., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G., Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // Climate Dynamics. 2017. V. 49. P. 3715-3734.
5. Kantha L.H., Clayson C.A. An improved mixed layer model for geophysical applications // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 25235-25266.
6. Reffray G., Bourdalle-Badie R., Calone C. Modelling turbulent vertical mixing sensitivity using a 1-D version of NEMO // Geosci. Model Dev. 2015. V. 8. P. 69-86.
7. Мортиков Е.В., Глазунов А.В., Дебольский А.В., Лыкосов В.Н., Зилитинкевич С.С. О моделировании скорости диссипации кинетической энергии турбулентности // Доклады академии наук. 2019. Т. 489. № 4. С. 82-86.
8. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // Russ. J. Numer. Analysis. Math. Modelling. 2019. V. 34. N 2. P. 119-132.
9. Zilitinkevich S., Druzhinin O., Glazunov A., Kadantsev E., Mortikov E., Repina I., Troitskaya Yu. Dissipation rate of turbulent kinetic energy in stably stratified sheared flows // Atm. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 2489-2496.
10. Обухов А.М. О распределении масштаба турбулентности в потоках произвольного сечения // Прикладная математика и механика. 1942. Т. 6. С. 209-220.