

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ И БИОГЕОХИМИИ  
СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ  
ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА

**Гладских Д.С.<sup>1,2,3</sup>, Мортиков Е.В.<sup>2,3,4</sup>**

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, г. Нижний Новгород*

<sup>2</sup>*Научно-Исследовательский Вычислительный Центр Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова*

<sup>3</sup>*Московский центр фундаментальной и прикладной математики, г. Москва*

<sup>4</sup>*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук, г. Москва*  
daria.gladskikh@gmail.com

В настоящей работе предложена параметризация турбулентного числа Прандтля для описания турбулентного перемешивания в моделях внутренних водоемов (озер и водохранилищ), допускающая возможность поддержания турбулентных пульсаций при сильно устойчивой стратификации и наличии малых сдвигов скорости.

Водоемы суши являются важнейшими элементами многих природных ландшафтов, а характеристики этих водных объектов (термический режим, распределение концентраций биохимических субстанций, потоки тепла и примесей в атмосферу) представляют интерес как в рамках задач гидрологии и экологии, так и с точки зрения их влияния на климат Земли и его изменения. При этом следует отметить, что формирование вышеназванных характеристик во многом определяется процессами турбулентного переноса (импульса, тепла и растворенных газов). Одним из наиболее распространенных классов турбулентных замыканий в рамках RANS подхода, применяемых в океанологии и лимнологии, являются двухпараметрические модели, основанные на гипотезе, связывающей турбулентные потоки с градиентами средних величин.

Ранее при участии авторов настоящей работы было предложено турбулентное замыкание [1–2], полученное на основе модели нестационарных турбулентных течений в стратифицированной жидкости [3]. Показано, что учет двухсторонней трансформации кинетической и потенциальной энергии турбулентных пульсаций позволяет объяснить под-

держание турбулентности небольшими сдвигами скорости при любых значениях градиентного числа Ричардсона, характеризующего соотношение между сдвиговой неустойчивостью и действием плавучести. Замыкание учитывает вклад сдвига скорости и плотностной стратификации в мелкомасштабную турбулентность внутреннего водоема и, в том числе, обеспечивает отсутствие явления «вырождения» турбулентного обмена (ламинаризации течения) при значениях градиентного числа Ричардсона превышающих некоторое эмпирическое пороговое значение. Учет данных эффектов влияет на вертикальные распределения кинетической энергии турбулентности, температуры и пассивных примесей. Полученная параметризация зависит лишь от одного параметра (который может быть определен по данным численного моделирования или лабораторных экспериментов), описывающего анизотропию в вертикальном и горизонтальном масштабах корреляции поля плотности. Однако такая формулировка приводит к дополнительным ограничениям на максимальное потоковое число Ричардсона, которые не согласуются с известными данными прямого и вихреразрешающего моделирования турбулентных течений, данными измерений в устойчиво-стратифицированных пограничных слоях [4].

В настоящей работе представлено обобщение модели, частный случай которой приведен в [1–2]. Модифицированное замыкание, которое зависит от двух параметров – параметра анизотропии, описывающего различия в вертикальном и горизонтальном масштабах корреляции поля плотности, и максимального потокового числа Ричардсона, позволило рассмотреть задачу об оценке чувствительности результатов моделирования биохимических характеристик водоема к параметризации двух режимов перемешивания – режима, связывающего нейтральную и устойчивую стратификацию, и режима перемешивания при сильно устойчивой стратификации.

Показано, что значение максимального потокового числа Ричардсона и, как следствие, асимптотика увеличения турбулентного числа Прандтля при сильной устойчивости связаны с различиями в интегральных масштабах времени, определяемых скоростью диссипации кинетической или потенциальной энергии и интенсивностями флуктуаций соответствующих полей, что согласуется с данными прямого численного моделирования сдвиговой турбулентности. Параметр анизотропии задает переходный режим – от нейтральной стратификации к сильной устойчивости.

Для исследования влияния предложенного замыкания на описание турбулентных процессов во внутренних водоемах и формирование опре-

деляемых ими характеристик использовалась разработанная авторами настоящей работы трехмерная модель термогидродинамики и биогеохимии внутреннего водоема на основе единого гидродинамического кода, объединяющего DNS-, LES- и RANS подходы для расчета геофизических турбулентных течений при высоком пространственном и временном разрешении (см., например, [5-8]). Численная модель включает уравнения гидродинамики в стратифицированном турбулентном вращающемся слое жидкости в приближении мелкой воды, а также уравнения для переноса тепла и солености с учетом горизонтальной и вертикальной диффузии [8].

Описание биогеохимических процессов в модели включает в себя уравнения для расчета концентраций и потоков биохимических веществ. Уравнения описывают перенос, диффузию и реакции для таких веществ как: метан ( $\text{CH}_4$ ), кислород ( $\text{O}_2$ ), углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), живые и отмершие частицы фито- и зоопланктона и т.д. Ввиду объединения блоков динамики и биогеохимии обеспечивается воспроизведение моделью двусторонних связей, таких как вклад биопродуктивности за счет фотосинтеза в коэффициент экстинкции проникающей радиации.

С использованием предложенной параметризации проведены эксперименты по воспроизведению термического и биохимического режима внутреннего водоема небольшого размера (оз. Куйварви). Результаты показывают, что распределение биохимических концентраций, процессы газообмена в большей степени чувствительны к заданию максимального потокового числа Ричардсона. Показано также, что модель корректно описывает протекающие в водном объекте физические и биогеохимические процессы, а полученные численные результаты согласуются с наблюдаемыми натурными характеристиками.

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», а также РФФИ (21-55-52005).

### Литература

1. Соустова И.А., Троицкая Ю.И., Гладских Д.С., Мортиков Е.В., Сергеев Д.А. Простое описание турбулентного переноса в стратифицированном сдвиговом потоке применительно к описанию термогидродинамики внутренних водоемов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 6. С. 689–699.

2. Gladskikh D., Ostrovsky L., Troitskaya Y, Soustova I, Mortikov E. Turbulent Transport in a Stratified Shear Flow // J. Mar. Sci. Eng. 2023. V. 11(1). P. 136.
3. Островский Л.А., Троицкая Ю.И. Модель турбулентного переноса и динамика турбулентности в стратифицированном сдвиговом потоке // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1987. № 3. С. 1031-104.
4. Zilitinkevich S.S., Esau I., Kleeorin N., Rogachevskii I., Kouznetsov R.D. On the velocity gradient in stably stratified sheared flows. Part 1: asymptotic analysis and applications // Bound.-Layer Meteorol. 2010. V. 135. P. 505-511.
5. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure–strain correlations // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2019. V. 34. N 2. P. 119-132.
6. Mortikov E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in stratified flow // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2016. V. 52. P. 108-115.
7. Kadantsev E., Mortikov E., Zilitinkevich S. The resistance law for stably stratified atmospheric planetary boundary layers // Q.J.R. Met. Soc. 2021. V. 147. N 737. P. 2233-2243.
8. Гладских Д.С., Степаненко В.М., Мортиков Е.М. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего перемешанного слоя // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 2. С. 155-163.