Секция: Структура и динамика геофизических пограничных слоёв, тип доклада: устный

**Исследование температурного режима и горизонтальной неоднородности в Рыбинском водохранилище в период открытой воды с использованием трехмерного математического моделирования**

**Study of temperature regime and horizontal heterogeneity in the Rybinsk reservoir during the open water period using three-dimensional mathematical modeling**

*Гладских Дарья Сергеевна 1,2,3, Ломов Виктор Александрович 4,1,5,*

*Ахтамьянов Рамиль Анварович 1,3,4,6, Мортиков Евгений Валерьевич 1,3,7,*

*Законнова Арина Васильевна 8, Лазарева Валентина Ивановна 8*

*Gladskikh Daria Sergeevna 1,2,3, Lomov Victor Aleksandrovich 1,5,6,*

*Ahtamyanov Ramil Anvarovich 1,3,6,7, Mortikov Evgeny Valerievich 1,3,4,*

*Zakonnovs Arina Vasil’evna 8, Lazareva Valentina Ivanovna 8*

1 Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ

2 Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

3 Московский центр фундаментальной и прикладной математики

4 Географический факультет МГУ

5 Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

6 Гидрометцентр РФ

7 Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

8 Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

1 Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University

2 A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS

3 Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics

4 Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University

5 A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS

6 Hydrometeorological Center of the Russian Federation

7 Marchuk Institute of Numerical Mathematics

8 Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS

daria.gladskikh@gmail.com

lomson620@mail.ru

ramil.rgk@gmail.com

evgeny.mortikov@gmail.com

zak@ibiw.ru

lazareva\_v57@mail.ru

В работе представлено исследование температурного режима Рыбинского водохранилища с использованием трехмерной численной модели и комплексного набора данных натурных измерений. Объект исследования представляет собой искусственный водоем с достаточно сложной термической структурой. В качестве основного инструмента исследования авторами использовалась трехмерная модель внутреннего водоема, созданная на основе единого гидродинамического кода НИВЦ МГУ, объединяющего DNS, LES, RANS подходы для описания турбулентных течений в высоком пространственном и временном разрешении [1-5]. Полученные в рамках измерительных кампаний профили распределения характеристик водной толщи по глубине на разных участках водохранилища были использованы для разработки трехмерной конфигурации модели, соответствующей условиям Рыбинского водохранилища, а также для оценки результатов, полученных с помощью созданных конфигураций.

В рамках исследования использовались две конфигурации модели: первая подразумевала максимально детальное воспроизведение структуры Рыбинского водохранилища с учетом рельефа дна и перемешивания за счет сейшевых колебаниями, во второй, упрощенной конфигурации рассматривалась постановка, соответствующая одномерной модели, а члены, отвечающие за горизонтальные эффекты, осреднялись.

Показано, что одномерное моделирование без параметризации эффектов, связанных с горизонтальным переносом и, в частности, сейшевыми колебаниями, не позволяет корректно воспроизводить процессы перемешивания, что приводит к занижению толщины эпилимниона и ошибкам в распределении температуры. Трехмерная модель также учитывает вертикальные «ветви» циркуляционной ячейки, роль которых заключается в передаче импульса и тепла между верхней и нижней границами перемешанного слоя, тем самым воспроизводя перемешивание корректной интенсивности.

Для изучения горизонтальной неоднородности в различных точках Рыбинского водохранилища были выбраны три станции наблюдений и проведено сравнение модельных результатов, полученных в двух конфигурациях, с измеренными профилями. Для количественной оценки результатов использовались статистические показатели, подтвердившие обоснованность использования трехмерного моделирования для водного объекта, характеризующегося высокой пространственной неоднородностью.

Подводя итог сопоставления результатов моделирования и данных измерений, выявлено, что трехмерная модель в полной конфигурации способна достаточно корректно воспроизводить термическую структуру Рыбинского водохранилища, в том числе, в условиях высокой пространственной неоднородности. Показано хорошее согласие результатов с натурными измерениями как в период устойчивой стратификации, так в условиях гомотермии. Использование упрощенной конфигурации, соответствующей одномерной постановке, занижает интенсивность перемешивания и не учитывает влияние сейш. Таким образом, можно заключить, что построение достаточно точной одномерной модели для Рыбинского водохранилища возможно, но с параметризациями горизонтального переноса и поправками на турбулентный обмен.

Предложенная в работе конфигурация численной модели Рыбинского водохранилища может быть использована при дальнейших исследованиях биохимических процессов в водоеме, в том числе, для оценок эмиссии метана.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 23-77-01032.

1. Gladskikh D. S., Mortikov E. V. On Parameterization of Dissipative Processes in Turbulent Transport Models for Description of Thermohydrodynamics and Biogeochemistry of Stratified Inland Water Bodies //Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2024. – Т. 60. – №. 3. – С. 286-296.
2. Gladskikh D. et al. Turbulent transport in a stratified shear flow //Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Т. 11. – №. 1. – С. 136.
3. Kadantsev E., Mortikov E., Zilitinkevich S. The resistance law for stably stratified atmospheric planetary boundary layers //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2021. – Т. 147. – №. 737. – С. 2233-2243.
4. 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. – Т. 34. – №. 2. – С. 119-132.
5. Mortikov E. V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in a stratified flow //Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2016. – Т. 52. – С. 108-115.