

Применимость одномерного приближения для описания термической структуры крупных внутренних водоемов

Р.А. Ахтамьянов^{1,2}, Д.С. Гладских^{1,3,4}, Е.В. Мортиков^{1,4,5},
Н.В. Вазаева^{6,7}, Е.В. Татаринovich²

¹Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ им. М.В. Ломоносова

²Гидрометцентр РФ ³Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН

⁴Московский центр фундаментальной и прикладной математики

⁵Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

⁶Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН

⁷МГТУ им. Н.Э. Баумана

Физическое и математическое моделирование
процессов в геосредах
ИПМех РАН

20 октября, 2023



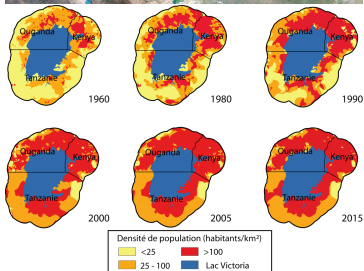
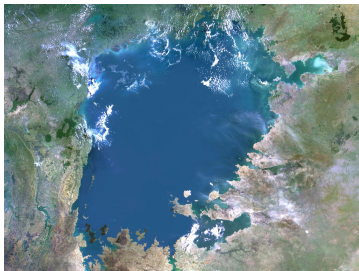
- Озёра занимают 1-2% поверхности суши
- Влияние озёр на климат и климата на озера охватывает различные пространственные и временные масштабы [Samuelsson и др. 2010; Tranvik и др. 2009]
- Процессы, протекающие во внутренних водоемах, требуют учета при разработке глобальных моделей [Ljungemyr и др. 1996; Tsuang и др. 2001]
- В глобальных моделях для описания озёр используется одномерное приближение
- Для достижения высокой точности моделирования, необходимо детализировать описание особенностей рельефа водохранилища

Цель исследования

Исследовать применимость одномерного приближения для описания термической структуры крупных внутренних водоемов

Задачи исследования

- Провести численное моделирование термогидродинамики озера Виктория с использованием трехмерной численной модели замкнутого водоема
- Создать различные конфигурации модели озера Виктория с разной степенью детализации рельефа дна, включая разнообразные описания геометрической формы озера
- Сравнить результаты моделирования термической структуры озера для разных конфигураций модели с точки зрения задания рельефа озера



Рост плотности населения вокруг озера Виктория (1960-2015)

- Расположено на экваторе, на высоте 1134 м, тектоническое происхождение
- Площадь — 68 тыс. км² (второе по площади пресное озеро мира), объём — 2760 км³
- Горизонтальные размеры: 320x275 км
- Средняя глубина 40 м, максимальная – 80 м [Hamilton и др. 2016]
- Пресное, 80% притока - осадки [Sutcliffe, Parks и др. 1999]
- В окрестностях озера проживает около 30 миллионов человек

MODIS (2009)

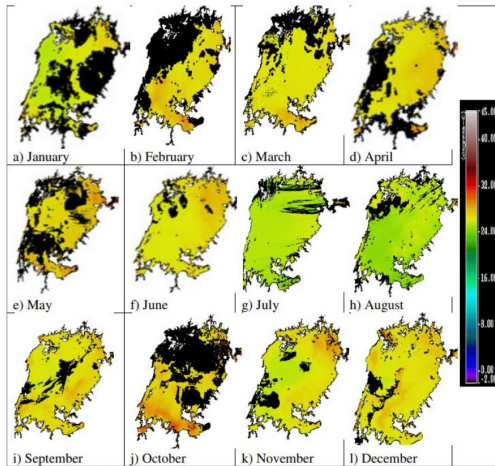
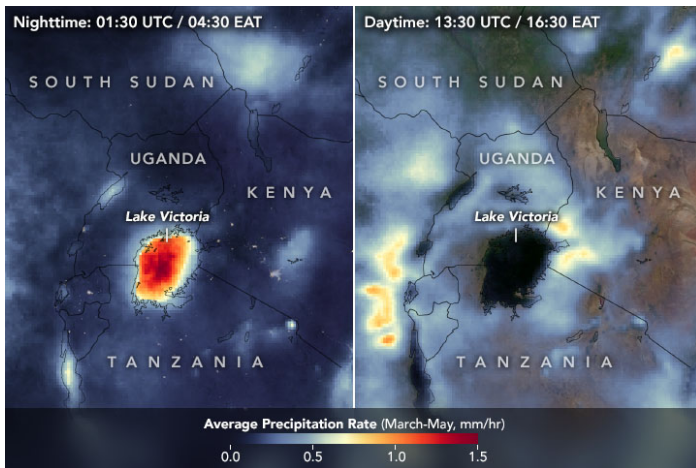


Figure 3: Monthly Mapped LST

Среднемесячная температура поверхности о. Виктория по данным MODIS [Muhindo & Anthony 2012]

- Экваториальный тип климата
- Средняя температура января 22 °C, средняя температура июля 20 °C
- 2 дождливых сезона в год при смещении ВЗК: апрель-май и октябрь-ноябрь.
- Среднегодовое количество осадков составляет 1500—1600 мм
- Суточный режим погоды в районе озера характеризуется интенсивными ночными штормами над озером.

Бризовая циркуляция в сезон дождей способствует формированию сильных ночных гроз, которые ежегодно становятся причиной смерти до 5000 местных рыбаков [Thiery и др. 2016]



Усредненное за 18 лет (2000-2018) количество осадков для ночных (слева) и дневных (справа) сроков наблюдения по данным спутников TRMM и GPM

LAKE3D. Описание модели

- Модель разработана в НИВЦ МГУ Е. Мортиковым, А. Дебольским и Д. Гладских [Gladskikh и др. 2020; Mortikov и др. 2019; Гладских и др. 2021]
- Трехмерная численная модель термогидродинамики замкнутого водоема, основанная на осредненной по Рейнольдсу системе уравнений термогидродинамики в приближении Буссинеска и гидростатики

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -A(u) + D_H(u, \lambda_m) + D_z(u, K_m + v) - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho dz' + fv,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -A(v) + D_H(v, \lambda_m) + D_z(v, K_m + v) - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\eta \rho dz' - fu,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

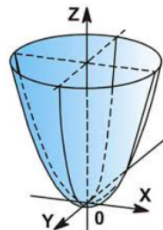
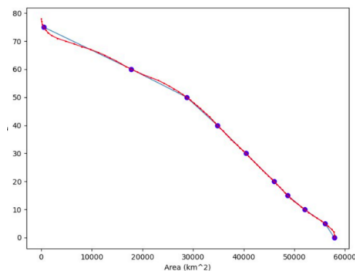
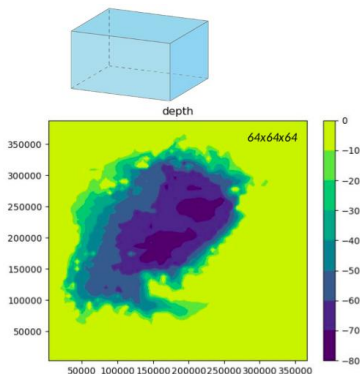
$$\frac{\partial T}{\partial t} = -A(T) + D_H(T, \lambda_h) + D_z(T, K_h + \chi'),$$

$$\rho = \rho(T), \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + (\mathbf{u}_h \cdot \nabla_h) \eta = w$$

- Расчеты проведены на суперкомпьютерном кластере Института вычислительной математики им. Марчука РАН
- Атмосферный форсинг – метеорологические характеристики (данные реанализа NCEP/NCAR) **в период с 1 мая по 22 ноября 2022 года**
 - Температура
 - Атмосферное давление
 - Зональная и меридиональная компоненты скорости ветра U и V
 - Нисходящие потоки солнечной радиации
 - Влажность

Эксперименты

1. Параллелепипед 325x275 км с глубинами 40 и 60 м
2. «Чаша» с площадями сечения на заданных уровнях и соотношением осей эллипса, определёнными из батиметрии

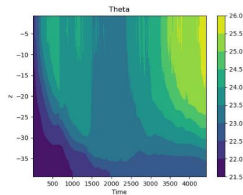


3. Батиметрия с различным разрешением:

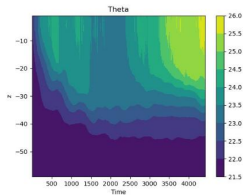
- 32x32x32 (~10 км)
- 64x64x64 (~ 5 км)
- 128x128x64 (~ 2.5 км)

Результаты I

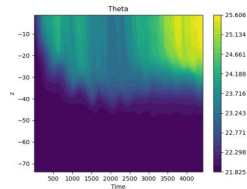
height = 40



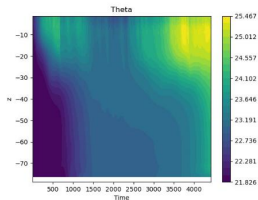
height = 60 m



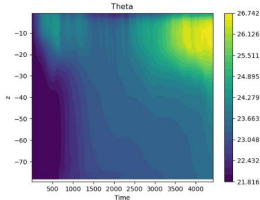
cup



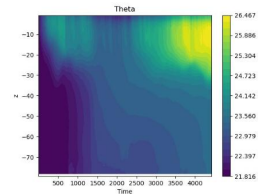
bathymetry
32x32x32



bathymetry
64x64x64

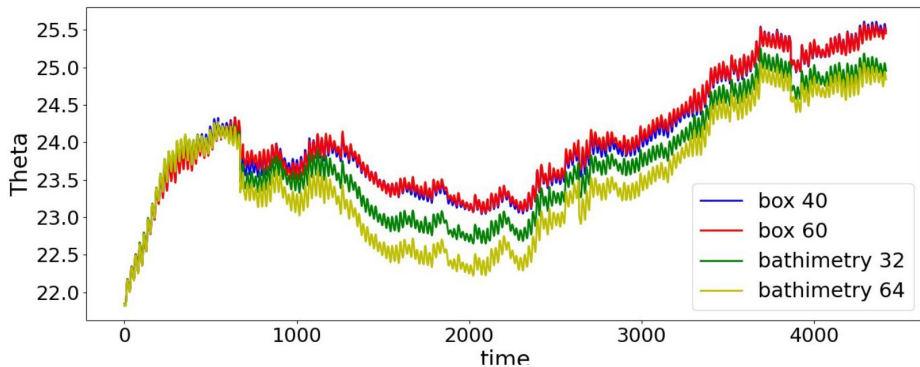


bathymetry
128x128x64



Временная диаграмма вертикальных профилей средней температуры (май - ноябрь 2022)

Результаты II



Графики средней температуры поверхности озера (май - ноябрь 2022)

Выводы

- Разработан набор конфигураций модели LAKES3D для тестирования моделирования температурного режима о. Виктория
- Детализация орографических особенностей оказала существенное влияние на описание термической структуры
- Продемонстрирована высокая чувствительность модели к разрешению батиметрических данных

Будущие цели

- Калибровка 3D-модели путем сравнения результатов моделирования с данными натурных наблюдений
- Тестирование влияния атмосферного форсинга на результаты моделирования

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-77-01032

1. Gladskikh, D. и др. *Numerical simulation of turbulent mixing and transport of biochemical substances in inland waters. в IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **611** (2020), 012013 (цит. на с. 7).
2. Hamilton, S. и др. Lake Victoria bathymetry contours, V7. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.7910/DVN/ZSWZIA> (2016) (цит. на с. 4).
3. Ljungemyr, P. и др. Parameterization of lake thermodynamics in a high-resolution weather forecasting model. *Tellus A* **48**, 608—621 (1996) (цит. на с. 2).
4. Mortikov, E. V. и др. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure–strain correlations. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling* **34**, 119—132 (2019) (цит. на с. 7).

5. Muhindo, M. & Anthony, G. *Monitoring the Surface Temperature of Lake Victoria Using Modis Imagery*. в *The first Conference on Advances Geomatics Research* (2012) (цит. на с. 5).
6. Samuelsson, P. и др. The impact of lakes on the European climate as simulated by a regional climate model. (2010) (цит. на с. 2).
7. Sutcliffe, J. V., Parks, Y. P. и др. *The hydrology of the Nile*. (International Association of Hydrological Sciences Wallingford, 1999) (цит. на с. 4).
8. Thiery, W. и др. Hazardous thunderstorm intensification over Lake Victoria. *Nature communications* **7**, 12786 (2016) (цит. на с. 6).
9. Tranvik, L. J. и др. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and oceanography* **54**, 2298—2314 (2009) (цит. на с. 2).

10. Tsuang, B.-J. *и др.* Lake parameterization for climate models. (2001) (цит. на с. 2).
11. Гладских, Д. *и др.* О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего перемешанного слоя. *Водные ресурсы* 48, 155—163 (2021) (цит. на с. 7).

Hierarchy of lake models by dimensionality

□ **3D models** (Reynolds equations in Boussinesq approximation)

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \delta_{iz} g \frac{\bar{\rho}}{\rho_0} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} - 2(\boldsymbol{\Omega} \times \bar{\mathbf{u}})_i + \nu \nabla^2 \bar{u}_i, \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{T} \bar{u}_j}{\partial x_j} &= -\frac{\partial \overline{T' u'_j}}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho_0 c_p} \frac{\partial \bar{F}_j}{\partial x_j}\end{aligned}$$

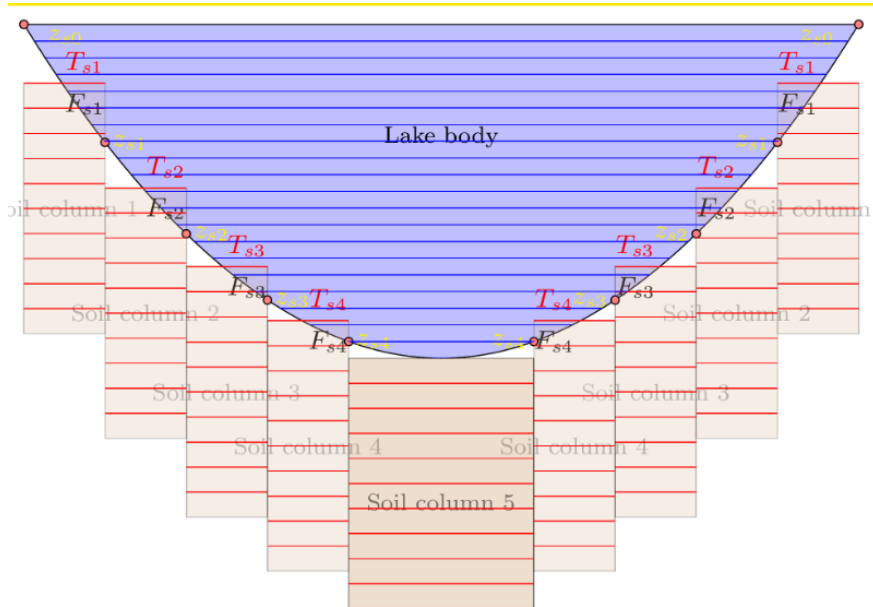
□ **2D models** – 3D equations are averaged in horizontal or vertical plane

□ **1½ D models** – vertical transports are resolved, horizontal processes are resolved partially

□ **1D models** – only vertical processes are simulated

□ **½ D models** – vertical processes are simulated in simplified way (not explicitly)

□ **0 D (bulk) models** – obsolete



1D⁺ framework

Traditional 1D model concept



1D⁺ model concept

- 1D⁺ model includes friction, heat and mass exchange at the lateral boundaries
- Heat, moisture and gas transfer are solved for each soil column independently



In 1D⁺ model horizontally averaged quantity f obeys the equation:

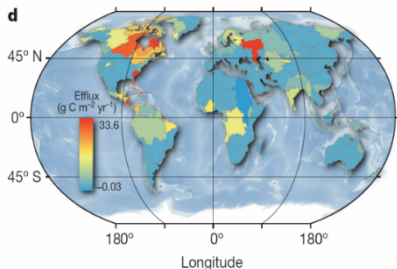
$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left[A k_f \frac{\partial f}{\partial z} \right] + F(z, t, f, A) + H_f \frac{1}{A} \frac{dA}{dz}.$$

A list of validation sites

Lake	Thermodynamics	CH ₄	CO ₂	Reference
<u>Vendyurskoe</u> (Russia)	+	-	-	<u>Stepanenko</u> , 2007
<u>Shuchi</u> (Siberia)	-	+	-	<u>Stepanenko et al.</u> , 2010
<u>Kossenblatter</u> (Germany)	+	-	-	<u>Stepanenko et al.</u> , 2013
<u>Valkea-Kotinen</u> (Finland)	+	-	-	<u>Stepanenko et al.</u> , 2014
<u>Kuivajarvi</u> (Finland)	+	+	+	<u>Heiskanen et al.</u> , 2014; <u>Stepanenko et al.</u> , 2016
<u>Kivu</u> (Kongo)	+	-	-	<u>Thiery et al.</u> , 2014
<u>Seida</u> (Russia)	+	+	-	<u>Guseva et al.</u> , 2016
<u>Bolshoi Vilyui</u> (Russia)	+	-	-	<u>Stepanenko et al.</u> , 2018
<u>Uvs Nuur</u> (Mongolia)	+	-	-	<u>Stepanenko et al.</u> , 2019
<u>Alqueva</u> (Portugal)	+	-	+	<u>Iakunin et al.</u> , 2020
<u>Mozhayskoe</u> (Russia)	+	+	-	<u>Stepanenko et al.</u> , 2020a
<u>Suva</u> (Japan)	+	+	-	-
<u>Iseo</u> (Italy)	+	-	-	<u>Stepanenko et al.</u> , 2020b

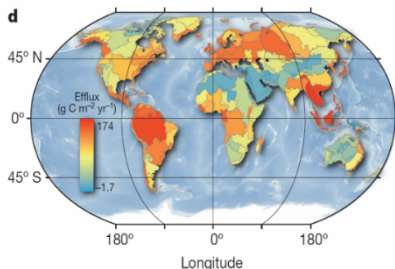
CO₂ emissions by lakes and rivers

Raymond et al., 2013, Nature



Lakes

- global emission of CO₂ by freshwaters is 2.1 Pg C yr⁻¹
- lake emission is 0.3 Pg C yr⁻¹, river emissions is 1.8 Pg C yr⁻¹
- significant contribution of Volga hydropower reservoirs



Rivers

Lake Model Intercomparison Experiment

- The motivation is realistic parameterization of lakes in NWP and climate models
- 1D thermodynamic lake models are ran in the unified setup, forced by on-lake measured meteorology
- Focus on simulation of temperature and heat fluxes (Kossenblatter Lake, Valkea-Kotinen Lake, Lake Kivu, ...)
- Ongoing experiment: Harp Lake, focus on gas exchange (CO_2 , O_2)

