

# Numerical simulation of greenhouse gases transport in a system «lake – atmospheric boundary layer»

<sup>1,2</sup>Stepanenko V.M., <sup>1,3</sup>Glazunov A.V., <sup>2</sup>Guseva S.P., <sup>1,3</sup>Lykosov V.N., <sup>4</sup>Shurpali N., <sup>4</sup>Biasi C., <sup>4</sup>Martikainen P.

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Geographical Faculty, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Institute for Numerical Mathematics RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup> University of Eastern Finland, Department of Environmental Science, Biogeochemistry Research Group, Kuopio, Finland

E-mail: [stepanen@srcc.msu.ru](mailto:stepanen@srcc.msu.ru)

---

Lakes occupy a significant part of land in many northern regions, e.g. in Northern Siberia, Karelia, Finland and Canada. The importance of thermodynamic interaction between lakes and the atmosphere in these regions led to inclusion of lake parameterizations into climate models and numerical weather prediction systems. However, these lake parameterizations are still confined to heat and momentum exchange at the lake-atmosphere interface, whereas observational evidence is growing on the importance of greenhouse gases emissions from lakes. In order to extend our current knowledge on the dynamics of these emissions and gain a capability of

making future projections of climate taking into account lake carbon fluxes, suitable modelling framework is to be developed. However, the modelling task faces two kinds of problems here. First, a lake model involving explicit treatment of both key biotic and abiotic controls of methane and carbon dioxide emissions is to be developed. And second, air surface layer parameterizations are needed that are adequate to lake-adjacent typical landscapes met in high latitudes. From this point a special attention must be paid to a case of a lake, surrounded by bluff topography (a forest), that violates the hypotheses underlying Monin-Oubukhov similarity theory. Large Eddy Simulation (LES) occurs to be an only feasible tool to explicitly reproduce turbulent flow and fluxes over such a landscape. This abstract presents first results of a project, addressing the above issues.

We adopt the one-dimensional model LAKE (Stepanenko et al., 2011) containing a module of methane production, transport and sink processes in bottom sediments and in a water column to one of thermokarst lakes in Seida place, Komi Republic, Russia. The meteorological forcing and validation data on water temperature and methane fluxes were measured *in situ* by the University of Eastern Finland during the 2007-2008 seasons (Marushchak et al., 2013; Repo et al., 2009). Chamber method was used for measuring methane fluxes from the thermokarst lakes. The measurements missed atmospheric radiation and shortwave radiation extinction coefficient in the water column. Therefore, the sensitivity of the model to specification of these variables was studied. It is shown that the "optimal" choice of atmospheric radiation parameterization allows a good match of water surface temperature with observations. The surface temperature was found to be almost insensitive to extinction coefficient, due to intense vertical mixing down to the lake bottom (2 m depth). However, the sensitivity of methane fluxes to extinction coefficient was high, pointing at an exponential dependence of methane production on sediment temperature. The modelled methane fluxes agreed well with the available measured data by calibrating a parameter describing organic substrate amount and quality in methane production formula.

An LES study by INM RAS – RCC MSU LES model (Glazunov et al., 2010), has been performed for an idealized case of an elliptic lake surrounded by forest. The "forest" is represented by a regularly spaced set of vertically elongated blocks. The reference boundary layer stratification, wind speed and direction were varied. It is shown, that the statistics of the flow (including fluxes) are almost insensitive to stratification resulting from turbulent kinetic energy predominantly produced by shear generation at heights around the tree canopy. This strongly questions the applicability the Monin-Oubukhov similarity to this case. Another important conclusion derived is that the constant-flux layer does not exist in the first meters above the lake surface, i.e. the flux at 1.5 m height may differ from that at the surface by 1.6-1.7 times. This has a direct implication for eddy covariance measurements above lakes, that are typically performed at this height.

#### References:

1. Glazunov A.V., Dymnikov V.P., Lykossov V.N. *Mathematical modelling of spatial spectra of atmospheric turbulence*. - *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 2010, v. 25, No. 5, p. 431 – 451.
2. Stepanenko, V. M., Machul'skaya, E. E., Glagolev, M. V. and Lykosov, V. N. 2011. *Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone*. *Izv. AN. Fiz. Atmos. Ok+* 47, 275–288.
3. Marushchak, M.E., Kiepe, I., Biasi, C., Elsakov, V., Friborg, T., Johansson, T., Soegaard, H., Virtanen, T., Martikainen, P.J., 2013. *Carbon dioxide balance of subarctic tundra from plot to regional scales*. *Biogeosciences* 10 (1), 437–452.
4. Repo, M.E., Susiluoto, S., Lind, S.E., Jokinen, S., Elsakov, V., Biasi, C., Virtanen, T. & Martikainen, P.J. (2009). *Large N<sub>2</sub>O emissions from cryoturbated peat soil in tundra*. *Nature Geoscience*.

## Численное моделирование переноса парниковых газов в системе «озеро-пограничный слой атмосферы»

<sup>1,2</sup>Степаненко В.М., <sup>1,3</sup>Глазунов А.В., <sup>2</sup>Гусева С.П., <sup>1,3</sup>Лыкосов В.Н., <sup>4</sup>Shurpali N., <sup>4</sup>Biasi C., <sup>4</sup>Martikainen P.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup> University of Eastern Finland, Department of Environmental Science, Biogeochemistry Research Group, Kuopio, Finland  
E-mail: stepanen@srcc.msu.ru

### ВВЕДЕНИЕ

Озера покрывают значительную часть площади суши во многих районах в высоких широтах: в Канаде, Финляндии, Карелии, Западной Сибири, Северо-восточной Сибири и др. Для адекватного отражения специфики обмена теплом и импульсом между гидрологически неоднородными территориями и

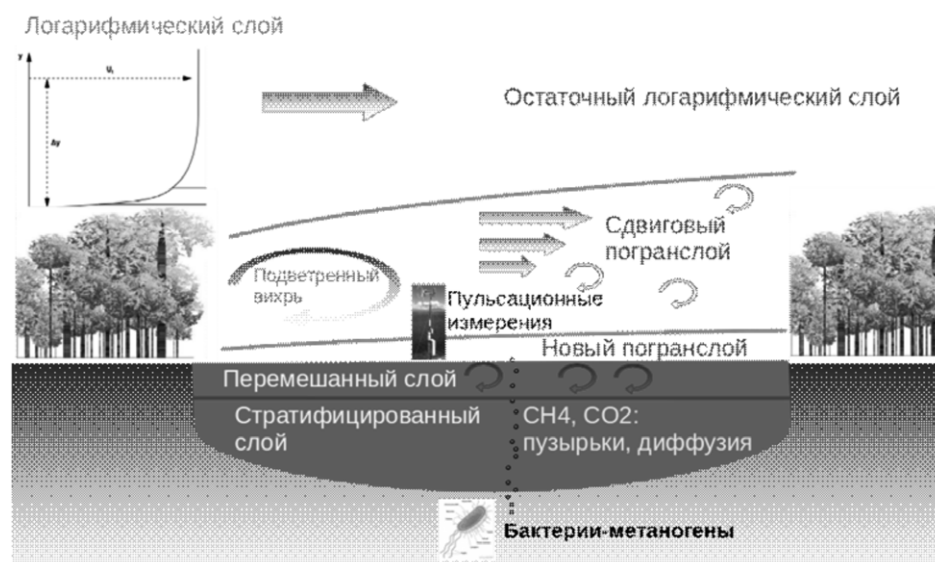
атмосферой в последнее десятилетие во многих моделях системы Земля и опертивных схемах прогноза погоды были встроены одномерные модели водоема (Mironov et al., 2010; Dutra et al., 2010; Subin et al. 2012), что позволило получить заметный отклик в результатах атмосферных моделей. Кроме того, результаты моделей водоема были сопоставлены для озер умеренных (Stepanenko et al., 2013; Stepanenko et al., 2014) и тропических широт (Thierry et al., 2014), и показано, что большинство моделей успешно воспроизводит температуру поверхности водоемов.

Тем временем, накапливаются эмпирические данные о том, что озера являются существенным источником парниковых газов (Tranvik et al., 2009; Bastviken et al. 2004), в первую очередь, углекислого газа и метана. Также в литературе часто приводятся аргументы в пользу того, что биохимический цикл в озерах может образовывать положительную обратную связь с потеплением климата. Очевидно, что чисто эмпирический анализ не может дать количественной картины роли различных механизмов в образовании и эмиссии метана и углекислого газа в озерных экосистемах, и тем более количественно оценить возможные обратные связи с потеплением климата. Таким образом, назрела необходимость математического моделирования на основе явного воспроизведения гидротермодинамических и биохимических процессов (process-based modelling), контролирующих эмиссию метана и углекислого газа в атмосферу. Ввиду ограниченности объема статьи, в дальнейшем изложении мы будем рассматривать моделирование процессов, связанных с эмиссией в атмосферу метана, хотя многие аспекты будут касаться и углекислого газа.

Задача математического моделирования эмиссии парниковых газов из озер сталкивается с рядом существенных трудностей. Их можно разделить на две группы: моделирование биотических и абиотических процессов. К первым относится описание генерации и окисления метана соответствующими группами бактерий. Важнейшими абиотическими факторами являются температура и турбулентность. Так, для успешного воспроизведения потока метана в атмосферу необходим довольно точный расчет температуры донных отложений, поскольку производство метана экспоненциально зависит от температуры среды. В то же время, как раз температура дна может воспроизводиться моделями водоема с ошибкой в несколько градусов (Stepanenko et al., 2013). Это может быть связано как с недостаточно адекватным описанием турбулентного перемешивания в самом водоеме вследствие несовершенства соответствующего турбулентного замыкания, так и ошибками потоков тепла и импульса на границе с атмосферой. Заметим, что ошибка в расчете турбулентной диффузии приводит также к недостаточному или избыточному переносу метана с поверхности дна до поверхности озера.

Перемешивание в водоеме очень чувствительно к описанию потока импульса из атмосферы. Так, для малых водоемов значительная часть импульса из атмосферы может быть потрачена на развитие волнения (Lin et al., 2002), что уменьшает сдвиговую генерацию кинетической энергии турбулентности в водоеме (Stepanenko et al., 2014). Кроме того, небольшие водоемы часто окружены лесом (например, в Карелии и Финляндии), что ставит вопрос о степени применимости теории Монина-Обухова к приводному слою над такими объектами. И, наконец, структура и динамика пограничного слоя над такими озерами определяет интенсивность переноса парниковых газов, поступающих с озера, в вышележащие слои атмосферы.

Таким образом, при математическом моделировании эмиссии парниковых газов с гидрологически неоднородной территории необходимо учитывать совместную динамику процессов внутри водоема и в атмосферном пограничном слое (рис.1). В настоящей статье приводятся первые результаты проекта, в котором делаются необходимые шаги для такого сопряжения задач, которые ранее решались в разных научных сообществах практически изолированно.



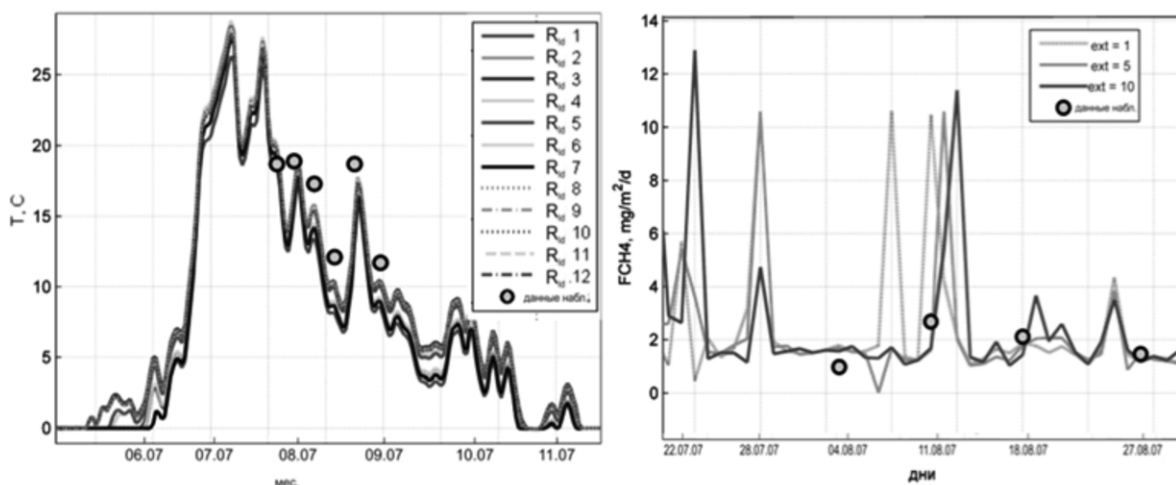
**Рис. 1.** Схема процессов, контролирующих перенос метана из озера в атмосферу

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА ИЗ ОЗЕРА

Разработанная ранее одномерная модель водоема (Stepanenko et al., 2011) включает, помимо описания основных термодинамических процессов в теле водоема (включая турбулентное перемешивание по к-ε модели), в ледовом и снежном покрове, в нижележащем слое грунта, также одномерную модель производства, переноса и стока метана. Подходы к описанию производства и окисления метана заимствованы из аналогичных работ по болотным экосистемам, за исключением случая термокарстовых озер (подробнее см. в Stepanenko et al., 2011). Вертикальный перенос метана осуществляется диффузией по к-ε модели и пузырьками по адаптированной модели МакГинниса.

В настоящей работе, благодаря наличию данных наблюдений, любезно предоставленных коллегами из Университета Восточной Финляндии (Dr. N.Shurpali), была осуществлена оценка качества модели и ее калибровка. Данные наблюдений включают все основные метеорологические величины, суммарную солнечную радиацию, температуру воды и поток метана, измеренные на озере в местности Сейда (республика Коми) в 2007-2008 гг. Калибровка производилась по одному параметру в формуле для производства метана в донных отложениях для наилучшего соответствия рассчитанных потоков метана в атмосферу наблюдаемым.

На рисунке 2 изображен временной ход температуры и потока метана по результатам расчетов и данным наблюдений. По причине отсутствия натуральных данных по излучению атмосферы, эта величина рассчитывалась различными формулами, и неопределенностью в значениях встречного излучения оказалось возможным в значительной степени объяснить занижение моделью температуры поверхности водоема. Чувствительность температуры водоема (температура дна и поверхности отличаются слабо из-за интенсивного перемешивания) к коэффициенту экстинкции коротковолновой радиации оказалась очень слабой. В то же время, поток метана в атмосферу варьировал в зависимости от этой величины в значительно больших пределах (рисунок 2), включая появление новых максимумов. Таким образом, мгновенный поток метана очень чувствителен к изменению метеорологического воздействия, и связан с ним существенно нелинейно из-за нелинейности турбулентного замыкания в модели водоема (турбулентного перемешивания в природе).



**Рис. 2.** Слева: температура поверхности озера Сейда при использовании различных параметризаций излучения атмосферы; справа: суммарный поток метана в атмосферу при различных значениях коэффициента экстинкции коротковолновой радиации. Кривые – результаты моделирования, кружки – данные наблюдений.

## ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НАД ОЗЕРОМ

При помощи вихреразрешающей модели ИВМ РАН – НИВЦ МГУ проведены расчеты стратифицированной турбулентности над объектом, имитирующим лесное озеро малого размера. Схематически моделируемый процесс изображен на рисунке 1.

Турбулентное течение над верхушками деревьев в случае нейтральной стратификации можно охарактеризовать тремя размерными параметрами – скоростью трения  $U_*$ , высотой вытеснения  $D_w$  и параметром шероховатости  $Z_{0w}$ . Основная особенность турбулентного натекания с леса на озеро заключается в существенных (на несколько порядков) различиях между значениями шероховатости растительного покрова и поверхности воды  $Z_{0w} \gg Z_0$ , а также в наличии над лесом слоя вытеснения значительной толщины  $D_w \sim h$ . На высотах  $z < D_w$  внутри растительного покрова скорость ветра мала, поэтому в задаче расчета статистических характеристик турбулентности над озером в первом приближении можно пренебречь особенностями течения между деревьями.

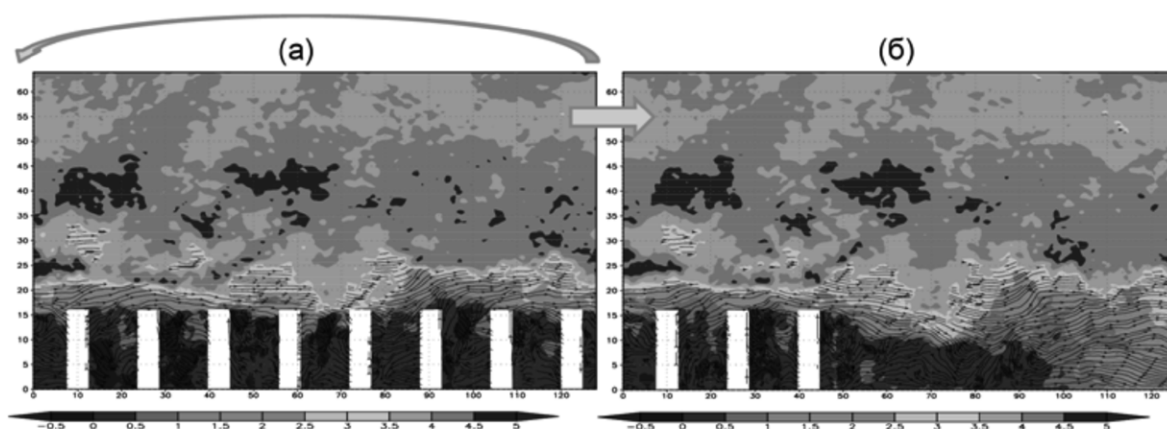
Турбулентное течение с заданными параметрами  $U_*$ ,  $D$  и  $z$  и можно сгенерировать при помощи LES-модели (Глазунов, 2014а; Глазунов, 2014б), располагая на поверхности массивы плохообтекаемых

объектов с высотой  $h > D$ . При этом, изменяя плотность заполнения поверхности объектами, можно подобрать такую конфигурацию, при которой соотношения  $z_{ow} / h$  и  $D_w / h$  близки к наблюдаемым значениям и над лесной растительностью.

Независимо от формы объектов, создающих трение на поверхности, над ними формируется логарифмический профиль средней скорости:

$$\langle U \rangle = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z-D}{z_{ow}} \right) \quad (1)$$

В целом схема постановки численных расчетов выглядела так, как это представлено на рисунке 3. Турбулентный набегающий поток генерируется вспомогательной численной LES-моделью с двоякопериодическими граничными условиями. В модели (а) задается периодический массив объектов с большой аэродинамической шероховатостью. Это позволяет получить согласованное с модельной динамикой нестационарное граничное условие на левой границе модели (б) со статистическими характеристиками, приближенными к характеристикам турбулентного течения над лесной растительностью. Данные модели (а), взятые в одном из вертикальных сечений, передаются в модель (б) на каждом временном шаге и используются в качестве граничных условий на левой границе расчетной области (б).



**Рисунок 3.** Схема расчета турбулентного течения при натекании с поверхности с большой шероховатостью, заданной явным образом, на поверхность с малой шероховатостью, заданной параметрически. Цветом нанесена величина продольной компоненты скорости ветра (мгновенные данные LES-модели в одном из вертикальных сечений). В нижней части рисунков нанесены линии тока. Белые прямоугольники – заданные объекты.

«Озеро» расположено в центре расчетной области (б) и представляет собой эллипс с полуосями  $a = 200$  м и  $b = 60$  м. «Озеро» окружено объектами той же формы и размера, что и объекты в области (а). Сеточный размер области (б) в основных расчетах составлял  $1024 \times 512 \times 128$  или  $512 \times 1024 \times 128$  узлов, шаг равномерной сетки  $\Delta_g = 0.5$  м по всем трем пространственным направлениям. Вычисления проводились на суперкомпьютере МГУ «Ломоносов» с использованием до 2048-ми ядер в параллельном режиме (Воеводин и др., 2012). Интегрирование проводилось с шагом 0,025 секунды на 1 час модельного времени.

Были проведены расчеты при устойчивой, нейтральной и неустойчивой стратификации над озером. Наиболее важный эффект, обнаруженный на основе анализа модельных данных, заключается в слабой чувствительности статистических характеристик турбулентного течения над неоднородной поверхностью к плотностной стратификации. Это обусловлено тем, что значительная часть генерации кинетической энергии турбулентности над мелкомасштабными лесными озерами связана со сдвигом ветра, расположенным на высоте деревьев. Этот механизм обеспечивает гораздо более интенсивное турбулентное перемешивание над поверхностью озера, чем перемешивание над однородной поверхностью с теми же аэродинамическими характеристиками.

Еще один важный вывод, следующий из расчетов, касается интерпретации результатов натуральных пульсационных измерений над поверхностью водоемов. Было обнаружено, что турбулентные потоки импульса, даже на сравнительно небольшом удалении от поверхности озера, существенно отличаются от потоков через поверхность озера. Применение стандартных методик измерения поверхностных потоков, подразумевающих расположение датчиков на высоте  $\sim 1,5$  м, может привести, таким образом, к большому завышению их значений. Систематическая погрешность измерения (завышающая значение напряжения трения на поверхности в 1.6-1,7 раза) будет присутствовать даже на значительном расстоянии от берега, в 25-30 раз превышающем высоту деревьев.

#### Литература:

1. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В. Практика суперкомпьютера "Ломоносов" // Открытые системы. - Москва: Издательский дом "Открытые системы", N 7, 2012. С. 36-39.

2. Глазунов А.В. Численное моделирование турбулентных течений над поверхностью городского типа. Расчеты при нейтральной стратификации.// ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2014а, том 50, № 1, с. 1–10
3. Глазунов А.В. Численное моделирование устойчиво стратифицированных турбулентных течений над плоской и городской поверхностями.// ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2014б, том 50, № 3, с. 1–11
4. Bastviken D, Cole JJ, Pace ML, and Tranvik L. 2004. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochem. Cycles*, Vol. 18, No. 4, GB4009.
5. Dutra, E., Stepanenko, V. M., Balsamo, G., Viterbo, P., Miranda, P. M. A. and co-authors. 2010. An offline study of the impact of lakes on the performance of the ECMWF surface scheme. *Boreal Environ. Res.* 15, 100–112.
6. Lin, W., Sanford, L. P., Suttles, S. E. and Valigura, R. 2002. Drag coefficients with fetch-limited wind waves. *J. Phys. Oceanogr.* 32, 3058–3074.
7. Mironov, D., Heise, E., Kourzeneva, E., Ritter, B., Schneider, N. and Terzhevik, A. 2010. Implementation of the lake parameterization scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environ. Res.* 15, 218–230.
8. Stepanenko, V. M., Machul'skaya, E. E., Glagolev, M. V. and Lykosov, V. N. 2011. Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone. *Izv. AN. Fiz. Atmos. Ok+* 47, 275–288.
9. Stepanenko, V. M., Martynov, A., Jöhnk, K. D., Subin, Z. M., Perroud, M. and co-authors. 2013. A one-dimensional model intercomparison study of thermal regime of a shallow turbid midlatitude lake. *Geosci. Model Dev.* 6, 1337–1352. DOI: 10.5194/gmd-6-1337-2013.
10. Stepanenko, V., Jöhnk, K., Machul'skaya, E., Perroud, M., Subin, Z., Nordbo, A., Mammarella, I., Mironov, D.. Simulation of surface energy fluxes and stratification of a small boreal lake by a set of one-dimensional models. *Tellus A, North America*, 66, jan. 2014.
11. Subin, Z. M., Riley, W. J. and Mironov, D. 2012. An improved lake model for climate simulations: model structure, evaluation, and sensitivity analyses in CESM1. *J Adv Model Earth Syst.* 4(1), Quarter 1. DOI: 10.1029/2011MS000072.
12. Thiery, W., Stepanenko, V., Fang, X., Jöhnk, K., Li, Z., Martynov, A., Perroud, M., Subin, Z., Dar-chambeau, F., Mironov, D., van Lipzig, N.. LakeMIP Kivu: evaluating the representation of a large, deep tropical lake by a set of one-dimensional lake models. *Tellus A, North America*, 66, feb. 2014.
13. Tranvik LJ, others Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnol. Oceanogr.* 2009;54:2283–2297.