

УДК 504.455
AGRIS F70

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/130/11>

**ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОДОЕМЫ ЮЖНОЙ АЗИИ
ПО ДАННЫМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
(НА ПРИМЕРЕ ОЗ. УРСУЛ, БАНГАЛОР, ИНДИЯ)**

©Голосов С. Д., ORCID: 0000-0002-4687-0621, SPIN-код: 9712-4011,
канд. физ.-мат. наук, Институт озераведения РАН-СПб ФИЦ РАН,
г. Санкт-Петербург, Россия, sergey_golosov@mail.ru

©Зверев И. С., ORCID: 0000-0003-0829-6881, SPIN-код: 4634-8770,
канд. физ.-мат. наук, Институт озераведения РАН-СПб ФИЦ РАН,
г. Санкт-Петербург, Россия, iliazverev@mail.ru

**ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC IMPACT ON THE WATER BODIES
OF SOUTH ASIA BASED ON MATHEMATICAL MODELING DATA
(A CASE STUDY OF ULSOOR LAKE, BENGALURU, INDIA)**

©Golosov S., ORCID: 0000-0002-4687-0621, SPIN-code: 9712-4011, Ph.D., Institute of Limnology
RAS-SPC RAS, Saint-Petersburg, Russian Federation, sergey_golosov@mail.ru

©Zverev I., ORCID: 0000-0003-0829-6881, SPIN-code: 4634-8770, Ph.D., Institute of Limnology
RAS-SPC RAS, Saint-Petersburg, Russian Federation, iliazverev@mail.ru

Аннотация. По результатам математического моделирования гидротермодинамических и химико-биологических процессов выявлены причины возврата озера Урсул (Индия) к высокому трофическому статусу после масштабных восстановительных работ. Ключевым фактором является высокая концентрация биогенов, провоцирующая интенсивную первичную продукцию фитопланктона и рост его биомассы. Это ведет к значительному потреблению кислорода в процессах бактериального разложения органики и дыхания планктона. В условиях кратковременной устойчивой плотностной стратификации, препятствующей аэрации придонных слоев, растворенный кислород полностью истощается, вызывая массовую гибель рыбы. Проведенные работы позволили снизить внешнюю биогенную нагрузку со стороны водосбора, однако этого оказалось недостаточно: внутренняя нагрузка полностью компенсировала достигнутый эффект. В итоге, после непродолжительного улучшения экологическое состояние озера вернулось к исходному гиперэвтрофному уровню.

Abstract. Mathematical modeling of hydrothermodynamic, chemical, and biological processes has identified the potential causes of Lake Ursul (India) returning to a high trophic status after extensive restoration work. This is due to high nutrient content, which leads to very high phytoplankton primary production and biomass. This causes high oxygen consumption during the bacterial decomposition of organic matter and plankton respiration. In such a situation, short-term stable density stratification, which prevents the aeration of the bottom layers, is sufficient to completely deplete dissolved oxygen, leading to massive fish mortality. As a result of the restoration work, the influx of nutrients from the catchment area was reduced; that is, the reduction affected the external nutrient load. However, this was insufficient, as the internal nutrient load was enough to compensate for this reduction. Consequently, after a short-term improvement, the lake's ecological state returned to its initial hypereutrophic state.

Ключевые слова: эвтрофирование, гидротермодинамика, потребление кислорода, биомасса фитопланктона, математическое моделирование.

Keywords: eutrophication, hydrothermodynamics, oxygen consumption, phytoplankton biomass, mathematical modeling.

Озеро Улсур (Халасури) — озеро искусственного происхождения, вырытое в XVII веке для нужд общего водопользования (питьевая вода, рыбная ловля, ирригация и т. д.). Оно расположено в центре г. Бангалора — столицы штата Карнатака (Южная Индия; 12°59' с. ш., 77°37' в. д.). Средняя глубина озера составляет приблизительно 6 метров, максимальная достигает 18 метров, площадь поверхности — до 50 гектаров. В настоящее время озеро используется в основном для привлечения туристов, лодочных прогулок, а иногда — как съемочная площадка.



Рисунок 1. Расположение озера Улсур на карте и виды озера с различных ракурсов

В конце 90-х годов прошлого столетия экологическое состояние озера резко ухудшилось. Концентрации биогенных элементов — азота и фосфора — выросли до значений, характерных для гиперэвтрофных водоемов (см. таблицу 1). Дефицит растворенного кислорода часто стал достигать 100%, что приводило к массовым заморам рыбы. Концентрация хлорофилла «а» достигала 200 мкг/л, резко уменьшилась прозрачность воды. Власти г. Бангалор приняли решение о проведении работ по снижению трофического статуса озера. В частности, были выполнены следующие мероприятия: аэрация сточных вод, поступающих в озеро с прилегающих территорий; выемка донных отложений, позволившая увеличить глубину и объем котловины; установка иловых ловушек в устьях ливневых водозаборов; прокладка канализационных линий из восточной части города в обход озера (диаметр труб — 900 мм); восстановление водной флоры и фауны путем заселения видов, естественных для этого водоема; установка специальных сетей для предотвращения сброса твердых бытовых отходов; ограничение доступа местных жителей и туристов к озеру (с 9:00 до 18:00, выходной — среда). Также была разработана система постоянного экологического мониторинга.

Как следует из данных, представленных в Таблице, сразу после проведения восстановительных работ произошло некоторое улучшение экологического состояния озера. Так снизились концентрации азота и фосфора в воде озера, уменьшились максимальные значения концентрации хлорофилла «а», прекратилось возникновение анаэробных зон. Однако спустя десять лет после проведения работ озеро вернулось в свое первоначальное состояние (Таблица). А с 2016 года в прессе стали регулярно появляться сообщения об участившихся массовых заморах рыбы. Таким образом, несмотря на очевидные усилия местных властей по улучшению экологического состояния озера, долговременного успеха достичь не удалось. По всей видимости, при выполнении восстановительных работ не были в полной мере учтены все влияющие на процессы эвтрофирования факторы.

Таблица

ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ
озера «до», «сразу после восстановительных работ» и спустя 10 лет

Параметр	1998 (до восстановления)	2004 (после)	2008-2013 (через 10 лет)
Фосфаты, мг/л	1.55-5.33*	0.108*	0.155-5*
Азот, мг/л	0.28-4.5*	1.9*	4.1-8.53*
Chl "a", мг/м ³	81-244* (583-1026*??)	84-137*	72-141*
Прозрачность, (м)	Нет данных	Нет данных	0.12* (??)
pH	7-8	7-8	7-8
Растворенный кислород, mg/L	0.1-4*	3-4*	4-6*; 0.1-<10*
Биомасса фитопланктона	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Первичная продукция фитопланктона	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Толщина донных отложений, м	≈ 1.5	Нет данных	Нет данных
Тяжелые металлы (Zn, Cu, Hg, Pb, Cr, Cd)	Очень большие концентрации	Очень большие концентрации	Очень большие концентрации

* [1]



Рисунок 2. Сообщение в местной прессе о снижении концентрации растворенного кислорода в воде озера ниже 1 мг/л, что привело к очередной массовой гибели рыбы

Так, если судить по перечню параметров, представленных в Таблице, отсутствует информация о таких важных экологических параметрах, как: годовой цикл температуры воды; условия перемешивания в озере; годовой цикл кислородного режима; прозрачность воды; биомасса фитопланктона; первичная продукция фитопланктона. Информация о сезонной динамике этих параметров может быть получена с использованием методов математического моделирования, в частности, с применением модели FLakeEco.

Материал и методы исследования

Среди природных водоемов значительную часть составляют мелководные озера и водохранилища со средними глубинами до 20-30 м и горизонтальными размерами от

нескольких сотен метров до нескольких километров. Одной из основных особенностей таких водоемов является существенная горизонтальная однородность поля температуры в них и преобладание процессов вертикального переноса тепла над адвективными. При моделировании термического режима водоемов этого класса зачастую достаточно использовать простые одномерные модели, основанные на интегрировании уравнения вертикальной диффузии тепла и различных способах представления вертикального распределения температуры. Такие модели, как правило, основаны на ясных физических предположениях, не требуют задания коэффициентов вертикального турбулентного обмена, просты в реализации и удобны для проведения численных экспериментов. Примером модели такого типа является модель FLake, разработанная совместными усилиями сотрудников Института озераведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) [2, 3].

Модель FLake является универсальной математической моделью гидротермодинамики озера, в которой реализованы последние мировые достижения в области физической лимнологии. Модель применяется для решения широкого круга лимнологических проблем, служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в естественных и искусственных водоемах. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий модель внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран мира - Российской Федерации, Германии, Великобритании, Канады, Португалии, США, Франции, Финляндии, Швеции и Международного Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды. На Рисунке 3 схематично представлено вертикальное распределение температуры в системе снег – лед – водная масса – донные отложения, временная динамика которого рассчитывается в модели.



Рисунок 3. Схема вертикального профиля температуры в системе «снег – лед – водная масса – донные отложения», реализованная в модели FLake

В настоящее время модель FLake дополнена экологическим модулем Eco [4, 5].

Результаты верификации модели FLakeEco свидетельствуют о ее способности воспроизводить такие важные в экологическом отношении параметры, как концентрация РК, прозрачность воды, первичная продукция и биомасса водорослей в широком диапазоне разнотипных озер. На Рисунке 4 представлена блок-схема объединенной модели FLakeEco.



Рисунок 4. Блок-схема математической модели FLakeEco

В качестве исходной метеорологической информации для выполнения расчетов по модели FLakeEco требуются данные о солнечной радиации, температуре и влажности воздуха, общей облачности, скорости ветра над водоемом и количестве осадков. Данные могут быть получены из наблюдений, выполненных на локальных метеорологических станциях, либо при отсутствии такой возможности из постоянно обновляющихся архивов метеорологического реанализа ERA5.

Результаты и обсуждение

Для объективной оценки причин ухудшения экологического состояния озера Улсур с использованием модели FLakeEco были рассчитаны среднесезонные годовые циклы недостающих параметров, перечисленных выше. При выполнении расчетов были использованы данные метеорологического реанализа ERA5.

На Рисунке 5 представлены результаты моделирования годового цикла поверхностной и придонной температуры в озере. Как следует из данных, представленных на Рисунке 5, в озере Улсур устойчивая плотностная стратификация отсутствует (т.е. озеро полностью перемешивается) в период, переходный от жаркого сезона к сезону дождей – с начала июня по первую половину августа, а также со второй половины ноября до середины декабря. В эти периоды из-за полного перемешивания следует ожидать, что во всей водной массе от поверхности до дна концентрация РК близка к концентрации насыщения. В эти периоды, скорее всего, анаэробные условия в озере отсутствуют. В течение же остального времени в озере существует устойчивая плотностная стратификация, препятствующая аэрации придонных водных масс.

С учетом высоких значений биомассы водорослей (судя по значениям Chl «a») длительности этих периодов вполне достаточно для полного потребления РК в процессе деструкции органического вещества не только в придонной области, но и в вышележащих слоях. Последнее приводит к возникновению заморных явлений в озере.



Рисунок 5. Годовой цикл температуры воды в озере Улсур (по данным моделирования на модели FLakeEco). T_s и T_b – поверхностная и придонная температура воды соответственно

На Рисунке 6 представлены результаты моделирования сезонной динамики толщины перемешанного слоя в озере. Данные рисунка 6 полностью согласуются с данными расчетов температуры. Т.е. плотностная стратификация при высоких значениях концентрации органического вещества может быть причиной возникновения анаэробных условий в озере.

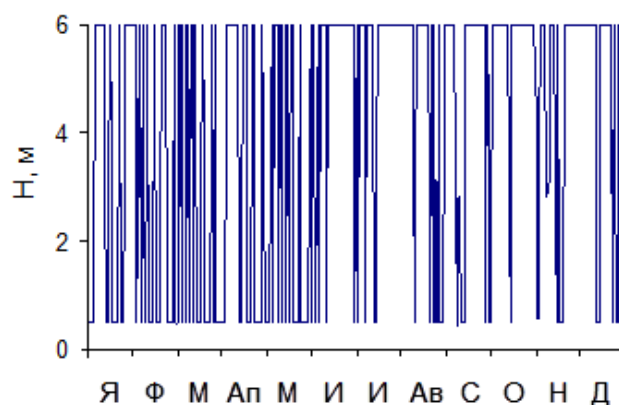


Рисунок 6. Сезонная динамика толщины перемешанного слоя H в оз. Улсур

На Рисунке 7 представлены результаты моделирования сезонной изменчивости прозрачности воды в озере до восстановительных работ, сразу после них и через 10 лет после проведения работ. Также выполнены расчеты для случая аномально высоких значений биомассы водорослей. Как следует из результатов моделирования, восстановительные работы действительно позволили увеличить прозрачность воды в период массового развития фитопланктона в озере ($\approx 20\%$). То, что в зимние месяцы прозрачность воды до и после восстановительных работ практически одинаковая, объясняется малыми значениями биомассы водорослей в это время. На Рисунке 8 представлены результаты моделирования сезонной изменчивости первичной продукции фитопланктона в озере до восстановительных работ, сразу после них и через 10 лет после проведения работ. Также выполнены расчеты для случая аномально высоких значений Chl «a».

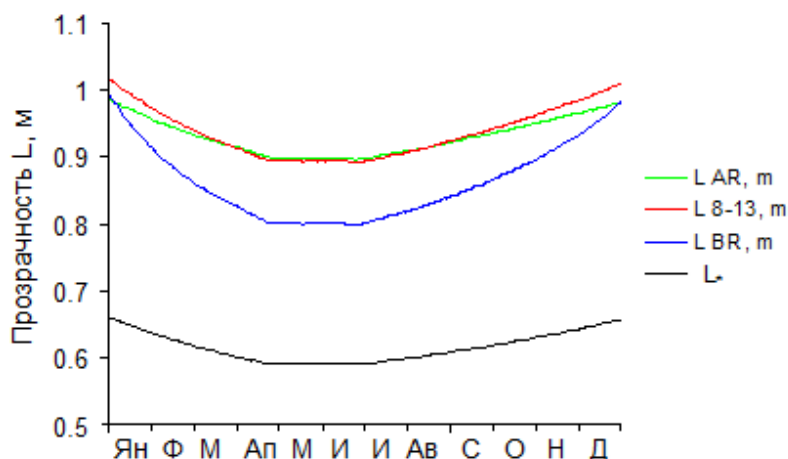


Рисунок 7. Прозрачность воды L в озере Улсур до (BR), после (AR) восстановления и в период с 2008 по 2013 год. Прозрачность при чрезвычайно высоких значениях Chl «а» (Таблица) обозначена как L^*

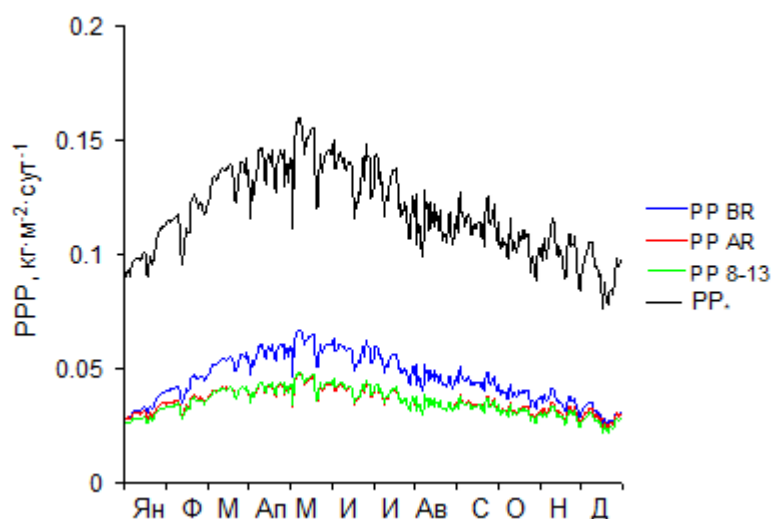


Рисунок 8. Первичная продукция фитопланктона (PPP) в озере Улсур до (BR), после (AR) восстановления и в период с 2008 по 2013 год. PPP при чрезвычайно высоких значениях Chl «а» обозначена как PP^*

В целом результаты расчетов первичной продукции симметричны результатам расчетов прозрачности воды в озере. С учетом того, что биомасса водорослей, а, следовательно, и первичная продукция являются величинами обратно пропорциональными прозрачности воды, результаты моделирования выглядят достаточно достоверными. Максимальные значения продукции и, соответственно, минимальные значения прозрачности наблюдаются в течение летних месяцев в наиболее благоприятных условиях для массового развития водорослей. Результаты моделирования термического режима и условий перемешивания в озере Улсур полностью соответствуют результатам моделирования годового цикла режима РК, представленным на Рисунке 9. Как следует из данных Рисунка 9 концентрация РК в озере в периоды отсутствия плотностной стратификации не опускается до ниже 3-4 мг/л, что не может приводить к возникновению заморов рыбы. И, наоборот, в периоды существования стратификации концентрации РК нередко опускаются до нулевых значений в придонной области и до минимально допустимых для выживания рыбы значений в поверхностных слоях.

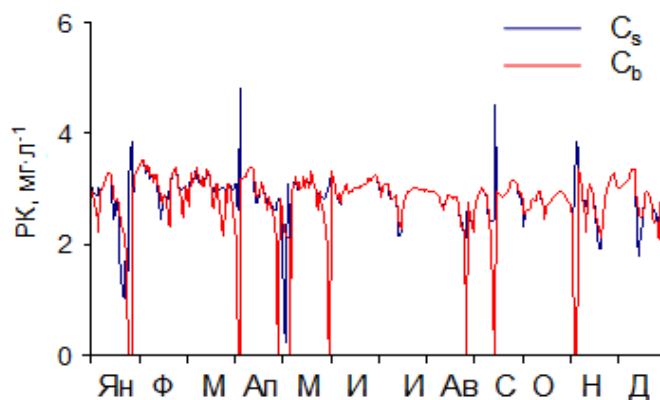


Рисунок 9. Сезонная динамика концентрации растворенного кислорода (PK) в озере Улсур. CS и Cb – концентрации PK в поверхностном и придонном слоях соответственно.

В работе [1] сообщалось о высоких концентрациях растворенного неорганического фосфора и азота в озере в зимние периоды. Это может быть вызвано конвективным механизмом массообмена на границе раздела вода – дно. Причиной этого процесса является отрицательный тепловой поток при охлаждении донных отложений [6].

На Рисунке 10 представлены результаты моделирования теплообмена через границу раздела вода-дно.

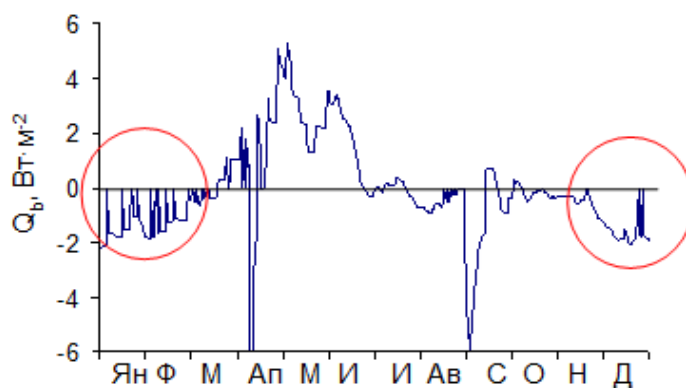


Рисунок 10. Сезонная динамика потока тепла через границу раздела вода – дно Q_b в озере Улсур. Окружностями отмечены периоды отрицательных значений потока тепла в зимнее время

По данным, представленным на Рисунке 10, отчетливо выделяются зимние месяцы с устойчивым отрицательным – направленным из донных отложений в водную массу – потоком тепла. В этот период происходит смена механизма массообмена через поверхность вода-дно с крайне замедленного молекулярного на конвективно-диффузионный, при котором вынос растворенных в поровом растворе донных отложений биогенных элементов происходит макрообъемами. Последнее вызывает резкий подъем концентраций азота и фосфора в водной массе озера, обеспечивая тем самым благоприятные условия для последующего массового развития фитопланктона.

Заключение

Результаты моделирования сезонной динамики гидрофизических и химико-биологических параметров в озере Улсур позволяют сделать некоторые выводы о причинах и механизмах формирования его современного экологического состояния. В основе лежит

высокое содержание биогенных веществ, которое приводит к очень высоким значениям первичной продукции фитопланктона и его биомассы. В свою очередь, это обеспечивает очень высокие показатели потребления кислорода при бактериальном разложении органического вещества и дыхании планктона. В такой ситуации даже кратковременной устойчивой плотностной стратификации, препятствующей аэрации придонных слоев, будет достаточно для полного исчезновения растворенного кислорода, что приводит к массовой гибели рыбы. В результате восстановительных работ было уменьшено поступление биогенных веществ с водосбора, т.е. уменьшение коснулось внешней биогенной нагрузки. Однако, этого было недостаточно, так как внутренняя биогенная нагрузка оказалась достаточной, чтобы компенсировать данное уменьшение. В результате экологическое состояние озера после кратковременного улучшения вернулось в свое первоначальное гиперэвтрофное состояние.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Института озераедения РАН – СПб ФИЦ РАН.

Список литературы:

1. Zutshi B., Prasad S., Bharathi J. Anthropogenic Impact on the Lakes Ecosystem in Hi-Tech City, Bangalore, Karnataka. *Environmental Science*, 2008
2. Mironov D. V. Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Part 1: Description of a lake model // German Weather Service, Offenbach am Main, Germany. 2005.
3. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // *Environmental Modelling & Software*. 2010. V. 25. №6. P. 793-801. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.01.002>
4. Golosov S., Maher O. A., Schipunova E. Physical Background of Oxygen Depletion Development in Ice-Covered Lakes // *Oecologia*, Springer Verlag. 2007. V. 151. P. 331-340.
5. Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2012. V. 64. №1. P. 17264. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.17264@zela20.2016.68.issue-s1>
6. Golosov S. D., Ignatieva N. V. Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment–water interface in shallow lakes // *Hydrobiologia*. 1999. V. 408. №0. P. 153-157. <https://doi.org/10.1023/A:1017067532346>

References:

1. Zutshi, B., Prasad, S. G. R., & Nagaraja, R. (2008). Anthropogenic impact on the lakes ecosystem in Hi-Tech City. *Bangalore, Karnataka*, 1786-1793.
2. Mironov, D. V. (2005). Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Part 1: Description of a lake model. *German Weather Service, Offenbach am Main, Germany*.
3. Golosov, S., & Kirillin, G. (2010). A parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environmental Modelling & Software*, 25(6), 793-801. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.01.002>
4. Golosov, S., Maher, O. A., & Schipunova, E. (2007) Physical Background of Oxygen Depletion Development in Ice-Covered Lakes. *Oecologia, Springer Verlag*, 151, 331-340.
5. Golosov, S., Terzhevik, A., Zverev, I., Kirillin, G., & Engelhardt, C. (2012). Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 64(1), 17264. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.17264@zela20.2016.68.issue-s1>

6. Golosov, S. D., & Ignatieva, N. V. (1999). Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment–water interface in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 408(0), 153-157. <https://doi.org/10.1023/A:1017067532346>

Поступила в редакцию
29.06.2026 г.

Принята к публикации
06.07.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Голосов С. Д., Зверев И. С. Оценка антропогенного воздействия на водоемы Южной Азии по данным математического моделирования (на примере оз. Урсул, Бангалор, Индия) // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №9. С. 109-118. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/130/11>

Cite as (APA):

Golosov, S., & Zverev, I. (2026). Assessment of Anthropogenic Impact on the Water Bodies of South Asia Based on Mathematical Modeling Data (A Case Study of Ulsoor Lake, Bengaluru, India). *Bulletin of Science and Practice*, 12(9), 109-118. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/130/11>