

ИЗ РАБОЧЕЙ ТЕТРАДИ ИССЛЕДОВАТЕЛЯ

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК НЕИЗУЧЕННЫХ ОЗЁР СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2023 г. И. С. Зверев^{a,*}, А. М. Расулова^{a,**}, С. Д. Голосов^{a,***}, С. А. Кондратьев^{a,****}

^aИнститут озероведения РАН — подразделение Санкт-Петербургского
Федерального исследовательского центра РАН, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: iliazverev@mail.ru

**E-mail: ARasulova@limno.ru

***E-mail: sergey_golosov@mail.ru

****E-mail: kondratyev@limno.org.ru

Поступила в редакцию 18.02.2023 г.

После доработки 22.03.2023 г.

Принята к публикации 26.03.2023 г.

В статье предложена методика оценки гидрофизических и химико-биологических характеристик неизученных малых и средних озёр (площадью до 100 км²) северных территорий России (на примере Восточной Фенноскандии) с использованием методов дистанционного зондирования и математического моделирования. Она основана на использовании одномерной модели гидротермодинамических процессов в водоёмах FLake. По данным спутниковой съёмки подстилающей поверхности определяется площадь озера, связанная частными эмпирическими зависимостями со средней глубиной, которая является входным параметром для применения модели. Кроме того, используются ряды метеозаписей стандартных измерений, получаемых по географическим координатам выбранного объекта из метеорологического реанализа семейства ERA5.

Таким образом можно оценить термические характеристики водоёма, а также рассчитать содержание растворённого кислорода в различных слоях водной массы и вероятность возникновения бескислородных условий. При этом не требуются контактные измерения, что крайне важно при исследовании труднодоступных и малоизученных северных территорий нашей страны.

Ключевые слова: Арктическая зона, озеро, дистанционные методы, зондирование Земли, математическая модель, термический и кислородный режимы, модель FLake.

DOI: 10.31857/S0869587323050110, EDN: VXEOCE

В соответствии со “Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года” (утверждена Указом Президента РФ № 645 от 26.10.2020 г.) [1] в настоящее время идёт активное освоение Арктики. Озёра — неотъемлемая часть природных ландшафтов этого региона. По данным дешифрирования спутниковых снимков на территории российской Арктики насчиты-

вается более 3.9 млн водоёмов, из которых около 1.4 млн имеют естественное происхождение [2]. Абсолютное большинство малых и средних озёр до сих пор остаются неизученными, главным образом из-за их труднодоступности.

Цель нашего исследования — разработка методики дистанционной оценки характеристик неизученных малых и средних озёр северных территорий нашей страны на основе методов математического моделирования с использованием имеющейся метеоинформации, данных дистанционного зондирования подстилающей поверхности и геостатистических зависимостей между морфометрическими характеристиками водоёмов рассматриваемой природной зоны. В данном случае под северными территориями понимается бореальная зона, южной границей которой для Европы (западнее 40° меридиана) является широ-

ЗВЕРЕВ Илья Сергеевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН. РАСУЛОВА Анна Мурадовна — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН. ГОЛОСОВ Сергей Дмитриевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН. КОНДРАТЬЕВ Сергей Алексеевич — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН.



Рис. 1. Природные зоны и озёра Кольско-Карельской провинции

та 50°, для Азии (восточнее 40° меридиана) — широта 40° [3].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК НЕИЗУЧЕННЫХ ОЗЁР

В качестве объектов исследования были выбраны очень малые, малые (площадью 0.1–10 км²) и средние (10–100 км²) озёра (по классификации П.В. Иванова [3]) Кольско-Карельской физико-географической провинции (Восточная Фенноскандия) [4, 5] (рис. 1). В её пределах находятся три основные природные (ландшафтные) зоны [6]: тундра, северная и средняя тайга.

Среди водоёмов Кольско-Карельской провинции значительную часть составляют мелководные озёра и водохранилища со средними глубинами от 5 до 12 м [7–9] и горизонтальными размерами от нескольких сотен метров до нескольких километров. Одна из основных особенностей таких водоёмов — существенная горизонтальная однородность поля температуры и преобладание процессов вертикального переноса тепла над адвективными. При моделировании термического режима водоёмов этого класса зачастую достаточно использовать простые одномерные модели,

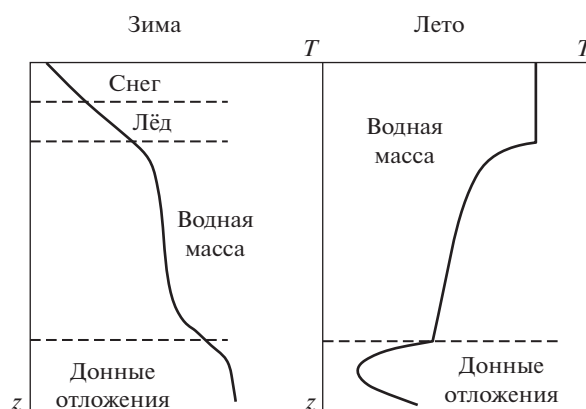


Рис. 2. Схема вертикального профиля температуры в системе “снег — лёд — водная масса — донные отложения”, реализованная в модели FLake

основанные на интегрировании уравнения вертикальной диффузии тепла и различных способах представления вертикального распределения температуры. Такие модели, как правило, не требуют задания коэффициентов вертикального турбулентного обмена, просты в реализации и удобны для проведения численных экспериментов.

Примером модели такого типа служит модель FLake, разработанная совместными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) [10–13]. Это универсальная математическая модель гидротермодинамики озера, в которой реализованы последние мировые достижения в области физической лимнологии. На рисунке 2 схематично представлено вертикальное распределение температуры в системе “снег — лёд — водная масса — донные отложения”, временная динамика которого рассчитывается в модели.

Для оценки химико-биологических характеристик озёр модель FLake была дополнена гидро-экологическим модулем, позволяющим рассчитывать режим растворённого кислорода в озёрах [14]. Объект моделирования должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- протяжённость не должна быть настолько велика, чтобы породить значительные климатические различия между отдельными участками акватории, и не настолько мала, чтобы вторичная ветровая циркуляция играла существенную роль;
- дно должно быть более или менее ровным и горизонтальным, чтобы его можно было аппроксимировать горизонтальной плоскостью;
- адвективные процессы не должны вносить значительного вклада в турбулентное перемешивание.

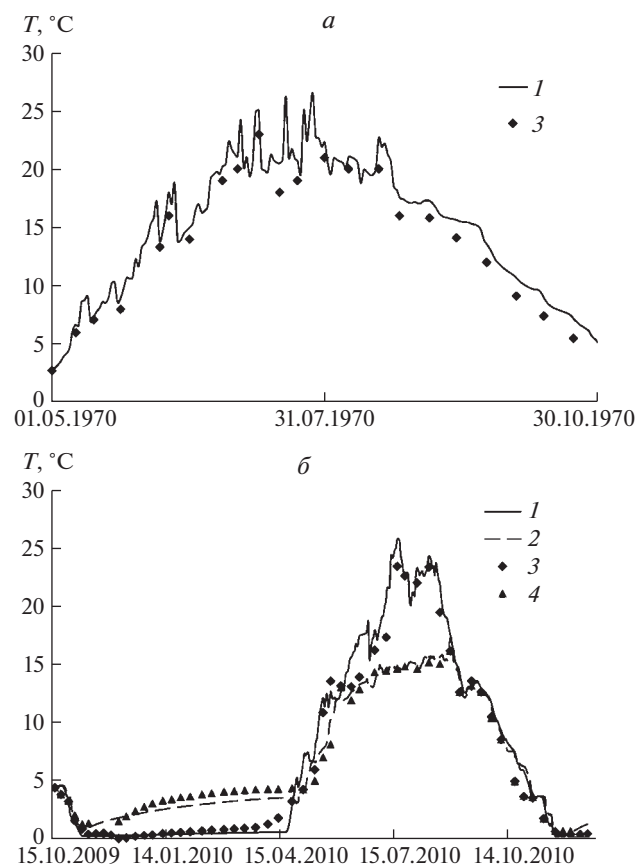


Рис. 3. Измеренные и рассчитанные значения поверхностной (T_s) и придонной (T_b) температуры воды в озёрах Красном (а) и Вендюрском (б)
1 – рассчитанная поверхностная температура; 2 – рассчитанная придонная температура; 3 – измеренная поверхностная температура; 4 – измеренная придонная температура

Модель FLake верифицирована по данным многолетних натурных наблюдений на многочисленных разнотипных озёрах мира, в частности, расположенных в пределах Восточной Фенноскандии – озёрах Красном (60°33' с.ш., 29°42' в.д., площадь 9 км², средняя глубина 7 м) и Вендюрском (62°10' с.ш., 33°10' в.д., площадь 10.4 км², средняя глубина 5.5 м) [15, 16]. В качестве примера на рисунке 3 представлено сравнение рассчитанных с помощью FLake и измеренных значений поверх-

Таблица 1. Уравнения для приближённой оценки средней глубины озера h_{avg} (м) в зависимости от его площади F_0 (км²) в различных природных зонах [6]

Природная зона	Граничное условие	Расчётная формула
Тундра	$F_0 \leq 10^7 \text{ км}^2$	$h_{avg} = 2.63 \cdot F_0^{0.16}$
Северная тайга	$F_0 \leq 200 \text{ км}^2$	$h_{avg} = 4.22 \cdot e^{0.01 \cdot F_0}$
Средняя тайга	$F_0 \leq 10^4 \text{ км}^2$	$h_{avg} = 5.25 \cdot F_0^{0.21}$

ностной (T_s) и придонной (T_b) температуры воды в указанных озёрах, подтверждающее адекватность модели процессов теплопереноса в водной массе.

Для дистанционной оценки характеристик озера с использованием модели FLake необходимо иметь географические координаты объекта, его среднюю глубину (или площадь, по которой можно вычислить глубину) и привязанные к ним данные метеорологического реанализа семейства ERA5. Реанализ ERA5, выполненный в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды [17], представляет собой ряды восстановленных величин метеорологических параметров для всего земного шара начиная с 1940 г. по настоящее время с пространственным разрешением 0.25° × 0.25° и временным шагом 1 ч. Он основан на данных наблюдений со спутниковых СВЧ-радиометров, различных метеостанций, метеобуёв, беспилотных аэростатов и наземных радаров. Временной шаг между сроками наблюдений составляет 6 ч. Выборка необходимых для расчётов данных производится по координатам расчётной точки.

Информацию о площадях озёр можно получать различными дистанционными методами. Наиболее приемлемым в рамках настоящей работы способом определения площади водоёма стало дешифрирование спутниковых снимков. При решении задачи дистанционной оценки характеристик неизученных озёр в годы различной водности применимы каталоги данных Global Surface Water (GSW) [18, 19], полученных на основе проекта Copernicus¹ [20], и снимков со спутников Landsat с 1984 по 2021 г. Пространственное разрешение всех каталогов GSW составляет 30 м.

Вопросам поиска территориально общих взаимосвязей между такими морфометрическими характеристиками озёр, как площадь и глубина, уделяется определённое внимание в работах отечественных [21, 6, 22] и зарубежных [23] специалистов. В нашем исследовании использованы расчётные зависимости для оценки средней глубины озера на основе его площади в различных природных зонах бореальной области Евразии, представленные в таблице 1.

Совершенствование территориально общих взаимосвязей между морфометрическими характеристиками озёр различных природных зон –

¹ Программа дистанционного зондирования Земли, цель которой – обеспечение глобальных, непрерывных, автономных и высококачественных возможностей для наблюдений Земли в широком спектральном диапазоне. Охватывает следующие основные категории: атмосфера, морская среда, поверхность земли, климат, чрезвычайные ситуации и безопасность. Все полученные данные, космические снимки и основанные на них информационные продукты находятся в открытом доступе для всех категорий пользователей.

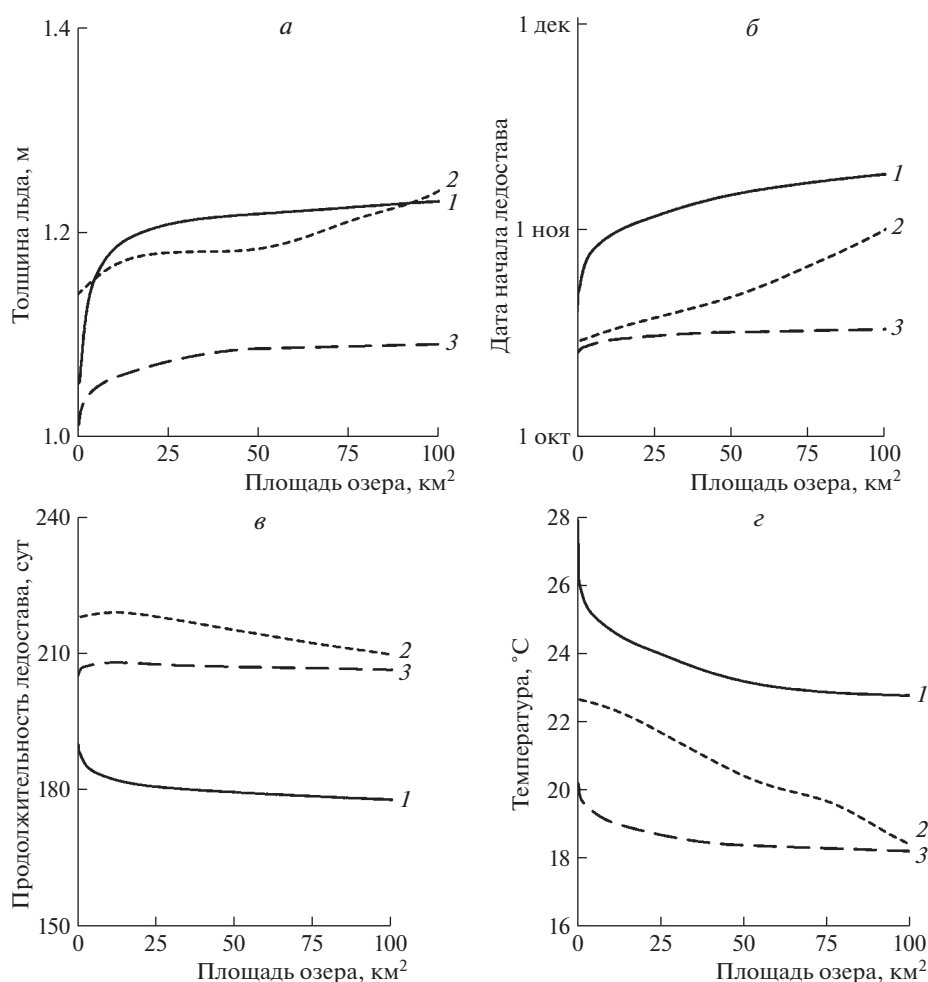


Рис. 4. Номограммы для приближённой оценки максимальной толщины льда (а), даты образования льда (б), продолжительности ледостава (в) и максимальной температуры поверхности воды (г) в зависимости от площади озера в зонах тундры, северной и средней тайги
1 – средняя тайга; 2 – северная тайга; 3 – тундра

одно из важных направлений развития методов дистанционной оценки неизученных озёрных экосистем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчёты термических характеристик озёр и содержания в водной массе растворённого кислорода выполнялись для трёх точек, расположенных на 32° меридиане в пределах зон тундры (67°30' с.ш., 32°00' в.д.), северной (65°00' с.ш., 32°00' в.д.) и средней (62°30' с.ш., 32°00' в.д.) тайги с использованием привязанных к ним данных метеорологического реанализа семейства ERA5.

По результатам проведённых расчётов построены номограммы, связывающие термические характеристики (максимальная толщина ледяного покрова, продолжительность периода замерзания и максимальная температура поверхностного слоя воды) малых и средних озёр различных при-

родных зон (тундры, северной и средней тайги) Восточной Фенноскандии со значениями их площадей (рис. 4). Расчёты производились с использованием усреднённых за 30-летний период (с 1990 по 2020 г.) метеорологических параметров.

В первом приближении принимается, что гидрометеорологические входные параметры не изменяются в пределах рассматриваемой природной зоны. При этом следует помнить, что построить оценочные номограммы для других географических координат с использованием соответствующих данных гидрометеорологического реанализа на основе результатов расчётов по FLake не составляет большого труда. Аналогичные графики могут быть построены и для таких гидротермодинамических характеристик, как температура и толщина верхнего перемешанного слоя в озере, теплообмен через границу раздела вода–дно, степень подлёдного прогрева водоёма, толщина слоя сезонного протаивания многолет-

немёрзлых грунтов (вечной мерзлоты) при их наличии и т.д.

Первый шаг при переходе от вычисления термических параметров озёр к решению задачи дистанционной оценки их экологического состояния — расчёт характеристик кислородного режима и выявление перспектив возникновения анаэробных зон, формирующихся в условиях острого дефицита растворённого в воде кислорода. В этих зонах активизируются анаэробные процессы, приводящие к образованию метана (CH_4), сероводорода (H_2S) и аммиака (NH_3), которые не только ухудшают качество озёрной водной массы, но и могут быть токсичными для гидробионтов (особенно H_2S).

На рисунке 5, *а* представлена внутригодовая динамика средней толщины анаэробной зоны в озёрах разной площади (и соответствующей глубины) в зоне средней тайги, рассчитанной по модели FLake. Рисунок 5, *б* иллюстрирует уменьшение максимальной толщины анаэробной зоны для озёр площадью 0.1, 1 и 15 км² в зависимости от географической широты в пределах той же зоны.

Как показали проведённые расчёты, риск формирования анаэробных зон в водоёмах Восточной Фенноскандии наиболее вероятен в малых озёрах (до 10 км²) средней тайги. Для озёр больших площадей существование анаэробной зоны не выявлено. Возрастание географической широты места расположения озера также ведёт к снижению вероятности возникновения в нём бескислородных условий. Так, в тундре при любых площадях водоёмов анаэробная зона в них не образуется, что обусловлено низкой температурой воды, снижающей скорость потребления кислорода в процессе бактериального разложения органического вещества.

Полученные результаты не противоречат данным более ранних исследований кислородного режима Восточной Фенноскандии [24, 25], которые свидетельствуют о том, что в силу географического положения, климатических условий, а также специфического характера формирования водного баланса (прежде всего его приходной части)² в озёрах, расположенных севернее 67°–68° с.ш., дефицит растворённого кислорода — явление крайне редкое и носит локальный характер. Формирование же бескислородных зон в таких озёрах практически не отмечалось.

Таким образом, основным результатом нашего исследования стала методика приближённой, полностью дистанционной оценки характеристик термического и кислородного режимов не-

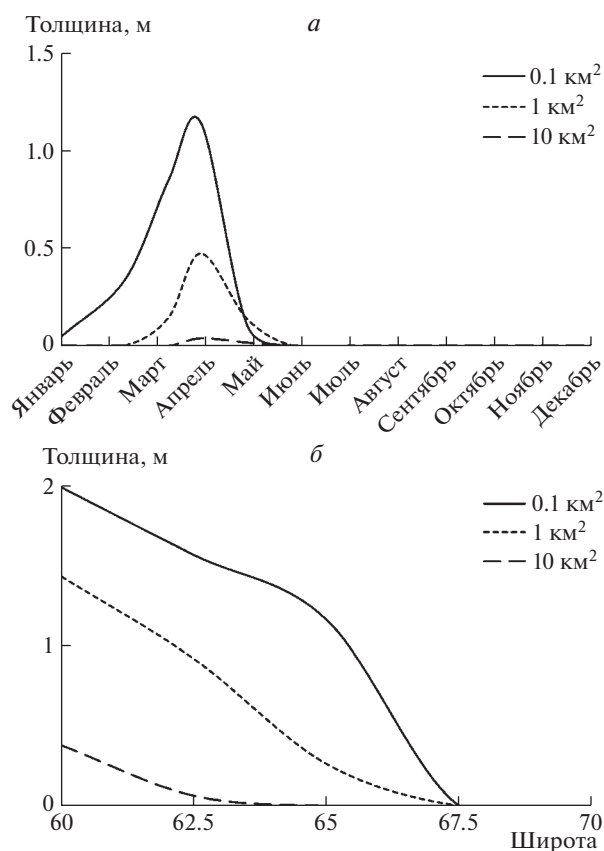


Рис. 5. Внутригодовая динамика средней толщины анаэробной зоны в озёрах разной площади в средней тайге (*а*), а также максимальная толщина анаэробной зоны для озёр различной площади в зависимости от географической широты (*б*)

изученных озёр серверных территорий. Главным инструментом для выполнения такого рода оценки служит одномерная математическая модель гидротермодинамики озера FLake в совокупности с имеющейся информацией метеорологического реанализа в изучаемом регионе и известными территориально общими зависимостями средней глубины озера от его площади. Даже при отсутствии доступа к модели любой водопользователь, заинтересованный озером с известными географическими координатами и оценивший площадь его поверхности, может на основании полученных в результате моделирования номограмм провести приближённую оценку термических свойств водоёма (продолжительность ледостава, толщина льда, температура поверхностного слоя воды, наличие или отсутствие бескислородной зоны и др.), а также характеристик кислородного режима. Необходимо отметить, что при условии дополнения модели FLake соответствующими программными модулями по приведённой выше методике могут быть оценены и другие химико-биологические показатели, например, биомасса, первичная продукция водорослей, про-

² Приходная часть водного баланса озера складывается из поступления поверхностного и подземного стока с озёрного водосбора и атмосферных осадков, выпадающих на поверхность самого озера.

зрачность воды. При этом, как упоминалось выше, не потребуются сложно реализуемых контактных измерений, что крайне важно для труднодоступных и малоизученных северных территорий России.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам FMNG-2019-0001 “Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоёмов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов” (№ госрегистрации AAAA-A19-119031890106-5) и FMNG-2019-0004 “Закономерности распределения озёр по территории Евразии и оценка их водных ресурсов” (№ госрегистрации AAAA-A19-119031990011-1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. <http://kremlin.ru/acts/news/64274> (дата обращения 01.02.2023).
2. Измайлова А.В. Озёрный фонд Арктической зоны Российской Федерации // MGO 2020 им. Л.Н. Карлина. Труды IV Всероссийской конференции “Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития”. 16–17 декабря. СПб.: Химиздат, 2020. С. 181–184.
3. Мякишева Н.В. Многокритериальная классификация озёр. СПб.: РГГМУ, 2009.
4. Исаченко А.Г., Шляпников А.А. Ландшафты. М.: Мысль, 1989.
5. Физико-географическое районирование (М 1 : 15000000) // Национальный атлас России. Т. 2. Природа и экология. М.: ПКО “Картография”, 2007. С. 350–351.
6. Шульга М. Представление озёр в моделях погоды и климата: внешние параметры, объективный анализ температуры поверхности воды и верификация. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. СПб.: РГГМУ, 2015.
7. Рянжин С.В., Ульянова Т.Ю. Геоинформационная система “озёра мира” – GIS WORLDLAKE // Доклады Академии наук. 2000. № 4. С. 542–545.
8. Кочков Н.В., Рянжин С.В. Озёра мира WORLDLAKE / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015621549. Заявка № 2015620713. ИНОЗ РАН, 2015.
9. Lehner B., Grill G. Global River hydrography and network routing: Baseline data and new approaches to study the world’s large river systems // Hydrological Processes. 2013. № 15. P. 2171–2186.
10. Mironov D.V. Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model // COSMO Technical Report № 11. Offenbach am Main: German Weather Service, 2008.
11. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO // Boreal environ. Res. 2010. V. 15. P. 218–230.
12. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // Environmental Modelling & Software. 2010. V. 25 (6). P. 793–801.
13. Choulga M., Kourzeneva E., Zakharova E. et al. Estimation of the mean depth of boreal lakes for use in numerical weather prediction and climate modelling // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2014. V. 66 (1). P. 21295.
14. Golosov S., Maher O.A., Schipunova E. et al. Physical Background of Oxygen Depletion Development in Ice-Covered Lakes // Oecologia. 2007. V. 151. P. 331–340.
15. Mironov D.V., Golosov S.D., Zilitinkevich S.S. et al. Seasonal changes of temperature and mixing conditions in a lake. Modelling Air-Lake Interaction. Physical Background / Ed. S.S. Zilitinkevich. Berlin: Springer-Verlag, 1991. P. 74–90.
16. Терзевик А.Ю., Пальшин Н.И., Голосов С.Д. и др. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. № 5. С. 568–580.
17. Copernicus Climate Data Store. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5> (дата обращения 02.02.2023).
18. Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N. et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. V. 540. P. 418–422.
19. Global Surface Water Explorer. <https://global-surface-water.appspot.com/> (дата обращения 01.02.2023).
20. Copernicus: Europe’s eyes on Earth. <https://www.copernicus.eu/en>
21. Кочков Н.В., Рянжин С.В. Методика оценки морфометрических характеристик озёр с использованием спутниковой информации // Водные ресурсы. 2016. № 1. С. 18–23.
22. СТО ГГИ 52.08.40–2017. Определение морфометрических характеристик водных объектов суши и их водосборов с использованием технологии географических информационных систем по цифровым картам РФ и спутниковым снимкам // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). СПб.: ООО “РПЦ Офорт”, 2017.
23. Messenger M., Lehner B., Grill G. et al. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach // Nat. Commun. 2016. V. 7 (1). 13603.
24. Озёра различных ландшафтов Кольского полуострова. Ч. 2. Гидрохимия и гидробиология / Отв. ред. В.Г. Дробкова и Т.Д. Слепухина. Л.: Наука, 1974.
25. Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. Геоэкология озёр Мурманской области. В 3 ч. Ч. 2. Гидрохимия водоёмов. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2014.