

ПРОБЛЕМЫ ВОД СУШИ

УДК 556.550.72:528.88

МЕТОДИКА ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК НЕИЗУЧЕННЫХ ОЗЕР МАТЕРИКОВОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОЙ ТУНДРЫ

© 2023 г. И. С. Зверев¹, С. Д. Голосов¹, С. А. Кондратьев¹, А. М. Расулова^{1,*}

Представлено академиком РАН В.А. Семеновым 30.03.2023 г.

Поступило 30.03.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принято к публикации 04.04.2023 г.

Предложена методика оценки гидрофизических и химико-биологических характеристик неизученных малых и средних озер (площадью до 100 км²) арктических территорий России с использованием методов дистанционного зондирования и математического моделирования. Методика основана на использовании одномерной модели гидротермодинамических и химико-биологических процессов в водоемах. Предложенный подход позволяет на основе информации о географических координатах и площади поверхности озера получить оценку теплопереноса между атмосферой, льдом, водой и донными отложениями, дату образования ледового покрова, его толщину и продолжительность существования ледостава, рассчитывать профили температуры воды и донных отложений, а также растворенного кислорода по глубине. При этом не требуются контактные измерения, что крайне важно для труднодоступных и малоизученных северных территорий нашей страны.

Ключевые слова: дистанционная оценка, озеро, тундра, математическая модель, реанализ

DOI: 10.31857/S2686739723600650, **EDN:** WGECPU

Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации [1, 8] направлена на активное изучение и освоение Арктики, в том числе и ее природных ресурсов. Озера являются неотъемлемой частью природных ландшафтов арктического региона РФ. На спутниковых снимках в пределах Арктической зоны РФ дешифрируется более 2.5 млн водоемов. Суммарная площадь водной поверхности арктических озер составляет ~160 тыс. км², или чуть менее половины суммарной площади водной поверхности всех естественных водоемов РФ [1, 5, 6]. Абсолютное большинство малых и средних озер арктических территорий являются неизученными главным образом из-за их труднодоступности.

Целью настоящего исследования является разработка методики дистанционной оценки характеристик неизученных малых (1–10 км²) и средних (10–100 км²) озер тундровых ландшафтов нашей страны на основе методов математического моделирования с использованием спутниковой

информации дистанционного зондирования подстилающей поверхности, баз данных метеорологического реанализа и геостатистических зависимостей между морфометрическими характеристиками озер природных зон.

Объектами исследования являются очень малые и малые (площадью 0.1–10 км²), а также средние (10–100 км²) озера [3], расположенные за полярным кругом в зоне тундры вдоль побережья Северного Ледовитого океана и Берингова моря (рис. 1). Характерной особенностью этой территории является наличие вечной мерзлоты.

Побережье морей Северного Ледовитого океана практически повсеместно покрыто густой сетью водоемов. Наряду с прибрежно-лагунными водоемами, в пределах морских аккумулятивных, водно-ледниковых и озерно-аллювиальных равнин широко распространены термокарстовые, ледниковые, просадочные, пойменные и западинные озера. Большинство из них характеризуются малыми площадями и незначительными глубинами, составляющими от 1 до 2 м и лишь иногда – до 3 и более метров [6]. Одними из основных особенностей таких водоемов являются существенная горизонтальная однородность поля температуры в них и преобладание процессов вертикального переноса тепла над адвективными. При моделировании термического режима водоемов этого класса зачастую достаточно ис-

¹Институт озероведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: ARasulova@limno.ru



Рис. 1. Тундровые природные зоны России: 1 — Кольские низкоротные тундры и редколесья, 2 — Большеземельские тундры, 3 — Ямало-Гыданские тундры, 4 — Северо-Таймырские арктические тундры, 5 — Североякутские тундры, 6 — Чукотские тундры, 7 — Тундры и редколесья Корякского нагорья (<https://ecoregions.appspot.com/>).

пользовать простые одномерные модели, основанные на интегрировании уравнения вертикальной диффузии тепла и различных способах представления вертикального распределения температуры.

При невозможности выполнения контактных измерений характеристик озер, находящихся в труднодоступных областях, предлагается воспользоваться методикой оценки состояния озер, схема которой представлена на рис. 2.

Основные этапы дистанционной оценки характеристик озер сводятся к следующему алгоритму. С использованием средств дистанционного зондирования поверхности Земли дешифрируется интересующий объект, находятся его географические координаты и площадь водной поверхности озера. На основе геостатистических (территориально-общих для рассматриваемого региона) соотношений между площадью и глубиной, последняя оценивается для неизученных озер. По географическим координатам из баз данных метеорологического реанализа может быть получена метеоинформация требуемого разрешения. Глубина озера и метеоданные являются входными данными в модель FLakeEco, которая рассчитывает термические характеристики водоема, параметры его кислородного режима, а также теплоперенос в донных отложениях. При отсутствии доступа к модели для приближенной оценки термических характеристик воды и донных отложений, а также показателей кислородного режима озера могут быть использованы соответствующие номограммы, построенные заранее по результатам модельных расчетов для интересующей области.

Инструментом дистанционной оценки характеристик неизученных озер в предлагаемой методике является модель FLake (www.lakemodel.net), 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) [12, 16]. Модель FLake является универсальной математической моделью гидротермодинамики озера, в которой реализованы основные мировые достижения в области физической лимнологии. Модель FLakeEco представляет собой модификацию FLake, дополненную гидроэкологическим модулем, позволяющим рассчитывать режим растворенного кислорода в озерах [9, 13]. Продукт синтеза модели озера FLake и приповерхностных метеорологических данных из проекта реанализа NCEP/NCAR получил название FLake-Global [14]. Отмечается, что FLake-Global “позволяет практически мгновенно оценить сезонный цикл температуры и условий перемешивания в любом мелководном пресноводном озере по всему миру”. Как отмечается на сайте модели (www.lakemodel.net), она может использоваться в системах численного прогнозирования погоды, моделирования климата и других экологических приложений как одномерная модель в автономном режиме или как физический модуль в моделях озерных экосистем. В международном проекте COSMO (<https://www.cosmo-model.org/content/model/cosmo/default.htm>) модель FLake используется при оценке влияния водной поверхности водоемов на локальный климат. В настоящей работе впервые математическое моделирование и результаты космической съемки применены для дистанци-



Рис. 2. Схема дистанционной оценки характеристик малых и средних неизученных труднодоступных водоемов.

онной оценки характеристик неизученных озер арктической зоны РФ.

Примеры верификации модели FLake на озерах Северо-Таймырской арктической тундры РФ представлены в работах [10, 17]. На рис. 3 в качестве примера дополнительной верификации модели на озере Сюртав-Малто (69.7° с.ш., 75.6° в.д.), расположенного в Ямало-Гыданской тундре, представлены измеренные значения температуры воды на разных глубинах для двух дат в конце ледостава [4] и рассчитанные по модели для этих же дат температурные профили. Соответствие расчетных и натурных данных можно признать удовлетвори-

тельным, а модель FLake — вполне пригодной для достижения целей настоящей работы.

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. В настоящей работе использовался реанализ NCEP/NCAR (www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml), который представляет собой ряды восстановленных величин метеорологических параметров для всего земного шара. Временной шаг между сроками “наблюдений” составляет 6 ч. Выборка

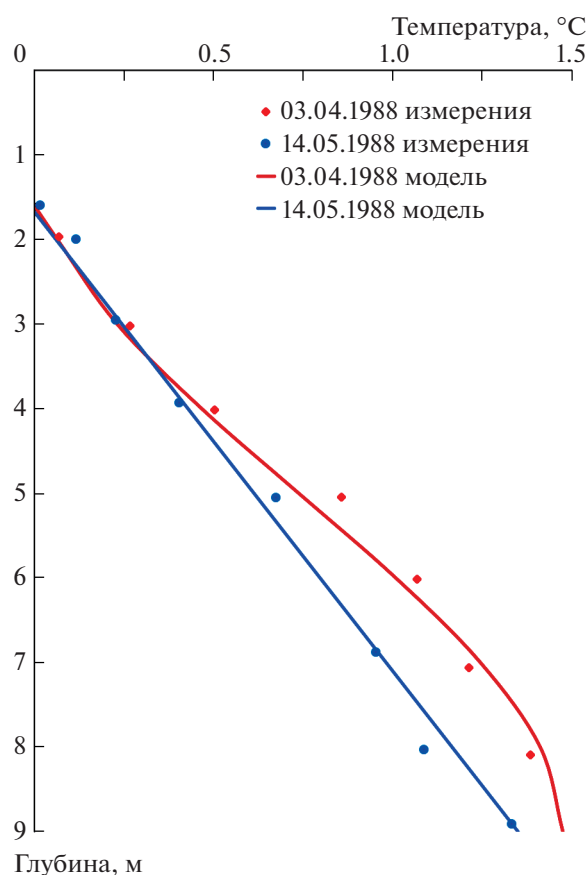


Рис. 3. Измеренные и рассчитанные по модели FLake вертикальные распределения температуры в озере Сюртав-Малто, Ямало-Гыданская тундра.

необходимых для расчетов данных производится по координатам расчетной точки.

Наиболее приемлемым в рамках настоящей работы методом определения площади водоема является дешифрирование спутниковых снимков. При решении задачи дистанционной оценки

Таблица 1. Геостатистические зависимости средней глубины озера (h) от его площади (F) для различных зон тундры (№ зоны соответствует рис. 1)

№ зоны	Вид зависимости	Количество озер в выборке HydroLAKES ($0.1 \text{ км}^2 \leq F \leq 100 \text{ км}^2$)
1	$h = 6.215F^{0.198}$	1724
2	$h = 4.028F^{0.028}$	2761
3	$h = 0.521\ln(F) + 4.515$	18 179
4	$h = 4.932F^{0.219}$	30 586
5	$h = 4.591F^{0.144}$	20 096
6	$h = 1.049\ln(F) + 6.946$	4002
7	$h = 4.985F^{0.104}$	5216

характеристик неизученных озер в годы различной водности применимы каталоги данных Global Surface Water (<https://global-surface-water.appspot.com>), полученные на основе проекта Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en>) и снимков со спутников Landsat с 1984 по 2021 г. Пространственное разрешение всех каталогов GSW составляет 30 м.

Вопросам поиска геостатистических взаимосвязей между такими морфометрическими характеристиками озер, как площадь и глубина, посвящен ряд научных исследований как отечественных [2, 7, 17], так и зарубежных [15] специалистов. В настоящем исследовании для всех семи зон тундры (рис. 1) использованы эмпирические зависимости глубины озера от его площади (табл. 1), которые были получены в результате статистической обработки баз данных HydroLAKES [15] по выбранным зонам.

Необходимо отметить, что совершенствование территориально общих взаимосвязей между морфометрическими характеристиками озер различных природных зон является одним из основных направлений развития метода дистанционной оценки неизученных озерных экосистем.

При наличии необходимой исходной информации модель рассчитывает следующие характеристики выбранного озера:

- теплоперенос между атмосферой, льдом, водой и донными отложениями;
- профиль температуры воды по глубине, температуру у поверхности и у дна;
- профиль температуры в донных отложениях;
- дату образования ледового покрова, его продолжительность и толщину;
- глубину протаивания донных отложений в озерах зоны вечной мерзлоты;
- профиль концентрации растворенного кислорода по глубине и толщину анаэробной зоны (при наличии).

Расчеты выполнялись для шести точек, расположенных в представленных на рис. 1 семи областях зоны тундры и соответствующих следующим озерам: 1 — оз. Бабозеро, Мурманская обл. (67.993980° с.ш., 37.603655° в.д.); 2 — оз. Порчты, Ненецкий автономный округ (67.888251° с.ш., 59.076433° в.д.); 3 — оз. Сохонто, Ямало-Ненецкий автономный округ (69.166749° с.ш., 70.109453° в.д.); 4 — оз. Сырутатурку, Красноярский край (73.685402° с.ш., 97.586035° в.д.); 5 — оз. Федота, Респ. Саха (71.168933° с.ш., 144.813443° в.д.); 6 — оз. Элэргытгын, Чукотский АО (68.804262° с.ш., 171.274288° в.д.); 7 — оз. Бурыпчи — Камчатский край (63.962810° с.ш., 168.493262° в.д.). К указанным точкам привязаны данные метеорологического реанализа семейства NCEP/NCAR, осредненные за тридцатилетний интервал времени. В первом приближении можно считать результа-

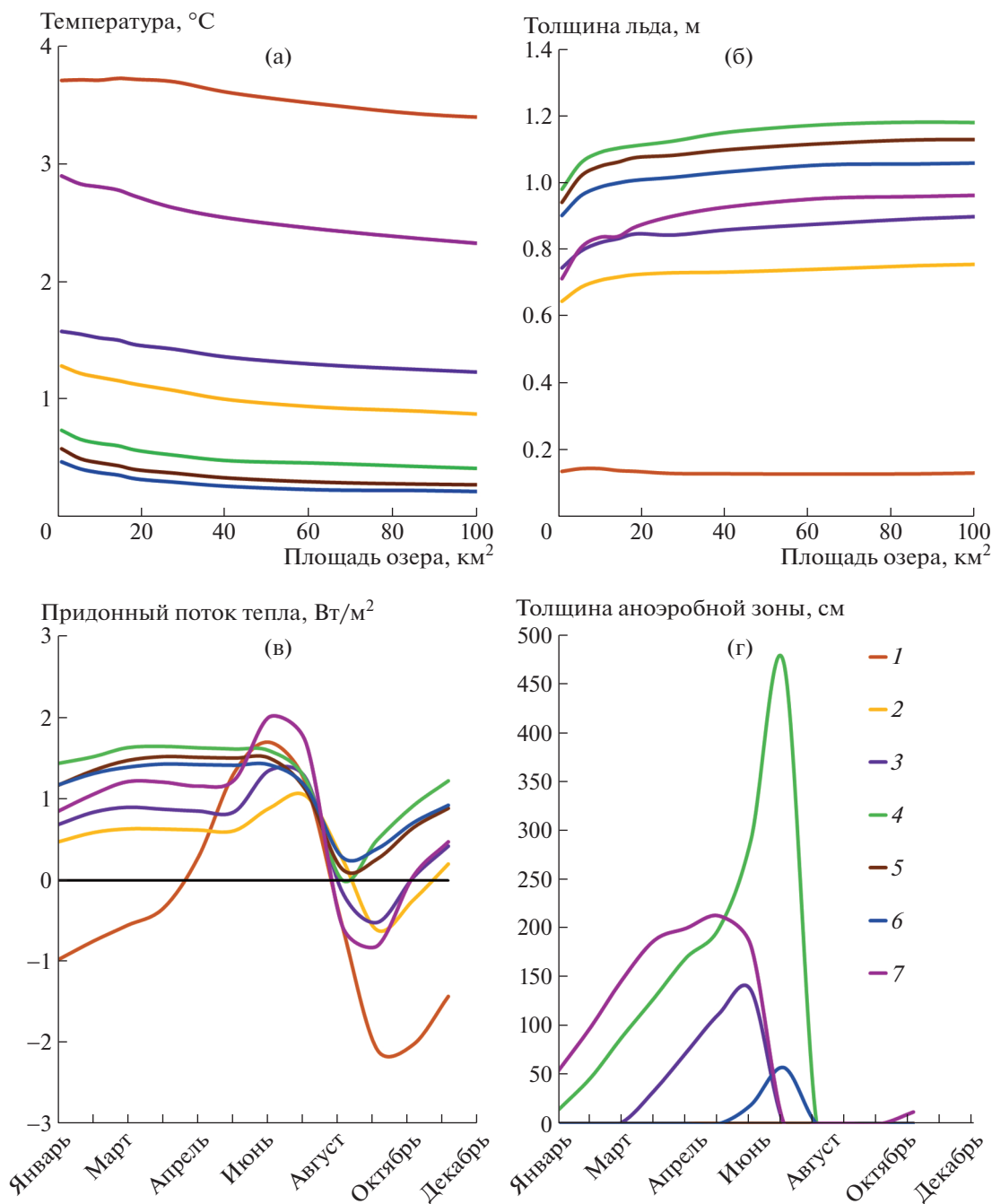


Рис. 4. Номограммы для приближенной оценки средних значений температуры поверхности воды (а), толщины льда (б) в зависимости от площади озера, теплообмен через границу вода–дно (в), а также внутригодовая динамика максимально возможной толщины анаэробной зоны (г) для различных зон тундры по результатам моделирования (номера зон соответствуют рис. 1).

ты расчетов, выполненных для указанных точек, репрезентативными для соответствующих зон тундры.

По результатам проведенных расчетов построены номограммы, связывающие термические характеристики (средние значения температуры поверхностного слоя воды и толщины ледяного

покрова) малых и средних озер со значениями их площадей для семи рассматриваемых зон тундры (рис. 4).

При этом следует помнить, что построить оценочные номограммы для других географических координат с использованием соответствующих данных метеорологического реанализа на основе

результатов расчетов по модели не составляет большого труда.

Рисунки 4 а и 4 б иллюстрируют зависимость средних значений температуры поверхности воды и толщины льда от площади озера в семи рассматриваемых зонах тундры. Пологая форма представленных графиков является следствием слабой зависимости глубины водоема от его площади, что является характерной особенностью тундровых озер. Разница в расположении графиков объясняется различной широтой рассматриваемых точек, а также региональными различиями данных метеорологического реанализа. Максимальные значения температуры поверхности воды и минимальная толщина льда характерны для Кольских низкогорных тундр и редколесей, подверженных влиянию теплого атлантического течения Гольфстрим. Противоположная картина наблюдается в результатах расчета по Северо-Таймырской арктической тундре (№ 4), северо-якутской (№ 5) и чукотской (№ 6) зонам тундры.

Рисунок 4 в представляет результаты расчета внутригодовой динамики потока тепла через границу вода–дно для рассматриваемых точек. Невозможно видеть, что в зонах 4, 5 и 6 поток тепла положителен, т.е. направлен в донные отложения в течение всего года, что объясняется влиянием вечной мерзлоты. В остальных зонах осенне-зимнее выхолаживание водной массы приводит к возникновению обратного потока тепла, так как донные отложения дольше удерживают тепло по сравнению с водной массой. В наибольшей степени это выражено в озерах Кольской тундры.

В качестве первого шага при переходе от вычисления термических параметров озер к решению задачи дистанционной оценки их экологического состояния могут служить расчет характеристик кислородного режима и оценка перспектив возникновения анаэробных зон, формирующихся в условиях острого дефицита растворенного в воде кислорода. В этих зонах активизируются восстановительные процессы, приводящие к образованию метана (CH_4), сероводорода (H_2S) и аммиака (NH_3), которые не только ухудшают качество озерной водной массы, но и могут быть токсичными для гидробионтов (особенно это касается H_2S). Входной информацией для расчета характеристик кислородного режима является скорость потребления кислорода бактериями (БПК_5), задаваемая по известным литературным аналогам [9, 12]. На рис. 4 г представлена рассчитанная внутригодовая динамика средней толщины анаэробной зоны для рассматриваемых точек и расположенных в них озер. Как показали проведенные расчеты, риск возникновения анаэробных зон наиболее вероятен в озерах зон № 3, 4, 5 и 6. Максимальная толщина анаэробной зоны характерна для Северо-Таймырской арктической тундры

(зона № 4), характеризующейся максимальной толщиной ледяного покрова (рис. 4 б). Для озер, находящихся в зонах № 1, 2 и 7, возможность формирования анаэробных зон не выявлена.

Основным результатом исследования является методика полностью дистанционной оценки характеристик термического и кислородного режимов неизученных озер северных территорий. Основным инструментом для выполнения такого рода оценки служит одномерная математическая модель гидротермодинамики озера FLake, а также ее производные FLakeEco и FLake-Global в совокупности с имеющейся информацией метеорологического реанализа в изучаемом регионе и известными геостатистическими 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 составить приближенную оценку термических характеристик водоема (продолжительность ледостава, толщина льда, температура поверхностного слоя воды и донных отложений, наличие или отсутствие бескислородной зоны и др.), а также характеристик кислородного режима. Необходимо отметить, что при условии дополнения модели FLake соответствующими программными модулями, по приведенной выше методике могут быть оценены и другие химико-биологические характеристики водоемов, такие как, например, биомасса и первичная продукция водорослей, прозрачность воды и др.

При этом, как уже упоминалось выше, не потребуются сложно реализуемые контактные измерения, что крайне важно для труднодоступных, неизученных или малоизученных северных территорий нашей страны.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам FMNG-2019-0001 и FMNG-2019-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измайлова А.В. Водные ресурсы озер Российской Федерации // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14.
2. Кочков Н.В., Рянжин С.В. Методика оценки морфометрических характеристик озер с использованием спутниковой информации // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 1. С. 18–23.
3. Мякишева Н.В. Многокритериальная классификация озер. СПб.: изд. РГГМУ, 2009. 160 с.
4. Павлов А.В. Термический режим равнинных озер Севера // Криосфера Земли. 1999. Т. 3. № 3. С. 59–70.

5. Румянцев В.А., Измайлова А.В., Макаров А.С. Состояние озерного фонда Арктической зоны Российской Федерации // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 2. С. 115–126.
6. Румянцев В.А., Измайлова А.В., Крюков Л.Н. Состояние водных ресурсов озер арктической зоны Российской Федерации // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 1. С. 84–100.
7. 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. 148 с.
8. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года // Утверждена Указом Президента Российской Федерации № 645 от 26 октября 2020 года.
<http://kremlin.ru/acts/news/64274> (дата обращения: 01.02.2023).
9. Терзевик А.Ю., Пальшин Н.И., Голосов С.Д. и др. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 5, № 5. С. 568–580.
10. Шадрин А.А., Федорова И.В., Голосов С.Д., Евдокимов А.А., Бойке Дж. Термический режим озер Арктики // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. Тр. VIII Межд. н.-практ. конф., 2014. Т. 1. М., РУДН, 24–27.11 2014. С. 581–589.
11. Шульга М. Представление озер в моделях погоды и климата: внешние параметры, объективный анализ температуры поверхности воды и верификация / Дисс. ... уч. ст. канд. физ.-мат. наук. СПб.: РГГМУ, 2015. 217 с.
12. 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>
13. Golosov S., Maher O.A., Schipunova E., et al. Physical Background of Oxygen Depletion Development in Ice-Covered Lakes // Oecologia, Springer Verlag. 2007. V. 151. P. 331–340.
14. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nutzmann G. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // Environmental Modelling & Software. 2011. V. 26. Iss. 5. P. 683–684.
15. 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.
<https://doi.org/10.1038/ncomms13603>
16. 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.
17. Zdrovennov R., Golosov S., Zverev I., Zdrovennova G., Fedorova I. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes // E3S Web of Conferences. V. 163. 04008, 2020.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016304008>

METHODOLOGY OF REMOTE ASSESSMENT OF THE CHARACTERISTICS OF UNEXPLORED LAKES OF THE CONTINENTAL PART OF THE RUSSIAN TUNDRA

I. S. Zverev^a, S. D. Golosov^a, S. A. Kondratiev^a, and A. M. Rasulova^{a, #}

^a*Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation*

[#]*E-mail: ARasulova@limno.ru*

Presented by Academician of the RAS V.A. Semenov March 30, 2023

A methodology has been proposed to assess the hydrophysical and chemical-biological characteristics of unexplored small and medium lakes (with an area of up to 100 km²) in the Arctic territories of Russia using remote sensing and mathematical modeling methods. The methodology is based on the use of a one-dimensional model of hydrothermodynamic and chemical-biological processes in water bodies FLake. The technique makes it possible to obtain an estimate of heat transfer between the atmosphere, ice, water, and bottom sediments, the date of ice cover formation, its thickness, and duration of existence of freeze-up, calculate profiles of water and bottom sediment temperature and dissolved oxygen by depth based on information on geographical coordinates and lake's surface area. Contact measurements are not required, which is extremely important for hard-to-reach and poorly explored northern territories of our country.

Keywords: distance assessment, lake, tundra, mathematical model, reanalysis