



научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<https://ecopri.ru>



<https://petsu.ru>

Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<https://ecopri.ru>

№ 4 (50). Декабрь, 2023

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

**Редакционная
коллегия**

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugolek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Ленина, 33.

E-mail: ecopri@petsu.ru

<https://ecopri.ru>





УДК 57.042

ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА МЕТОДАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

ИСАКОВА
Ксения Валерьевна

Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИВПС КарНЦ РАН) (Россия, Республика Карелия, 185030, г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), ksusha_isakova@mail.ru

КАЛИНКИНА
Наталья
Михайловна

доктор биологических наук, Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИВПС КарНЦ РАН) (Россия, Республика Карелия, 185030, г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), cerioda@mail.ru

Ключевые слова: Онежское озеро, температура поверхности воды, многолетние тренды, сезонные тренды

Подписана к печати:
23 декабря 2023 года

Аннотация. Проанализированы материалы по температуре поверхности воды Онежского озера за период 35 лет (с 1985 по 2020 г.). Использованы данные дистанционного зондирования из двух интернет-источников со свободным доступом. Выполнена верификация данных относительно натурных измерений температуры, сделанных с борта судна. Составлена база данных по температуре поверхности воды для 142 ячеек акватории озера размером 8*8 км. Рассчитаны уравнения линейных многолетних трендов в увеличении среднемесячных показателей температуры поверхности воды. Оценки, полученные методами дистанционного зондирования за изученный период для Онежского озера, оказались близки к результатам натурных наблюдений. Построены картограммы, демонстрирующие выраженность указанных трендов в разных районах акватории Онежского озера. Наиболее существенные изменения коснулись Повенецкого залива и центрального плеса. Здесь озерные воды стали быстрее нагреваться ранним летом и дольше остывать осенью.

© Петрозаводский государственный университет

Введение

Важнейший из экологических факторов – температурный – определяет уровень метаболизма у гидробионтов и общий ход фенологических процессов. Особенностью глубоководного Онежского озера оказывается неравномерность прогревания огромной

водной массы. В межсезонье это приводит к формированию термического бара, вертикального слоя воды с температурой наибольшей плотности (+4 °C), разделяющего озеро на прибрежную теплоактивную и глубоководную теплоинертную зоны. В лимнически разных районах развиваются своеобразные сообщества гидробионтов, различающиеся как по структурным, так и по динамическим характеристикам и обеспечивающие разные скорости и пути трансформации автохтонного органического вещества. Пространственное распределение вод с разной температурой во многом определяет продуктивность экосистемы глубокого озера в целом.

Температурный режим Онежского озера зависит от климата Земли, для которого отмечается «потепление». В северном полушарии рост температуры воздуха происходит в два раза быстрее, чем в мире в целом (Второй оценочный доклад..., 2014). Например, в Швеции в 1991–2000 гг. по сравнению с предыдущим 30-летним периодом среднегодовая температура воздуха возросла на 0.8 °C, зимняя температура – почти на 2 °C (Räisänen, Alexandersson, 2003). За последние 150 лет в Финляндии температура воздуха возросла на 1 °C, при этом скорости увеличения температуры зимой и весной были выше, чем летом и осенью (Monni, 2013). В Карелии начиная с 1989 г. среднегодовая температура воздуха превышала климатическую норму 1960–1990 гг. на 0.9–1.2 °C, в зимний период – на 1.7–3.0 °C (Filatov et al., 2019; Назарова, 2014, 2022). Как показали натурные измерения, температура поверхности воды в Онежском озере в теплый период в прибрежной зоне Петрозаводской губы в новом веке возросла более чем на 2 °C по сравнению с прошлым (Ефремова, Пальшин, 2015).

Кроме натурных наблюдений, для оценки температуры поверхности воды водных объектов актуальными становятся методы дистанционного зондирования с использованием спутниковых данных. Специальный поиск в Интернете показал, что разные космические агентства располагают данными дистанционного зондирования акватории Онежского озера за период с 1985 по 2020 г. и материалы по температуре доступны для анализа.

Цель настоящей работы состоит в оценке степени изменения температуры поверхности воды в разных частях Онежского озера, измеряемой из космоса в течение последних 35 лет. Поставлены следующие задачи: 1) выявить многолетние тренды изменения температуры поверхности воды в целом и в разных частях акватории озера, 2) районировать акваторию Онежского озера по выраженности трендов изменения температуры поверхности воды.

Материалы

В работе использованы данные SST (Sea Surface Temperature), полученные в результате обработки показаний инфракрасных датчиков, помещенных на спутники, которые регистрируют радиояркостную температуру поверхности воды. Информация находится в открытом доступе на двух сайтах. Источник 1: NASA: MODIS-Aqua Ocean Color Data: (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod28.php>), (URL: <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov:443/opendap>) (NASA..., 2014). Эти данные получены инфракрасным датчиком MODIS (22 и 23 каналы при 3.959 и 4.050 мкм). Источник 2: National Centers for Environmental Information: AVHRR Pathfinder SST) (<https://www.ncei.noaa.gov/products/avhrr-pathfinder-sst>), (URL: <https://www.ncei.noaa.gov/thredds-ocean/catalog/pathfinder/Version5.3/catalog.html>) (Kilpatrick et al., 2001). Эти данные получены (дважды в сутки – днем и ночью) с помощью AVHRR – радиометра с высоким разрешением, размещенного на борту полярно-орбитальных спутников NOAA.

Данные дистанционного зондирования прошли ряд этапов преобразования в числовой формат, пригодный для разных видов количественного анализа. Для чтения и предварительного анализа данных использовался пакет Python (Rossum, 1995).

Вначале с представленных выше сайтов были скачаны растровые изображения, охватывающие окрестности Онежского озера за все годы наблюдений. Исходные

геоизображения, помимо данных для Онежского озера, несут оценки температуры поверхности воды окрестных озер. Для ликвидации избыточной информации был построен векторный полигон, совпадающий с контурами Онежского озера, который использовали в качестве маски для извлечения данных только по Онежскому озеру.

Указанные сайты дали разные объемы данных. Источник 1 содержит 29052 геоизображения за период с августа 1981 г. по август 2015 г. Источник 2 – 6992 геоизображения с июля 2002 г. по август 2021 г. При создании единого временного ряда необходимо было убедиться в отсутствии систематических смещений. С этой целью были рассчитаны отличия между оценками температуры, полученными из разных источников для периода наложения данных – с 2002 по 2015 г. Результаты сравнений для разных областей озера давали примерно одинаковые результаты – практически все отклонения укладывались в диапазон ± 1 °C без смещения (рис. 1).

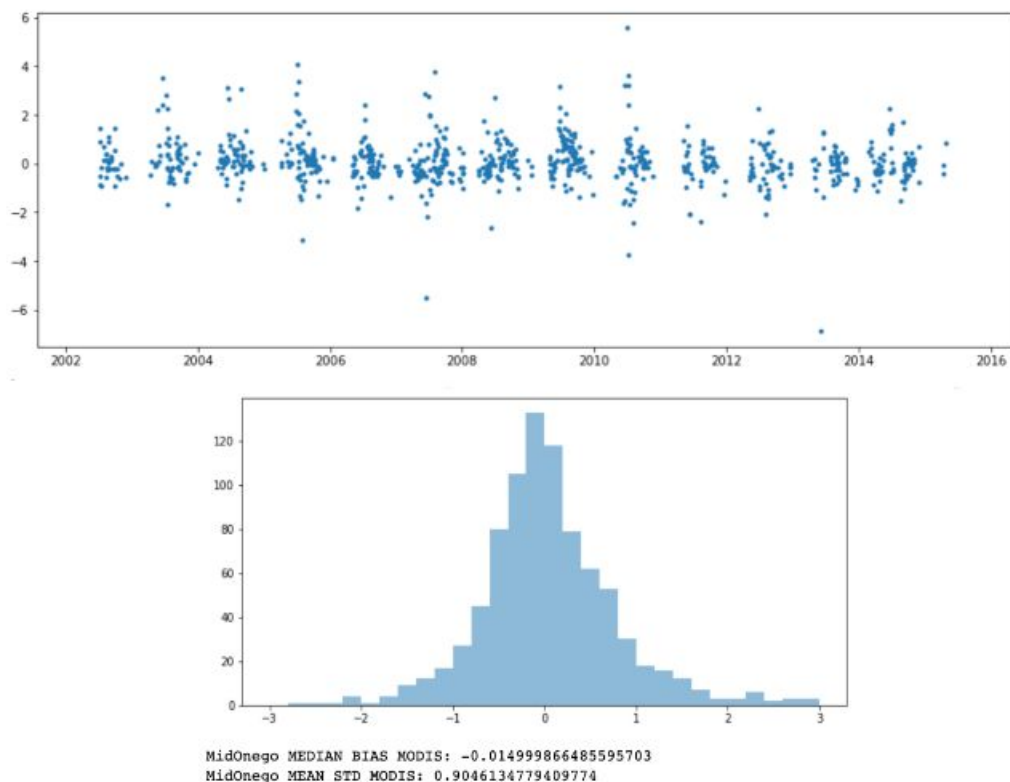


Рис. 1. Отличие значений температуры поверхности воды центрального плеса Онежского озера, полученные из разных источников: верхний рисунок – разница по месяцам; нижний рисунок – общее распределение различий

Fig. 1. The difference in the values of the water surface temperature of the central part of Lake Onego, obtained from different sources: the top picture – the difference by month; the bottom picture – the general distribution of differences

Этот анализ показывает простую стахостичность отличий между сравниваемыми рядами и позволяет совместить ряды. Данные до 2002 г. взяты из первого источника, данные после 2002 г. – из второго. Предварительный анализ показал, что достаточно плотный слой данных по температуре имеется только начиная с 1985 г., отсутствуют данные за август – октябрь 2021 г. По этой причине ниже проанализированы данные за 1985–2020 гг.

Для валидации данных дистанционного зондирования использовались полевые замеры температуры воды, выполненные в ИВПС КарНЦ РАН с мая по октябрь 1988–2020 гг. (Свидетельство о регистрации базы..., 2023). Температура воды измерялась на глубине до 0.5–1 м в 41 точке акватории Онежского озера. Из 60000 натурных замеров было отобрано 327 измерений, совпадающих с дистанционными оценками по дате и месту проведения замеров, и построена диаграмма их соотношений (рис. 2).

Сравнение показывает хорошее соответствие этих выборок, коэффициент детерминации составил 0.98, стандартное значение для остатков – 1.2 °C. Таким образом, в целом дистанционные замеры с высокой точностью соответствуют натурным, что позволяет проводить анализ в соответствии с заявленными целями.

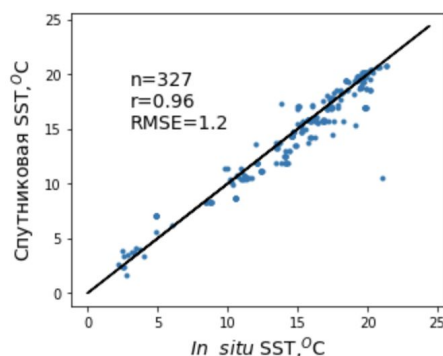


Рис. 2. Соотношение значений температуры воды, полученных в экспедиционных исследованиях и со спутника

Fig. 2. The ratio of water surface temperature values obtained in expeditionary research and from the satellite

На оригинальных снимках размер пикселя составляет 2*2 км. Из-за характерной для Карелии облачной погоды сканер не может определить интенсивность излучения во всех точка акватории, поэтому каждый суточный снимок обычно нес только небольшое число пикселей. С целью заполнения пустот и повышения репрезентативности данных исходные геоизображения были обобщены по времени и пространству. Площадь пикселей была увеличена до размера 8*8 км (включает 16 исходных пикселей), а период сбора информации – до декады (по 10 дней для мая – июля) и до месяца (по 30 дней для мая – октября). Таким образом, в качестве географических единиц были приняты 142 пикселя (ячеек) акватории Онежского озера (рис. 3), и каждая ячейка получила обобщенное описание по 480 (16*30) значениям для месяца и по 160 (16*10) значениям для декады. Вследствие встречающихся пробелов на геоизображениях фактические объемы данных для одной ячейки оказались ниже, для XX в. – на 40–50 %, для XXI века – на 10–30 %. В качестве статистических показателей были использованы средняя арифметическая, медиана, стандартное отклонение, число непустых исходных пикселей.

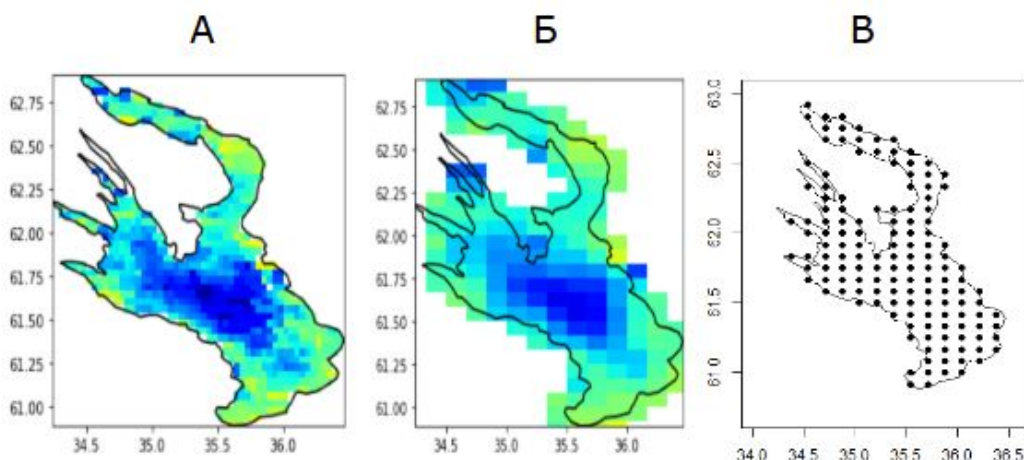


Рис. 3. Размеры пикселей на исходном (А) и обобщенном (Б) геоизображениях (отображены значения температуры поверхности воды с мая по октябрь), координаты центров пикселей в базе данных (В)

Fig. 3. Pixel sizes on the original (A) and generalized (B) geo-images (water surface

temperatures from May to October are shown), coordinates of pixel centers in the database (B)

Число дат сбора данных по месяцам составляет 240 (40 лет * 6 месяцев) отсчетов, по декадам – 240 (40 лет * 6 декад). Эта информация была переведена в формат базы данных с полями: *n* (номер п/п), *lon* (долгота), *lat* (широта), *po* (номер точки), *ye* (год), *mo* (месяц) или *de* (декада), *tmd* (медиана), *tav* (средняя), *tsd* (стандартное отклонение), *tcn* (объем выборки). Размеры баз данных, обобщенных по месяцам и декадам, составили соответственно 34080 (142 точки * 240 дат) и 34080 (142 точки * 240 дат) записей. Базы данных сформированы в среде MS Excel и импортированы в формат CSV для обработки в среде R (R..., 2012).

Полученные полные таблицы с данными служили для формирования выборок, предназначенных для отдельных видов анализа. При расчете средних оценок для всей акватории озера использовали ключевое поле *ye* (год), для отдельных месяцев и лет – поля *ye* (год), *mo* (месяц), для идентификации отдельных точек акватории – поле *po* (номер точки), поле *de* (декада). В расчетах использовали усредненные *tav* (средняя) и медианные *tmd* (медиана) оценки температуры.

Методы

Работа с ГИС

ГИС была организована в среде QGIS (<https://qgis.org/ru/site/>). В данной работе ее основное предназначение состояло в позиционировании точек, т. е. в построении иллюстрации результатов расчетов в форме картограмм. С этой целью использовали поля координат – *lon* (долгота), *lat* (широта).

Обобщения и статистические расчеты

Для формирования выборок, обобщения характеристик и статистических расчетов (расчет средних, линейной регрессии) были составлены программы в среде R (R..., 2012).

При построении трендов в изменении температуры использовалась линейная регрессия:

$$t_i = a_i * y + b_i,$$

где $y = 1985, 1986 \dots 2020$ – год,

a_i – показатель скорости изменения температуры для i -го объекта,

$i = 1, 2, \dots, 142$ – номер объекта.

Для выражения тренда относительно разных объектов строилось разное число уравнений. Были рассчитаны общий многолетний тренд для всей акватории, тренды по все акватории для шести разных месяцев года: $i = 5, 6, \dots 10$, а также многолетние температурные тренды в каждой из 142 ячеек акватории: $i = 1, 2, \dots, 142$ – номер точки. В каждом случае коэффициент a_i выражает величину ежегодного прироста температуры указанного объекта (°C / в год).

Результаты

Многолетние изменения температуры поверхности воды Онежского озера в 1985–2020 гг. (оцененные по спутниковым данным) рассмотрены в нескольких аспектах. Ниже дана характеристика общего уровня температуры воды, определены общие тренды для всей акватории, выявлена пространственная неоднородность трендов.

Пространственное распределение значений температуры

Медианное многолетнее значение температуры поверхности воды Онежского озера с мая по октябрь составило 12.3 °C. В разных частях акватории Онежского озера медианные значения температуры поверхности воды за май – октябрь существенно различаются, что связано с разной скоростью нагревания (весной) и охлаждения (осенью) прибрежных и открытых частей акватории. В период летней плотностной стратификации температура поверхности воды в озере относительно однородна (Петров, 1990; Ефремова, 2010). По данным космического зондирования, наименьшие

средние значения температуры поверхности воды за май – октябрь имеет центральная часть озера, наибольшие характерны для южной части (Южное Онего, Свирское Онего) и северных заливов (Петрозаводская, Кондопожская, Лижемская губы) (рис. 4). Температура в Повенецком заливе неоднородна, поскольку в его центральной части расположено множество островов, вдаются полуострова Клим, Сухой Нос и др. Глубины здесь небольшие, а показания температуры воды частично искажаются значениями температуры на суше островов.

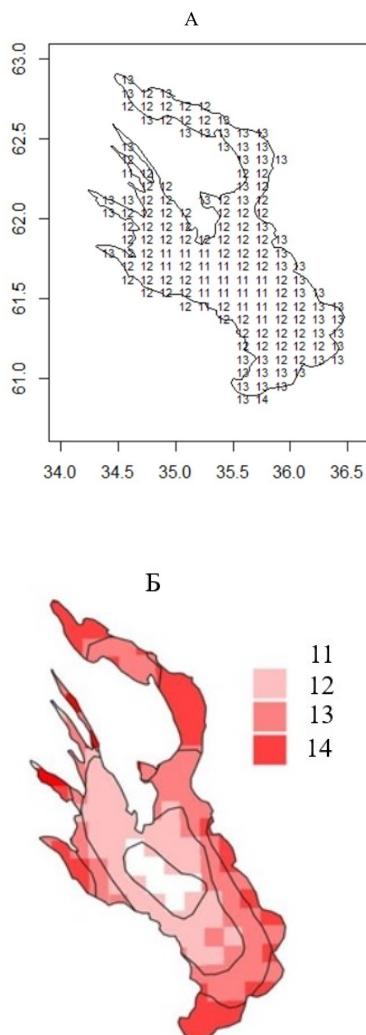


Рис. 4. Распределение медианных значений температуры поверхности воды за май – октябрь на акватории Онежского озера: А – общие медианные значения по сетке точек 8*8 км (пропорции искажены для лучшего отображения чисел), Б – картограмма для медианных значений и зоны акватории с относительно однородными температурами (11, 12, 13, 14 – обозначения зон с соответствующей температурой поверхности воды, °C) (пропорции озера искажены для лучшего отображения численных значений)

Fig. 4. Distribution of median water surface temperature values for May – October in Lake Onega water area: А – the total median values on a grid of points 8*8 km (the proportions are distorted for a better display of numbers), Б – cartogram for median values and the zones of the water area with relatively uniform water surface temperatures (11, 12, 13, 14 – designations of zones with the appropriate water surface temperature, ° C) (the proportions of the lake are distorted for a better display of numerical values)

Для отдельных месяцев характер пространственного распределения температуры поверхности воды озера меняется (рис. 5). Однородность медианных

значений для всей акватории мая (лед только что сошел) сменяется резким контрастом значений для прибрежной и открытой части Онежского озера в июне, когда проходит термобар. Термобар существует в Онежском озере до 15–25 июня (Петров, 1990; Ефремова, 2010). В июне вода в заливах и у берегов уже успевает прогреться, а в центральной части – еще нет. Летом (в июле – августе) температура поверхности воды находится на уровне 15–17 °С; к осени озеро постепенно остывает. Таким образом, отличия медианных значений температуры поверхности воды в весенние и раннелетние месяцы в разных частях акватории связаны в основном со сроками прохождения термобара, которые, в свою очередь, зависят от расстояния точки наблюдения до берега и от глубины.

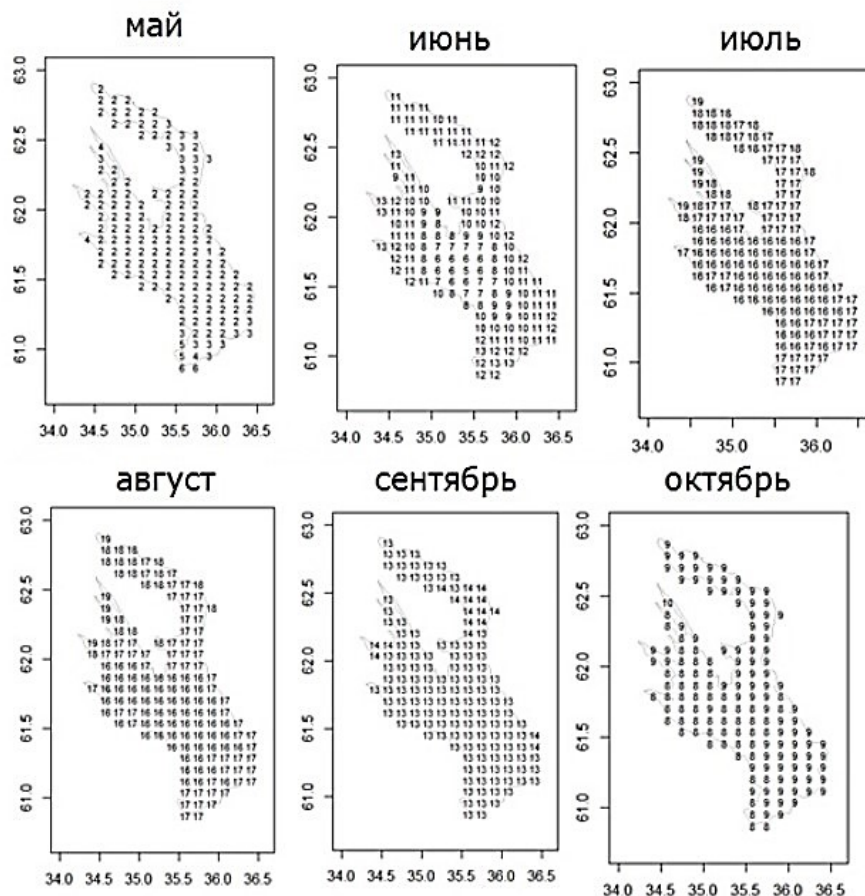


Рис. 5. Распределение по акватории Онежского озера значений медианы температуры поверхности воды (для всех лет) в разные месяцы

Fig. 5. Distribution of median water surface temperature values for all years in Lake Onego water area in different months

Общий тренд

Общий межгодовой тренд (рис. 6) выражается уравнением регрессии, в котором все коэффициенты значимы при $p < 0.05$:

$$t = 0.046 * ye - 79.1.$$

Общий прирост медианной температуры поверхности воды с мая по октябрь составил 0.046 °С/год за период 1985–2020 гг.

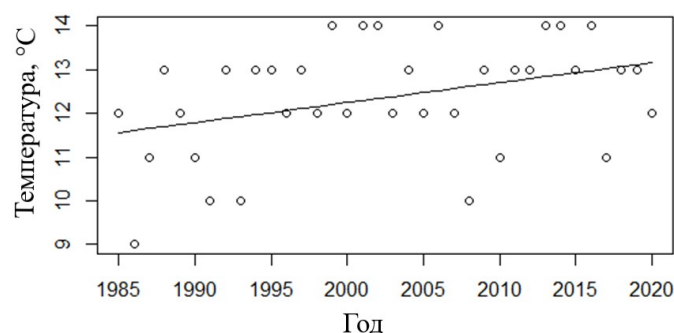


Рис. 6. Общий тренд изменения температуры поверхности воды Онежского озера за период 1985–2020 годов

Fig. 6. The general trend of changes in the water surface temperature of Lake Onega for the period 1985–2020

Для разных сезонов года тренды изменения температуры различаются как по уровню температур, так и по интенсивности роста (рис. 7). Для всех месяцев коэффициенты линейной регрессии оказались значимыми при уровне значимости менее 0.05.

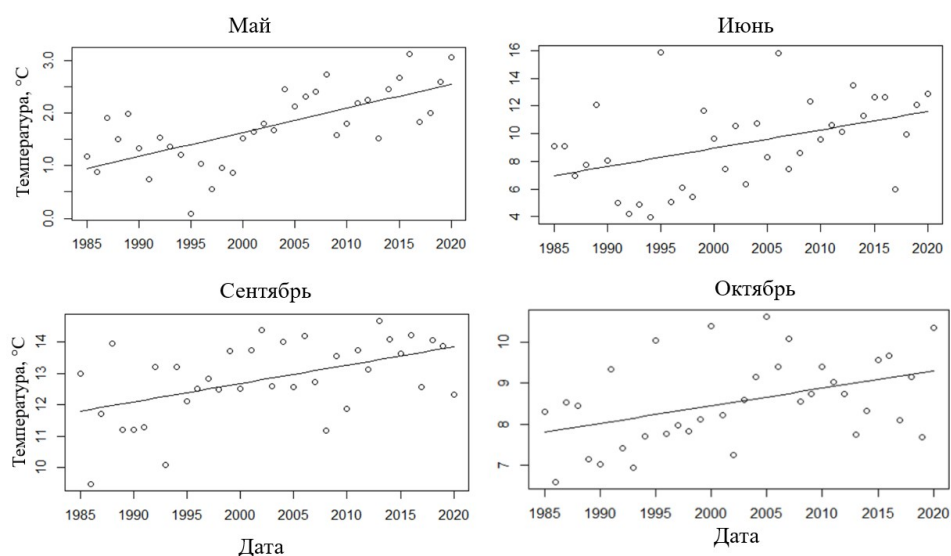


Рис. 7. Многолетние (1985–2020 гг.) тренды изменения медианных значений температуры поверхности воды Онежского озера в разные месяцы

Fig. 7. Long-term (1985–2020) trends in changes in the median monthly water surface temperature of Lake Onega

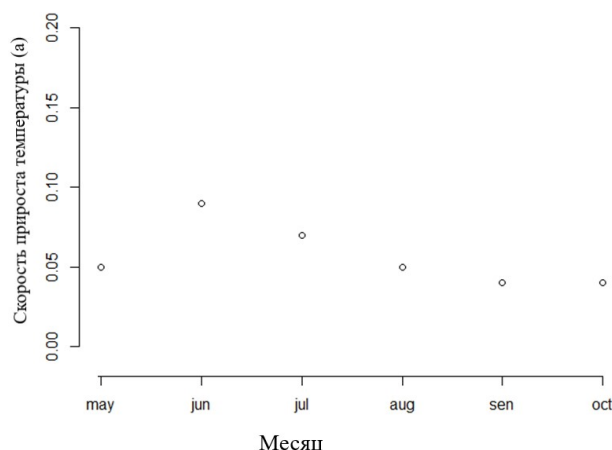


Рис. 8. Средние скорости прироста температуры поверхности воды Онежского озера (а) в разные месяцы года за период 1985–2020 гг.

Fig. 8. Average rates of increase in water surface temperature of Lake Onega (a) in different months of the year for the period 1985–2020

Пространственное распределение трендов межгодовой динамики температур

Используя все данные ячеек, рассчитали одну карту медианных скоростей прироста температуры за весь период наблюдений (рис. 9). Расчеты по месяцам (май – октябрь) раздельно позволили получить шесть карт пространственного распределения скоростей роста температуры для каждого месяца (рис. 10). Смысл такого анализа состоит, во-первых, в том, чтобы оценить роль теплового фактора для разных фенологических фаз жизни гидробионтов. Во-вторых, так можно подойти к возможному районированию акватории озера на относительно однородные области по данному фактору, что может служить основанием для выявления отдельных биогеоценозов.

Общее распределение (см. рис. 9Б) в первую очередь указывает на модальный класс скорости прироста температуры – 0.04-0.05 °C/год, что соответствует общему тренду, оцененному выше. Кроме этого, заметно широкое варьирование скоростей прироста температуры. За весь период исследования наибольшие скорости (выше 0.1 °C/год) характерны для некоторых прибрежных относительно мелководных зон; глубоководные и центральные части акватории имеют меньшие значения.

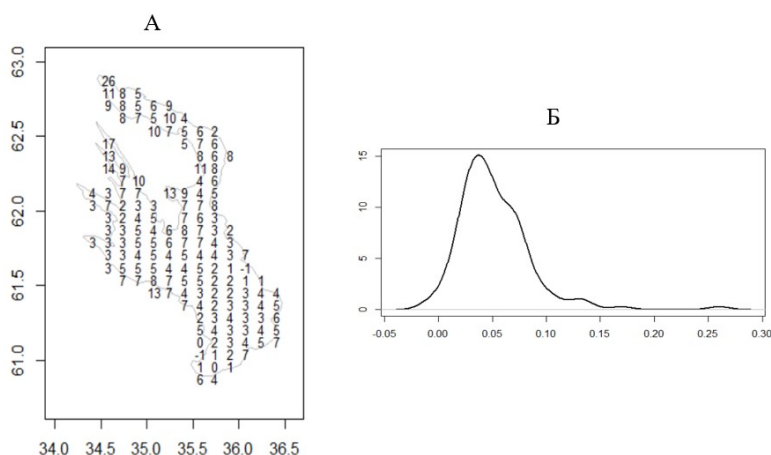


Рис. 9. Коэффициенты скорости возрастания медианной температуры

поверхности воды (а) по всем данным: А – распространение по акватории (приведены значения $a \cdot 100$), Б – сглаженное частотное распределение коэффициентов а

Fig. 9. Coefficients of the rate of increase of the median water surface temperature (a) according to all data: A – distribution over the water area (values $a \cdot 100$ are given), Б – smoothed frequency distribution of coefficients a

Детализация картины с использованием распределения данных по месяцам (см. рис. 10) выявляет сезоны и зоны, определяющие неравномерность скоростей прироста температуры на акватории Онежского озера. Для мая почти во всех частях акватории виден небольшой ежегодный прирост, очевидно, вследствие все более раннего схода ледяного покрова, в Свирской губе этот прирост наиболее заметен. В июне выделяется зона центрального плеса с очень высокими скоростями ежегодного прироста (до $a = 0.16$), видимо, вследствие наступления все более ранних сроков прохождения термобара и более раннего начала прогревания вод. Эти выводы хорошо согласуются с результатами анализа спутниковых данных за 1991–2011 гг. о потеплении поверхностных вод 19 глубоких озер, расположенных в Северном полушарии (Woolway, Merchant, 2018). Согласно этим исследованиям, в крупных озерах, в т. ч. в Онежском и Ладожском, более быстрое повышение температуры поверхностных вод в летний период (июль – сентябрь) отмечается в глубоководных участках по сравнению с более мелкими прибрежными водами. В целом в летний период более выраженные тренды увеличения температуры поверхности воды из-за потепления климата характерны именно для глубоких озер (Woolway, Merchant, 2017). Осенние тренды свидетельствуют о том, что осеннее остывание более нагретого Онежского озера в последние годы происходит медленнее.

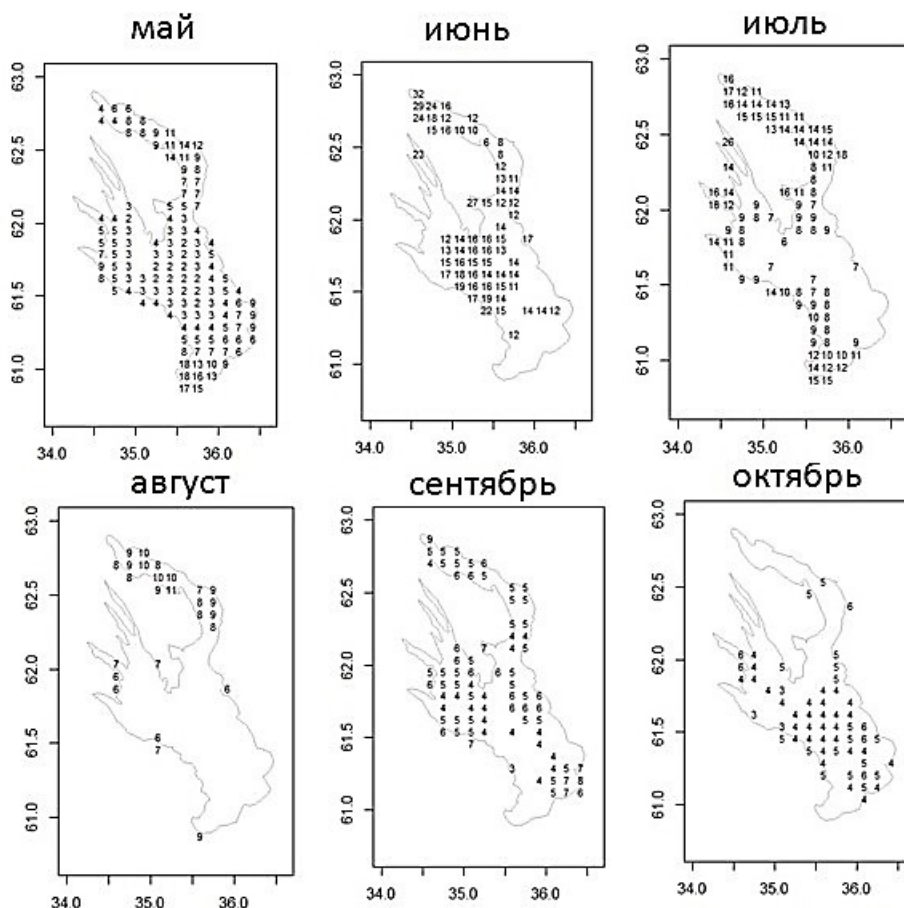


Рис. 10. Распространение только значимых скоростей прироста температуры поверхности воды ($a, p < 0.05$) с мая по октябрь (приведены значения $a \cdot 100$)

Fig. 10. Distribution of only significant growth rates of water surface temperature (a , $p < 0.05$) from May to October (values $a \cdot 100$ are given)

Ориентируясь на разнообразие коэффициентов a в виде частотных распределений и доли значимых коэффициентов (рис. 11), можно отметить, что наибольшие изменения на всей акватории происходят в мае, июне и июле. В остальные сезоны изменения также отмечаются, но носят менее выраженный характер.

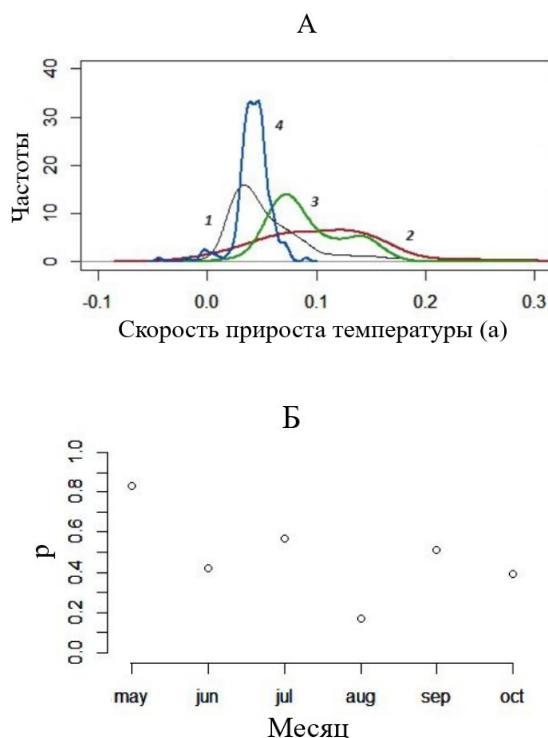


Рис. 11. Статистическая характеристика коэффициентов (a) линейного тренда изменения температуры поверхности воды Онежского озера; А – распределения коэффициентов a линейного тренда изменения температуры поверхности воды для разных месяцев (1 – май, 2 – июнь, 3 – июль, 4 – сентябрь); Б – доля (p) значимых коэффициентов

Fig. 11. Statistical characteristics of coefficients (a) of the linear trend of changes in the water surface temperature of Lake Onega; А – distributions of coefficients a of the linear trend of changes in water surface temperature for different months (1 – May, 2 – June, 3 – July, 4 – September); Б – the proportion (p) of significant coefficients

Обсуждение

Полученное в ходе исследований значение скорости увеличения температуры поверхности воды Онежского озера в период с мая по октябрь в целом составило 0.046 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ за последние 35 лет. При этом для Петрозаводской губы была получена величина 0.03 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (см. рис. 9). Порядок данных значений близок к результатам натурных наблюдений на Онежском и Ладожском озерах. Так, с 1959 по 2014 г. в период открытой воды получены значения скорости увеличения температуры поверхности воды в прибрежной зоне 0.04 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ для Онежского озера (Петрозаводская губа) и 0.046 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ для Ладожского озера (около о. Валаам) (Филатов и др., 2020).

В то же время наши оценки (0.046 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$) за 35 лет (1985–2020) за период май – октябрь оказались ниже скоростей увеличения летней температуры воды, полученной для Великих американских озер (Austin, Colman, 2007) за 27 лет наблюдений (1979–2006 гг.): скорость увеличения летней температуры воды (в июле – сентябре) для оз. Верхнее составила 0.11 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$, оз. Мичиган – 0.065 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$, оз. Гурон – на 0.086 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

Более низкие скорости роста температуры поверхности воды, полученные для Онежского озера, объясняются тем, что исходный массив включал весенние и раннелетние сезоны, в то время как для изучения Великих американских озер использовались данные только по летнему сезону.

Помимо факта роста межгодовой температуры поверхности воды, спутниковые данные, полученные в режиме круглогодичного непрерывного наблюдения, позволяют рассчитать и интерпретировать скорости изменения температуры в разные сезоны. Различие в скоростях нарастания температуры в разные месяцы имеет отчетливый смысл. В мае наблюдается значимый многолетний прирост температуры поверхности воды, во-первых, вследствие все более раннего освобождения озера из-под льда. О смещении сроков окончания ледостава в Петрозаводской губе Онежского озера на 7 суток за 64-летний период (1950–2014 гг.) указывается в работе Н. Н. Филатова и соавторов (2020). Во-вторых, возрастание температуры поверхности воды в весенний период связано с многолетним увеличением температуры воздуха. Обнаруженная для Онежского озера высокая чувствительность сроков начала стратификации воды к потеплению воздуха хорошо согласуется с литературными данными (Austin, Colman, 2007; Zhong et al., 2016).

Для июля выявлен многолетний тренд повышения средней температуры воздуха в регионе (Назарова, 2015), что влечет и рост температуры поверхности воды Онежского озера в летний период. В августе этот эффект менее выражен и отражает типичную однородность прогревности воды на исходе лета в каждый год наблюдений. Осенью наблюдается хоть и небольшой, но значимый тренд повышения температуры поверхности воды. Более позднее остывание озера определяет смещение сроков становления ледяного покрова (Ефремова, Пальшин, 2015). В аномально теплую зиму 2019/2020 г. впервые наблюдалось полное отсутствие льда в центральной части озера (Калинкина и др., 2021). Таким образом, дистанционные методы позволили подтвердить и количественно выразить все климатические сдвиги, отмеченные при натурных исследованиях.

Очевидным преимуществом дистанционных методов оказывается возможность получить температурные характеристики озера, распределенные в пространстве, и проанализировать особенности процессов теплообеспечения разных частей акватории. Для этого построен рис. 12, на котором отображено количество месяцев, когда наблюдался значимый прирост температуры в каждой ячейке акватории. Основой послужила картограмма на рис. 9, из которой видно, что, например, для Петрозаводской губы из 6 месяцев наблюдений значимый прирост температуры отмечен только для одного месяца, июля, соответственно, на рис. 12 эта ячейка получила значение 1.

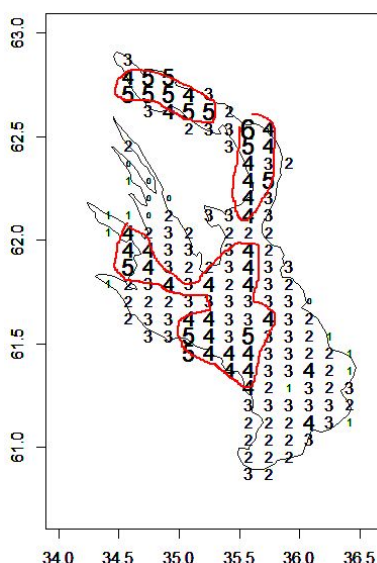


Рис. 12. Количество месяцев, для которых наблюдались значимые тренды прироста температуры в каждой точке акватории Онежского озера
Fig. 12. The number of months for which significant trends in the increase of water surface temperature were observed at each point of the Lake Onega water area

Картограмма отображает сезонное постоянство трендов повышения температуры. Оказалось, что в наибольшей степени повышение температуры поверхности воды характерно для центральных частей Онежского озера и для северной части – Повенецкого залива. Эти области акватории в последнее время стали как быстрее нагреваться, так и медленнее остывать. Это позволяет выполнить предварительное районирование акватории Онежского озера с точки зрения скорости многолетнего изменения температуры поверхности воды. Вполне отчетливо выделяются три зоны (см. рис. 12):

1) Повенецкий залив. Характеризуется высокими скоростями увеличения температуры поверхности воды с мая по октябрь.

2) Глубоководная часть центрального плеса. Здесь найдено существенное увеличение медианной температуры в июне и эффект длительного остывания осенью: в последние годы глубокие воды, аккумулируя летом тепло, все дольше остаются прогретыми.

3) Прибрежные области акватории как в северной, так и в южной частях озера. В этой зоне описанные тренды не сохраняют однородность, они менее выражены и разнонаправленны. Вероятной причиной является большое число дополнительных факторов, влияющих на теплообеспечение этих акваторий, а именно – рельеф дна, глубина, близость к берегу и островам, нагонные эффекты, объемы речных стоков, цветность вод.

Заключение

Полученные методами дистанционного зондирования данные показывают, что в период наблюдений (1985–2020 гг.) на фоне широкой изменчивости прослеживается значимый тренд к возрастанию значений температуры поверхности воды Онежского озера. Наиболее существенные сдвиги наблюдаются для Повенецкого залива и центрального плеса Онежского озера. Изменение температурного фона, важнейшего экологического фактора, не может не сказаться на водных сообществах Онежского озера.

Библиография

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме . М.: Росгидромет, 2014. 58 с.

Ефремова Т. В. Термический режим // Онежское озеро: Атлас / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. С. 55–66.

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Многолетняя изменчивость температуры воды и ледовая фенология // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменение экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 38–44.

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019/2020 годов // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 6. С. 888–899. DOI: 10.31857/S2587556621060078

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т., Георгиев А. П., Исакова К. В., Толстикова А. В., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Лимнологические показатели состояния Онежского озера и Выгозерского водохранилища: температура воды, концентрация хлорофилла а, продукция фитопланктона : Свидетельство о

регистрации базы данных № 2023621189, Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук» (RU). Дата регистрации в реестре баз данных 12.04.2023.

Назарова Л. Е. Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии // Известия РГО. 2014. Т. 146. Вып. 4. С. 27–33.

Назарова Л. Е. Современное состояние и изменчивость климата на водосборах Онежского озера и Выгозерско-Ондского водохранилища // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменение экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 10–20.

Назарова Л. Е., Исакова К. В., Калинкина Н. М., Балаганский А. Ф. Влияние потепления климата на зимний сток реки Шуя и последствия для зообентоса Онежского озера // Известия РГО. 2022. Т. 154, № 1. С. 28–36. DOI: 10.31857/S0869607122010086

Петров М. П. Термический режим // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Карельский филиал АН СССР, 1990. С. 32–37.

Филатов Н. Н., Баклагин В. Н., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Изменчивость температуры воды и характеристик ледяного покрова Ладожского и Онежского озера // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2020. С. 53–67.

Austin J. A., Colman S. M. Lake Superior summer water temperatures are increasing more rapidly than regional air temperatures: A positive ice-albedo feedback // Geophysical research letters. 2007. Vol. 34, No 6. P. 1–5. DOI: 10.1029/2006GL029021

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data // Inland Waters. 2019. Vol. 9. P. 130–141. DOI: 10.1080/20442041.2018.1533355

Finland's Sixth National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ministry of the Environment and Statistics / Ed. Monni S. Finland, Helsinki: Statistics Finland, 2013. 314 p. URL: https://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_natcom/submitted_natcom/application/pdf/fi_nc6%5B1%5D.pdf

Kilpatrick K. A., Podestá G. P., Evans R. H. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database // Journal of Geophysical Research. 2001. Vol. 106, No C5. P. 9179–9197. DOI: 10.1029/1999JC000065

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group: MODIS-Aqua Ocean Color Data; NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. URL: http://dx.doi.org/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0

R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna: Austria, 2012. URL: <http://www.r-project.org/>

Räisänen J., Alexandersson H. A probabilistic view on recent and near future climate change in Sweden // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2003. P. 113–125. DOI: 10.3402/tellusa.v55i2.12089

Rossum G. van. Python tutorial Technical Report. Amsterdam: Centrum voor Wiskunde en Informatica, 1995. 65 p. URL: <http://ir.cwi.nl/pub/5007/05007D.pdf>

Woolway R. I., Merchant C. J. Amplified surface temperature response of cold, deep lakes to inter-annual air temperature variability // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. No 1. P. 4130. DOI: 10.1038/s41598-017-04058-0

Woolway R. I., Merchant C. J. Intralake heterogeneity of thermal responses to climate change: A study of large Northern Hemisphere lakes // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018. Vol. 123. P. 3087–3098. DOI: 10.1002/2017JD027661

Zhong Y., Notaro M., Vavrus S. J., Foster M. J. Recent accelerated warming of the Laurentian Great Lakes: physical drivers // Limnol. Oceanogr. 2016. Vol. 61. P. 1762–1786.

DOI: 10.1002/lno.10331

STUDYING THE SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF WATER SURFACE TEMPERATURE OF LAKE ONEGA BY REMOTE SENSING METHODS

ISAKOVA
Ksenia Valeryevna

*Northern Water Problems Institute, KRC RAN (50, Aleksander Nevsky st., 185030 Petrozavodsk, Republic of Karelia Russia),
ksusha_isakova@mail.ru*

KALINKINA
Natalia Mikhailovna

*DSc, Northern Water Problems Institute, KRC RAN (50, Aleksander Nevsky st., 185030 Petrozavodsk, Republic of Karelia Russia),
cerioda@mail.ru*

Keywords: lake Onega, water surface temperature, long-term trends, seasonal trends

Published on:
23 December
2023

Summary: The materials on the water surface temperature of Lake Onega for a period of 35 years (from 1985 to 2020) were analyzed. Remote sensing data from two Internet sources with free access were used. Verification of data on full-scale water surface temperature measurements carried out from the ship was performed. A database on water surface temperature was compiled for 142 cells of the lake's water area measuring 8*8 km. The equations of linear long-term trends in increasing the average monthly water surface temperature were calculated. The estimates obtained by remote sensing methods for the studied period for Lake Onega turned out to be close to the results of field observations. Cartograms were constructed demonstrating the severity of these trends in different parts of the Lake Onega water area. The most significant changes affected the Povenetsky Bay and the central part of Lake Onega. In these areas, lake waters began to heat up faster in early summer and cool down longer in autumn.