

ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.555.5:551.521.31 (470.22)

СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ МАЛЫХ ОЗЕР КАРЕЛИИ

**Н. И. Пальшин, Г. Э. Здоровеннова, Р. Э. Здоровеннов,
С. Р. Богданов, Т. В. Ефремова, С. Ю. Волков, Г. Г. Гавриленко,
А. Ю. Тержевик**

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия*

Изучено распределение солнечной радиации в водной толще трех малых озер Южной Карелии в период ледостава и открытой воды. Измерения проведены в режиме автономных станций в период весенней подледной конвекции (с 27 марта по 6 апреля 2020 г.) на озерах Вендюрское и Голубая ламба. В период открытой воды 2020 г. на этапе раннего лета (июнь) и осенью (октябрь) выполнено зондирование водной толщи озер с использованием зонда RBR-Concerto. Установлено, что поток солнечной радиации быстро убывает с увеличением глубины в озерах Вендюрское и Риндозеро и практически равен нулю глубже 3–4 м в период открытой воды и 2–3 м в период ледостава. В прозрачной Голубой ламбе глубина фотической зоны может достигать дна в солнечные дни ($> 6-7$ м). По данным измерений оценены значения коэффициентов экстинкции, которые составили для периода открытой воды $0,99-1,97 \text{ м}^{-1}$ в озере Вендюрском, $1,60-1,88 \text{ м}^{-1}$ в озере Риндозеро, $0,12-0,14 \text{ м}^{-1}$ в Голубой ламбе. В период весенней подледной конвекции в Голубой ламбе значения коэффициентов экстинкции, осредненные для слоя 0–2,9 м, составили $0,47-0,57 \text{ м}^{-1}$. Сравнение полученных нами показателей ослабления солнечной радиации с оцененными ранее позволяет заключить, что оптические свойства водной толщи озер не претерпели заметных изменений в течение последних 30–40 лет на фоне меняющегося регионального климата и антропогенного воздействия (форелевое хозяйство на озере Вендюрском).

К л ю ч е в ы е с л о в а: малое озеро; солнечная радиация; фотосинтетическая активная радиация; период открытой воды; период ледостава; коэффициент экстинкции.

**N. I. Pal'shin, G. E. Zdorovenнова, R. E. Zdorovennov, S. R. Bogdanov,
T. V. Efremova, S. Yu. Volkov, G. G. Gavrilenko, A. Yu. Terzhevik. SOLAR
RADIATION WITHIN THE WATER COLUMN OF SMALL KARELIAN LAKES**

Measurements of solar radiation fluxes were taken with minute discreteness from March 27 to April 6, 2020 in the subglacial layer of Lake Vendyurskoe and in the water column of Lake Golubaya Lamba at 0–2.9 m depths. Seasonal surveys using the RBR-

Concerto probe in the vertical sounding mode were carried out in these lakes and in Lake Rindozero in early summer (June) and in autumn (October). When the ice was 40 cm thick and the snow was 1–2 cm thick, the solar radiation flux in the under-ice layer of Lake Vendyurskoe reached 90–100 W/m², and when snow covered the surface, it sharply decreased to almost zero. With the same ice and snow thickness, the flux of photosynthetic active solar radiation (PAR) reached 360–410 μmol/(m²·s) in the under-ice layer of Golubaya Lamba. For Golubaya Lamba, the values of the extinction coefficients averaged for 0–2.9 m depths were 0.47–0.57 m⁻¹ during the spring under-ice period; the depth of 1 % irradiation (photic zone) calculated from these values was 3.2–6.7 m, meaning it can reach the bottom on some sunny days. In June 2020, PAR fluxes in the surface layer of Lake Vendyurskoe (depth 0.5 m) reached 1000 μmol/(m²·s), decreasing to zero below 4 m depth. In Golubaya Lamba, the PAR flux reached 150 μmol/(m²·s) at a depth of 4 m in summer, and 50 μmol/(m²·s) during the ice-covered period and in autumn. In Lake Rindozero, the PAR flux rapidly decreased with depth and was practically zero below 2 m in June and October 2020. The values of the extinction coefficients for the open water period varied within 0.99–1.97 m⁻¹ in Lake Vendyurskoe, 1.60–1.88 m⁻¹ in Lake Rindozero, 0.12–0.14 m⁻¹ in Golubaya Lamba.

Key words: small lake; solar radiation; photosynthetic active radiation; open water period; ice-covered period, extinction coefficient.

Введение

В течение последних десятилетий происходят глобальные климатические изменения [IPCC..., 2019]: для умеренной зоны отмечается увеличение температуры воздуха, испарения, сумм жидких и смешанных атмосферных осадков, уменьшение доли твердых осадков [Назарова, 2010]. На водоемах фиксируется увеличение поверхностной температуры и сокращение периода ледостава [O'Reilly et al., 2015]. Эти и другие факторы, в том числе растущее антропогенное воздействие, способствуют широкомасштабному повышению концентрации растворенного органического углерода в озерах, что приводит к изменению их цветности – так называемой «браунификации» [Graneli, 2012]. Изменение прозрачности озер также происходит при увеличении поступления взвешенных веществ в периоды половодий и паводков, что может способствовать усилению термической стратификации и отрицательно сказывается на их газовом режиме [Mazumder, Taylor, 1994; Golosov et al., 2012]. Цветность и прозрачность воды играют важную роль в функционировании планктонного сообщества, определяя глубину фотической зоны, в которой наиболее продуктивно проходит фотосинтез органического вещества [Reynolds, 2006]. Современные модели климата и численного прогноза погоды включают параметризацию альбедо поверхности и прозрачности воды озер для учета их влияния на формирование термической стратификации и обменные процессы с атмосферой [Mironov et al., 2010]. Таким образом, очевидна актуальность изучения оптических свойств озер при современных климатических условиях.

Изучение потоков солнечной радиации проводилось в трех небольших озерах Южной Карелии на разных этапах годового термического цикла – в периоды весенней подледной конвекции (март-апрель), формирования летней термической стратификации (июнь) и осеннего охлаждения (октябрь). Цель работы заключалась в выявлении характерных черт освещенности водной толщи малых озер Карелии в годовом цикле.

Материалы и методы. Описание модели

Объекты исследования – озера Вендюрское, Риндозеро и Голубая ламба, расположенные в южной части Карелии (62°10'–62°20' с. ш. 33°10'–33°20' в. д.), характеризуются заметно отличающейся прозрачностью: в оз. Вендюрском глубина диска Секки достигает 3–4 м, в оз. Риндозеро – 1,5–2 м, в Голубой ламбе – больше 7 м [Чехин, 1987; Озера..., 2013; Отчет..., 2013]. Озера расположены в относительной удаленности от крупных промышленных центров (около 100 км от г. Петрозаводска и 50 км от г. Кондопоги). На северном берегу оз. Вендюрского располагается деревня Вендеры, в юго-западной части акватории более 10 лет функционирует форелевое хозяйство. Все указанные водоемы используются местными жителями в целях рыболовства и рекреации. Озера Вендюрское и Риндозеро – мезотрофные, Голубая ламба – олиготрофный водоем. Период ледостава на озерах начинается в ноябре, заканчивается в мае.

Оптические свойства озера Вендюрского достаточно хорошо изучены [Петров и др., 2005; Гавриленко и др., 2015; Zdorovenkov et al., 2016], в отличие от озер Риндозеро и Голубая ламба, на которых проводились лишь эпизо-

дические измерения прозрачности и освещенности водного столба [Чехин, 1987; Озера..., 2013; Отчет..., 2013].

Сезонные полевые измерения потоков солнечной радиации в озерах Вендюрском, Риндозеро и Голубой ламбе в марте-апреле, июне и октябре 2020 г. включали зондирования и установку автономных станций.

Зондирования водной толщи проводились с применением мультипараметрического зонда RBR-Concerto, на котором использовался датчик ФАР Licor (диапазон измерений от 0 до 10000 мкмоль/(м²·с), точность ±2 %, спектральный диапазон 400–700 нм).

Коса, оснащенная 8 датчиками фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР, Alec Electronics, Япония), была установлена со льда на Голубой ламбе в период с 27 марта по 6 апреля 2020 г., дискретность измерений составляла одну минуту.

На льду озера Вендюрского на расстоянии 300 м от северного берега, в районе с глубиной около 7 м в период с 27 марта по 6 апреля была установлена радиационная станция. Потoki приходящей суммарной (Q_d), отраженной (Q_r) и подледной (Q_u) радиации измерялись с дискретностью в одну минуту с помощью пиранометров «Star-shaped pyranometer» немецкой фирмы Theodor Friderich & Co, Meteorologische Geräte und Systeme (спектральный диапазон коротковолновой солнечной радиации 300–3000 нм).

На северном берегу озера Вендюрского 29 марта 2020 г. была установлена метеостанция для измерения метеопараметров и потоков ФАР (мкмоль/(м²·с) в спектральном диапазоне 400–700 нм с дискретностью пять минут. Измерения на метеостанции проводились в период до 23 октября 2020 г.

При проведении полевых работ весной 2020 г. выполнены измерения толщины и описания текстуры снежно-ледяного покрова озер.

Значение альбедо поверхности вычислялось как отношение потока отраженной (Q_r) к коротковолновой солнечной радиации, поступающей на поверхность озера (Q_d) в спектральном диапазоне 300–3000 нм:

$$\alpha = \frac{Q_r(0)}{Q_d(0)}.$$

Коэффициент экстинкции солнечной радиации в толще воды (м⁻¹) оценивался по формуле:

$$k_w(z, z_1) = -\frac{1}{z_1 - z} \ln \left(\frac{Q_d(z_1)}{Q_d(z)} \right),$$

где z и z_1 – горизонты измерений, м, $Q_d(z_1)$ и $Q_d(z)$ – потоки фотосинтетически активной радиации на разных глубинах, мкмоль/(м²·с).

Глубина фотической зоны была рассчитана в соответствии с подходом, изложенным в работе [Zdorovenov et al., 2016].

Результаты и обсуждение

Погодные условия, снежно-ледяной покров и оптические свойства озер весной 2020 г.

Согласно измерениям 27 марта 2020 г., толщина льда изменялась по площади озера Вендюрского от 35 до 49 см, со средним значением 41 см. Средняя толщина снежного льда составляла 15 см (минимум 9 см, максимум 20 см), а кристаллического – 27 см (минимум 21 см, максимум 32 см). Снег на льду практически отсутствовал. При проведении измерений на озере Риндозеро 27 марта толщина льда достигала 45 см, снега – 5 см. На Голубой ламбе толщина льда достигала 48 см, при этом слой кристаллического льда составлял 25 см, слой снега не превышал 1–2 см.

В период измерений на радиационной станции на берегу озера Вендюрского 27 марта – 6 апреля 2020 г. погодные условия характеризовались выраженной изменчивостью: 27–28 марта температура воздуха в дневные часы превышала +10 °С, в ночные опускалась до +3 °С, затем наступило похолодание, и в период с 29 марта по 6 апреля температура воздуха днем повышалась до –1...+3 °С, в ночные часы опускалась до –1...–8 °С. Ясная солнечная погода наблюдалась только 6 апреля, в остальные дни погода была облачной. Снег выпадал 1, 2 и 4 апреля (рис. 1, а).

В период измерений дневные максимумы падающей радиации на поверхности озера Вендюрского достигали 600–800 Вт/м² (рис. 1, б). В первые дни измерений 28–31 марта поверхность льда была практически свободна от снега и дневные максимумы потоков отраженной радиации составляли 200–230 Вт/м², подледной – 90–100 Вт/м². После выпадения свежего снега 1–2 апреля 2020 г. дневные максимумы потоков отраженной радиации резко увеличились до 500–700 Вт/м², подледной – уменьшились практически до нуля. Затем по мере стаивания снега потоки отраженной радиации достигали 300–500 Вт/м², подледной – увеличивались до 50–60 Вт/м².

Поскольку погодные условия весны 2020 г. были весьма неустойчивы, отмечалась выраженная изменчивость оптических характеристик снежно-ледяного покрова озера Вендюрского. С 29 марта по 1 апреля температура воздуха в районе исследований была ниже 0 °С. Альбедо снежного льда на оз. Вендюрском

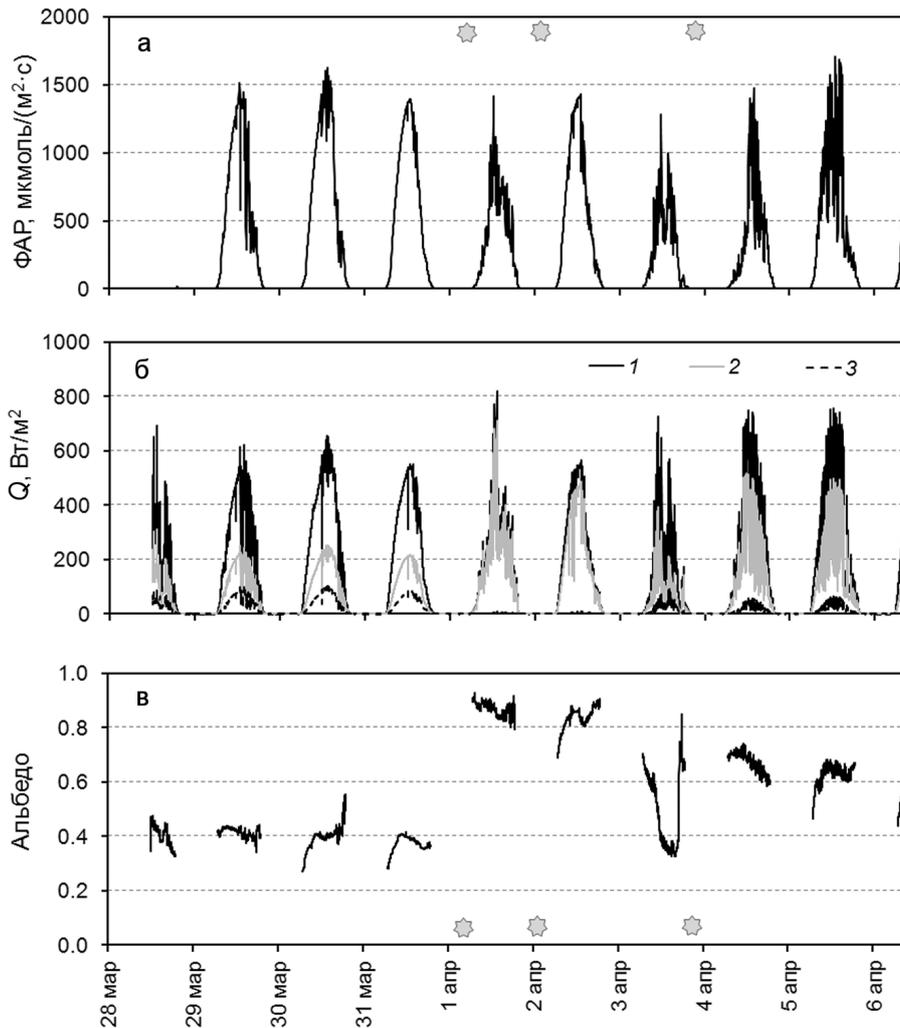


Рис. 1. Поток фотосинтетически активной солнечной радиации по данным метеостанции на северном берегу озера Вендюрского (а), потоки падающей, отраженной и подледной (1–3 соответственно) солнечной радиации по данным радиационной станции на льду озера Вендюрского (б) и альbedo снежно-ледяного покрова оз. Вендюрского (в) в период 28 марта – 6 апреля 2020 г. Символами на панелях (а) и (в) показаны периоды выпадения свежего снега

Fig. 1. Fluxes of photosynthetically active solar radiation according to the meteorological station on the northern shore of Lake Vendyurskoe (a), fluxes of incident, reflected and subglacial (1–3, respectively) solar radiation according to data from the radiation station on the ice of Lake Vendyurskoe (b) and albedo of the snow-ice cover of Lake Vendyurskoe (c) from March 28 to April 6, 2020. Symbols in panels (a) and (c) show the periods of fresh snowfall

составляло $\sim 0,4$ (рис. 1, в). В первой половине дня 1 апреля выпал мокрый снег, что привело к увеличению альbedo до $0,8–0,9$. В ночные часы 3 апреля при положительной температуре воздуха выпали обильные атмосферные осадки (дождь и мокрый снег). В результате при положительной температуре воздуха и большой насыщенности поверхности снежного покрова водой альbedo поверхности озера в дневные часы уменьшилось до $0,3–0,4$, но к вечеру вновь увеличилось до $0,6–0,8$.

При выпадении мокрого снега 4 апреля альbedo в течение дня изменялось от $0,7$ до $0,6$. В результате ночных заморозков 5 и 6 апреля на поверхности снежного покрова, вероятно, появилась корочка льда, что приводило к уменьшению альbedo в утренние часы до $0,45–0,55$, но ее трансформация при положительной температуре воздуха в дневное время способствовала увеличению альbedo до $0,6–0,7$.

Полученные нами данные для весны 2020 г. хорошо согласуются с данными многолет-

них измерений потоков солнечной радиации и оценками диапазона изменчивости альbedo поверхности озера Вендюрского в весенний период [Петров и др., 2005; Zdrovennova et al., 2018].

Между потоком ФАР (мкмоль/(м²·с), спектральный диапазон 400–700 нм, данные метеостанции; рис. 1, а) и суммарной радиацией Q_d (Вт/м², спектральный диапазон 300–3000 нм, данные радиационной станции; рис. 1, б) за период с 29 марта по 6 апреля 2020 г. установлена линейная зависимость:

$$Q_d = 0,4074 \text{ ФАР} + 15,427 \quad (R^2 = 0,9124).$$

Полученная зависимость позволяет вычислять величину всего диапазона коротковолновой солнечной радиации (Вт/м²), приходящей на поверхность озера, для периодов, когда прямые наблюдения Q_d не проводились, по данным ФАР-датчика метеостанции (мкмоль/(м²·с), в диапазоне 400–700 нм), с учетом влияния ослабления радиации облаками разных ярусов. Предложенный подход повышает точность расчетов по сравнению с оценками по эмпирическим формулам, учитывающим высоту солнца и общую облачность. Поскольку метеостанция проработала до октября 2020 г., с использованием полученной зависимости могут быть проведены расчеты энергетической облученности поверхности озера и потоков тепла до конца подледного периода, когда измерения на льду озера не проводились.

Измерения солнечной радиации ФАР-датчиками в водной толще Голубой ламбы показали достаточно высокую освещенность подледного слоя (измерения проведены до глубины 2,9 м). При отсутствии снега на льду 27–31 марта в дневные часы максимальная освещенность подо льдом достигала 360–410 мкмоль/(м²·с), а на глубине 2,9 м – 80–110 мкмоль/(м²·с) (рис. 2). При выпадении снега 1–2 апреля максимальные величины освещенности подо льдом уменьшились до 75–85 мкмоль/(м²·с), а на глубине 2,9 м составляли всего 10–20 мкмоль/(м²·с). По мере таяния снега подледная освещенность увеличивалась и 3 апреля в подледном слое достигла 150–200 мкмоль/(м²·с), на глубине 2,9 м – 20–30 мкмоль/(м²·с). Очередное выпадение осадков 4 апреля привело к уменьшению освещенности подо льдом до 100–150 мкмоль/(м²·с), на глубине 2,9 м – до 15–25 мкмоль/(м²·с).

По данным ФАР-датчика метеостанции, установленной на берегу озера Вендюрского, и данным ФАР-датчиков, закрепленных на кose в Голубой ламбе, получены регрессионные зависимости, которые позволили оценить долю освещенности (a , %) на разных глубинах озера от величины потока ФАР, падающего на поверхность льда. Осредненные за дневные часы значения a_z для всего периода весенних измерений в 2020 г. для каждой из глубин измерений в водной толще Голубой ламбы приведены в таблице 1. С целью оценки коэффициентов

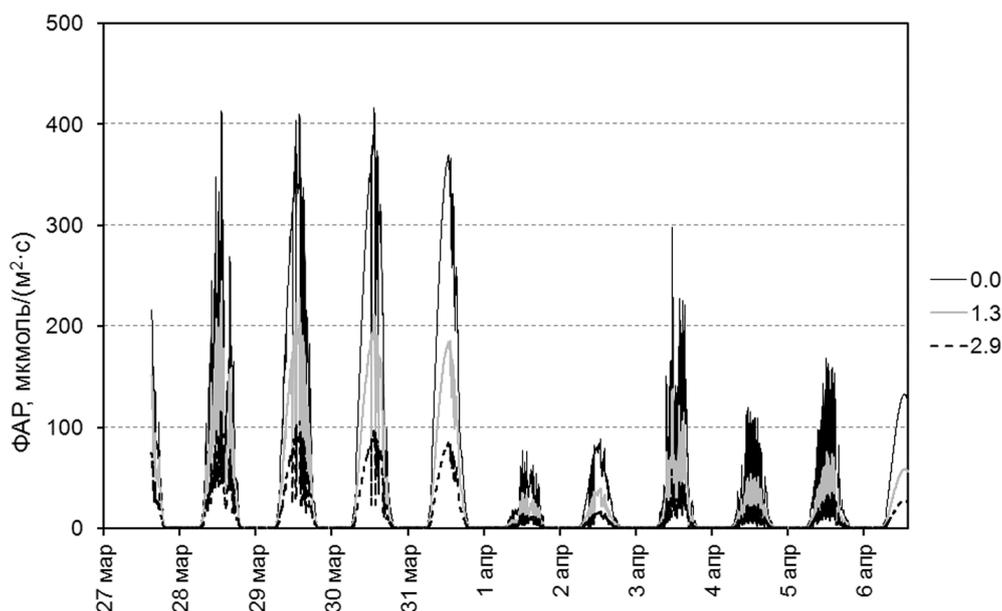


Рис. 2. Потоки ФАР на разных глубинах водного столба Голубой ламбы в период с 27 марта по 6 апреля 2020 г.

Fig. 2. PAR fluxes at different depths of Golubaya Lamba water column from March 27 to April 6, 2020

Таблица 1. Доля (a_z , %) потока ФАР на разных глубинах водной толщи Голубой ламбы от потока ФАР, падающего на поверхность снежно-ледяного покрова

Table 1. Fraction (a_z , %) of the PAR flux at different depths of the water column of Golubaya Lamba from the PAR flux falling on the surface of the snow-ice cover

Дата Date	Глубина, м Depth, m							
	0,0	0,5	0,9	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9
29.03.2020	24,64	19,65	16,41	13,55	11,06	8,95	7,60	6,24
30.03.2020	24,94	18,67	15,36	12,76	10,34	8,34	7,11	5,82
31.03.2020	26,28	19,09	15,66	13,03	10,59	8,51	7,21	5,92
01.04.2020	5,02	3,40	2,71	2,18	1,82	1,37	1,08	0,93
02.04.2020	5,64	3,87	3,06	2,45	2,00	1,53	1,25	1,06
03.04.2020	19,83	14,07	11,23	9,18	7,36	5,75	4,84	3,94
04.04.2020	7,52	5,04	4,11	3,37	2,80	2,16	1,83	1,53
05.04.2020	7,71	5,13	4,23	3,53	2,87	2,27	1,88	1,59
06.04.2020	8,93	5,69	4,71	3,92	3,22	2,56	2,17	1,81

экстинкции (k_w , m^{-1}) и толщины фотической зоны, что при отсутствии ледяного покрова близко соответствует глубине 1%-й облученности ($z_{1\%}$), измеренные данные a_z (табл. 1) были аппроксимированы экспоненциальной зависимостью $a_z = a_0 \exp(-k_w z)$ (табл. 2). Высокие коэффициенты детерминации (R^2) свидетельствуют о достоверности оценок. При расчетах глубины фотической зоны значения a_z на нижней границе льда ($z = 0$), выраженные в процентах от ФАР на поверхности льда, учитывают ослабление света снежно-ледяным покровом. Данные таблицы 2 показывают, что в весенний подледный период фотическая зона в Голубой ламбе в некоторые дни может достигать дна.

Измерения потоков ФАР в водной толще озер в период открытой воды 2020 г.

По данным измерений потоков ФАР в водной толще озер Вендюрское, Риндозеро и Голубая ламба в июне и октябре 2020 г. с помощью зонда RBR-Concerto был установлен характер распределения солнечной радиации в водной толще этих водоемов в безледный период.

В июне 2020 г. потоки ФАР в поверхностном слое озера Вендюрского (глубина 0,5 м) достигали 1000 мкмоль/($m^2 \cdot c$), быстро убывая с увеличением глубины (рис. 3). На глубине 2 м поток ФАР не превышал 200 мкмоль/($m^2 \cdot c$), а глубже 4 м практически равнялся нулю. В октябре 2020 г. освещенность ниже метрового поверхностного слоя была крайне низкой, поток ФАР не превышал 10 мкмоль/($m^2 \cdot c$) (рис. 3). Коэффициенты экстинкции, рассчитанные по данным зондирований для слоя 0–2 м, оказались близки для центральной части озера и для района вблизи форелевого хозяйства и составили

Таблица 2. Аппроксимации ежедневных данных a_z (%), измеренных на разных горизонтах (табл. 1), экспоненциальной зависимостью. Изменения коэффициентов экстинкции (k_w) и глубины фотической зоны ($z_{1\%}$) Голубой ламбы в период с 29 марта по 6 апреля 2020 г.

Table 2. Approximation of daily data a_z (%), measured at different horizons (Table 1), by exponential dependence. Changes in the extinction coefficients (k_w) and the photic zone depth ($z_{1\%}$) of Golubaya Lamba during the period from March 29 to April 6, 2020.

	a_0 , %	R^2	k_w , m^{-1}	$z_{1\%}$, м
29.03.2020	24,91	0,999	0,478	6,70
30.03.2020	24,30	0,999	0,498	6,46
31.03.2020	25,20	0,998	0,506	6,46
01.04.2020	4,71	0,995	0,577	2,80
02.04.2020	5,29	0,995	0,573	3,02
03.04.2020	18,91	0,997	0,551	5,42
04.04.2020	6,91	0,993	0,536	3,76
05.04.2020	7,08	0,993	0,530	3,85
06.04.2020	7,96	0,987	0,527	4,15

в июне 1,06 и 0,99 m^{-1} , в октябре 1,96 и 1,97 m^{-1} соответственно. Большое отличие коэффициентов экстинкции между этапами раннего лета и осени может быть связано с сезонным развитием фитопланктона.

Зондирование в Голубой ламбе показало, что поток ФАР распространяется до дна водоема, достигая 150–200 мкмоль/($m^2 \cdot c$) на глубине 4 м летом и 50 мкмоль/($m^2 \cdot c$) осенью. Коэффициенты экстинкции для этого водоема менялись мало в течение открытой воды и составляли в июне 0,14 m^{-1} , в октябре – 0,12 m^{-1} .

В Риндозеро поток ФАР быстро убывал с увеличением глубины и глубже 1,5 м был практически равен нулю и в июне и в октябре

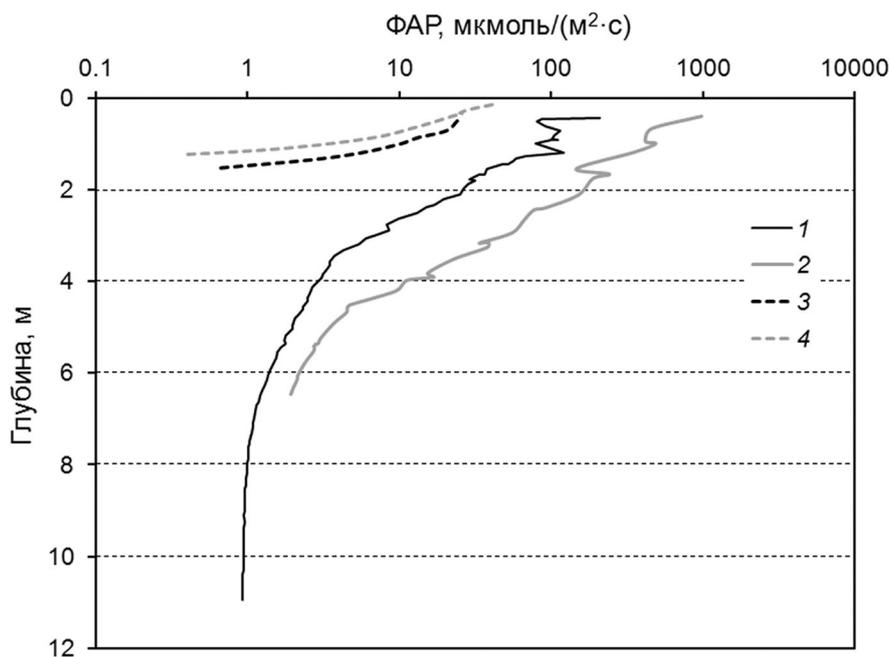


Рис. 3. Потоки ФАР в водной толще озера Вендюрского 26 июня (1 и 2) и 22 октября (3 и 4) 2020 г.:

1 и 3 – центр озера, 2 и 4 – вблизи форелевого хозяйства

Fig. 3. PAR fluxes in the water column of Lake Vendyurskoe on June 26 (1 and 2) and October 22, 2020 (3 and 4):

1 and 3 – the center of the lake, 2 и 4 – near the trout farm

2020 г. Коэффициенты экстинкции, оцененные для слоя 0–2 м в июне и слоя 0–1 м в октябре, составили 1,88 и 1,6 м⁻¹ соответственно.

Измерения подводной облученности на озерах Вендюрской группы в начале 1980-х гг. показали, что осредненные по глубине фотической зоны значения коэффициентов экстинкции в летний период составляют для центральной части озера Вендюрского 0,82 м⁻¹, для озера Риндозеро – 2,07 м⁻¹, для Голубой ламбы – 0,3 м⁻¹ [Чехин, 1987]. По данным измерений потоков солнечной радиации в водной толще озера Вендюрского в период открытой воды в 2013 и 2014 гг., то есть в первые годы работы форелевого хозяйства, установлено, что максимальные значения коэффициента экстинкции наблюдались в поверхностном слое озера в мае и составляли 1,9–2,1 м⁻¹, в июне были незначительно меньше и изменялись в пределах 1,5–1,75 м⁻¹ [Гавриленко и др., 2015]. По вертикали отмечалось уменьшение величины коэффициента экстинкции: глубже 1,5 м его значения составляли 0,9–1,25 м⁻¹. По данным измерений в апреле 2013 г. и в марте 2014 г. получены значения коэффициента экстинкции 2,1–2,8 м⁻¹ в метровом подледном слое озера Вендюрского и от 0,5 до 1,8 м⁻¹ в слое 1–4 м [Zdorovenov et al., 2016].

Заключение

По данным полевых измерений потоков солнечной радиации на поверхности и в водной толще трех малых озер Южной Карелии изучены оптические свойства их водной толщи в течение года. Измерения потоков падающей и отраженной солнечной радиации позволили установить диапазон изменчивости альbedo поверхности озера Вендюрского в весенний период, составивший 0,3–0,9, при меняющихся погодных условиях и различных состояниях поверхности озера (снежный лед, выпадение свежего снега, тающий снег, периоды положительных и отрицательных температур воздуха).

По данным синхронных измерений потоков фотосинтетической активной радиации на метеостанции (мкмоль/(м²·с), спектральный диапазон 400–700 нм), расположенной на берегу озера, и радиационной станции, установленной на льду озера Вендюрского (Вт/м², спектральный диапазон 300–3000 нм), получена эмпирическая зависимость, которая позволяет определять величину потока солнечной радиации (Q_d) у поверхности озера по данным ФАР-датчика метеостанции и выполнять расчет энергетической облученности поверхности озера с более высокой точностью,

по сравнению с оценками по эмпирическим формулам, за счет учета непосредственного влияния разных видов облаков. Поскольку метеостанция проработала до октября 2020 г., с использованием полученной зависимости проведены расчеты энергетической облученности поверхности озера и потоков тепла для периода, когда измерения на озере отсутствовали, но продолжали проводиться на береговой метеостанции.

Полученные нами значения коэффициентов экстинкции по данным измерений потоков солнечной радиации в водной толще озер Вендюрское, Риндозеро и Голубая лабма весной, летом и осенью 2020 г. достаточно хорошо согласуются с данными измерений, выполненных ранее [Чехин, 1987; Гавриленко и др., 2015; Zdorovenov et al., 2016]. Это позволяет сделать заключение, что оптические свойства водной толщи озер не претерпели заметных изменений в течение последних 30–40 лет на фоне меняющегося регионального климата. Более чем 10-летняя деятельность форелевого хозяйства практически не отразилась на оптических свойствах водной толщи озера Вендюрского.

Полученные оценки коэффициентов экстинкции озер могут использоваться в численных моделях при изучении их термического режима [Mironov et al., 2010].

Исследование выполнено в рамках государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН). Экспедиционные исследования осуществлялись при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-60291 «Адаптация арктических лимносистем к быстрому изменению климата».

Литература

Гавриленко Г. Г., Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Тержевик А. Ю. Пространственно-временная изменчивость потока фотосинтетически активной солнечной радиации в мелководном озере в период открытой воды // Общество. Среда. Развитие. 2015. № 3. С. 186–192.

References

Chekhin L. P. Svetovoi rezhim vodoemov [Light regime of reservoirs]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1987. 130 p.

Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E., Pal'shin N. I., Efremova T. V., Terzhevnik A. Yu. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' potoka fotosinteticheski aktivnoi solnechnoi radiatsii v melkovod-

Nazarova L. E. Vliyaniye kolebaniy klimata na stok s vodosbora Onezhskogo ozera // Geografiya i prirodnyye resursy. 2010. № 1. С. 171–174.

Ozera Karelii. Spravochnik. Petrozavodsk: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Отчет о НИР «Закономерности измерения озерных экосистем в различных ландшафтах Восточной Фенноскандии». № гос. регистрации 01201155831. Петрозаводск, 2013. 358 с.

Петров М. П., Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Поглощение солнечной радиации снежно-ледовым покровом озер // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 5. С. 546–554.

Чехин Л. П. Световой режим водоемов. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1987. 130 с.

Golosov S., Terzhevnik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus A. 2012. Vol. 64. Art. 17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Graneli W. Brownification of lakes // Bengtsson L., Herschy R. W., Fairbridge R. W. (eds.). Encyclopedia of Lakes and Reservoirs. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. P. 117–119.

IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change. Reports. 2019. URL: <https://www.ipcc.ch/reports/> (дата обращения: 09.02.2021).

Mazumder A., Taylor W. D. Thermal structure of lakes varying in size and water clarity // Limnol. Oceanogr. 1994. Vol. 39(4). P. 968–976.

Mironov D. V., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevnik A. Implementation of the lake parameterization scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // Boreal Env. Res. 2010. Vol. 15. P. 218–230.

O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42, iss. 24. P. 10773–10781. doi: 10.1002/2015GL066235

Reynolds C. Ecology of phytoplankton. Cambridge Univ. Press, 2006.

Zdorovennov R., Gavrilenko G., Zdorovennova G., Palshin N., Efremova T., Golosov S., Terzhevnik A. Optical properties of lake Vendyurskoe // Geography, Environ., Sustainability. 2016. No. 3. P. 74–87. doi: 10.15356/2071-9388_03v09_2016_05

Zdorovennova G., Palshin N., Efremova T., Zdorovennov R., Gavrilenko G., Volkov S., Bogdanov S., Terzhevnik A. Albedo of a small ice-covered boreal lake: Daily, meso-scale and interannual variability on the background of regional climate // Geosciences. 2018. Vol. 8(6). Art. 206. doi: 10.3390/geosciences8060206

Поступила в редакцию 10.02.2021

nom ozere v period otkrytoi vody [Spatio-temporal variability of the flux of photosynthetically active solar radiation in a shallow lake during the open water period]. Obshchestvo. Sreda. Razvitiye [Society. Environ. Development]. 2015. No. 3. P. 186–192.

Nazarova L. E. Vliyaniye kolebaniy klimata na stok s vodosbora Onezhskogo ozera [Influence of climate fluctu-

ations on runoff from the drainage basin of Lake Onega]. *Geografiya i prirod. resursy* [Geography and Natural Resources]. 2010. No. 1. P. 171–174.

Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. A reference book]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. 464 p.

Otchet o NIR "Zakonomernosti izmereniya ozernykh ekosistem v razlichnykh landshaftakh Vostochnoi Fenoskandii" [Research report *Regularities of measuring lake ecosystems in various landscapes of Eastern Fenoscandia*]. State registration No. 01201155831. Petrozavodsk, 2013. 358 p.

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Palshin N. I., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. Absorption of solar radiation by snow-and-ice cover of lakes. *Water Resources*. 2005. Vol. 32. P. 546–554.

Golosov S., Terzhevik A., Zverev I., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes. *Tellus A*. 2012. Vol. 64. Art. 17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Graneli W. Brownification of lakes. *Bengtsson L., Herschy R. W., Fairbridge R. W.* (eds.). *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. P. 117–119.

IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change. Reports. 2019. URL: <https://www.ipcc.ch/reports/> (accessed: 09.02.2021).

Mazumder A., Taylor W. D. Thermal structure of lakes varying in size and water clarity. *Limnol. Oceanogr.* 1994. Vol. 39(4). P. 968–976.

Mironov D. V., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterization scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Env. Res.* 2010. Vol. 15. P. 218–230.

O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42, iss. 24. P. 10773–10781. doi: 10.1002/2015GL066235

Reynolds C. *Ecology of phytoplankton*. Cambridge Univ. Press, 2006.

Zdorovenov R., Gavrilenko G., Zdorovenova G., Pal'shin N., Efremova T., Golosov S., Terzhevik A. Optical properties of lake Vendyurskoe. *Geography, Environ., Sustainability*. 2016. No. 3. P. 74–87. doi: 10.15356/2071-9388_03v09_2016_05

Zdorovenova G., Palshin N., Efremova T., Zdorovenov R., Gavrilenko G., Volkov S., Bogdanov S., Terzhevik A. Albedo of a small ice-covered boreal lake: Daily, meso-scale and interannual variability on the background of regional climate. *Geosciences*. 2018. Vol. 8(6). Art. 206. doi: 10.3390/geosciences8060206

Received February 10, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Пальшин Николай Иннокентьевич

старший научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: npalshin@mail.ru
тел.: (8142) 576381

Здорovenнова Галина Эдуардовна

руководитель лаб. гидрофизики, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: zdorovennova@gmail.com
тел.: (8142) 576381

Здорovenнов Роман Эдуардович

старший научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com
тел.: (8142) 576381

CONTRIBUTORS:

Palshin, Nikolai

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: npalshin@mail.ru
tel.: (8142) 576381

Zdorovennova, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: zdorovennova@gmail.com
tel.: (8142) 576381

Zdorovennov, Roman

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: romga74@gmail.com
tel.: (8142) 576381

Богданов Сергей Рэмович

ведущий научный сотрудник, д. ф.-м. н., доцент
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

Ефремова Татьяна Владимировна

старший научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Волков Сергей Юрьевич

младший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: taranarmo@gmail.com

Гавриленко Галина Геннадиевна

младший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: gg.gavrylenko@gmail.com

Терзевик Аркадий Юрьевич

ведущий научный сотрудник, к. т. н.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: ark1948@list.ru
тел.: (8142) 578464

Bogdanov, Sergey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

Efremova, Tatyana

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Volkov, Sergey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: taranarmo@gmail.com

Gavrilenko, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: gg.gavrylenko@gmail.com

Terzhevik, Arkady

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ark1948@list.ru
tel.: (8142) 578464