

ПОКАЗАТЕЛЬ ОСЛАБЛЕНИЯ ОБЛУЧЕННОСТИ В ОЗЕРАХ КАРЕЛИИ

© *Н. И. ПАЛЬШИН,¹ Т. В. ЕФРЕМОВА,
Г. Э. ЗДОРОВЕННОВА, Р. Э. ЗДОРОВЕННОВ*

Институт водных проблем Севера (ИВПС) КарНЦ РАН, Петрозаводск
E-mail: ¹ npalshin@mail.ru

Исследована зависимость показателя ослабления облученности (коэффициента экстинкции) ряда разнотипных водоемов Карелии от различных лимнических характеристик. Наряду с расчетами коэффициента экстинкции по данным прямых измерений потоков солнечной радиации в водной толще озер выполнены его оценки по эмпирической формуле, учитывающей глубину прозрачности по диску Секки и цветность воды. Установлено, что коэффициент экстинкции в озерах Карелии в основном зависит от количества окрашенного органического вещества, поступающего с заболоченных территорий водосборов, и периода водообмена, характеризующего способность озер к самоочищению. Получено относительно простое эмпирическое уравнение, связывающее величину коэффициента экстинкции с характеристиками водосбора и озера, применимое для параметризации этого коэффициента в моделях термического режима водоемов гумидной зоны или моделях прогноза погоды.

Ключевые слова: бореальные озера, водосбор, показатель ослабления облученности, коэффициент экстинкции, глубина 1 % облученности, период водообмена, окрашенное органическое вещество.

Введение. На территории Восточной Фенноскандии количество атмосферных осадков почти в 2 раза превышает испарение. В условиях избыточного увлажнения и слабой водопроницаемости почв и кристаллических пород на водосборах образовались многочисленные озера и болота. Только на территории Республики Карелия насчитывается 61.1 тыс. озер. Озерность территории составляет 12 %, а с учетом карельских частей Ладожского и Онежского озер достигает 21 %, являясь одной из самых высоких в мире [1¹]. Основное число озер — это малые водоемы с площадью менее 5 км².

Поверхностные воды Карелии характеризуются низкими концентрациями взвешенных веществ. На фоне относительно невысокой продуктивности озер содержание аллохтонного органического вещества (ОВ), поступающего в озера с заболоченного водосбора, преобладает над синтезом автохтонного [1¹]. Окрашенные гумусообразные вещества влияют на цветность и прозрачность воды и тем самым на распространение солнечной энергии в водной толще озер.

Прозрачность воды влияет на формирование вертикальной термической структуры озер [1⁷, 1⁸] и является основным фактором, определяющим режим перемешивания в озерах, занимающих переходное положение между полимиктическими и сезонно стратифицированными [1⁷, 1⁹, 1²⁴]. Снижение прозрачности уменьшает проникновение солнечной радиации в более глубокие слои, что снижает температуру гипolimниона, увеличивает вертикальный градиент температуры и стабильность столба воды, а это в свою очередь отрицательно сказывается на кислородном режиме водоема [1⁴]. Увеличение прозрачности оказывает противоположный эффект: свет проникает глубоко в толщу воды, что приводит к заглуплению термоклина и увеличению тепла, накапливающегося в озере в течение периода весенне-летнего нагревания. Таким образом, прозрачность может оказывать влияние не только на продолжительность

стратификации, но и на термический и кислородный режимы водоемов на последующих этапах годового цикла.

При комплексном подходе и анализе системы «водосбор—озеро», а также для численных расчетов термического режима и условий перемешивания, определяющих функционирование озерных экосистем, необходимы знания о вертикальном распределении потока солнечной энергии в водной толще. Уменьшение потока солнечной радиации с глубиной в результате его ослабления в толще воды обычно описывается простым экспоненциальным уравнением

$$E_d = E_0 e^{-K_d z},$$

где E_0 и E_d — облученность сверху на поверхности водоема и глубине z соответственно, K_d — показатель ослабления облученности, зависящий от длины волны излучения [6]. Это упрощенное уравнение получено по аналогии с законом Бугера $F = F_0 e^{-ar}$, справедливым для ослабления параллельного пучка монохроматического света, где F_0 и F — потоки излучения до и после прохождения слоя среды толщиной r соответственно, a — показатель поглощения [8]. Показатель поглощения является индивидуальной характеристикой озера и зависит от наличия в воде растворенного аллохтонного и автохтонного ОВ и минеральной взвеси. Растворенное и адсорбированное на малых частицах взвеси ОВ (желтое вещество) существенно влияет на поглощение света в коротковолновой области спектра [9]. Минеральная взвесь в процессе поглощения не участвует, но обуславливает рассеяние света на взвешенных частицах в разных диапазонах спектра. Сама вода сильно увеличивает поглощение в сторону красной части спектра с «окном прозрачности» в области 330—540 нм [9]. Поэтому до 40 % поступающей на поверхность озера солнечной радиации поглощается в верхнем 10-сантиметровом слое воды [1], кроме того, для всего диапазона спектра показатель ослабления облученности зависит от глубины. В численных моделях с целью упрощения расчетов обычно используется усредненный по глубине показатель ослабления облученности, называемый также коэффициентом экстинкции [20, 21].

Цель данной работы — оценить влияние отдельных характеристик водосборов и озер на показатель ослабления облученности или коэффициент экстинкции в разнотипных водоемах Карелии.

Объекты исследования и методы измерений. Были исследованы 57 разнотипных озер, расположенных на территории Карелии от 61° до 66° с. ш. и от 30° до 37° в. д. (рис. 1). Их выбор определялся наличием данных о цветности и прозрачности воды, обобщенных в справочнике [11]. Использовались усредненные значения этих параметров по имеющимся в ИВПС КарНЦ РАН данным измерений за многолетний период. Ландшафтные условия разных районов отражаются на количественных характеристиках водосборов, размерах и формах котловин выбранных озер. Озера, включенные в выборку, разнообразны по своим морфометрическим характеристикам и проточности: от крупных (~1000 км²) до малых с площадью около 1 км², от глубоких (максимальная глубина ~100 м) до мелких со средней глубиной около 1 м (табл. 1). Площади водосборов выбранных озер изменяются в широких пределах от нескольких км² до десятков тысяч км² при заболоченности территории от 2 до 55 % и лесистости от 28 до 85 %. Для крупных водосборов использовались

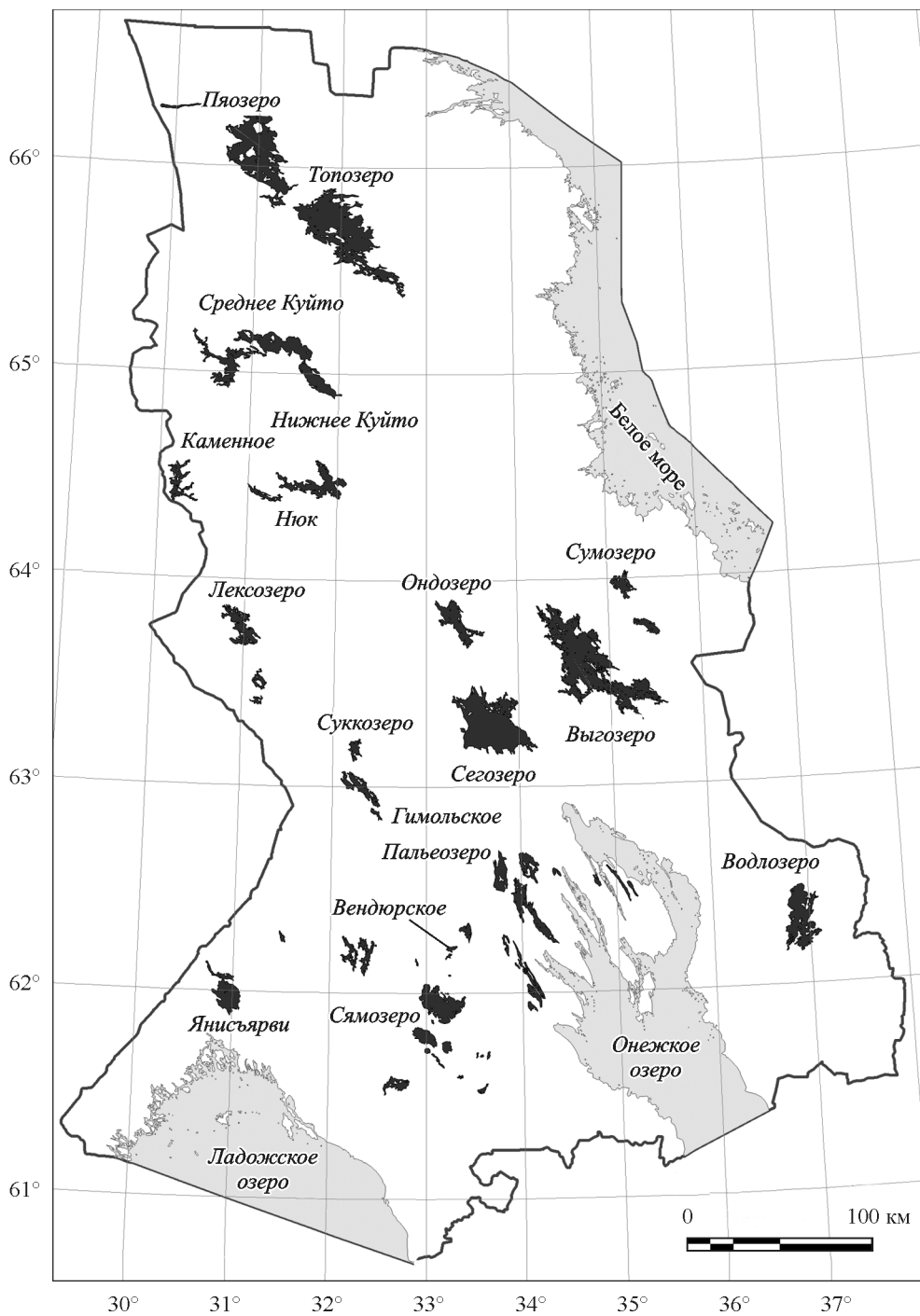


Рис. 1. Озера, включенные в выборку, на карте Карелии.

Таблица 1

**Диапазоны изменчивости географических и лимнических характеристик
57 исследованных озер Карелии**

Характеристика	Диапазон
Широта (ϕ), град	61°37'—66°19' с. ш.
Долгота (λ), град	30°04'—36°57' в. д.
Высота над уровнем моря (Z), м	33.9—201
Площадь зеркала (S), км ²	0.99—1140
Средняя глубина (H), м	1.2—37.8
Максимальная глубина (H_{\max}), м	2.4—128
Объем (V), км ³	0.0016—23.4
Коэффициент условного водообмена (K), год ⁻¹	0.05—68.2
Коэффициент удельного водосбора (ΔF)	0.9—472.7
Заболоченность (<i>Заб.</i>), от 0 до 1	0.02—0.55
Лесистость (<i>Лес.</i>), от 0 до 1	0.28—0.85
Прозрачность (Z_0), м	0.7—9.0
Цветность (C), град	3—149
Взвешенное вещество (<i>Взв.</i>), мг л ⁻¹	0.1—8
Хлорофилл (Chl «а»), мкг л ⁻¹	0.2—12.2

опубликованные значения показателей заболоченности и лесистости [12], а для малых озер при отсутствии опубликованных данных были выполнены оценки этих показателей по топографическим картам масштаба 1:50 000.

Водоемы Карелии относятся к классу низкопродуктивных, концентрация хлорофилла «а» обычно не превышает 4 мкг л⁻¹ (среднее по выборке озер ~2 мкг л⁻¹). ОВ в озерах преимущественно аллохтонного происхождения, его содержание варьирует от 2 до 70 мг л⁻¹ [11]. Концентрация взвешенных веществ преимущественно низкая — от 0.2 до 3.0 мг/л. Прозрачность по диску Секки и цветность озер варьируют от 0.7 до 9.0 м и от 3 до 149 град. соответственно.

На пяти озерах Карелии (Онежском, Вендюрском, Урос, Рапсуд и Голубая ламба) проводились полевые измерения потоков солнечной радиации в водной толще. На озерах Онежском и Вендюрском измерения потоков солнечной радиации проводились автономными датчиками фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР) производства фирмы «Alec Electronics» (Япония) в диапазоне длин волн 400—700 нм. В Онежском озере измерения проводились подо льдом в течение дневного времени 28 апреля 2012 г. На оз. Вендюрском измерения проводились в течение 5—7 сут в апреле, июне и октябре в 2013—2017 гг. Датчики ФАР (9 штук) устанавливались цепочкой до глубины 3—7 м с интервалом 0.5—1.0 м. При измерениях в апреле верхний датчик располагался непосредственно подо льдом, а в периоды с открытой водной поверхностью — на глубине 0.1—0.2 м. Дискретность измерений составляла 1 мин. В июне 2012 г. на озерах Урос, Рапсуд и Голубая ламба выполнены измерения солнечной радиации с борта лодки. Пиранометр («Star-shaped pyranometer» — производитель «Theodor Friderich & Co, Meteorologische Geräte und Systeme», Германия), закрепленный на штанге на корме лодки на высоте около 1 м над поверхностью воды, фиксировал поток падаю-

щей радиации, а подводный пиранометр, изготовленный на основе универсального пиранометра М80-м (Россия) и закрепленный на штанге, измерял поток солнечной радиации на глубине около одного метра.

Величина показателя ослабления облученности или коэффициента экстинкции рассчитывалась по формуле:

$$\gamma(z, z_1) = -\frac{1}{z_1 - z} \ln \left(\frac{E_d(z_1)}{E_d(z)} \right), \quad (1)$$

где $E_d(z_1)$ и $E_d(z)$ — облученность сверху на глубине z_1 и на поверхности водоема соответственно, Вт/м², $\gamma(z, z_1)$ — показатель ослабления облученности в слое от поверхности до глубины z_1 , м⁻¹.

За глубину 1%-ной облученности (фотический слой) была принята глубина, на которой поток солнечной радиации уменьшался на 99 % по сравнению с потоком на поверхности.

Поскольку прямые измерения потоков солнечной радиации в толще большинства озер выборки отсутствовали, для них были проведены оценки показателя ослабления облученности или коэффициента экстинкции по эмпирическому приближению, широко используемому на практике:

$$\gamma = az_{\sigma}^{-b}, \quad (2)$$

где γ — коэффициент экстинкции, м⁻¹; z_{σ} — глубина прозрачности по диску Секки, м; a и b — эмпирические параметры, которые зависят от содержания растворенных в воде ОБ и взвеси. Для разных типов вод они существенно отличаются: b изменяется от 0.5 до 1.0, a — от 1.0 до 3.5 [14].

При оценке коэффициента экстинкции для различных типов вод недостаточно информации только о глубине прозрачности по диску Секки [15]. Для цветных вод необходимо принимать во внимание заметное поглощение солнечной радиации в сине-голубой части спектра, которое главным образом зависит от концентрации растворенного в воде ОБ. Вероятно, по этой причине в формулах для разных водоемов эмпирические параметры a и b существенно отличаются. В качестве косвенного показателя, характеризующего количество аллохтонного ОБ в водах озер, Л. П. Чехин [14] использовал цветность воды. На основе большого количества натуральных данных почти по 200 озерам он получил уравнения для показателя вертикального ослабления облученности (γ) и глубины 1%-ной облученности ($z_{1\%}$), применимые для разных типов вод с широким диапазоном прозрачности (0.7—10 м) и цветности (1—150 град.), включая водоемы гумидной зоны:

$$\gamma = 0.46C^{0.39}z_{\sigma}^{-0.40}, \quad R = 0.92, \quad (3)$$

$$z_{1\%} = 7.2z_{\sigma}^{0.54}C^{-0.33}, \quad R = 0.96, \quad (4)$$

где C — цветность воды, град., R — коэффициент множественной корреляции.

При выводе формул Л. П. Чехин использовал измеренные значения облученности на разных горизонтах до глубины, на которой облученность уменьшалась до пренебрежимо малой величины. В качестве интегрального показателя

Таблица 2

**Матрица коэффициентов парных корреляций между ландшафтными
и лимническими характеристиками озер**

	<i>Лес.</i>	<i>Заб.</i>	$\lg\Delta F^*$	$\lg K^*$	z_0	<i>C</i>	<i>Взв.</i>	Chl «а»
<i>Лес.</i>	1							
<i>Заб.</i>	0.83	1						
$\lg\Delta F$	0.23	0.16	1					
$\lg K$	0.14	0.22	0.90	1				
z_0	0.24	0.53	0.54	0.65	1			
<i>C</i>	0.27	0.64	0.58	0.68	0.71	1		
<i>Взв.</i>	0.00	0.06	0.01	0.16	0.19	0.05	1	
Chl «а»	0.26	0.19	0.13	0.01	0.18	0.05	0.65	1

Примечание. * $\lg\Delta F$ и $\lg K$ — десятичные логарифмы показателя удельного водосбора и коэффициента условного водообмена соответственно. Обозначения характеристик см. в табл. 1.

теля вертикального ослабления облученности им было принято усредненное значение по всему слою. Одновременное использование в формулах прозрачности и цветности обусловлено тем, что эти характеристики неодинаково влияют на ослабление в водной толще разных диапазонов длин волн солнечной энергии. Показатели степени при z_0 , отражающие рассеяние света в видимой области (400—680 нм), для разных длин волн изменялись не так заметно — от -0.53 до -0.66 , как показатели степени при *C* — от 0.05 до 0.51, так как растворенное в воде ОВ поглощает преимущественно коротковолновую часть солнечного излучения [14].

Глубину 1%-ной интегральной облученности, которую обычно применяют для оценки толщины фотического слоя, легко получить в результате несложных преобразований из закона Бугера, используя для этого значения показателя ослабления облученности:

$$z_{1\%} = \frac{4.605}{\gamma}, \quad (5)$$

где 4.605 — обратная величина натурального логарифма от 0.01.

Химический состав воды озер (при отсутствии антропогенной нагрузки) формируется в результате ее поступления с водосбора и атмосферных осадков. В связи с этим была выполнена оценка доли речного притока в приходной составляющей части водного баланса:

$$\Delta P = \frac{P}{P + A}, \quad (6)$$

где *P* и *A* — объемы речного притока и атмосферных осадков на поверхность озера за год, м³.

Для выявления связей между отдельными характеристиками озер и водосбора были рассчитаны коэффициенты парных корреляций для таких показате-

телей, как лесистость, заболоченность водосбора, коэффициенты удельного водосбора, условного водообмена, цветность, прозрачность воды, содержание взвешенных веществ, содержание хлорофилла «а». Пошаговый множественный регрессионный анализ был проведен с целью выявления значимых предикторов и установления зависимости показателя ослабления облученности (коэффициента экстинкции), рассчитанного по формуле (3), от ландшафтных и лимнических характеристик озер.

Результаты и обсуждение. О наличии связи между отдельными ландшафтными и лимническими характеристиками озер свидетельствует матрица коэффициентов парных корреляций, где значимые связи выделены жирным шрифтом (табл. 2). При коэффициентах корреляции меньше 0.3 связи незначимые (уровень значимости $p > 0.05$), объясненная доля дисперсии меньше 10 %. Высокая парная корреляция наблюдается между лесистостью и заболоченностью, коэффициентами удельного водосбора и условного водообмена, цветностью и прозрачностью воды. Значимая связь наблюдается также между содержанием взвешенных веществ и концентрацией хлорофилла «а». Цветность и прозрачность воды в озерах коррелируют с показателями заболоченности, коэффициентами удельного водосбора и условного водообмена. Парная корреляция между лесистостью и заболоченностью в основном обусловлена региональными особенностями территории Карелии. Луга и пашни обычно занимают лишь очень небольшую долю площадей водосборов, а озерность также не оказывает большого влияния, так как колеблется около 12 %. Исключение могут составлять лишь малые водоемы с небольшими водосборами.

Доля речного притока (ΔP) тесно связана с показателем удельного водосбора, она стремится к единице при значениях показателя удельного водосбора ≥ 100 . Формирование водной массы озер почти полностью определяется химическими характеристиками вод, поступающих с водосбора. При уменьшении показателя удельного водосбора (< 100) в формировании водных масс озер возрастает доля атмосферных осадков. Нами установлена зависимость ΔP (при $\Delta F < 100$) от значений удельного водосбора озер:

$$\Delta P = 0.354 + 0.676 \lg \Delta F - 0.185 (\lg \Delta F)^2, \quad n = 57, \quad r = 0.99, \quad (7)$$

где n — количество озер, r — коэффициент парной корреляции.

Корреляционная связь между характеристиками, полученными из показателей лесистости и заболоченности, умноженными на долю речного притока, низкая ($r = 0.36$), что позволило рассматривать их в множественном регрессионном анализе как независимые предикторы. Применение пошагового множественного регрессионного анализа позволило исключить из уравнения незначимые предикторы, среди которых оказались лесистость, содержание взвешенных веществ и концентрация хлорофилла «а», которые объясняли лишь очень малую долю дисперсии. Таким образом, в результате проведенного анализа была установлена относительно простая эмпирическая зависимость показателя ослабления облученности, рассчитанного по формуле (3), от заболоченности водосбора и коэффициента условного водообмена озера:

$$\gamma = 0.883 + 3.82 \Delta b + 0.486 \lg K, \quad n = 57, \quad R = 0.90, \quad \varepsilon = \pm 0.30, \quad (8)$$

где $\Delta b = \Delta P \text{ Заб.}$ — доля воды, поступающей с заболоченной части водосбора, Заб. — показатель заболоченности в долях от единицы, K — коэффициент

условного водообмена, год^{-1} (при замене K на период водообмена T следует поменять знак «+» на «-» в последнем члене уравнения), ε — стандартное отклонение, м^{-1} .

Первый предиктор объясняет поступление аллохтонного ОВ с водосбора, а второй — очищающую способность озер, обусловленную периодом условного водообмена. В связи с низкой продуктивностью водоемов (судя по малым значениям хлорофилла «а») образование автохтонного ОВ практически не отражается на величине показателя ослабления облученности, что связано с физико-географическим положением Карелии и климатическими условиями (невысокие среднегодовые температуры воды, преобладание олиго- и мезотрофных водоемов). Эвтрофные водоемы, испытывающие, как правило, большое антропогенное воздействие, встречаются редко. В выборке озер их всего четыре (Крошноезеро, Святозеро, Микельское, Вохтозеро), что не позволило установить значимую связь между содержанием хлорофилла «а» и показателем ослабления облученности в водной толще озер.

Для определения периодов или коэффициентов условного водообмена необходимы сведения о средней глубине озер. Однако при расчетах по формуле (8), где в выборке диапазон изменчивости периодов водообмена озер составляет три порядка, нет необходимости в точных величинах, и вполне приемлемы оценки средней глубины озер в зависимости от их площади с учетом ландшафтных характеристик водосбора, выполненные по методике, изложенной в работе [13].

Для проверки регрессионной модели на адекватность предикторов были рассмотрены распределения остатков. Оказалось, что принятые виды зависимостей от доли воды, поступающей с заболоченной части водосбора, и логарифма условного водообмена адекватно описывают изменчивость показателя ослабления облученности в диапазоне от 0.3 до 3.5 м^{-1} со стандартным отклонением $\pm 0.3 \text{ м}^{-1}$.

Для всех озер выборки были выполнены оценки показателя ослабления облученности по формуле (8). На рис. 2, а приведено их сравнение со значениями, рассчитанными по формуле (3). На этом рисунке также показаны рассчитанные по формулам (3) и (8) значения показателя ослабления облученности для озер Воже и Лача, которые расположены за пределами Балтийского кристаллического щита к юго-востоку от Карелии. Для расчетов использовались усредненные данные по цветности и прозрачности озер, приведенные в работе [5]. попадание рассчитанных с использованием уравнения (8) значений показателя ослабления для этих водоемов в выборку позволяет утверждать, что полученная нами зависимость пригодна для расчетов этого показателя на водоемах гумидной зоны.

Приведенные на рис. 2, а водоемы, имеющие одинаковый трофический статус, не образуют кластеров. Например, олиготрофные водоемы с малым удельным водосбором, в питании которых доминируют атмосферные осадки, имеют самые низкие значения показателя ослабления облученности, в то же время олиготрофные озера, такие как Суоярви и Салонъярви, характеризующиеся высокой заболоченностью водосборов, имеют одни из самых высоких значений этого показателя. Кроме того, водоемы, близкие по гумусности, хорошо группируются. На рис. 2, а разными маркерами выделены олиго- и ультраолигогумусные озера, имеющие меньшие значения показателя ослабления облученности, и мезогумусные и мезополигумусные озера, характеризующиеся самыми высокими значениями этого показателя. Разброс данных можно

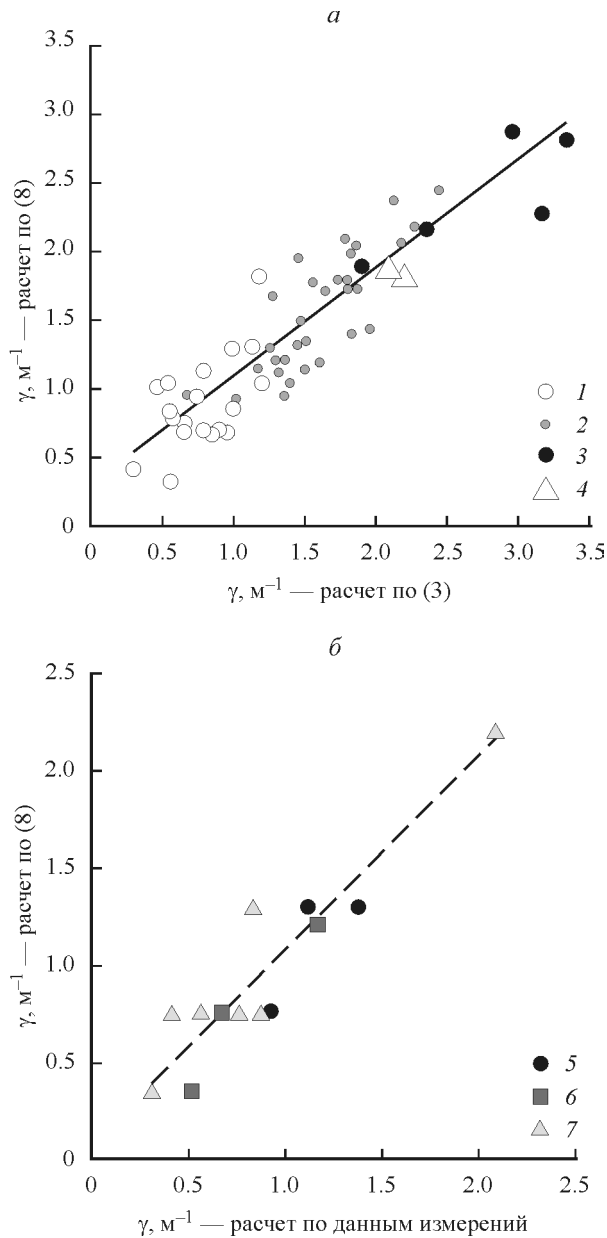


Рис. 2. Показатель ослабления облученности.

a — расчет по формулам (3) и (8): 1 — олигогумусные и ультраолигогумусные озера, 2 — мезогумусные озера, 3 — мезополигумусные озера, 4 — озера Воже и Лача; *b* — расчет по формуле (8) и по данным, полученным в результате прямых измерений солнечной радиации в озерах: 5 — Онежское и Вендюрское, 6 — Урус, Рапсудозеро и Голубая ламба; 7 — опубликованные данные [14]. Линиями показаны тренды аппроксимации данных.

объяснить отклонениями при оценках в регрессионной модели (8) доли воды, поступающей с заболоченной части водосбора, и концентраций растворенных гумусообразных веществ. Помимо относительных площадей заболоченности, следовало бы принимать во внимание модули стоков и химический состав вод с разных типов болот (верховые, низинные, переходные), наличие мелиорации, глубину и степень зарастания мелиоративных канав. К сожалению, такой подход существенно усложнил бы расчеты и был бы непригодным для прогностических целей.

Для проверки применимости регрессионной модели было выполнено сопоставление значений показателя ослабления облученности, вычисленных по формуле (8), со значениями, рассчитанными по данным прямых измерений потоков солнечной радиации в водной толще ряда разнотипных озер, которое продемонстрировало удовлетворительное соответствие между ними в диапазоне от 0.3 до 2.5 м^{-1} с отклонениями около $\pm 0.3 \text{ м}^{-1}$ (рис. 2, б).

Анализ данных прямых измерений потоков солнечной радиации в водной толще озер позволил установить, что величина показателя ослабления облученности характеризуется выраженной пространственно-временной изменчивостью даже в пределах одного водоема. Как показано в работах [3, 25], основывающихся на данных измерений на оз. Вендюрском как в период открытой воды, так и в период ледостава, максимальные значения коэффициента экстинкции $1.4\text{—}2.5 \text{ м}^{-1}$ наблюдались в верхнем слое воды толщиной около 1 м. На глубинах больше 1 м значения этого коэффициента снижались до $0.8\text{—}1.4 \text{ м}^{-1}$. Было показано, что наиболее высокие значения коэффициента экстинкции наблюдались в мае. Это, вероятно, было обусловлено повышенным выносом аллохтонного ОВ с водосбора в период весеннего половодья. Еще одной потенциально возможной причиной увеличения значений коэффициента экстинкции в период раннего лета может быть пик сезонного цветения планктона. Как показано в работе [23], значительные скопления клеток планктона в фотической зоне снижают прозрачность воды и могут даже рассматриваться как фактор, оказывающий влияние на формирование термической стратификации водоема.

В последние десятилетия в малых бореальных озерах Европы и Северной Америки наблюдается увеличение концентрации растворенного органического углерода [16], источником которого главным образом являются растворенные гуминовые вещества, выносимые с водосбора. Это вызывает увеличение цветности воды и приводит к уменьшению ее прозрачности [17, 22]. Предполагается, что основная причина таких изменений связана с происходящими изменениями климата. Прежде всего увеличивается поступление ОВ с водосбора на фоне увеличения количества осадков [16, 17]. Так, например, на территории Северной Европы и Европейской России увеличивается не только среднегодовое количество осадков, но и количество жидких осадков, причем максимальное сезонное увеличение сумм осадков приходится на весну [2, 10], что должно вызывать существенное изменение стока, а также выноса растворенного ОВ с заболоченных территорий в водоемы. Кроме того, повышение температуры воздуха и увеличение продолжительности теплого периода могут привести к повышению ферментативной активности в почвах и, таким образом, количество ОВ, которое может быть транспортировано в водные экосистемы с водосборов, будет увеличиваться. Все эти факторы отражаются на величине показателя ослабления облученности, который, следовательно, можно рассматривать как параметр, реагирующий на изменения климата.

Заключение. Разработан метод определения показателя ослабления облученности или коэффициента экстинкции, основанный на относительно простой эмпирической зависимости его от характеристик водосбора и озера, а именно, от заболоченности водосбора и периода водообмена. Предложенный метод можно успешно использовать для водоемов с невысоким антропогенным воздействием в подзонах северной и средней тайги Северо-Запада России, в которых поступающее с водосбора ОВ преобладает над его синтезом за счет продукционных процессов. Показано, что окрашенное гумусообразное вещество аллохтонного происхождения в большей мере оказывает влияние на ослабление солнечной радиации в озерах, чем автохтонное ОВ. Предложенный метод хорошо применим в условиях Карелии, поверхностные воды которой характеризуются относительно низкими концентрациями взвешенных веществ, а прозрачность воды в основном зависит от цветности.

При моделировании термического режима водоемов бореальной зоны и отсутствии непосредственных гидрооптических измерений можно оценивать показатель ослабления облученности двумя методами: 1) по измеренным значениям прозрачности и цветности воды или концентрации растворенного ОВ; 2) по характеристикам водосбора и озера. Второй способ позволяет при отсутствии данных измерений потоков радиации в толще озер оценивать гидрооптические показатели (коэффициент экстинкции, глубину 1%-ной облученности) по характеристикам водосбора и озера, используя карты крупного масштаба или космические снимки.

Очевидна практическая значимость предложенного метода количественной оценки показателя ослабления облученности в водоемах по характеристикам водосбора и морфометрическим характеристикам озера, что особенно важно для численных моделей прогнозирования погоды, в которых возникает необходимость расчетов для большого количества водоемов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера — обособленного подразделения ФГБУ науки ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук».

Список литературы

- [1] Адаменко В. Н., Кондратьев К. Я., Поздняков Д. В., Чехин Л. П. Радиационный режим и оптические свойства озер. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 300 с.
- [2] Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2014. М., Росгидромет. 58 с.
- [3] Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э. и др. Пространственно-временная изменчивость потока фотосинтетически активной солнечной радиации в мелководном озере в период открытой воды // Общество. Среда. Развитие. 2015. № 3. С. 186—192.
- [4] Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Волков С. Ю. и др. Устойчивость водной массы и ее влияние на кислородный режим полимиктического озера // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2018. Т. 4(14), № 1. С. 57—71.
- [5] Гидрология озер Воже и Лача. Л.: Наука, 1979. 288 с.
- [6] Ерлов Н. Г. Оптика моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 248 с.
- [7] Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э. и др. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // Изв. РГО. 2017. Т. 149, вып. 6. С. 59—74.

- [8] *Иванов А. А.* Введение в океанографию. М.: Мир, 1978. 574 с.
- [9] *Левашов Д. Е.* Техника экспедиционных исследований. Инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды. М.: Изд. ВНИРО, 2003. 399 с.
- [10] *Назарова Л. Е.* Атмосферные осадки в Карелии // Труды КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. 2015. № 9. С. 114—120. doi:10.17076/lim56.
- [11] Озера Карелии. Справочник. Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 2013. 464 с.
- [12] Ресурсы поверхностных вод СССР. Карелия и Северо-Запад. Т. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеониздат, 1972. 528 с.
- [13] *Сало Ю. А., Потахин М. С., Толстиков А. В.* Расчет средней глубины озер Карелии при отсутствии батиметрических данных // Изв. РГО. 2010. Т. 142, вып. 3. С. 43—47.
- [14] *Чехин Л. П.* Световой режим водоемов. Петрозаводск: Отдел водных проблем Карельского филиала АН СССР, 1987. 130 с.
- [15] *Arst H., Reinart A.* Application of optical classifications to North European lakes // *Aquat Ecol* 43, 2009. P. 789—801. doi:10.1007/s10452-008-9225-4.
- [16] *Couture S., Houle D., Gagnon C.* Increases of dissolved organic carbon in temperate and boreal lakes in Quebec, Canada // *Environ Sci Pollut Res*. 2012. 19. P. 361—371. doi:10.1007/s11356-011-0565-6.
- [17] *Einem J., Graneli W.* Effects of fetch and dissolved organic carbon on epilimnion depth and light climate in small forest lakes in southern Sweden // *Limnol. Oceanogr*. 2010. 55(2). P. 920—930.
- [18] *Heiskanen J., Mammarella I., Ojala A. et al.* Effects of water clarity on lake stratification and lake-atmosphere heat exchange // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015. V. 120. P. 7412—7428. doi:10.1002/2014JD022938.
- [19] *Kirillin G., Shatwell T.* Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes // *Earth-Science Reviews*. 2016. 161. P. 179—190.
- [20] *Mironov D. V.* Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model — COSMO Technical Report. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Germany, 2008. N 11. 41 p.
- [21] *Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al.* Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // *Boreal Environment Research*. 2010. 15. P. 218—230.
- [22] *Pace M. L., Cole J. J.* Synchronous variation of dissolved organic carbon and color in lakes // *Limnol. Oceanogr*. 2002. 47(2). P. 333—342.
- [23] *Shatwell T., Adrian R., Kirillin G.* Planktonic events may cause polymictic-dimictic regime shifts in temperate lakes // *Sci. Report*. 2016. 6. 24 361.
- [24] *Snucins E., Gunn J.* Interannual variation in the thermal structure of clear and colored lakes // *Limnol. Oceanogr*. 2000. 45(7). P. 1639—1646.
- [25] *Zdorovenov R., Gavrilenko G., Zdorovenova G. et al.* Optical properties of lake Vendyurskoe // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. N 3. P. 74—87.

Поступила в редакцию 18.09.2018 г.

После доработки 18.09.2018 г.

Принята к публикации 18.09.2018 г.

An attenuation of irradiation in the lakes of Karelia

© N. I. Palshin,¹ T. V. Efremova, G. E. Zdorovenнова, R. E. Zdorovenнов

Northern water problems Institute Karelian Research Center of RAS, Petrozavodsk, Russia
E-mail: ¹ npalshin@mail.ru

The dependence of the irradiance attenuation index (extinction coefficient) of a number of different water bodies of Karelia on various lake characteristics was studied. Along with calculating the coefficient of extinction from direct measurements of the fluxes of solar radiation in the water column of the lakes, its estimates are carried out according to an empirical formula that takes into account the depth of transparency along the Secchi disk and the color of the water. It is established that the coefficient of extinction in the lakes of Karelia mainly depends on the amount of colored organic matter coming from the wetlands of the catchments, and the period of water exchange characterizing the ability of lakes to self-purification. A relatively simple empirical equation is obtained that relates the magnitude of the extinction coefficient to the catchment and lake characteristics, which is applicable to the parameterization of this coefficient in models of the thermal regime of the humid zone reservoirs or weather forecast models.

Key words: boreal lakes, catchment area, indicator of attenuation of irradiation, extinction coefficient, 1 % irradiance depth, water exchange period, colored organic matter.

References

- [1] Adamenko V. N., Kondrat'ev K. Ya., Pozdnyakov D. V., Chekhin L. P. Radiatsionnyj rezhim i opticheskie svoystva ozer. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 300 s.
- [2] Vtoroj otsenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossijskoj Federatsii. 2014. M., Rosgidromet. 58 s.
- [3] Gavrilenko G. G., Zdorovenнова G. E., Zdorovenнов R. E. i dr. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' potoka fotosinteticheski aktivnoj solnechnoj radiatsii v melkovodnom ozere v period otkrytoj vody // Obshhestvo. Sreda. Razvitie. 2015. N 3. S. 186—192.
- [4] Gavrilenko G. G., Zdorovenнова G. E., Volkov S. Yu. i dr. Ustojchivost' vodnoj massy i ee vliyanie na kislorodnyj rezhim polimikticheskogo ozera // Geopolitika i ehkogeodinamika regionov. 2018. T. 4(14), N 1. S. 57—71.
- [5] Hidrologiya ozer Vozhe i Lacha. L.: Nauka, 1979. 288 s.
- [6] Erlov N. G. Optika morya. L.: Gidrometeoizdat, 1980. 248 s.
- [7] Zdorovenнова G. E., Gavrilenko G. G., Zdorovenнов R. E. i dr. Evolyutsiya temperatury vodnoj tolshhi boreal'nykh ozer na fone izmenenij regional'nogo klimata // Izv. RGO. 2017. T. 149, vyp. 6. S. 59—74.
- [8] Ivanov A. A. Vvedenie v okeanografiyu. M.: Mir, 1978. 574 s.
- [9] Levashov D. E. Tekhnika ehkspeditsionnykh issledovanij. Instrumental'nye metody i tekhnicheskie sredstva otsenki promyslovo-znachimyx faktorov sredy. M.: Izd-vo VNIRO, 2003. 399 s.
- [10] Nazarova L. E. Atmosfernye osadki v Karelii // Trudy KarNTS RAN. Seriya Limnologiya. 2015. N 9. S. 114—120. doi:10.17076/lim56.
- [11] Ozera Karelii. Spravochnik. Petrozavodsk, Karel'skij nauchnyj tsentr RAN, 2013. 464 s.
- [12] Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Kareliya i Severo-Zapad. T. 2. CH. 1. L.: Gidrometeoizdat, 1972. 528 s.
- [13] Salo Y. A., Potakhin M. S., Tolstikov A. V. Raschet srednej glubiny ozer Karelii pri otsutstvii batimetricheskikh dannyx // Izv. RGO. 2010. T. 142, vyp. 3. S. 43—47.
- [14] Chekhin L. P. Svetovoj rezhim vodoemov. Petrozavodsk: Otdel vodnykh problem Karel'skogo filiala AN SSSR, 1987. 130 s.
- [15] Arst H., Reinart A. Application of optical classifications to North European lakes // Aquat Ecol 43, 2009. P. 789—801. doi:10.1007/s10452-008-9225-4.

- [16] *Couture S., Houle D., Gagnon C.* Increases of dissolved organic carbon in temperate and boreal lakes in Quebec, Canada // *Environ Sci Pollut Res.* 2012. 19. P. 361—371. doi:10.1007/s11356-011-0565-6.
- [17] *Einem J., Graneli W.* Effects of fetch and dissolved organic carbon on epilimnion depth and light climate in small forest lakes in southern Sweden // *Limnol. Oceanogr.* 2010. 55(2). P. 920—930.
- [18] *Heiskanen J., Mammarella I., Ojala A. et al.* Effects of water clarity on lake stratification and lake-atmosphere heat exchange // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015. V. 120. P. 7412—7428. doi:10.1002/2014JD022938.
- [19] *Kirillin G., Shatwell T.* Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes // *Earth-Science Reviews.* 2016. 161. P. 179—190.
- [20] *Mironov D. V.* Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model — COSMO Technical Report. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Germany. 2008. N 11. 41 p.
- [21] *Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al.* Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // *Boreal Environment Research.* 2010. 15. P. 218—230.
- [22] *Pace M. L., Cole J. J.* Synchronous variation of dissolved organic carbon and color in lakes // *Limnol. Oceanogr.* 2002. 47(2). P. 333—342.
- [23] *Shatwell T., Adrian R., Kirillin G.* Planktonic events may cause polymictic-dimictic regime shifts in temperate lakes // *Sci. Report.* 2016. 6. 24 361.
- [24] *Snucins E., Gunn J.* Interannual variation in the thermal structure of clear and colored lakes // *Limnol. Oceanogr.* 2000. 45(7). P. 1639—1646.
- [25] *Zdorovenov R., Gavrilenko G., Zdorovenova G. et al.* Optical properties of lake Vendyurskoe // *Geography, Environment, Sustainability.* 2016. N 3. P. 74—87.

DOI 10.1134/S086960711806006X

Изв. РГО. 2018. Т. 150, вып. 6

ОПАСНЫЕ ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ОСТРОВА МАТУА (СРЕДНИЕ КУРИЛЫ)

© С. Ю. ГРИШИН

Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии
ДВО РАН, Владивосток
E-mail: grishin@biosoil.ru, alaid@bk.ru

Оценки вулканической опасности для территории острова Матуа основаны на неполных данных, собранных за короткий период наблюдений (менее 100 лет), поэтому не могут надежно характеризовать повторяемость и масштаб опасных явлений. Помимо явлений, зафиксированных в ходе сильного извержения вулкана Пик Сарычева в 2009 г. (а также ряде извержений XX в.), масштаб и диапазон воздействия которых на природу острова недостаточно изучен, выявлены новые признаки потенциальных опасностей. Это газовые эмиссии, вызвавшие поражение древесной растительности в 2007 г., а также данные о масштабной гибели древесной растительности, произошедшей около 150 л. н. Сюда же можно отнести особо высокие эруптивные колонны (извержение 2009 г.). Выявлена высокая повторяемость сильных извержений: за последние полтора столетия произошли 4 извержения класса VEI 4, не считая менее крупных. В ходе сильных извержений может внезапно и непредсказуемо сложиться комбинация неблагоприятных факторов, приводящая к разрушительным последствиям в юго-восточной половине острова. В аспекте нового этапа освоения острова, потенциальную опасность может представлять сход пирокластических потоков и волн по юго-вос-