

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУШИ С АТМОСФЕРОЙ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

УДК 504.4.062.2

О ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ В ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМАХ¹

© 2023 г. С. Д. Голосов^а, *, И. С. Зверев^а, А. Ю. Тержевик^б

^аИнститут озероведения РАН – обособленное структурное подразделение
Санкт-Петербургского Федерального Исследовательского центра РАН,
Санкт-Петербург, 196105 Россия

^бИнститут водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, 185910 Россия

*e-mail: sergey_golosov@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 10.04.2023 г.

Представлена новая параметризация, описывающая пространственно-временную изменчивость прозрачности воды, измеряемую диском Секки, в зависимости от интегральной биомассы фитопланктона и температуры верхнего слоя воды. Параметризация верифицирована по данным натурных наблюдений в разнотипных по своим физико-географическим и химико-биологическим характеристикам озерах – от глубоководных олиготрофных северных районов Ладожского озера до мелководного гиперэвтрофного Псковского озера. Результаты верификации свидетельствуют о том, что новая параметризация может использоваться при решении широкого круга как гидротермодинамических, так и гидробиологических задач. В частности, при моделировании термического режима водоемов параметризация может использоваться для оценки коэффициента экстинкции солнечного излучения. При разработке моделей функционирования водных экосистем новая параметризация может применяться для оценки толщины трофогенного слоя, а также при оценке первичной продукции фитопланктона.

Ключевые слова: прозрачность воды, диск Секки, математическое моделирование, гидротермодинамика, биомасса, первичная продукция.

DOI: 10.31857/S0321059623600163, **EDN:** RZJKLT

ВВЕДЕНИЕ

Прозрачность воды – один из фундаментальных гидроэкологических параметров, определяющих особенности функционирования экосистем природных водоемов [11]. Началом регулярных измерений прозрачности следует считать 1860-е гг., когда итальянский астроном Анджело Секки предложил считать количественной оценкой прозрачности воды глубину исчезновения из вида круглого белого диска при погружении его в воду. С тех пор этим простым и доступным способом в океанах и озерах выполнено, по разным оценкам, несколько миллионов измерений [25].

¹ Работа выполнена в рамках государственных заданий Института озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН и Института водных проблем Севера КарНЦ РАН. В работе использованы данные натурных наблюдений, полученные в рамках выполнения государственных заданий Института озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН (оз. Ладожское), при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-05-00702-а (оз. Чудское и оз. Псковское)), в рамках научной программы AQUASHIFT (ФРГ) (проект KI 853/3, оз. Мюгельзее).

Оцененная таким образом прозрачность воды – косвенный показатель световых условий в водной массе, которые во многом определяют протекание химико-биологических и гидротермодинамических (ГТД) процессов. В частности, от распределения в водной массе солнечной энергии напрямую зависит видовой состав фитопланктонного сообщества, его фотосинтетическая активность и распределение по глубине. Также прозрачность воды напрямую связана с толщиной эвфотической зоны, в пределах которой в результате фотосинтеза в основном продуцируется органическое вещество и которую принято ограничивать глубиной проникновения 1% поступающей на поверхность воды солнечной радиации [3, 8, 27, 31, 36]. При этом толщина эвфотической зоны оценивается приблизительно как две величины прозрачности, измеренной диском Секки [1, 2, 7, 10].

Кроме того, поглощение солнечной радиации различными компонентами косного вещества – неотъемлемой части любой водной природной системы – приводит к неравномерному распреде-

лению тепловой энергии, что в свою очередь влияет на протекание ГТД процессов в водоемах.

В начале XX в. было обнаружено, что коэффициент ослабления (экстинкции) солнечной радиации при ее распространении в водном столбе в вертикальном направлении обратно пропорционален прозрачности воды, измеренной диском Секки. Тогда же появилась и одна из первых параметризаций, связывающая коэффициент экстинкции с прозрачностью воды в следующем виде (например, [30]):

$$\gamma = 1.7/SD, \quad (1)$$

где γ – коэффициент экстинкции, м^{-1} ; SD – прозрачность воды, измеренная диском Секки, м; 1.7 – безразмерный эмпирический коэффициент, значение которого впоследствии много раз уточнялось в зависимости от оптических свойств водного объекта. В работе [25] авторы утверждают, что значения коэффициента могут варьировать от 0.9 до 1.7.

Влияние прозрачности на ГТД водоемов оказалось настолько велико [26, 32], что с 1980-х гг. вертикальный профиль коэффициента экстинкции начали использовать при разработке моделей общей циркуляции океана [28, 29]. Особенно широко эта процедура применялась в региональных системах моделирования (ROMS) [24].

Дальнейшие исследования закономерностей формирования прозрачности природных вод были сфокусированы на определении степени влияния на нее первичных и вторичных гидрооптических характеристик (ПГХ и ВГХ) (от англ. “inherent optical properties” (IOP) и “apparent optical properties” (AOP)). Различия между ними заключаются в том, что величины первых при разной длине световых волн зависят от свойств самой воды и находящихся в ней веществ, тогда как вторые зависят от условий освещения, например от альбедо поверхности воды, высоты солнца над горизонтом и т. д. [13, 14, 16–18, 22, 23, 35].

В результате многочисленных исследований был определен круг факторов, существенно влияющих на формирование светового климата в поверхностных водах природных водоемов. Среди них наиболее значимые – непосредственно сама вода с ее химическим составом, фитопланктон, органические и неорганические взвеси, а также желтое вещество, которое образуется в водоемах в результате распада органики с последующим образованием гуминовых соединений, имеющих желтый цвет [5, 6, 34].

Непосредственно вода поглощает в основном солнечное излучение в “красной” части спектра; взвеси и желтое вещество, поглощая более коротковолновое излучение, способствуют прогреву водной массы. Что касается фитопланктона, то

он имеет два основных максимума поглощения – в “красной” и “синей” частях спектра.

Как видно, в последние два десятилетия основные усилия разных исследователей были направлены в основном на определение закономерностей поглощения светового излучения в различных частях спектра в зависимости от первичных и вторичных гидрооптических характеристик. Однако предпринимались и попытки напрямую связать ослабление солнечной радиации с глубиной с прозрачностью воды, измеренной диском Секки (например, [25, 33]).

Первая из моделей [33] при определении глубины диска Секки учитывает концентрацию водорослей, концентрацию взвешенных неорганических частиц, распределение частиц по размерам и концентрацию растворенного органического вещества. Несмотря на удовлетворительные результаты, данная модель не нашла широкого применения из-за большого количества входящих в нее внешних эмпирических параметров.

Авторы работы [25] отказались от доминирующего в последние годы подхода, основанного на учете многочисленных ПГХ, влияющих на пропускную способность природных водных масс. Они фактически вернулись к параметризации вида (1), описывающей коэффициент экстинкции в зависимости от глубины диска Секки. При этом, по их данным, эмпирический коэффициент в формуле (1) имеет значение 0.9 и подходит для природных вод с глубиной диска Секки в диапазоне от 1 до 75 м, что практически полностью покрывает известные до настоящего времени значения прозрачности природных вод. Самым существенным недостатком остается то, что в данной параметризации глубина диска Секки – внешний параметр, который необходимо задавать заранее для каждого конкретного случая при оценке пропускной способности той или иной водной массы. Однако авторы [25] утверждают, что данный недостаток может быть компенсирован большим количеством измерений прозрачности диском Секки, выполненных в разнотипных водных массах за последние более чем полтора столетия.

В настоящей работе предпринята попытка разработки новой параметризации, позволяющей оценивать прозрачность природной водной массы по диску Секки в зависимости от перераспределения поступающего видимого солнечного излучения между удельной тепловой энергией водной массы и продуцируемой в процессе фотосинтеза биомассой фитопланктона.

ФОРМУЛИРОВКА ПАРАМЕТРИЗАЦИИ

В основу новой параметризации положено допущение о том, что основная часть видимого солнечного излучения после проникновения в водо-

ем поглощается посредством двух различных механизмов. Часть его поглощается молекулами воды и косным веществом, находящимся в ней, и тем самым идет на изменение удельной тепловой энергии водной массы, другая же расходуется на образование химических связей при фотосинтезе водорослей. Оба процесса происходят в верхнем слое водной массы, толщина которого, как отмечалась выше, может быть определена величиной прозрачности воды, которая обычно измеряется как глубина исчезновения стандартного белого диска – диска Секки. Оба процесса влияют на глубину распространения солнечной радиации в водоеме. В свою очередь глубина исчезновения диска обратно пропорциональна коэффициенту поглощения света – одного из основных физических параметров для моделирования теплового режима водоемов. Таким образом, наличие функциональной связи между глубиной исчезновения диска Секки, с одной стороны, и преобразованием энергии солнечного света в удельную тепловую энергию воды и энергию химических связей – с другой, позволяет получить метод оценки коэффициента экстинкции в виде (1).

Удельная тепловая энергия верхнего слоя водной массы может быть представлена в виде

$$E_T = \rho C_p T, \quad (2)$$

где E_T – удельная тепловая энергия, Дж м⁻³; ρ – плотность воды, кг м⁻³; C_p – теплоемкость воды при постоянном давлении, Дж кг⁻¹ К⁻¹; T – температура воды, К. В настоящей работе для теплоемкости и плотности воды приняты значения 4180 Дж кг⁻¹ К⁻¹ и 1000 кг м⁻³ соответственно.

Выражение для энергии, расходуемой на продуцирование биомассы фитопланктона, запишем в виде

$$E_B = K_B V_{PH}, \quad (3)$$

здесь E_B – энергия, поглощаемая при фотосинтезе, Дж м⁻³; $K_B = 5 \times 10^7$ Дж кг⁻¹ – энергетическая константа, определяющая количество энергии, необходимое для продуцирования 1 кг углерода в соответствии с циклом Кальвина–Бенсона [9]; V_{PH} – биомасса фитопланктона, кг м⁻³.

Функциональную зависимость между энергией фотосинтеза, тепловой энергией и прозрачностью воды запишем в виде

$$\frac{SD}{SD_{\max}} = \alpha \left(\frac{E_B}{E_T} \right)^\beta, \quad (4)$$

здесь $SD_{\max} = 80$ м – максимально возможная в природе прозрачность дистиллированной воды [19], м; α и β – безразмерные коэффициент пропорциональности и показатель степени, которые надлежит определить по данным натуральных наблюдений.

Прежде чем приступить к обработке данных натуральных наблюдений, полезную информацию о порядке величины коэффициента пропорциональности α можно получить из анализа выражения (4) и ранее полученных данных о масштабах изменчивости прозрачности воды и характере ее зависимости от биомассы фитопланктона. Так, например, многочисленные данные наблюдений свидетельствуют о том, что прозрачность воды, измеренная диском Секки, и биомасса фитопланктона находятся в обратной зависимости [1, 17, 18]. Кроме того, минимальные значения SD , измеренные в природных водах, не превышают нескольких сантиметров [15].

Теперь после линеаризации выражение (4) можно переписать в следующем виде:

$$\beta = \frac{\ln \left(\frac{SD}{SD_{\max}} \right) - \ln(\alpha)}{\ln \left(\frac{E_B}{E_T} \right)}. \quad (5)$$

Обратная зависимость между величинами прозрачности и биомассы означает, что показатель степени β должен иметь отрицательные значения во всем диапазоне изменчивости прозрачности воды $0 < SD \leq SD_{\max}$. Температура воды в природных условиях меняется от 273 до 310 К, биомасса даже в гиперэвтрофных водоемах ≤ 0.25 кг м⁻³ [15]. Из этого следует, что знаменатель в (5) всегда < 0 . Для того чтобы показатель степени был < 0 , необходимо выполнение условия:

$$\ln \left(\frac{SD}{SD_{\max}} \right) - \ln(\alpha) > 0. \quad (6)$$

Если принять, что минимальное значение прозрачности воды составляет 0.1 м, то из (6) следует, что $\alpha < 0.00125$. Теперь показатель степени β в (5) может быть определен по данным натуральных наблюдений.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДАННЫЕ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Данные полевых наблюдений, использованные для разработки параметризации в настоящей работе, были собраны в четырех озерах, относящихся к разным типам. Озера различаются как по физико-географическим, так и по химическим и биологическим характеристикам. Так, Ладожское озеро – самое большое в Европе, расположено частично в Ленинградской области и частично в Республике Карелии. Озеро простирается на 220 км с Ю на С и на 125 км с З на В. Значительны и колебания глубин – от нескольких метров в южной части озера до ~250 м в северной. Неудивительно, что при таких больших размерах



Рис. 1. Места расположения станций наблюдения в Ладожском, Чудском и Псковском озерах (отмечены черными точками), а также в оз. Мюггелзее, на котором расположена автоматическая измерительная станция (в правом нижнем углу).

озера разброс величин его гидрофизических и гидробиологических параметров также значителен. Это относится и к трофическому статусу озера. Так, трофическое состояние его южных частей близко к эвтрофному, северных глубоководных частей – к олиготрофному, тогда как трофическое состояние озера в целом оценивается как мезотрофное [4]. Полевые данные, необходимые для данного исследования, были собраны в ходе регулярных мониторинговых наблюдений в период с 1992 по 2012 г. Все данные были получены в периоды открытой воды, так как зимой озеро не изучалось из-за сложных ледовых условий. Схема расположения станций отбора проб в озере показана на рис. 1. Из рис. 1 следует, что 16 станций отбора проб покрывают практически всю площадь поверхности озера, включая южные эвтрофные районы с низкими значениями прозрачности воды и северные, где ее значения значительно выше. Общее количество одновременных измерений температуры воды, биомассы фитопланктона и прозрачности воды по диску Секки составило почти 200 для каждого параметра.

Следующим водным объектом, данные по которому использовались при разработке параметризации, была так называемая Чудско-Псковская озерная система (рис. 1), которая состоит из двух больших, но мелких озер, а именно Чудского (средняя глубина 7 м) и Псковского (средняя глубина ~3.5 м). Канал, соединяющий эти два озера, называется Теплым озером. Несмотря на относительно небольшие глубины, система озер имеет значительные пространственные размеры: ~140 км

в длину и до 40 км в ширину. Последнее, как и в Ладожском озере, определяет значительную пространственную неоднородность гидрофизических и химико-биологических характеристик. Например, общая биомасса фитопланктона в Чудском озере в два раза меньше, чем в Псковском, которое в свою очередь значительно теплее и имеет меньшую прозрачность воды, чем Чудское. Трофические условия обоих озер также различны. Чудское озеро имеет эвтрофный статус, а Псковское озеро относится к гиперэвтрофному типу озер. Чудско-Псковская озерная система – трансграничный водный объект. Граница между Эстонией и Российской Федерацией проходит по средней линии Чудского озера с Ю на С. Данные, используемые в настоящей работе, собраны в российских частях обоих озер – на гидрологической станции Залита в Псковском озере и в зал. Раскопель в Чудском озере. Схема расположения станций отбора проб показана на рис. 1. Следует отметить, что расположение обеих станций не очень удачное, так как они находятся в непосредственной близости от береговой линии. Это может привести к значительному влиянию побережья на получаемые данные, и весьма вероятно, что последние не смогут полностью отразить ситуацию в озерах в целом. Данные представляют собой временные ряды среднемесячных значений температуры воды, биомассы фитопланктона и прозрачности воды за период с мая по октябрь с 1970 по 2008 г. Общее количество одновременно измеренных значений температуры воды, биомассы фитопланктона и прозрачности воды по

Таблица 1. Диапазоны изменчивости параметров, входящих в параметризацию

Озеро	L_{\min}	L_{\max}	$T, ^\circ\text{C}$	$V_{PH}, \text{кг м}^{-3}$	Количество данных
Ладожское	1.2	5.3	2.8–22	$6 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-3}$	194
Псковское	0.4	1.9	2.7–25	$1.5 \times 10^{-3} - 0.09$	234
Чудское	1	3	2.6–24	$1.5 \times 10^{-3} - 0.061$	234
Мюггельзее	0.5	5.2	0–28	$5 \times 10^{-4} - 0.054$	813

диску Секки составило более 200 для каждого параметра в каждом озере.

Четвертый источник полевых данных, использованных в данном исследовании, – небольшое городское оз. Мюггельзее, расположенное в черте г. Берлина (ФРГ) (рис. 1). Его пространственные размеры не так велики по сравнению с ранее упомянутыми озерами – всего 4.5×2.5 км, максимальная глубина 8 м (среднее значение составляет ~5 м). Трофическое состояние озера оценивается как эвтрофное. Несмотря на небольшие размеры, это озеро имеет одно неоспоримое преимущество, заключающееся в долгосрочных комплексных круглогодичных еженедельных наблюдениях на постоянной станции. Полевые исследования проводятся сотрудниками Лейбниц-института пресноводной экологии и внутреннего рыболовства (IGB, Берлин). Используемые здесь данные охватывают период с 1979 по 1995 г. Общее количество одновременных измерений температуры воды, биомассы фитопланктона и прозрачности воды по диску Секки составило > 800 для каждого параметра.

В табл. 1 представлены диапазоны изменчивости прозрачности воды L , температуры верхнего слоя воды T и интегральной биомассы фитопланктона V_{PH} – параметров, входящих в параметризацию, а также количество данных наблюдений для всех озер.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Параметризация (4) верифицирована по описанным выше данным натурных наблюдений. Для всех четырех озер в соответствии с условием (6) принято значение коэффициента пропорциональности $\alpha = 0.001$. Показатель степени β для всех озер рассчитан в соответствии с (5) с использованием данных наблюдений на каждом озере. Примечательным оказалось то, что для всех озер, за исключением Чудского, показатели степени оказались достаточно близкими (табл. 2).

Графически результаты приведены на рис. 2а–2г. Результаты для всех озер, за исключением Ладожского озера, представлены в виде $SD = f(t)$ (t – дата наблюдения) (рис. 2а). Дело в том, что измерения на Ладожском озере выполнялись крайне нерегу-

лярно в течение всего периода наблюдений и расположить их в хронологическом порядке не представляется возможным. Поэтому данные на рис. 2а представлены в виде $SD = f(N)$, N – количество измерений.

Качество воспроизведения данных наблюдений параметризацией (4) приблизительно одинаково для всех озер. Завышенным оказалось значение β для Чудского озера. Причиной этого может быть следующее обстоятельство. Гидрологический пост (г.п.) Раскопелъ расположен непосредственно в прибрежной зоне одноименного залива (рис. 1), и, скорее всего из-за влияния мелководья (например, частой ресуспензии частиц донных отложений), измеренные на нем значения прозрачности воды могут не отражать ситуации в озере в целом. Если не принимать во внимание показатель степени для Чудского озера, то среднее значение параметра β для остальных озер составляет $-1/3$. Данное обстоятельство открывает новые возможности для использования параметризации (4).

Дело в том, что параметризация в виде (4) имеет одну важную особенность – она не содержит никакой информации о солености/минерализации водоема, т. е. в идеале она может применяться как для слабоминерализованных (озера), так и для соленых (морья, океаны) водных объектов. В настоящей работе предпринята попытка расчета прозрачности воды в Саргассовом море с использованием параметризации (4). В качестве исходной информации для расчета использованы полученные в период с января 1985 г. по сентябрь 1986 г. и опубликованные в [20] данные о биомассе фитопланктона, температуре воды и глубине, на которой количество солнечной радиации составляет 1% приходящей на поверхность. Выше указано, что данная глубина достаточно точно со-

Таблица 2. Результаты верификации параметризации (4)

Озеро	Значение α	Значение β
Ладожское	0.001	-0.33
Псковское	0.001	-0.32
Чудское	0.001	-0.4
Мюггельзее	0.001	-0.35

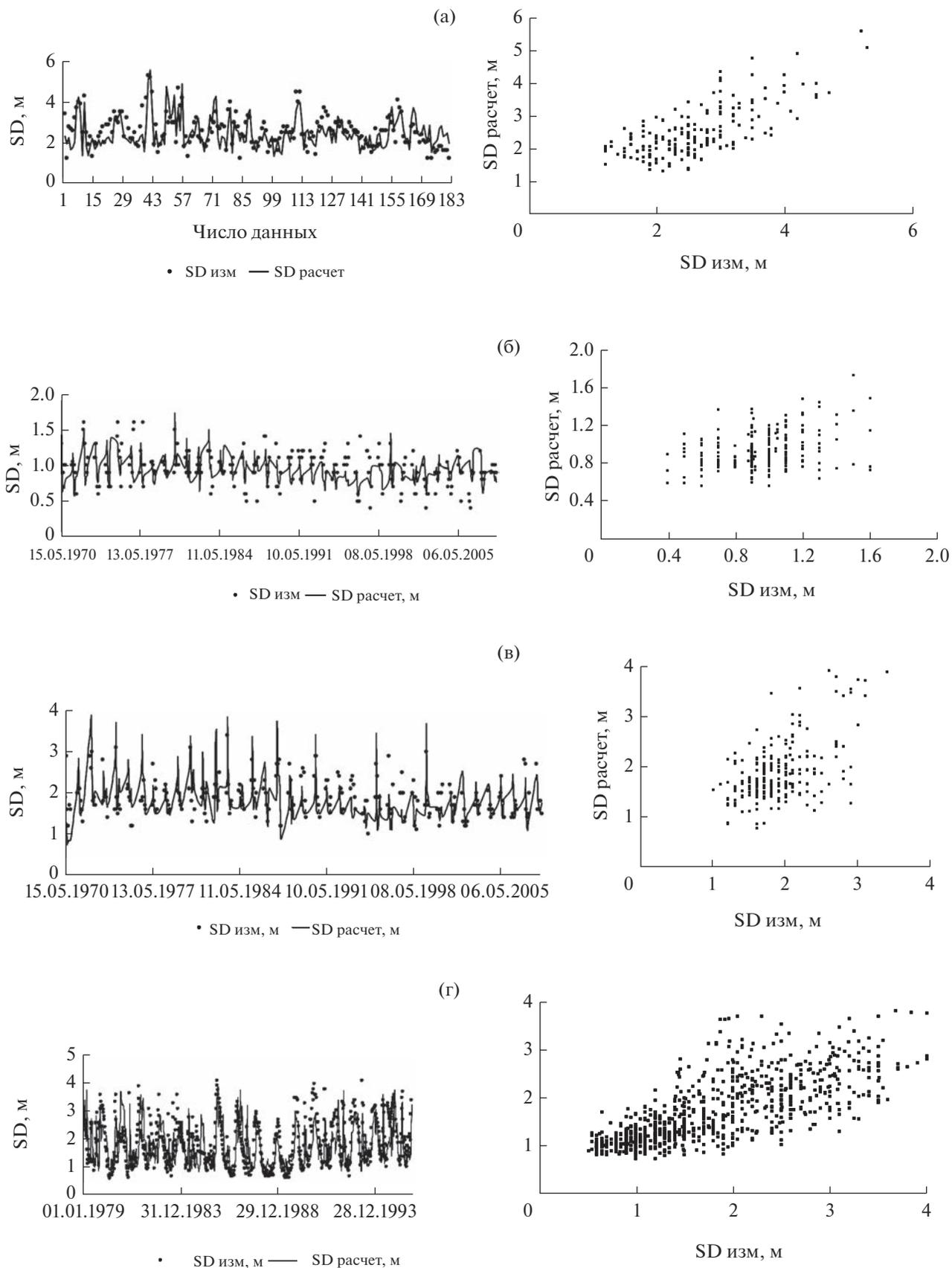


Рис. 2. Результаты верификации параметризации (4) по данным натуральных наблюдений на озерах Ладожском (а), Псковском (б), Чудском (в) и Мюгельзее (г).

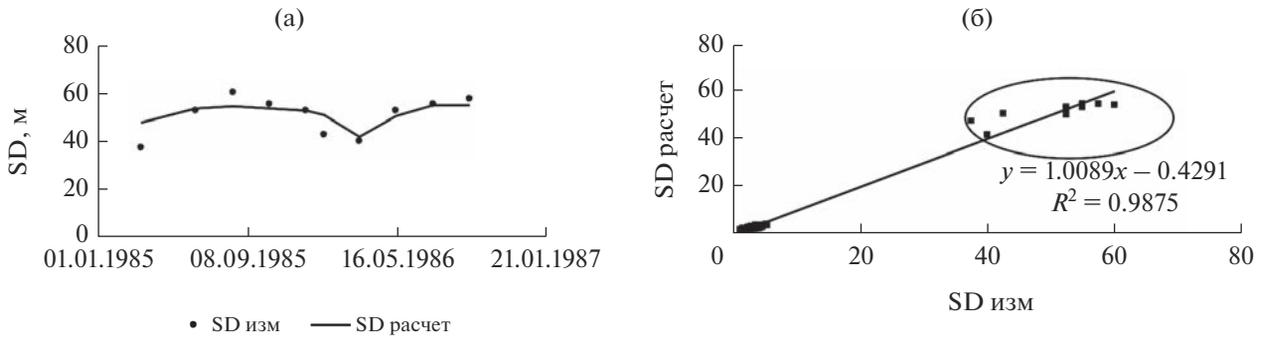


Рис. 3. Сезонная динамика прозрачности воды в Саргассовом море (а), соотношение рассчитанных по параметризации (4) и измеренных значений прозрачности воды в Ладожском озере (в левом нижнем углу) и Саргассовом море (выделено овалом) (б).

ответствует двум величинам прозрачности воды, измеренной диском Секки. Исходя из этого выполнены расчеты прозрачности воды по параметризации (4). На рис. 3а, 3б представлены результаты расчетов. Там же для наглядности приведены полученные в настоящей работе результаты аналогичных расчетов для Ладожского озера (рис. 2а).

Результаты, представленные на рис. 3, следует признать обнадеживающими, хотя и предварительными. Безусловно, параметризация (4) нуждается в дальнейшей верификации с использованием морских и океанских данных.

Еще одно перспективное направление применения параметризации – использование ее при оценке первичной продукции фитопланктона в моделях водных экосистем. Так, например, в работе [21] для расчета первичной продукции фитопланктона в озерах при моделировании водных экосистем на основе анализа размерностей предложена параметризация в виде

$$\mu = C \frac{(IB_{PH}^2)^{\frac{1}{3}}}{SD}, \quad (7)$$

μ – первичная продукция фитопланктона, $\text{кг м}^{-3} \text{сут}^{-1}$; I – интенсивность солнечной радиации, Вт м^{-2} ; $C = 0.34$ – константа пропорциональности. Данная параметризация верифицирована по результатам наблюдений на разнотипных озерах, расположенных в различных географических зонах – от умеренных широт до Антарктики.

Как следует из (7), один из определяющих величину μ параметров – прозрачность воды, которую предполагалось задавать из данных наблюдений, т. е. величина SD – внешний параметр. Теперь же результаты настоящей работы позволяют исключить этот недостаток при использовании параметризации (7). Подставляя (4) в (7) и принимая по результатам настоящей работы $\beta = -1/3$, получаем

$$\mu = \frac{C}{\alpha SD_{\max}} \left(\frac{K_B I}{E_T} \right)^{\frac{1}{3}} B_{PH}. \quad (8)$$

Таким образом, прозрачность воды исключается из числа внешних параметров и величина первичной продукции фитопланктона зависит теперь только от внутренней переменной модели водной экосистемы – температуры воды и биомассы фитопланктона. При этом интенсивность солнечной радиации I остается внешним параметром для всех как экосистемных, так и ГТД моделей. В качестве примера на рис. 4 представлены результаты воспроизведения сезонной динамики первичной продукции в оз. Мюггелзее с использованием (8) для разных лет в период с 1979 по 1991 г.

Результаты, полученные с использованием параметризации (8), свидетельствуют о том, что качественно и количественно они не уступают таковым, получаемым в моделировании водных экосистем традиционными методами с использованием уравнений Михаэлиса–Ментен. А в части уменьшения количества эмпирических параметров применение параметризации (8) более предпочтительно. Тем не менее необходимо отметить, что представление первичной продукции в виде (8) нуждается в дальнейшей верификации как по озерным, так и по морским данным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена новая параметризация, описывающая пространственно-временную изменчивость прозрачности воды, измеряемой диском Секки, в зависимости от интегральной биомассы фитопланктона и температуры верхнего слоя воды. Параметризация верифицирована по данным натуральных наблюдений в разнотипных по своим физико-географическим и химико-биологическим характеристикам озерах – от глубоководных олиготрофных северных районов Ладожского озера

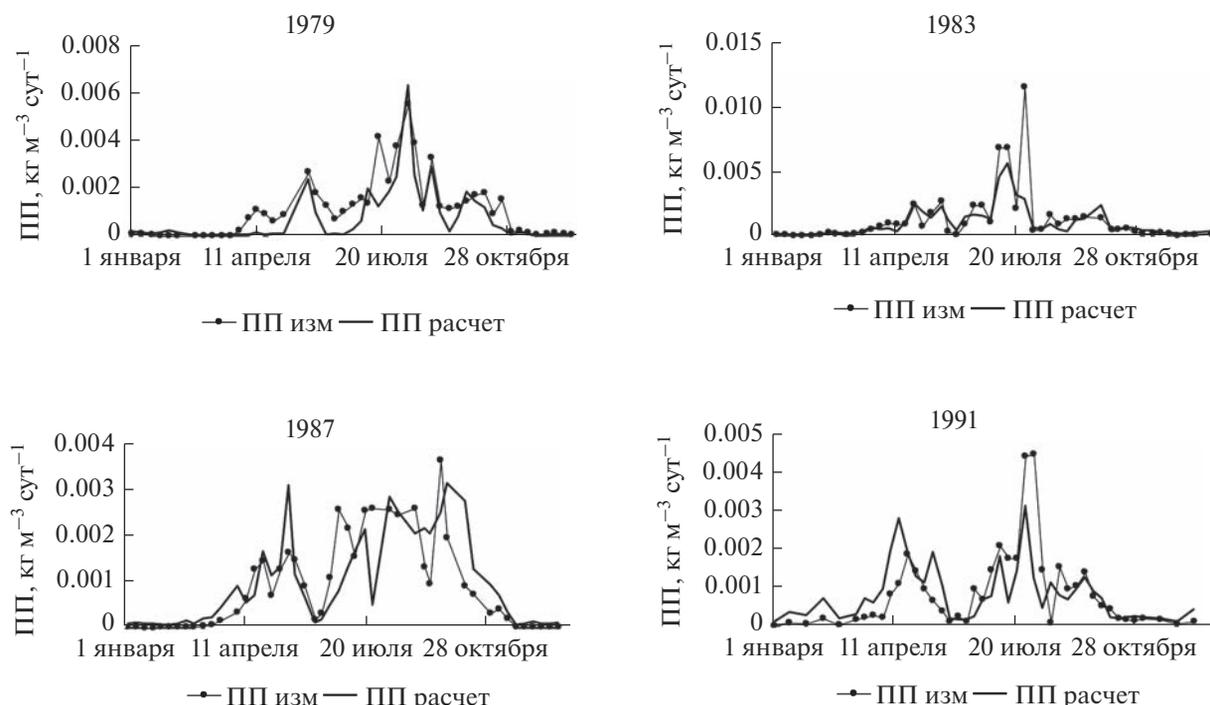


Рис. 4. Сезонная динамика первичной продукции фитопланктона (ПП) в оз. Мюггельзее в период с 1979 по 1991 г.

до мелководного гиперэвтрофного Псковского озера. Результаты верификации свидетельствуют о том, что новое представление прозрачности воды может использоваться при решении широкого круга как гидротермодинамических, так и гидробиологических задач. В частности, при моделировании термического режима водоемов параметризация может использоваться для оценки коэффициента экстинкции солнечного излучения. При разработке моделей функционирования водных экосистем новая параметризация может применяться для оценки толщины трофогенного слоя, а также при оценке первичной продукции фитопланктона. При этом необходимо отметить, что представленная параметризация при моделировании ГТД процессов в водоемах несколько усложняет проблему, поскольку подразумевает введение в число переменных модели биомассы фитопланктона, которая не относится к числу ГТД переменных, что ведет к «утяжелению» модели. С этой точки зрения более предпочтительным выглядит подход, изложенный в [25]. Если же речь идет о моделировании водных экосистем, то в данном случае параметризация не только не вносит дополнительных сложностей, но наоборот, позволяет упростить оценку образования органического вещества в процессе фотосинтеза фитопланктона.

Авторы выражают благодарность М.М. Мельник (Санкт-Петербургский филиал ВНИРО (ГосНИОРХ им. Л.С. Берга)), Е.В. Протопоповой

и С.Г. Каретникову (ИНОЗ РАН СПб ФИЦ РАН), а также Г.Б. Кириллину и К. Энгельгардту (IGB, Берлин, ФРГ) за предоставленные для выполнения работы данные натурных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 149 с.
2. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск, 1960. 329 с.
3. Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 248 с.
4. Ладога / Под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.
5. Минеева Н.М. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус, 2009. 279 с.
6. Минеева Н.М. Растительные пигменты в воде Волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004, 156 с.
7. Минеева Н.М. Содержание фотосинтетических пигментов в водохранилищах Верхней Волги (1994–2003 гг.) // Биология внутренних вод. 2006. №1. С. 31–40.
8. Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
9. Секи Х. Органические вещества в водных экосистемах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 199 с.
10. Трифонова И.С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука, 1990. 178 с.
11. Хатчинсон Д. Лимнология. М.: Прогресс, 1969. 591 с.

12. Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 335 с.
13. Buiteveld H. A model for calculation of diffuse light attenuation (PAR) and Secchi depth // *Neth. J. of Aquat. Ecol.* 1995. № 29. P. 55–65.
14. Bukata R.P., Jerome J.H., Kondratyev K.Y., Pozdnyakov D.V. *Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters.* CRC Press. 1995. 362 p.
15. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // *Limnol. Oceanogr.* 1977. № 22. P. 361.
16. Davies-Colley R.J., Vant W.N., Smith D.G. *Colour and Clarity of Natural Waters: Science and Management of Optical Water Quality.* Caldwell, New Jersey: Blackburn Press, 2003. 310 p.
17. Effler S.W., Gelda R.K., Bloomfield J.A., Johnson D.L. 2001. Modeling the effects of tripton on water clarity: Lake Champlain // *J. Water Resour. Plan. Manage.* – ASCE 127. 2001. P. 224–234
18. Effler S.W., Perkins M. *Limnological and Engineering Analysis of a Polluted Urban Lake* / Ed. S.W. Effler. New York: Springer Ser. Environ. Manage. Springer-Verlag, 1996. 832 p.
19. Gieskes W.W.C., Veth C., Woehrmann A., Graefe M. Secchie disk visibility world record shattered // *Eos.* 1986. № 68. P. 123.
20. Goericke R., Welschmeyer N.A. Response of Sargasso Sea phytoplankton biomass, growth rates and primary production to seasonally varying physical forcing // *J. Plankton Res.* 1998. V. 20. № 12. P. 2223–249. <https://doi.org/10.1093/plankt/20.12.2223>
21. Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. et al. On the parameterization of phytoplankton primary production in water ecosystem models // *J. Phys. Conf. Ser.* 2131 032079. 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032079>
22. Hakanson L. Models to Predict Secchi Depth in Small Glacial Lakes // *Aquat. Sci.* 1995. № 57. P. 31–53.
23. Hakanson L., Bouillon V.V. A model to predict how individual factors influence Secchi depth variations among and within lakes // *Int. Rev. Hydrobiol.* 2003. № 88. P. 212–232.
24. Hedström K.S. *Technical manual for a coupled sea-ice/ocean circulation model.* New Brunswick, NJ: Rutgers Univ. Rep., 2000. 110 p.
25. Lee Z., Shang S., Du K., Lin G., Liu T., Zoffoli L. Estimating the transmittance of visible solar radiation in the upper ocean using Secchi disk observations // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2019. № 124. P. 1434–1444. <https://doi.org/10.1029/2018JC014543>
26. Lewis M.R., Carr M., Feldman G., Esaias W., McMclain C. Influence of penetrating solar radiation on the heat budget of the equatorial Pacific Ocean // *Nature.* 1990. № 347 (6293). P. 543–545. <https://doi.org/10.1038/347543a0>
27. Margalef R. Typology of reservoirs // *Verh. Int. Ver. Limnol.* 1975. V. 19. № 3. P. 1847–1848.
28. Mellor G.L. *Users guide for a threedimensional, primitive equation, numerical ocean model.* Princeton, NJ: Princeton Univ. Rep., 2002. 42 p.
29. Oberhuber J.M. Simulation of the Atlantic circulation with a coupled sea ice-mixed layer-isopycnal general circulation model. Part I: Model description // *J. Phys. Oceanogr.* 1992. № 23. P. 808–829.
30. Poole H.H., Atkins W.R.G. Photo-electric measurement of submarine illumination throughout the year // *J. Mar. Biol. Assoc.* 1929. № 16. P. 297–324.
31. Talling J.F. Comparative laboratory and field studies of photosynthesis by a marine planktonic diatom // *Limnol. Oceanogr.* 1960. V. 5. № 1. P. 62–77.
32. Sathyendranath S., Gouveia A.D., Shetye S.R., Ravindran P., Platt T. Biological control of surface temperature in the Arabian Sea // *Nature.* 1991. № 349 (6304). P. 54–56. <https://doi.org/10.1038/349054a0>
33. Swift T.J., Perez-Losada J., Schladow S.G., Reuter J.E., Jassby A.D., Goldman C.R. Water clarity modeling in Lake Tahoe: Linking suspended matter characteristics to Secchi depth // *Aquat. Sci.* 2006. № 68. P. 1–15 <https://doi.org/10.1007/s00027-005-0798-x>
34. Van Duin E.H.S., Blom G., Los F.J., Maffione R., Zimmerman R., Cerco C.F., Dortch M., Best E.P.H. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth // *Hydrobiologia.* 2001. № 444. P. 25–42.
35. Weidemann A.D., Bannister T.T. Absorption and scattering coefficients in Irondequoit Bay // *Limnol. Oceanogr.* 1986. № 31. P. 567–583.
36. Westlake D.F., Adams M.S., Bindloss M.E. et al. *Primary production // The Functioning of Freshwater Ecosystems.* IBP 22. Cambridge: Univ. Press, 1980. P. 141–246.