

ФИЗИКА

УДК 535

Влияние ветровых течений на спектральный показатель ослабления света в воде*

*О.Б. Акулова¹, Т.В. Андрухова², В.И. Букатый¹, А.А. Коломейцев¹,
К.В. Марусин¹, О.М. Фроленков¹*

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

²Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Influence of Wind Currents on Spectral Light Attenuation in Water

*O.B. Akulova¹, T.V. Andrukova², V.I. Bukatyi¹, A.A. Kolomeitsev¹,
K.V. Marusin¹, O.M. Frolenkov¹*

¹Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (Barnaul, Russia)

²Altai State University (Barnaul, Russia)

Рассмотрена зависимость измеряемых спектральных показателей ослабления света природной водой от ветрового течения на примере озер юга Западной Сибири. С целью определения значимости абиотических, в данном случае — физических факторов, влияющих на прозрачность воды, авторами рассчитаны относительные спектральные вклады отдельных ее оптически активных компонентов в изучаемых пресноводных озерах, выполненные в период гидрофизических исследований в 2019 г. Кроме того, были проанализированы опубликованные данные по суточной динамике спектральной прозрачности воды, полученные сотрудниками ИВЭП СО РАН на оз. Красиловское в 2016 г. Показано, что наибольший спектральный вклад в суммарное ослабление света в рассматриваемых водоемах вносит взвесь, состоящая преимущественно из частиц водорослей фитопланктона, и желтое вещество. Это обусловлено тем, что перераспределение концентрации частиц в верхних слоях озера по его вертикали вследствие вызываемого ветром турбулентного перемешивания происходит со значительно большей скоростью, чем изменение содержания желтого вещества в результате физико-химических процессов его образования. Следовательно, определяющим фактором, влияющим на динамику показателя ослабления света, является скорость ветрового течения.

The paper deals with wind current dependences of spectral light attenuation measured in natural waters of lakes in the south of West Siberia. To reveal the significance of abiotic, i.e., physical factors affecting water transparency, we calculate relative spectral contributions of individual optically active water components in freshwater lakes established during hydrophysical research of 2019. In addition, the published data on the daily dynamics of spectral water transparency obtained by researchers of IWEP SB RAS for Lake Krasilovskoye in 2016 are partially analyzed. The greatest spectral contribution to the total light attenuation falls on suspension consisting mainly of phytoplankton algae particles and yellow matter. Wind current velocity is a determining factor affecting light attenuation dynamics because the upward redistribution of particle concentration in upper layers of the lake caused by wind-induced turbulent mixing occurs faster than the change in the yellow matter content as a result of physical-chemical processes responsible for its formation. In such cases, the intensity of turbulence (turbulent mass exchange) is usually characterized by flow (integral) Richardson number Ri , which is directly dependent on wind current velocity. In our experiment, Ri equals to 1.5.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (№ гос. регистрации проекта АААА-А17-117041210241-4).

В подобных случаях интенсивность турбулентности (турбулентный массообмен) принято характеризовать потоковым (интегральным) числом Ричардсона Ri , непосредственно зависящим от скорости ветрового течения. В работе приведена оценка числа Ричардсона, равного 1,5, для конкретного эксперимента.

Ключевые слова: показатель ослабления света, показатель поглощения света желтым веществом, ветровые течения, ветровой коэффициент, метод поверхностных поплавков.

DOI 10.14258/izvasu(2020)4-01

Введение

Течения во внутренних водоемах (озерах, водохранилищах) — это сложный процесс, который зависит от множества причин (ветер, сток рек, выпадающих в озеро, неравномерное распределение температуры и минерализации воды, а также атмосферное давление). Более 100 лет проходят исследования течений на озерах [1], существуют следующие виды течений в них: *ветровые* (дрейфовые), *компенсационные*, *сток-овые*, *плотностные*, *инерционные* [2–6].

В работе [7] было показано, что спектральная прозрачность воды, следовательно, и спектральный показатель ослабления света в изучаемых пресноводных озерах Алтайского края зависят в основном от содержания в них двух оптически активных компонентов воды — взвеси, состоящей преимущественно из клеток водорослей фитопланктона и растворенного органического (желтого) вещества. Таким образом, пространственно-временная динамика концентрации вышеуказанных компонентов воды под действием биотических и абиотических факторов, в особенности при гидрофизическом воздействии, рассмотренных в работах [8–11], приводит к существенному изменению показателя ослабления света в естественных водоемах суши.

Как показали эксперименты и модельные расчеты [9–11], главным определяющим механизмом тепло-массопереноса в озерной воде является турбулентная диффузия, приводящая к вертикальному турбулентному перемешиванию в верхнем слое водоема, в пределах которого концентрация фитопланктона является одинаковой. При этом следует иметь в виду, что коэффициенты вертикального турбулентного обмена существенно зависят от скорости ветрового течения.

Основной целью работы является исследование влияния скорости ветровых течений на показатель ослабления света для прогнозных расчетов гидрооптических характеристик в пресноводных водоемах. Апробация предложенного подхода проведена на примере ряда озер Алтая.

Материалы и методы исследования

Исследования гидрооптических характеристик — показателя ослабления света водой $\varepsilon(\lambda)$, показателя поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ и отно-

Key words: light attenuation index, coefficient of light absorption by yellow matter, wind currents, wind coefficient, surface float method.

сительной прозрачности Z , измеренной с помощью диска Секки, провели по акватории *Телецкого озера* (координаты: между $51^{\circ}21'46''$ и $51^{\circ}48'36''$ N, между $87^{\circ}14'40''$ и $87^{\circ}50'54''$ E) в период со 2 по 4 июля 2019 г. Отбор проб воды с поверхностного слоя (глубина — 10–15 см, т.е. расстояние от границы раздела вода — атмосфера) озера брали батометром с борта научно-исследовательского судна. В лаборатории провели 504 отдельных измерения спектральной прозрачности (коэффициента пропускания) воды в области спектра 400–800 нм на спектрофотометре; использовали стеклянные кюветы с рабочей длиной 50 мм.

Отбор проб воды с поверхностного слоя озера *Лана* (координаты: $53^{\circ}37'088''$ N, $83^{\circ}83'215''$ E) осуществили 13 августа 2019 г., озера *Красилоское* (координаты: $53^{\circ}18'771''$ N, $84^{\circ}35'447''$ E) — 14 октября 2019 г. Здесь провели 228 измерений спектральной прозрачности воды; применили кварцевые кюветы с рабочей длиной 10 мм.

Спектрофотометрический метод определения спектральной прозрачности воды. Спектральные измерения провели в лаборатории с помощью спектрофотометра типа ПЭ-5400УФ. Для всех проб выполнили по два измерения (до и после их фильтрации через мембраны «Владипор» с диаметром пор 0,22 мкм) в диапазоне 400–800 нм с шагом 30 нм. Для определения спектральной прозрачности (коэффициента пропускания) воды применили спектрофотометрический метод, в основу которого, как известно, положен принцип измерения отношения двух интенсивностей световых потоков, проходящих через объемы с исследуемой и эталонной средами. В качестве последней использовали дистиллированную воду высокой очистки — контрольный образец, по отношению к которому производили измерения. Расчеты $\varepsilon(\lambda)$ (при натуральном основании логарифма) провели по формуле

$$\varepsilon(\lambda) = (1/L) \cdot \ln(1/T(\lambda)), \quad (1)$$

вытекающей из закона Бугера, где L — длина кюветы; $T(\lambda) = I(\lambda) / I_0(\lambda)$ — прозрачность в относительных единицах; $I(\lambda)$, $I_0(\lambda)$ — интенсивности прошедшего и падающего света, соответственно, λ — длина волны све-

та. Показатель поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ определили после измерения спектральной прозрачности исследуемой озерной воды, очищенной от взвеси фильтрованием с использованием мембран «Владипор». Максимальная абсолютная погрешность измерений $\varepsilon(\lambda)$ и $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ для озер Лапа и Красиловское составила $0,5 \text{ м}^{-1}$, для озера Телецкое — $0,1 \text{ м}^{-1}$.

Необходимо иметь в виду, что течения во внутренних водоемах в зависимости от скорости перемещения водных масс могут приводить к заметному изменению прозрачности как с течением времени, так и на разных глубинах. В связи с этим представляет интерес оценка влияния спектрального вклада оптически активных компонентов воды на суммарный показатель ослабления света.

Относительный спектральный вклад оптически активных компонентов озерной воды (взвеси, желтого вещества, хлорофилла «а» и чистой воды) в $\varepsilon(\lambda)$ в поверхностном слое исследуемых водоемов рассчитали с использованием модифицированной спектральной модели показателя ослабления света [12], которая впервые предложена О.В. Копелевичем в работе [13] и имеет вид

$$\varepsilon(\lambda) = \kappa_{\text{хл}}(\lambda) + \kappa_{\text{жв}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda) + \sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \kappa_{\text{чв}}(\lambda), \quad (2)$$

где $\kappa_{\text{хл}}(\lambda)$ и $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ — спектральные показатели поглощения хлорофиллом «а» и желтым веществом соответственно; $\sigma_{\text{мол}}(\lambda)$ — спектральный показатель молекулярного рассеяния чистой водой; $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ — спектральный показатель рассеяния взвесью; $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$ — спектральный показатель поглощения чистой водой. При анализе выражения (2) необходимо иметь в виду, что при экспериментальном определении $\varepsilon(\lambda)$ можно получить неверный результат в зависимости от функциональных особенностей прибора. В нашем приборе (спектрофотометр ПЭ-5400УФ) при измерениях $T(\lambda)$ используется однолучевая фотометрическая схема, когда сравнивается световой поток, прошедший через эталонный образец (чистая вода), и световой поток, прошедший через исследуемую среду. Поэтому вычисляемый нами показатель ослабления по формуле (1) не содержит данные о показателе ослабления чистой водой $\varepsilon_{\text{чв}}(\lambda) = \kappa_{\text{чв}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda)$. Таким образом, в формуле (2) значения $\varepsilon(\lambda)$, полученные из измерений на спектрофотометре, должны суммироваться со значениями $\varepsilon_{\text{чв}}(\lambda)$, взятыми из справочных данных [14, 15], что и выполнено в наших исследованиях.

Показатель поглощения хлорофиллом «а» рассчитали по формуле, взятой из работы [13]

$$\kappa_{\text{хл}}(\lambda) = \kappa_{\text{уд.хл}}(\lambda) \cdot C_{\text{хл}}. \quad (3)$$

Здесь $C_{\text{хл}}$ — концентрация хлорофилла «а», в $\text{мг}/\text{м}^3$, $\kappa_{\text{уд.хл}}(\lambda)$ — удельный показатель поглощения хлорофиллом «а», в $\text{м}^2/\text{мг}$, его значения приведены в рабо-

те [13]. Для расчетов $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$ использовали табличные данные из работы [14], для $\sigma_{\text{мол}}(\lambda)$ — [15].

Как следует из выражения (2), спектральное ослабление света описано с помощью трехпараметрической модели. В отличие от ранее выполненных работ [13], где параметр $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ определяется экспериментально, а $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ находится как разность между измеренным $\varepsilon(\lambda)$ и суммой остальных параметров, нами рекомендован другой подход. Так как в эксперименте определяли параметр $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$, то спектральный показатель рассеяния взвесью $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ можно найти из выражения (2) по формуле [12]:

$$\sigma_{\text{вз}}(\lambda) = \varepsilon(\lambda) - [\kappa_{\text{хл}}(\lambda) + \kappa_{\text{жв}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda) + \kappa_{\text{чв}}(\lambda)]. \quad (4)$$

Определение скоростей течения при помощи поверхностных поплавков. Поплавочный метод измерения течений основан на определении положения в пространстве и во времени поплавков, движущихся с поверхностными водами в потоке. Для измерения характеристик течений используются различного типа полавки, которые могут запускаться как на водную поверхность, так и на требуемую глубину. Скорость течений принимается равной скорости движения полавка, определяемой по времени прохождения им определенного расстояния. Она является осредненной для участка потока по траектории движения полавка. В нашем случае поверхностные полавки изготовили в виде прямоугольников толщиной 5 см, отпиленных от торца соснового бревна диаметром 20 см. Подробно методика измерений представлена в [16].

Расчетные соотношения между скоростями ветрового течения и ветра можно записать в виде эмпирической зависимости, предложенной Экманом [3]:

$$V_0 = \frac{A \cdot W}{\sqrt{\sin \varphi}}, \quad (5)$$

где V_0 — скорость поверхностного ветрового течения; W — скорость ветра; A — ветровой коэффициент; φ — географическая широта точки измерений. Значение ветрового коэффициента может изменяться в широких пределах, но обычно он расположен в диапазоне 1,0–1,7.

Среднюю скорость однонаправленного ветрового течения на вертикали рассчитали по эмпирической формуле [3]

$$V_{\text{cp}} = 0,35 \cdot V_0 \left[2 - \lg \frac{H}{\lambda_0} \right], \quad (6)$$

где V_{cp} — средняя скорость однонаправленного ветрового течения на вертикали; H — глубина, на которой проводятся измерения; λ_0 — длина волны

ветрового волнения; 0,35 — эмпирический коэффициент.

Волновое движение, или по-другому — ветровое волнение, в соответствии с предположением классической гидродинамики появляется при кратковременном действии на водную поверхность, например, порыва ветра. При этом можно записать

$$\lambda_0 = \frac{gT^2}{2\pi}, \quad (7)$$

где g — ускорение свободного падения; T — период волны.

Для оценки влияния скорости ветрового течения на показатель ослабления света можно воспользоваться следующим методическим подходом [9]. Показателем неоднородности вертикального профиля концентрации фитопланктона N может служить коэффициент вариации B , который рассчитали по формуле [9]

$$B = \frac{a}{\bar{N}} = \frac{1}{\bar{N}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n}}, \quad (8)$$

где a — среднеквадратичное отклонение концентрации фитопланктона; \bar{N} — средняя концентрация водорослей фитопланктона в перемешанном слое толщиной H ; N_i — измеренная концентрация водорослей фитопланктона на глубине z ; n — количество эмпирических точек, по которым строится вертикальный профиль. Для характеристики интенсивности турбулентности, с которой связаны особенности вертикального распределения концентрации фитопланктона в верхнем слое озера, может быть использовано число Ричардсона Ri , являющееся интегральным показателем интенсивности турбулентного перемешивания в слое $0 < z < H$ [9]

$$Ri = (g\Delta\rho)H/V_0^2, \quad (9)$$

где $\Delta\rho$ — перепад плотности в термоклин; ρ — плотность воды; g — ускорение свободного падения; z — вертикальная координата, V_0 — скорость ветрового течения на водной поверхности.

В работе [9] на основе статистической обработки для аппроксимации эмпирических данных была получена формула

$$B = 0,8 - 0,75Ri^{-1}, \quad (10)$$

связывающая вертикальное распределение фитопланктона с интенсивностью перемешивания в верхнем слое водоема.

Результаты и обсуждение

За исследуемый период значения спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ (рассчитан при натуральном

основании логарифма) в диапазоне 400–800 нм в пробах воды, отобранных на различных глубинах озера Лапа (13 августа 2019 г.), варьировались в широких пределах: 3,9–63,7 м⁻¹. В октябре 2019 г. на озере Красиловское значения $\varepsilon(\lambda)$ находились в диапазоне 4,2–16,8 м⁻¹. Среднее значение относительной прозрачности, измеренной с помощью диска Секки за исследуемый период, составило для озер Лапа и Красиловское 160 и 130 см соответственно. В результате расчетов относительного спектрального вклада основных оптически активных компонентов воды (чистой воды, взвеси, желтого вещества и хлорофилла) получено, что максимальный вклад в $\varepsilon(\lambda)$ на озерах Лапа и Красиловское вносит желтое вещество (ЖВ) и взвесь.

На Телецком озере в различных точках отбора проб значения $\varepsilon(\lambda)$ в области спектра 400–800 нм за исследуемый период находились в диапазоне: 0,2–4,5 м⁻¹, $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ — 0,1–3,9 м⁻¹ (рассчитаны при натуральном основании логарифма). Например, на длине волны 430 нм значения $\varepsilon(\lambda)$ варьировались в пределах 1,2–4,0 м⁻¹, на $\lambda=550$ нм — 0,4–2,6 м⁻¹. Величины относительной прозрачности, измеренной с помощью диска Секки за исследуемый период, находились в диапазоне 0,8–11,0 м со средним значением 5,9 м.

В результате расчетов спектрального вклада оптически активных компонентов озерной воды в спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ для поверхностного слоя озера Телецкое в различных точках отбора проб получено, что наибольшее оптическое влияние на суммарное ослабление оказывают также желтое вещество и взвесь.

Наиболее наглядно можно проанализировать влияние скорости ветра на показатель ослабления света на примере суточной динамики $\varepsilon(\lambda)$ при $\lambda=430$ нм в ходе эксперимента на оз. Красиловское (18–19 июля 2016 г.) [8]. Как следует из рисунка (см. стр. 15) работы [8], с 8:00 до 20:00 временное изменение величины $\varepsilon(\lambda)$ в поверхностном слое и на глубинах 1 и 2 м практически отсутствует в пределах погрешности измерений 0,5 м⁻¹. Скорость ветра в это время изменялась от 3 до 5 м/с, измеренный при этом ветровой коэффициент A (полученный по нашим данным 14.10.2019) составлял 1,7. Практическое присутствие скорости ветра в указанный период измерений (18–19 июля 2016 г.) приводило к турбулентному перемешиванию воды в верхних слоях озера и, как следствие, к практическому постоянству показателя ослабления света за счет одинаковости концентрации водорослей фитопланктона в вышеуказанной области. Ранее было показано [8], что из результатов расчета спектрального вклада основных оптически активных компонентов воды в $\varepsilon(\lambda)$ следует вывод, согласно которому основное влияние (до 80 %) на спектральную прозрачность оказывает взвесь, в данном случае клетки водорослей фитопланктона. Необходимо иметь в виду, что в нашем случае наряду с турбулентным перемешиванием в верхних слоях озера, влияющим на прозрачность, оседание частиц взвеси под воздействием силы тяжести также при-

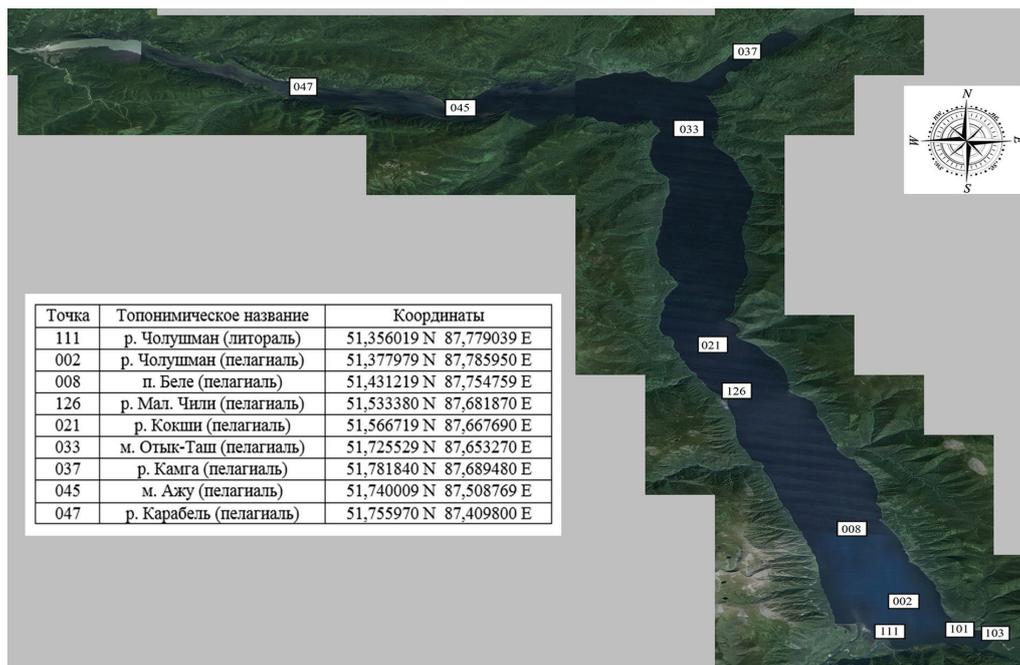


Рис. Схема расположения точек измерений скорости ветровых течений на Телецком озере 2–4 июля 2019 г.

водит к изменению показателя ослабления света. В то же время скорость ветрового течения, измеренная в октябре 2019 г. на оз. Красиловское и равная 6 см/с, почти на порядок превышала скорость оседания клеток сине-зеленых водорослей фитопланктона за счет силы тяжести. Таким образом, преобладающим фактором, влияющим на $\epsilon(\lambda)$, является турбулентное перемешивание, обусловленное ветром. Аналогичный характер зависимости от W можно ожидать для оз. Лапа, в котором измерена (13.08.2019 г.) $V_0=4$ см/с при скорости ветра 3 м/с, расчетный ветровой коэффициент составил 1,3.

Далее, как следует из рисунка [8], на глубинах 3 м и ниже, вплоть до 6 м, наблюдается область резкого увеличения показателя ослабления света, что связано с увеличением концентрации частиц взвеси за счет оседания и отсутствия действия процесса турбулентного перемешивания в данной зоне.

Таким образом, в процессах измерения $\epsilon(\lambda)$ требуется контроль скорости ветра, так как наличие ветрового течения существенно меняет компонентный

состав водной среды. Для нахождения области измерений показателя ослабления света, в которой следует учитывать влияние ветра, необходимо обеспечивать данные по скорости ветровых течений и ветровых коэффициентов в месте наблюдений.

В таблице представлены результаты измерений параметров ветровых течений на Телецком озере в июле 2019 г., а также данные расчетов ветровых коэффициентов, являющихся опорными и объективными характеристиками для описания аналитической связи между скоростями ветра и ветрового течения в различных точках измерений по акватории Телецкого озера. В соответствии с этими данными можно оценить скорости ветрового течения, не прибегая к его инструментальному определению, при наличии измеренной скорости ветра и ветрового коэффициента. Это позволяет рассчитывать числа Ричардсона для прогнозной оценки интенсивности турбулентного перемешивания в поверхностных слоях пресноводных водоемов и ее влияния на измеряемые показатели ослабления света.

Таблица

Результаты измерений скорости ветровых течений на озере Телецкое (2–4 июля 2019 г.)

Дата	Текущее время	Точка измерений	Топонимическое название	Расстояние, м	Время измерений, с	Скорость ветрового течения, м/с	Скорость ветра, м/с	Ветровой коэффициент
02.07.2019	11:16	111	р. Чолушман (литораль)	28,5	470	0,06	2,8	1,9
02.07.2019	12:07	002	р. Чолушман (пелагиаль)	137,6	1200	0,11	4,9	2,2
02.07.2019	15:27	008	п. Беле (пелагиаль)	236,4	979	0,24	3,2	6,7
03.07.2019	10:03	126	р. Мал. Чили (пелагиаль)	51,7	491	0,11	5,9	1,6
03.07.2019	12:23	021	р. Кокши (пелагиаль)	51,2	630	0,08	5,2	1,4
03.07.2019	18:40	033	м. Отык-Таш (пелагиаль)	48,1	379	0,13	3,2	3,6
04.07.2019	09:59	037	р. Камга (пелагиаль)	25,2	385	0,07	5,2	1,5
04.07.2019	14:23	045	м. Ажу (пелагиаль)	47,5	488	0,10	2,7	3,3
04.07.2019	16:13	047	р. Карабель (пелагиаль)	82,7	615	0,13	4,6	2,5

Выводы

На основе модифицированной спектральной модели показателя ослабления света природной водой рассчитаны относительные спектральные вклады оптически активных ее компонентов на примере ряда озер юга Западной Сибири. Расчеты показали, что наибольший спектральный вклад в суммарное ослабление света в данных водоемах вносят взвесь и желтое вещество. Проанализировано влияние ветрового течения на суточную динамику показателя ослабления света. Представлены результаты исследований ветровых течений с использованием метода

поверхностных поплавков, измерений скорости ветра и расчетных ветровых коэффициентов для прогнозных оценок влияния ветровых течений на гидрооптические характеристики пресноводных водоемов, проведенных в 2019 г.

Для прогнозных оценок влияния ветровых течений на гидрооптические характеристики пресноводных водоемов приведены результаты проведенных в 2019 г. на вышеуказанных озерах исследований ветровых коэффициентов, скорости ветра и ветровых течений с использованием метода поверхностных поплавков.

Библиографический список

1. Щевьев В.А. Физика течений в океанах, морях и в озерах. История поисков, размышлений, заблуждений, открытий. Saarbruken, Germany, 2012.
2. Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Т. 1. Гидрофизика. М., 2002.
3. Судольский А.С. Динамические явления в водоемах. Л., 1991.
4. Самолюбов Б.И. Придонные стратифицированные течения. М., 1999.
5. Одрова Т.В. Гидрофизика водоемов суши. Л., 1979.
6. Шулейкин В.В. Физика моря. М., 1968.
7. Суторихин И.А., Букатый В.И., Харламова Н.Ф., Акулова О.Б. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края : монография / отв. ред. В.Н. Седалищев. Новосибирск, 2016.
8. Суторихин И.А., Букатый В.И., Фроленков О.М., Фроленков И.М. Влияние водной взвеси на суточный ход спектральной прозрачности озерной воды // Ползуновский альманах. 2016. № 2.
9. Крейман К.Д., Голосов С.Д., Сквородова Е.П. Влияние турбулентного перемешивания на фитопланктон // Водные ресурсы. 1992. № 3.
10. Картушинский А.В. Влияние суточной изменчивости абиотических условий на распределение и продуцирование фитопланктона оз. Байкал // Водные ресурсы. 1997. Т. 24. № 1.
11. Картушинский А.В. Численное моделирование эффектов гидрофизического воздействия на распределение фитопланктона // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 1. № 1.
12. Акулова О.Б. Разработка методов и измерительно-вычислительного комплекса для оценки экологически значимых гидрооптических характеристик пресноводных водоемов (на примере озер Алтайского края) : дис. ... канд. тех. наук. Барнаул, 2015.
13. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / под ред. А.С. Монина. М., 1983.
14. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Applied Optics. 1997. V. 36. № 33. DOI: 10.1364/AO.36.008710.
15. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // Applied Optics. 1981. V. 20. № 2. DOI: 10.1364/AO.20.000177.
16. Базыленко Г.М., Лопух П.С. Гидрологическая практика: для студентов-географов / под ред. Б.Б. Богословского. Минск, 1979.