

## ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА С УЧЁТОМ ДИСПЕРСНОСТИ ГИДРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ВОДОЁМА (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА- СТАРИЦЫ ЛАПА АЛТАЙСКОГО КРАЯ)

И.А. Суторихин, В.И. Букатый, А.В. Котовщиков, О.Б. Акулова

Приведены результаты измерений спектральной прозрачности в диапазоне длин волн 400–1000 нм в осенне-зимний период 2011–2012 гг. Изучена взаимосвязь между спектральной прозрачностью и концентрацией хлорофилла *a*, определяемой стандартным экстрактным методом. Проведено сравнение эмпирических зависимостей прозрачности по диску Секки от содержания хлорофилла, приведённых из литературных данных для различных типов водоёмов, с полученными данными наших спектральных измерений. Проведён анализ полученных экспериментальных данных с учётом дисперсного состава гидрозолей.

**Ключевые слова:** спектральная прозрачность, показатель ослабления света, гидрозоль, фитопланктон, хлорофилл

### Введение

В последнее время во многих странах всё больший интерес приобретает проблема мониторинга состояния водоёмов, расположенных в городской черте. В пределах именно таких территорий отмечается большинство случаев антропогенного загрязнения водных объектов, особое место среди которых занимают озёра.

На территории Алтайского края озёра в гидрооптическом отношении изучены совершенно недостаточно. В связи с этим требуются дополнительные исследования в данной области, а именно, изучение сезонной динамики спектральной прозрачности, а также влияние на неё дисперсной структуры водорослей фитопланктона.

Для целей экологического мониторинга водоёмов активно используется изучение фитопланктона, который оказывает непосредственное влияние на качество воды, благодаря структуре и функциональным особенностям определяет состояние водных экосистем в целом. Содержание фотосинтетических пигментов – важная и ёмкая характеристика фитопланктона. Основным пигмент зелёных растений – хлорофилл *a* благодаря своим уникальным свойствам и надёжным инструментальным методикам определения позволяет получить однозначную информацию об интенсивности фотосинтеза и биомассе фитопланктона, характеристиках качества воды, наличии химических загрязнений [1–3].

В настоящее время в исследовании водных экосистем оперативно разрабатывается и активно применяется на практике спек-

трофотометрический метод определения прозрачности. Необходимо отметить, что в последние годы в научной литературе представлены экспериментальные данные по взаимосвязи между прозрачностью водоёмов и содержанием хлорофилла, в основном, для морей и океанов [1–6]. Подобные исследования для внутренних водоёмов в нашей стране (озёр, водохранилищ, рек и т.д.) проводились лишь эпизодически. Так в лаборатории физики атмосферно-гидросферных процессов ИВЭП СО РАН в последние годы создавалась экспериментальная база и разрабатывались методики по определению спектральной прозрачности и связи с содержанием хлорофилла в фитопланктоне и его дисперсной структурой во внутренних водоёмах Алтайского края [7].

Результаты, полученные различными авторами, зачастую характеризуются разобщённостью и нередко несопоставимостью, что требует проведения дальнейших исследований в этом направлении с учетом комплексной оценки сложных полидисперсных, поликомпонентных водных экосистем.

В гидрооптике часто под прозрачностью понимают глубину видимости погруженного в воду белого диска (диска Секки) до полного исчезновения его изображения. Отметим, что в научной литературе в большинстве случаев приводятся данные о величине прозрачности, измеренной именно этим методом. Но необходимо учитывать, что глубина диска Секки характерна и показательна для оценки трофности лишь в периоды высокой прозрачности вод [8–9]. Погрешность данного метода изме-

ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА С  
УЧЁТОМ ДИСПЕРСНОСТИ ГИДРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ВОДОЁМА (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА-СТАРИЦЫ  
ЛАПА АЛТАЙСКОГО КРАЯ)

няется в различных экспериментах в пределах 8–20%. Под трофностью понимается характеристика водоёма по его биологической продуктивности. В случае интенсивного поступления в водоём полидисперсных частиц взвеси (так называемых гидрозолей), содержащей, главным образом, минеральные взвешенные частицы, определение прозрачности воды может давать ошибочное представление об уровне развития фитопланктона, степень развития которого, в свою очередь, характеризует величину прозрачности в озёрах.

Вышеизложенное послужило основанием для наших исследований, основной целью которых является проведение сезонных измерений спектральной прозрачности воды (на примере озера-старицы Лапа) на различных глубинах и нахождение эмпирической зависимости прозрачности от концентрации хлорофилла. Подобные исследования представляются актуальными, так как между концентрацией хлорофилла *a*, являющимся основным пигментом фитопланктона, и его биомассой, существует прямая зависимость [10–12]. Поэтому, исследуя взаимосвязь между прозрачностью и содержанием хлорофилла, изучая сезонный ход подобной зависимости применительно к внутренним водоёмам определённого типа, можно на основании оперативных данных о прозрачности с большой достоверностью определить трофический статус и биопродуктивность конкретных водных экосистем.

#### Материалы и методы

Материалом для данной работы послужили количественные пробы фитопланктона в осенне-зимний период 2011–2012 гг. на различных глубинах озера-старицы Лапа, принадлежащего к придаточной системе правобережной поймы реки Оби и расположенного в окрестностях г. Барнаула. Озеро является непроточным и сообщается с рекой только в период весеннего половодья. Обработка проб проводилась с использованием стандартных гидробиологических методик. Планктон концентрировали фильтрацией воды из объёма 100–700 мл через мембранные фильтры «Владипор» МФАС-ОС-3 с диаметром пор 0,8 мкм. Концентрацию хлорофилла в ацетоновых экстрактах определяли стандартным спектрофотометрическим методом на длине волны 664 нм согласно ГОСТ 17.1.4.02-90 и методическим рекомендациям. Погрешность определения хлорофилла составила не более 10%.

Измерения спектральной прозрачности воды проводились в лабораторных условиях

на спектрофотометре СФ-46 с погрешностью, равной 0,5%. Имеется мобильный вариант прибора – это измерительно-вычислительный комплекс для определения функции распределения по размерам взвешенных в воде частиц, их среднего размера и концентрации, разработанный проф. Суториным И.А. совместно с аспирантом [7].

В основе разработки оперативного и функционального на практике спектрофотометрического метода определения прозрачности водоемов лежат измерения на спектрофотометре отношений двух световых потоков, прошедших через объёмы эталонного (в нашем случае, дистиллированная вода) и исследуемого образцов.

Водные пробы, взятые на различной глубине (максимальная глубина озера 9 м), помещались в кварцевые кюветы размером 12\*30 мм с длиной пути 12 мм. Спектральная прозрачность измерялась в диапазоне 400–1000 нм. Далее рассчитывалась важная гидрооптическая характеристика – показатель ослабления света  $\varepsilon$  по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{L} \ln I/T, \quad (1)$$

где  $L$  – длина кюветы, равная 12 мм,  $T$  – прозрачность воды. Известно [1], что показатель ослабления света в воде природных водоёмов можно разделить на четыре компонента: 1) показатель ослабления в чистой воде; 2) показатель поглощения растворёнными органическими и неорганическими веществами; 3) показатель ослабления малыми, главным образом, минеральными частицами; 4) показатель ослабления крупными биологическими частицами (водоросли фитопланктона, детрит и пр.).

#### Результаты и обсуждение

В связи с тем, что ослабление света в толще воды в водоёме обусловлено, в основном, поглощением и рассеянием на взвешенных частицах, для оценки оптических характеристик необходимо определить микрофизические параметры гидрозолей.

Известно, что в стоячих и слабопроточных водоёмах, к которым принадлежит изучаемый нами объект, основную часть взвешенного вещества составляют клетки микроскопических водорослей, обитающих в толще воды фитопланктона. В связи с этим нами проводились измерения их размеров с помощью светового микроскопа Nikon Eclipse 80 i., а также определение их счётной (числовой) концентрации. По данным измерений размеры частиц в пробах находились в пределах 1–14 мкм по диаметру в осенний период и

## РАЗДЕЛ I. ТРУДЫ УЧЕНЫХ АЛТАЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

1–6 мкм в зимний период. Типичные гистограммы распределения частиц по диаметрам (D) в озере Лапа приведены на рисунках 1–2.

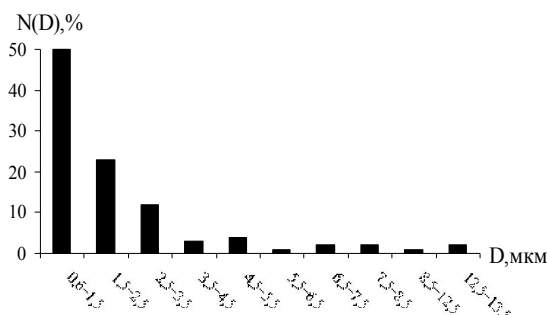


Рисунок 1—Типичная гистограмма распределения частиц фитопланктона по диаметру 13 октября 2011 г.

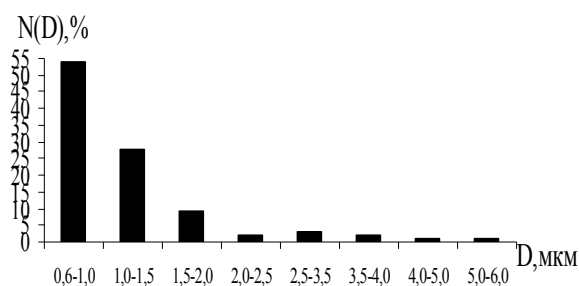


Рисунок 2—Типичная гистограмма распределения частиц фитопланктона по диаметру 15 февраля 2012 г.

Из рисунков 1–2 видно, что в зимний период существенно увеличилась доля мелких частиц водорослей фитопланктона, при этом среднеарифметический диаметр частиц составил 2,17 мкм (осенью) и 1,08 мкм (зимой). Среднее значение счётной концентрации, измеренной с помощью счётной камеры Нажотта объёмом 0,05 мл, составила  $\sim 5 \cdot 10^7$  см<sup>-3</sup>.

На рисунках 3–4 представлены результаты наших расчётов по спектральному показателю ослабления света на различных глубинах озера по данным измерений спектральной прозрачности, проведённых 13.10.2011. и 15.02.12., которые показали, что максимальные значения показателя ослаб-

ления имеют место в пробе воды, отобранной с более глубокого слоя (7,5 м).

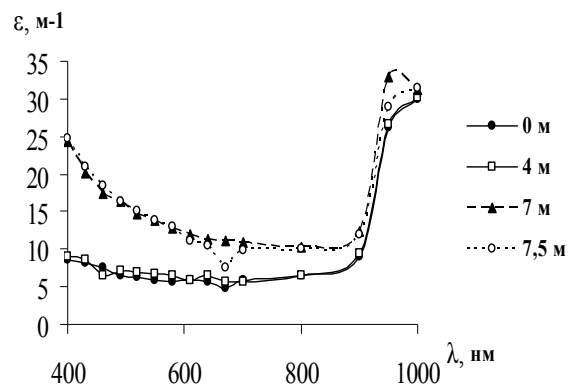


Рисунок 3—Зависимость показателя ослабления от длины волны λ на различных глубинах водоёма в осенний период 2011 г.

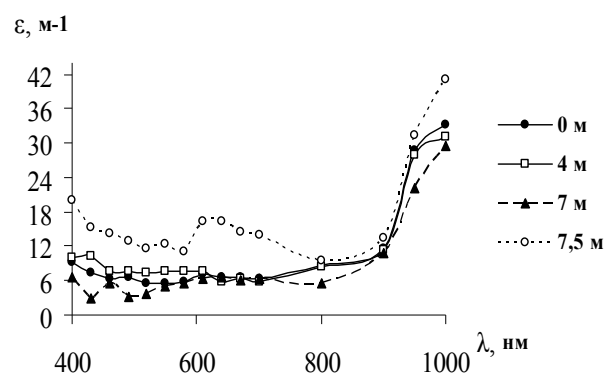


Рисунок 4—Зависимость показателя ослабления от длины волны λ на различных глубинах водоёма в зимний период 2012 г.

Из сравнения рисунков 3–4 видно, что показатель ослабления в зимний период существенно меньше, чем в осенний период в диапазоне длин волн 400–800 нм, что обусловлено, на наш взгляд, уменьшением размеров частиц водорослей фитопланктона.

Для оценки рассеивающих и ослабляющих свойств частиц фитопланктона нами проводились измерения прозрачности воды, как до фильтрации, так и после фильтрации пробы.

На рисунке 5 представлена соответствующая зависимость показателя ослабления в пробах воды в зимний период 2012 г.

ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА С УЧЁТОМ ДИСПЕРСНОСТИ ГИДРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ВОДОЁМА (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА-СТАРИЦЫ ЛАПА АЛТАЙСКОГО КРАЯ)

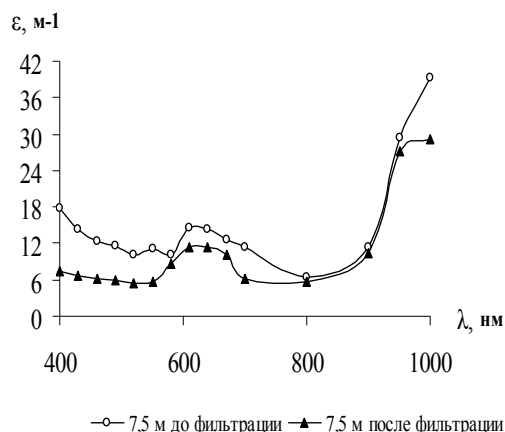


Рисунок 5—Зависимость показателя ослабления от длины волны  $\lambda$  на глубине водоёма 7,5 м в зимний период 2012г.

Разность между показателями ослабления до фильтрации и после фильтрации, характеризующая именно ослабление на частицах с размерами свыше 0,8 мкм, представлена на рисунке 6.

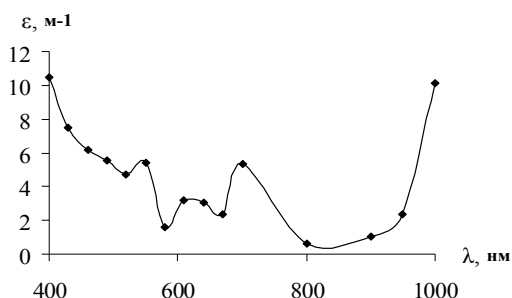


Рисунок 6—Спектральная зависимость разности показателей ослабления до и после фильтрации пробы воды.

Для сравнения с экспериментальными результатами, показанными на рисунке 6 сделаем оценку показателя ослабления  $\epsilon$  в соответствии с формулами, приведёнными в работе [1]. Тогда можно записать

$$\epsilon = N \cdot \pi \cdot D^2 \cdot K(\rho) / 4, \quad (2)$$

где  $N$  – концентрация крупных частиц,  $D$  – их средний диаметр,  $K(\rho)$  – поперечник ослабления света, равный сумме поперечников поглощения и рассеяния,  $\rho$  – дифракционный параметр  $Mi$ ,  $\rho = \pi \cdot D / \lambda$ ,  $\lambda = \lambda^0 / n$ ,  $\lambda^0$  – длина волны в вакууме,  $n$  – показатель преломления воды. Подставляя значения  $N = 5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ ,  $D = 1,08 \text{ мкм}$ ,  $K(\rho) = 0,35$  для длины волны  $\lambda = 400 \text{ нм}$  и  $\rho = 11$  из формулы (2), находим  $\epsilon = 16 \text{ м}^{-1}$ . Таким образом, различия между экспериментальным

значением  $\epsilon$  и расчётным, составило около 30%.

На рисунке 7 показаны результаты измерения концентрации хлорофилла а стандартным методом, которые выявили, что вертикальное распределение содержания пигмента имеет стратифицированный характер с максимумом на глубине 6–7 м, который более чем в два раза превышает значения в вышележащих слоях. При этом содержание разрушенного хлорофилла (феопигментов) в придонном слое достигало 80%, а в верхнем слое составило в среднем 34%.

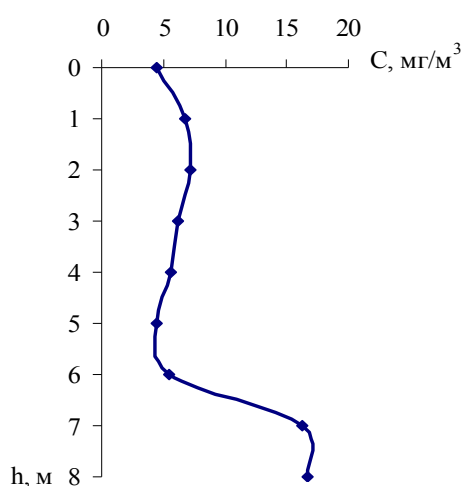


Рисунок 7— Вертикальное распределение содержания хлорофилла а 13.10.2011 г.

На основании результатов измерений, проведённых в период с 13.09.2011. по 13.10.2011., спектральной прозрачности и соответствующих данных по концентрации хлорофилла на рисунке 8 приведена их обобщённая зависимость. Взаимосвязь прозрачности от концентрации хлорофилла а показывает, что при увеличении концентрации хлорофилла в водоёме прозрачность уменьшается.

На рисунке 8 показана аппроксимационная кривая, представляющая собой гауссовую функцию вида

$$T = T_0 + \frac{A}{\omega \sqrt{\pi/2}} e^{-2 \frac{(C-C_c)^2}{\omega^2}}, \quad (3)$$

где  $T_0 = -1,18$ ;  $C_c = 3,16$ ;  $\omega = 75,39$ ;  $A = 196,16$ .

## РАЗДЕЛ I. ТРУДЫ УЧЕНЫХ АЛТАЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

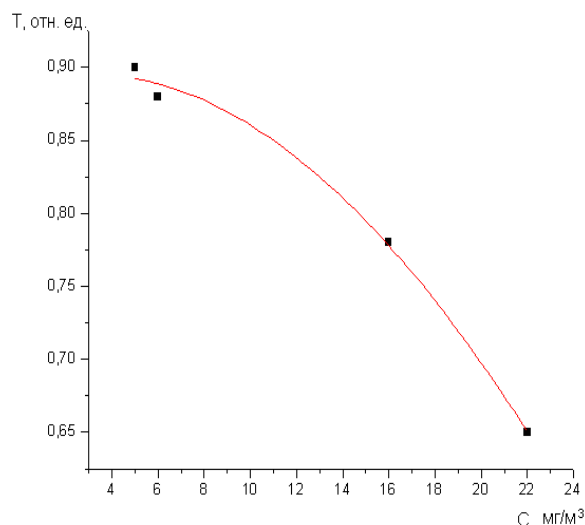


Рисунок 8–Зависимость прозрачности на длине волны 430 нм от концентрации хлорофилла а

Представляет интерес сравнить полученные нами результаты с данными других исследований прозрачности водоёмов по диску Секки. В работах, например, [3,4], посвящённых изучению экспериментальной зависимости оптической прозрачности  $T_b$  (в метрах) по диску Секки от концентрации  $C$  (в мг/м³) для различных водных экосистем используется эмпирическая зависимость вида

$$T_b = \alpha C^{-b}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  и  $b$  – постоянные параметры, различные для отдельных групп водоёма.

Чтобы сравнить наши результаты измерений спектральной прозрачности, воспользуемся уравнением, связывающим прозрачность по диску Секки с показателем ослабления, полученным по формуле (1). Данное уравнение имеет вид [1]

$$T_b = d/\epsilon,$$

где  $d$  – параметр, который для водоёмов в большинстве случаев принимается равным 8. При  $\alpha = 6,46$  и  $b = 1,0$  наши результаты можно описать функцией вида (4).

### Выводы.

Результаты измерений спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла в фитопланктоне озера-старицы показали обратную зависимость величины прозрачности на длине волны 430 нм от концентрации основного фотосинтетического пигмента. Коэффициент корреляции при этом равен – 0,98 и достоверен при  $p = 0,07$ .

Показано существенное влияние дисперсных частиц водорослей фитопланктона на показатель ослабления света в водных пробах.

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН 131. «Математическое и геоинформационное моделирование в задачах мониторинга окружающей среды и поддержки принятия решений на основе данных стационарного, мобильного и дистанционного наблюдения».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шифрин, К.С. Введение в оптику океана./ К.С.Шифрин – Л., 1983.
  2. Кронберг, П. Дистанционное изучение земли./ П. Кронберг – М., 1988.
  3. Бульон, В.В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах/ В.В.Бульон – СПб., 1994.
  4. Мусатов, А.П. Оценка параметров экосистем внутренних водоёмов./ А.П. Мусатов – М., 2001.
  5. Апонасенко, А.Д. Количественная закономерность функциональной организации водных экосистем / А.Д. Апонасенко Автореф. дисс. док.физ.-мат. наук, СПб., 2002.
  6. Апонасенко, А.Д. Связь содержания хлорофилла с биомассой и дисперсной структурой фитопланктона // А.Д. Апонасенко, Л.А. Щур, В.Н.Лопатин Доклады Академии Наук.– 2007. том 412, №5.
  7. Суторихин, И.А. Измерение прозрачности и концентрации хлорофилла в поверхностных водах ./ И.А. Суторихин, В.Ю.Бортников, А.П. Анисимов, А.В. Котовщиков.- Материалы Третьей всероссийской научной конференции с международным участием, Барнаул, 2010.
  8. Бульон, В.В. Первичная продукция планктона и классификация озёр. Продукционно-гидробиологические исследования водных экосистем./ В.В. Бульон – Л., 1987.
  9. Минеева, Н.М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ/ Н.М. Минеева – М., 2004.
  10. Винберг, Г.Г. Первичная продукция водоёмов./ Г.Г. Винберг – Минск., 1960.
  11. Сиренко, Л.А. Определение содержания хлорофилла в планктоне пресных вод./ Л.А. Сиренко, А.В. Курейшевич – Киев, 1982.
  12. Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоёмов // Под ред. И. Л.Пыриной, СПб., 1993.
- Заведующий лабораторией физики атмосферно-гидросферных процессов, д.ф.-м.н., профессор **Суторихин И.А.**, e-mail: [sia@iwep.asu.ru](mailto:sia@iwep.asu.ru); главный научный сотрудник, почётный профессор Алтайского государственного университета, д.ф.-м.н., **Букатый В.И.**, e-mail: [v.bukaty@mail.ru](mailto:v.bukaty@mail.ru) ;Научный со-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2/1, 2012

трудник лаборатории водной экологии **Котовщиков А.В.**, e-mail: [kotovschik@iwep.asu.ru](mailto:kotovschik@iwep.asu.ru) - Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул);

магистрант кафедры геоэкологии и природопользования **Акулова О.Б.**, e-mail: [Akulova8282@mail.ru](mailto:Akulova8282@mail.ru) - Алтайский государственный университет (Барнаул)

УДК: 539.183.5

## О ШИРИНЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

В. А. Попов, П. Ю. Гуляев, Б. В. Семкин

Предложен метод описания экспериментально наблюдаемых уширений спектральных линий. Показано, что в рамках решения единой спектральной задачи, учитывающей ширину спектральных линий, можно описать и кинетические свойства электронов в атомах, кластерах и металлах.

**Ключевые слова:** ширина спектральных линий, моделирование, электронные возбуждения

### Введение

Экспериментальные данные показывают, что во всех случаях атомы и молекулы при переходе из возбужденного состояния в основное испускают целый спектр частот. Причем каждая спектральная линия имеет вполне определенную форму и ширину. Ширина спектральной линии и форма линии зависят как от строения атомов и молекул, так и от внешних воздействий на эти частицы. Даже в том случае, когда на атомы или молекулы не действуют внешние силы, спектральные линии имеют конечную ширину, неустранимую никакими способами. Эта ширина  $\Gamma$  обусловлена соотношением неопределенностей Гейзенберга:  $\Gamma \tau \sim \hbar$ , где  $\Gamma$  – неопределенность уровня с энергией  $E$ ,  $\tau$  – время жизни частицы на этом уровне,  $\hbar$  – постоянная Планка.

Если же атомы или молекулы сталкиваются между собой в процессе теплового хаотического движения, то их энергетические состояния могут изменяться, что приводит к еще большему уширению спектральных линий. Частота излучения при этом будет зависеть еще и от величины и направления скорости движения частиц относительно приемника излучения. Хаотичность теплового движения приводит к тому, что вместо одной частоты, соответствующей идеальному случаю для неподвижных частиц, приемник воспринимает более широкий спектр частот.

Воздействие постоянных магнитных и электрических полей на атомы или молекулы приводит к сдвигу их энергетических уровней и расщеплению на несколько подуровней. Причем каждый из подуровней обладает своей шириной. Перекрываясь, они образуют спектральную линию большей ширины. При воздействии на атомы или молекулы электромагнитной волной с частотой, равной частоте квантового перехода, наблюдается ре-

зонансное поглощение, если населенность нижнего уровня перехода больше, чем населенность верхнего уровня, и вынужденное излучение, если верхний уровень населен больше, чем нижний. Отмеченное насыщение спектральной линии сопровождается увеличением амплитуды волны, что приводит к уширению этой спектральной линии.

Отметим, что в кристаллах, в отличие от атомов и молекул, уширение спектральных линий происходит за счет колебаний кристаллической решетки, сильно зависит от нарушений периодической структуры, от примесей, вакансий и других дефектов.

В работе поставлена задача: в рамках единого подхода *ab initio* описать весь спектр испускания и поглощения атомов, молекул и кристаллов с учетом ширины спектральных линий. Отметим, что идея учитывать ширину энергетических уровней впервые предложена в [1] при вычислении возбужденных волновых функций в атоме водорода. Затем эта идея была использована для описания возбуждений в многоэлектронных атомах [2], в кластерах [3].

### Метод исследования

Рассмотрим сначала стандартное решение спектральной задачи основного состояния многоэлектронного атома:

$$\hat{H}\psi = E\psi \quad (1)$$

Аппроксимация центрального поля позволяет разделить радиальные переменные и угловые, а собственные функции  $\psi$  оператора энергии  $\hat{H}$  искать в виде произведения радиальной функции  $R(r)$  на угловую  $Y(\theta, \varphi)$ :

$$\psi = R(r)Y(\theta, \varphi), \quad (2)$$

причем угловая часть удовлетворяет следующим уравнению:

$$-\Delta Y(\theta, \varphi) = l(l+1)Y(\theta, \varphi). \quad (3)$$