

С.Ф. Карбышев, В.Е. Павлов

Спектральная прозрачность поверхностных вод средней Оби

Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул

Поступила в редакцию 15.11.99 г.

Приводятся результаты измерений спектральных коэффициентов ослабления света в поверхностном слое обской воды на трассе от Томска до устья р. Иртыш. Значения десятичных коэффициентов меняются в пределах от 2,1 до 10,4 (м^{-1}) и заметно варьируют по спектру. Доминирующий желтый цвет воды ниже устья р. Чаи объясняется стоком так называемого желтого вещества из болот Западно-Сибирской низменности и повышенным содержанием железа в минеральных частицах. Оценивается роль крупных и мелких гидрозолей в формировании суммарных коэффициентов ослабления.

Изучение процессов распространения света в природной воде давно уже стало неотъемлемой частью комплексных исследований, проводимых во внешних водоемах – морях и океанах [1–3]. Получен обширный наблюдательный материал, позволяющий формировать соответствующие радиационные модели объектов. В меньшей степени изучены внутренние водоемы – крупные озера и водохранилища [4–7], и практически не исследованы реки и болота. Так, в современной литературе нам не удалось обнаружить сведений об оптических параметрах воды в перечисленных экосистемах для громадной территории Западной Сибири.

В связи с вышесказанным в Институте водных и экологических проблем СО РАН и Алтайском госуниверситете начаты работы по исследованию радиационного режима в водоемах Западной Сибири. Как известно, важнейшей характеристикой, определяющей процесс переноса излучения в мутных средах, является спектральная прозрачность. Для ее измерений была собрана специальная установка, включающая источник света с углом расхождения светового пучка 3° , вертикально расположенную кювету с прозрачным дном и фиксатором уровней заполнения водой, набор интерференционных светофильтров, приемник излучения ФЭУ-62 и регистратор сигнала. Толщина остаточного слоя воды, соответствующая «нулевому» уровню, составляла 3 мм. Диаметр светового пятна на выходе пучка из кюветы не превышал размеров фотокатода. Интерференционные светофильтры имели полуширины полос пропускания около 9 нм и максимумы при 455, 495, 555, 598, 670, 707 и 801 нм. Достоверность получаемых на установке результатов была проверена на опытах с отстоявшейся дистиллированной водой: данные измерений коэффициентов поглощения света оказались хорошо совпадающими с литературными [2, 5, 7].

По предложению директора Международного исследовательского центра физики окружающей среды и экологии ТНЦ СО РАН академика В.Е. Зуева мы приняли участие в комплексном эксперименте «Пойма-99» по обследованию экологического состояния окружающей среды в среднем течении реки Оби на участке от Томска до устья Иртыша. В настоящем сообщении приводятся результаты измерений коэффициентов ослабления света в пробах воды, взятых в поверхностном слое (в среднем с глубины 15 см).

На рис. 1 представлены типичные результаты измерений величины десятичного логарифма отношения световых потоков, соответствующих заполнению кюветы водой до разных уровней, к нулевому уровню – так называемые прямые Бугера. Каждая из них соответствует трехкратному изменению высоты столба в кювете. Указаны экспериментальные ошибки при доверительной вероятности 0,95.

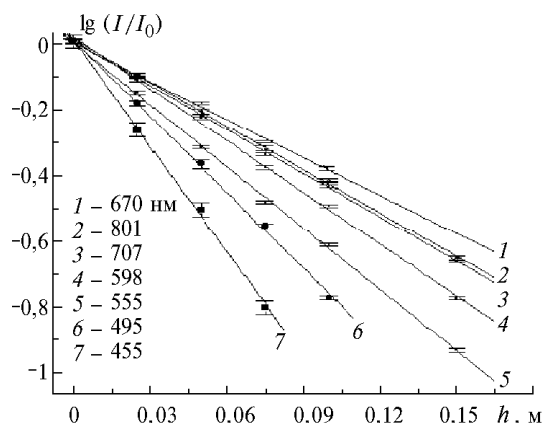


Рис. 1. Пример бугеровских прямых (проба № 5, до фильтрации)

Из рис. 1 видно, что уже 16-сантиметровый слой воды может ослаблять свет более чем на порядок. Обращает на себя внимание отсутствие упорядоченности в расположении прямых в зависимости от длины волны λ . Вряд ли такие спектральные вариации прозрачности связаны с рассеянием света на сложных полимодальных структурах гидрозолей. Скорее всего, они обусловлены наличием в воде окрашенных частиц, имеющих характерные спектральные полосы поглощения. О том, как меняется окраска воды в зависимости от координат места забора пробы, можно судить по данным из табл. 1. В ней также указаны значения температуры t поверхностного слоя и величины рН. Высокая температура верхнего слоя, достигающая 26°C , свидетельствует о сильном поглощении солнечной радиации гидрозолем. Значения рН близки к 7, т.е. ее кислотность почти нормальна.

Таблица 1

Идентификация проб воды

№ проб	Координаты места забора проб	Число /вр. (МСК)	pH воды	t	Местоположение	Цвет воды
1	56 35'48" с.ш. 84 47'02" в.д.	12.07.99/4.00	8,64	25,8	р. Тоть, ~15 км ниже г. Томска	Желто-коричневый
2	56 56'37" 84 25'31"	12.07.99/8.45	8,59	25,4	р. Обь, 300 м ниже устья р. Томи	Серо-зеленый
3	57 43'23" 83 48'31"	13.07.99/11.30	7,91	25,5	р. Обь, 700 м ниже устья р. Чулым	Серо-коричневый
4	58 17'45" 83 00'08"	14.07.99/5.13	7,81	25,5	р. Обь, ~10 км выше г. Колпашево	Светло-коричневый
5	58 33'44" 82 12'04"	15.07.99/7.11	7,62	25,8	р. Обь между устьями рек Чулым и Кеть	Красно-бурый
6	59 03'43" 80 52'13"	16.07.99/6.15	7,87	26,4	р. Обь, напротив пристани п. Каргасок	Темно-желтый
7	59 06'29" 80 44'32"	18.07.99/9.24	7,65	25,6	р. Обь, 500 м ниже устья р. Васюган	Желто-коричневый
8	59 13'24" 80 33'38"	19.07.99/16.00	7,14	24,8	р. Обь, д. Карга	Коричнево-желтый
9	60 26'04" 77 52'16"	20.07.99/17.00	7,75	22,1	р. Обь, напротив пристани п.Александрово	Темно-желтый
10	60 48'10" 76 46'28"	22.07.99/-	7,63	20,8	р. Обь, 2 км ниже устья р. Вах	Светло-желтый
11	61 00'31" 76 03'25"	23.07.99/3.00	7,50	21,5	р. Обь, г. Сургут	Желто-коричневый
12	61 02'34" 75 32'00"	23.07.99/6.06	-	21,4	р. Обь, ~30 км ниже г. Сургута	Коричнево-зеленый
13	61 05'59" 68 48'59"	25.07.99/4.16	-	21,5	р. Обь, 1,5 км ниже устья р. Иртыш	Коричневый

Таблица 2

Коэффициенты ослабления света природной водой, м⁻¹

λ, нм	Номер пробы																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13													
455	-	-	-	3,42	0,06	6,61	0,19	10,24	0,31	6,65	0,06	5,84	0,22	7,61	0,09	7,85	0,04	10,23	0,30	8,90	0,13	5,86	0,16	6,80	0,19	
495	2,97	0,04	2,69	0,04	4,17	0,15	5,80	0,12	7,74	0,15	7,74	0,13	5,15	0,08	5,48	0,05	6,52	0,12	9,65	0,31	7,31	0,14	5,89	0,05	7,11	0,10
555	2,76	0,11	2,43	0,05	2,31	0,07	4,68	0,07	6,26	0,09	7,26	0,05	3,75	0,08	5,01	0,15	5,63	0,08	6,48	0,08	6,48	0,08	6,03	0,13	4,69	0,20
598	2,66	0,12	2,12	0,02	3,94	0,04	5,36	0,07	5,27	0,10	6,43	0,13	4,00	0,06	4,23	0,12	4,40	0,05	5,62	0,24	2,87	0,12	5,45	0,25	6,20	0,22
670	2,59	0,09	2,13	0,08	3,97	0,07	6,58	0,14	3,86	0,14	4,64	0,10	3,09	0,06	3,74	0,06	3,82	0,03	5,36	0,15	4,65	0,02	5,78	0,04	3,67	0,19
707	3,03	0,09	2,59	0,09	3,73	0,07	6,90	0,04	4,47	0,05	6,91	0,32	3,55	0,02	4,48	0,06	4,47	0,08	4,31	0,06	4,15	0,01	4,81	0,04	3,95	0,10
801	3,99	0,08	2,68	0,06	3,19	0,17	6,64	0,10	4,41	0,06	7,22	0,31	3,11	0,17	4,39	0,09	4,31	0,06	4,99	0,05	3,63	0,03	4,39	0,13	3,36	0,11

Примечание. В графах с номерами проб 1–13 первая колонка – коэффициент ослабления света, вторая – его погрешность.

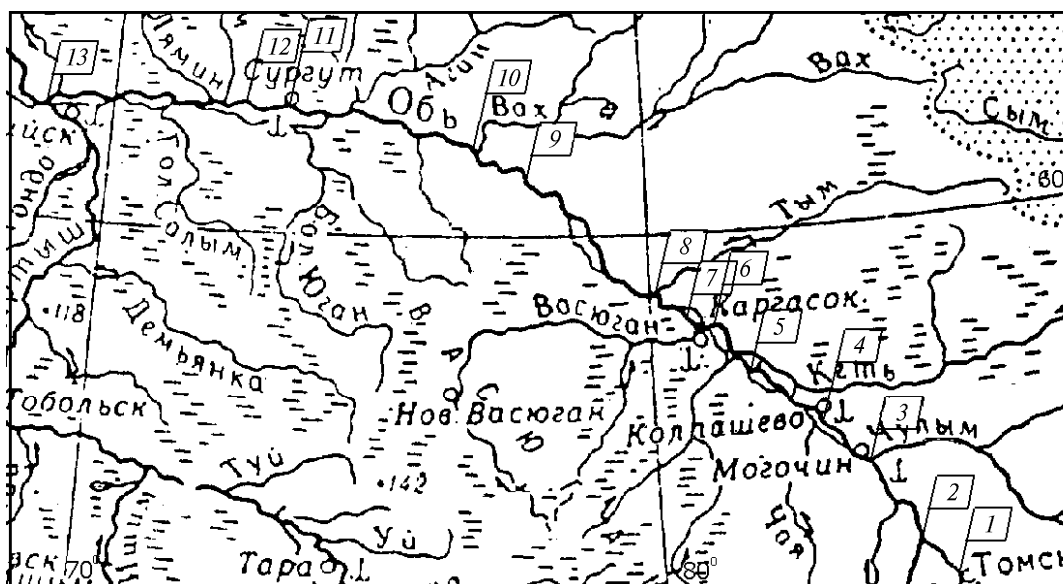


Рис. 2. Карта мест забора проб

В табл. 2 представлены результаты измерений десятичных коэффициентов ослабления света σ (м⁻¹) и соответствующие погрешности для 13 проб воды, места забора которых обозначены на карте (рис. 2). Имеют место заметные вариации величины $\sigma(\lambda)$. Именно они обуславливают цветовые оттенки, отмеченные в табл. 1.

Различия в спектральном ходе коэффициентов ослабления в коротковолновой области спектра от пробы к пробе отмечались и другими авторами [8]. Средние спектральные зависимости $\overline{\sigma(\lambda)} / \sigma(555 \text{ нм})$ для всей трассы и соответствующие среднеквадратические отклонения приведены на рис. 3.

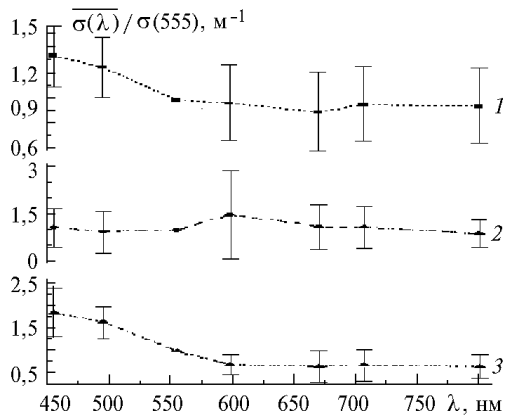


Рис. 3. Спектральные зависимости, усредненные по всей трассе: 1 – $\sigma(\lambda)/\sigma(555 \text{ нм})$, 2 – $\sigma_k(\lambda)/\sigma_k(555 \text{ нм})$ и 3 – $\sigma'(\lambda)/\sigma'(555 \text{ нм})$

Обращает на себя внимание почти нейтральный ход $\sigma(\lambda)$ в длинноволновом участке спектра и тенденция к росту с уменьшением длины волны. В целом загрязненность обской воды гидрозолем высока. Она превышает таковую, например, для Ладожского озера или Рыбинского водохранилища [4, 6].

Подобные спектральные зависимости обычно возникают при красно-желтой окраске частиц. Именно эти цвета преобладают в обской воде севернее устья притока Чаи. Обусловлены они в основном стоком в Обь остатков разлагающейся растительности (желтого вещества) из болот

Западно-Сибирской низменности. Заметное влияние на цвет могут оказывать фитопланктон [2, 9] и частицы минерального происхождения, обогащенные окислами железа. Последние в избытке присутствуют в пойме средней Оби.

Чтобы разделить вклад крупного и мелкого гидрозоля в формирование суммарного коэффициента ослабления, было осуществлено последовательное фильтрование воды через стандартные химические фильтры «красная лента» и «синяя лента» с порами пропускания 10 и 2,5 мкм соответственно. После этой процедуры измерялись коэффициенты ослабления света фильтрованной водой $\sigma_m(\lambda)$, содержащей частицы диаметром $d < 2,5$ мкм. В этом случае разность $\sigma_k(\lambda) = \sigma(\lambda) - \sigma_m(\lambda)$ будет характеризовать ослабление света крупным гидрозолем $d > 2,5$ мкм. В табл. 3, 4 представлены величины $\sigma_k(\lambda)$ и $\sigma'(\lambda) = \sigma_m(\lambda) - \sigma_n(\lambda)$, где $\sigma_n(\lambda)$ – коэффициенты поглощения света чистой водой [7], $\sigma'(\lambda)$ – коэффициент ослабления света гидрозолем $d < 2,5$ мкм и растворенными в воде веществами, а в табл. 5 – соответствующие концентрации сухого остатка частиц, осаждаемых на каждый из типов фильтров. По данным этих таблиц можно судить о заметных вариациях $\sigma_k(\lambda)$ и $\sigma'(\lambda)$ для разных пунктов в зависимости от длины волны и об отсутствии корреляции между этими величинами и концентрациями сухого остатка. Последнее естественно, поскольку при сушке фильтров органический гидрозоль в отличие от минеральных частиц сильно и непредсказуемо изменяет свою массу, не говоря уже об «исчезновении» микроскопических пузырьков воздуха, участвующих в процессе рассеяния света.

Таблица 3

Коэффициенты ослабления света гидрозолем [крупнодисперсная фракция ($d > 2,5$ мкм)], м^{-1}

Длина волны, нм	Номер пробы																							
	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13												
455	–	–	–	–	1,27	0,09	5,22	0,19	0,67	0,45	1,19	0,34	3,91	0,11	2,91	0,31	4,72	0,32	3,69	0,13	0,55	0,19	1,93	0,20
495	0,94	0,05	1,41	0,05	2,67	0,19	5,02	0,12	2,25	0,15	1,50	0,29	2,38	0,07	2,44	0,13	4,98	0,31	1,75	0,25	0,21	0,12	0,26	0,10
555	1,66	0,12	1,48	0,06	1,62	0,09	4,00	0,08	4,30	0,05	0,61	0,19	2,43	0,17	2,93	0,12	3,41	0,11	3,44	0,10	2,89	0,21	0,90	0,24
598	1,36	0,14	1,65	0,03	3,18	0,05	4,65	0,08	3,76	0,25	2,28	0,08	1,86	0,12	2,35	0,11	2,91	0,24	0,41	0,16	2,91	0,27	4,51	0,22
670	1,74	0,10	1,37	0,08	2,98	0,09	5,81	0,14	1,93	0,12	1,60	0,07	1,96	0,10	2,15	0,06	3,48	0,16	1,54	0,11	0,54	0,09	1,67	0,20
707	1,08	0,12	2,09	0,10	2,61	0,07	6,14	0,05	4,31	0,38	0,93	0,05	2,22	0,07	2,68	0,12	2,80	0,08	0,28	0,04	0,73	0,25	2,26	0,18
801	2,23	0,11	1,85	0,06	1,93	0,18	5,13	0,10	3,97	0,34	0,59	0,23	2,07	0,10	2,88	0,06	2,62	0,08	0,13	0,03	0,11	0,02	0,99	0,12

См. примечание к табл. 2.

Таблица 4

Коэффициенты ослабления света гидрозолем [средне- и мелкодисперсная фракция и растворенные вещества ($d < 2,5$ мкм)], м^{-1}

Длина волны, нм	Номер пробы																							
	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13												
455	–	–	–	–	2,12	0,06	1,38	0,01	5,95	0,45	4,45	0,26	3,68	0,05	4,93	0,30	5,70	0,11	5,20	0,01	5,30	0,11	4,85	0,05
495	2,00	0,03	1,24	0,02	1,47	0,11	0,75	0,02	5,47	0,07	3,63	0,28	3,07	0,04	4,05	0,05	4,64	0,04	5,53	0,21	5,65	0,11	6,82	0,02
555	1,03	0,03	0,88	0,02	0,62	0,06	0,62	0,03	2,89	0,03	3,07	0,17	2,51	0,09	2,63	0,09	3,01	0,08	2,98	0,07	3,08	0,17	3,71	0,15
598	1,04	0,07	0,21	0,02	0,50	0,03	0,45	0,04	2,41	0,21	1,45	0,05	2,11	0,02	1,79	0,10	2,45	0,01	2,18	0,11	2,28	0,09	1,43	0,02
670	0,43	0,05	0,35	0,01	0,57	0,07	0,35	0,02	2,29	0,07	1,06	0,02	1,37	0,07	1,25	0,05	1,46	0,06	2,69	0,11	4,81	0,08	1,58	0,06
707	1,15	0,08	–	–	0,31	0,01	–	–	1,79	0,20	1,81	0,04	1,45	0,04	0,98	0,08	0,69	0,05	3,07	0,04	3,24	0,24	0,89	0,15
801	0,80	0,08	–	–	0,29	0,05	0,54	0,04	2,29	0,14	1,55	0,16	1,35	0,04	0,46	0,01	1,40	0,07	2,52	0,01	3,31	0,18	1,41	0,05

См. примечание к табл. 2.

Таблица 5

Концентрация гидрозоля [крупнодисперсная фракция ($d > 10$ мкм и $10 > d > 2,5$ мкм)], г/л

Хим. фильтр	Номер пробы												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Красная лента	0,0189	0,0998	0,0612	–	0,0549	0,0725	0,0359	0,0548	0,0453	0,0381	0,0279	0,0061	0,0284
Синяя лента	0,0268	0,0469	0,0470	–	0,0280	0,0341	0,0195	0,0209	0,0172	0,0068	0,0173	0,0416	0,0431

Из рис. 3 видно, что в среднем крупные гидрозолы рассеивают свет почти нейтрально, в то время как для частиц $d < 2,5$ мкм и растворенных веществ коэффициент ослабления растет с уменьшением длины волны. Следовательно, именно мелкие частицы и растворенные вещества в основном ответственны за желтый цвет воды в Оби севернее устья притока р. Чаи, что соответствует литературным данным о физико-химических свойствах желтого вещества [7].

Авторы благодарны академику В.Е. Зуеву и члену-корреспонденту РАН В.В. Зуеву за предоставленную возможность проведения натурных исследований, Э.А. Карнауковой за активное участие в аппаратурных разработках, а также сотрудникам Лимнологического института СО РАН О.Г. Нецветаевой и Н.А. Кобелевой за измерения температуры и pH воды в пробах.

Работа выполнена при финансовой поддержке региональных грантов РФФИ «р98-Сибирь» № 98-05-03153 и 98-05-03154.

1. Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 248 с.
2. Очаковский Ю.Е., Копелевич О.В., Войтов В.И. Свет в море. М.: Наука, 1970. 175 с.
3. Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Оценка концентрации светопоглощающих и светорассеивающих веществ в различного типа

водах открытого океана // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 9. С. 989–995.

4. Анонасенко А.Д., Винокуров В.В., Поддубный С.А., Румянцев В.Б. Формирование вертикальной оптической структуры вод на полигоне Рыбинского водохранилища // X пленум «Оптика океана»: Тезисы докладов. Л.: ГОИ им. С.И. Вавилова, 1988. С. 101.
5. Добрынин В.И., Миргазов Р.Р., Почейкин К.А., Таращанский Б.А. Спектральное поглощение света глубинной байкальской водой // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 3. С. 234–244.
6. Кондратьев К.Я., Мокиевский К.А., Румянцев В.Б., Васильев О.Б., Гришечкин В.С. Результаты дистанционно-контактных определений оптических характеристик внутренних водоемов // X пленум «Оптика океана»: Тезисы докладов. Л.: ГОИ им. С.И. Вавилова, 1988. С. 46–47.
7. Адаменко В.Н., Кондратьев К.Я., Поздняков Я.В., Чехин Л.П. Радиационный режим и оптические свойства озер. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 300 с.
8. Анонасенко А.Д., Гительсон А.А., Гарбузов Г.П. О спектральном ходе показателя рассеяния поверхностных вод суши // X пленум «Оптика океана»: Тезисы докладов. Л.: ГОИ им. С.И. Вавилова, 1988. С. 102–103.
9. Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Оценка концентрации хлорофилла в морской воде по измерениям спектрального показателя вертикального ослабления света // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 12. С. 1778–1784.

S.F. Karbyshev, V.E. Pavlov. Spectral transmittance of surface water in the region of Middle Ob.

The measurement of spectral coefficients of light attenuation in surface layer of Ob water in the region from Tomsk to the Irtysh mouth are presented. The values of decimal coefficients are found to change from 2.1 to 10.4 m^{-1} and noticeably vary over spectrum. Prevailing yellow colour of water downstream river Chaya are explained by the flow of so called yellow matter from bogs of the West-Siberia lowland and elevated concentration of iron in mineral particles. The role of large and small hydrosols in formation of total attenuation coefficients is estimated.