



СОСТОЯНИЕ ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

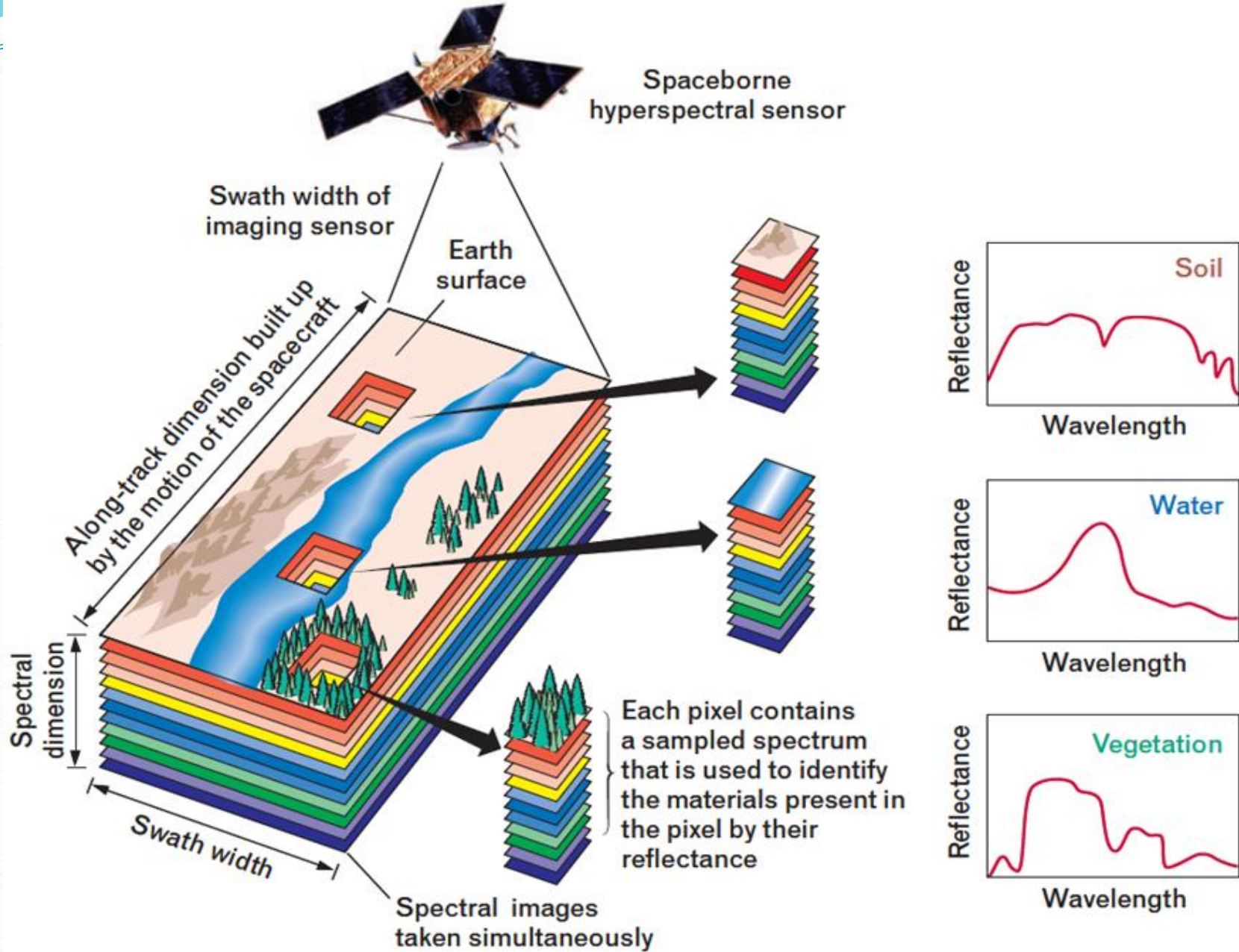
Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк

**Всероссийская научно-практическая конференция с международным
участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ:
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»**
Ростов-на-Дону, 20 – 23 сентября 2023 года



Гиперспектральный куб

Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектроскопии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»





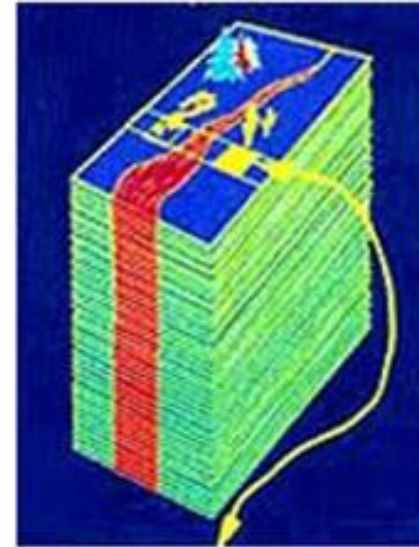
Сравнение мультиспектральной и гиперспектральной съемки

Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектроскопии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»

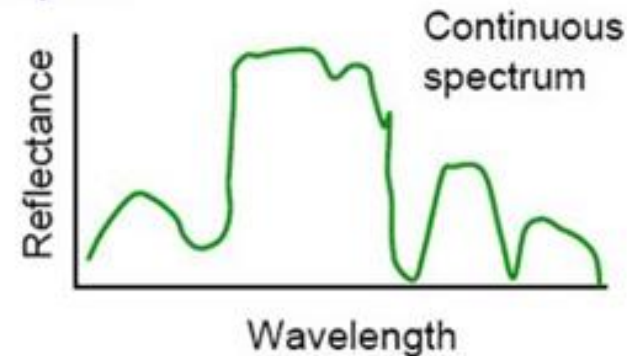
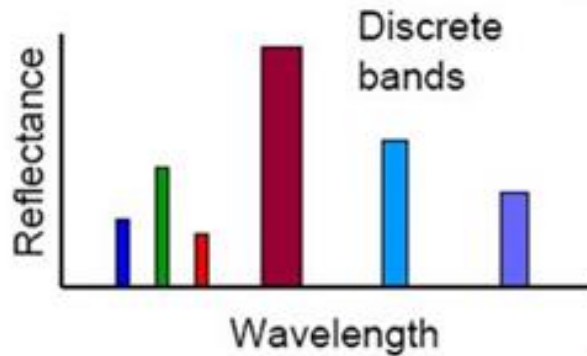
Multispectral



Hyperspectral



Each pixel



Модель и алгоритм расчета спектров КЯ в приближении «поглощающей среды с сильно анизотропным рассеянием»

$$\rho(\mu, \mu_0, \psi) = \frac{\Lambda \cdot \chi(\cos \vartheta_0)}{4 \cdot (\mu + \mu_0) \cdot [1 - \Lambda \cdot \Phi(\mu, \mu_0)]}$$

$$\rho_\lambda(\sigma, \kappa, \chi) = \Sigma_\lambda(\sigma, \kappa, \chi) / \text{K}_\lambda(\sigma, \kappa, \chi)$$

где $\Sigma_\lambda(\sigma, \kappa, \chi) = \sigma_{\lambda, \text{МВ}}^\gamma * C_{\text{МВ}} + \sigma_{\lambda, \text{ФП}}^\gamma * C_{\text{ФП}} + \sigma_{\text{воды}}$
 $+ w_{\text{ХЛ}} * C_{\text{ХЛ}} + w_{\text{ФБ}} * C_{\text{ФБ}}$

$$\text{K}_\lambda(\sigma, \kappa, \chi) = [\kappa_{\lambda, \text{МВ}} + (1 - \Phi_{\lambda, \text{МВ}}) * \sigma_{\lambda, \text{МВ}}] * C_{\text{МВ}} +$$
$$[\kappa_{\lambda, \text{ФП}} + (1 - \Phi_{\lambda, \text{ФП}}) * \sigma_{\lambda, \text{ФП}}] * C_{\text{ФП}} + 0,5 * \sigma_{\lambda, \text{воды}} + \kappa_{\lambda, \text{воды}} + \kappa_{\lambda, \text{РОВ}}$$



Цель – проанализировать дистанционно полученную спектрометрическую информацию, собранную на водных объектах РФ, и рассмотреть возможность выделения ограниченного количества типичных спектров коэффициента спектральной яркости (СКСЯ) поверхностных вод. Такая классификация в мониторинге состояния водных объектов необходима для разработки подходов к их оперативной оценке.

Соответственно, **задача** – разработать критерии различимости СКСЯ по спектральной и опорной информации при их дешифрировании для видимой области спектра, где наиболее отчетливо проявляются биологические свойства экосистем.

Объект исследования – водная экосистема водного объекта II типа.

Предмет – оптический образ восходящего от воды излучения, СКСЯ.

Метод – интерпретация СКСЯ с использованием методов математического моделирования, светорассеяния и решение обратной задачи: по оптическому образу оценить состояние водного объекта и его компонентов.

1 Этап. На основании теории светорассеяния определить перечень и свойства, так называемых, оптически активных (видимых) компонентов (ОАК).

2 Этап. Получить (собрать) экспериментальные СКСЯ на разных водных объектах. (В настоящее время есть ~ 500 СКСЯ).

3 Этап. По форме СКСЯ (соотношению СКСЯ на длинах волн, выбранных для РП) предложить оценку состояния водной экосистемы.



Состояние – чрезвычайно общая абстракция, отражающая количественно-качественные формы реализации бытия, существования объектов любой природы, **наличной и приобретенной ими специфики и определенности (меры) их сущностных, основных свойств и качеств, как внутренних, так и внешних.** Его нельзя приравнивать по семантике к категории качества. Это, скорее, форма проявления качественной определенности, так как в его описание обычно не включают описание структуры объекта, характер элементов, всех решительно его свойств.

[Симанов А.Л. Понятие “состояния” как философская категория // Новосибирск: Наука.. – 1982. – 125 с.].

Состояние водного объекта – характеристика водного объекта по совокупности его количественных и качественных показателей применительно к видам водопользования [ГОСТ 17.1.1.01 – 77 С. 5].

Примечание. К количественным и качественным показателям относятся: расход воды, скорость течения, глубина водного объекта, температура воды, рН, БПК5 и другие гидрохимические и гидробиологические показатели [ГОСТ 17.1.1.01 – 77 С. 5].



Определение состояния водной экосистемы по оптическим (видимой области) показателям

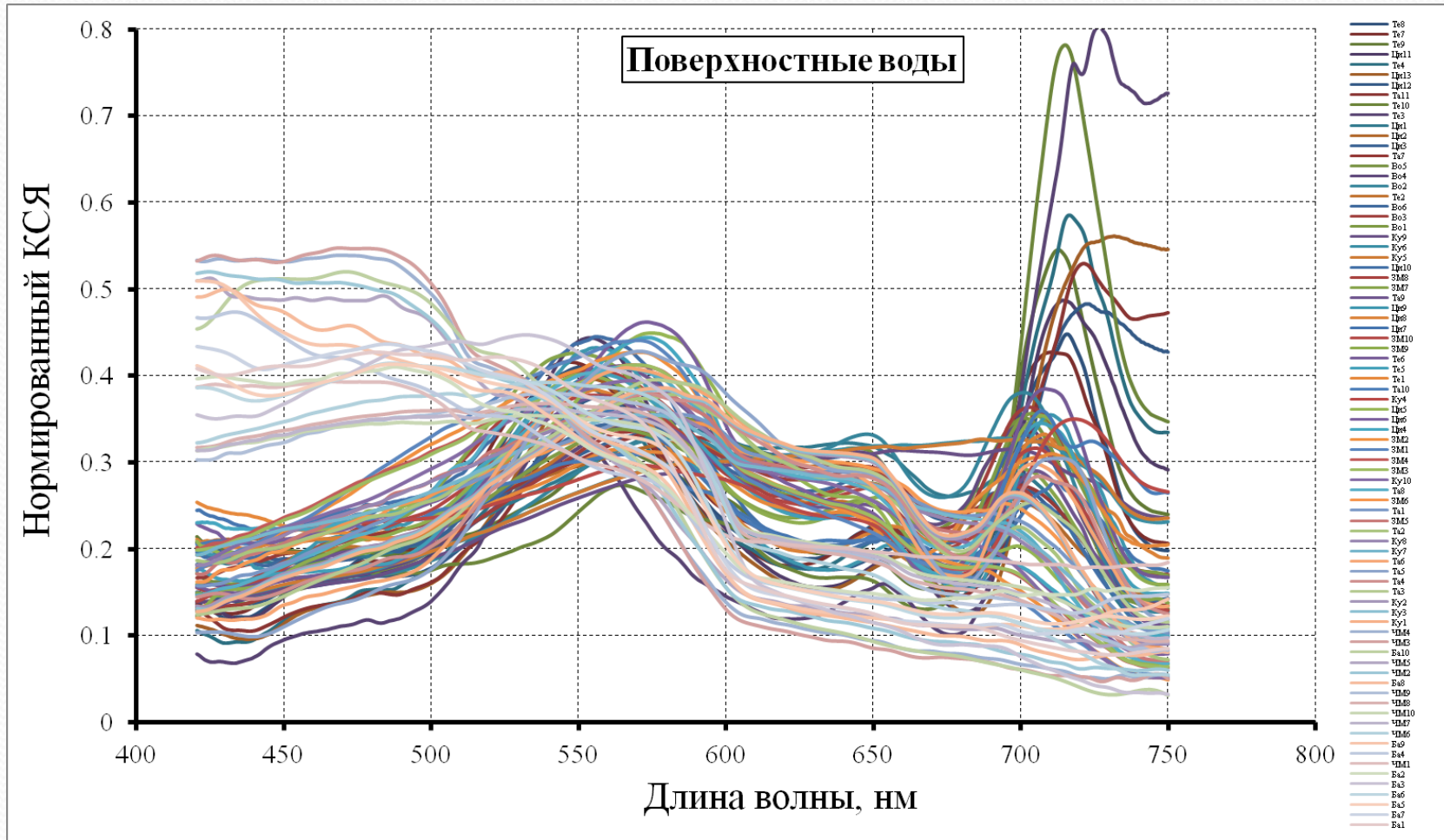
Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектроскопии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»

Состояния водной экосистемы по оптическим данным – образ (отражение) состояния фотического слоя водной экосистемы во всей совокупности взаимодействия бесконечного количества химических и биологических компонентов (внутренних) при фиксированных (внешних физических) условиях.



Типичные спектры КСЯ для внутренних вод России

Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектроскопии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»



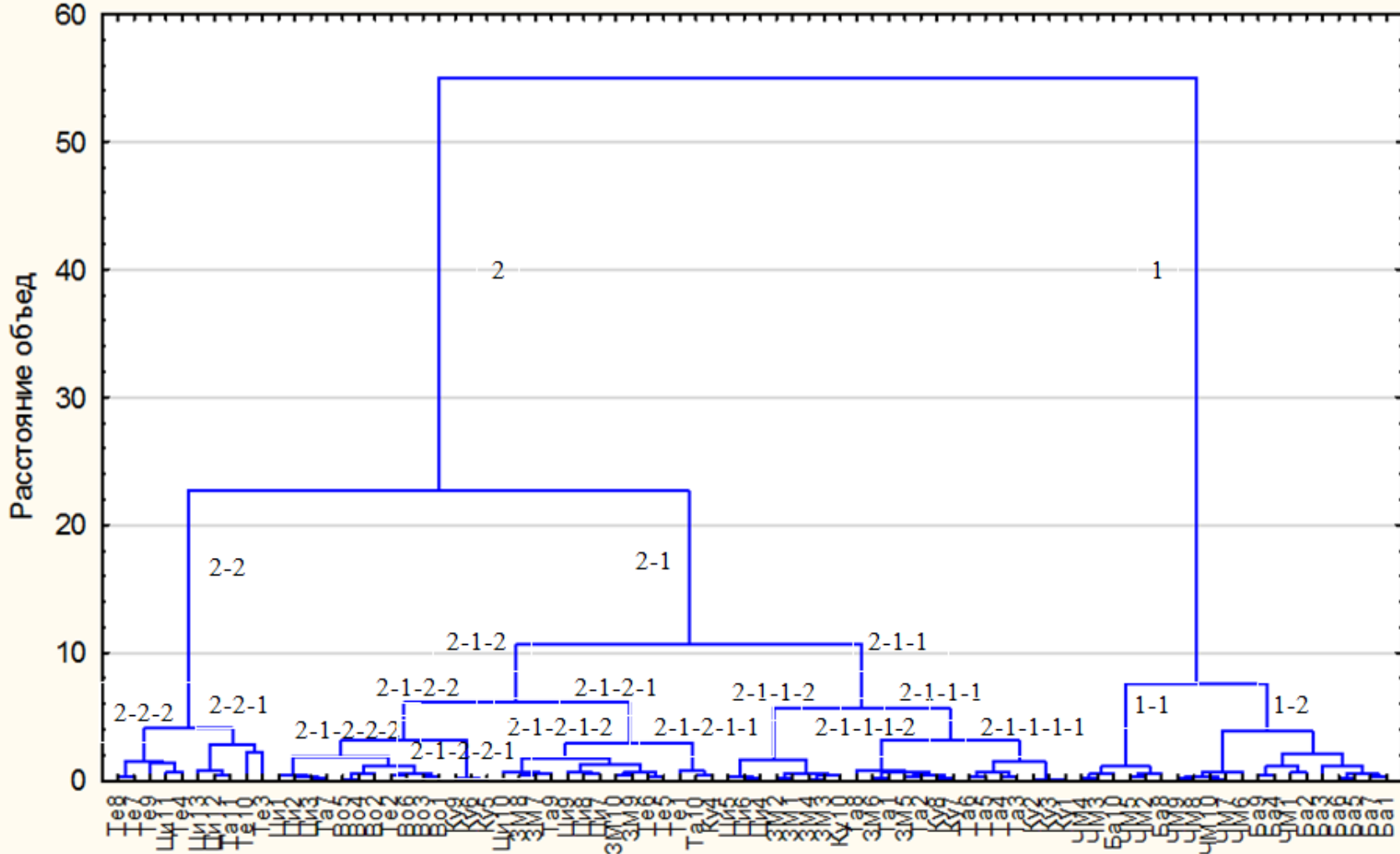


Дендрограмма кластерного анализа типичных спектров КСЯ для водных объектов России

Дендрограмма для 80 набл.

Метод Варда

Евклидово расстояние

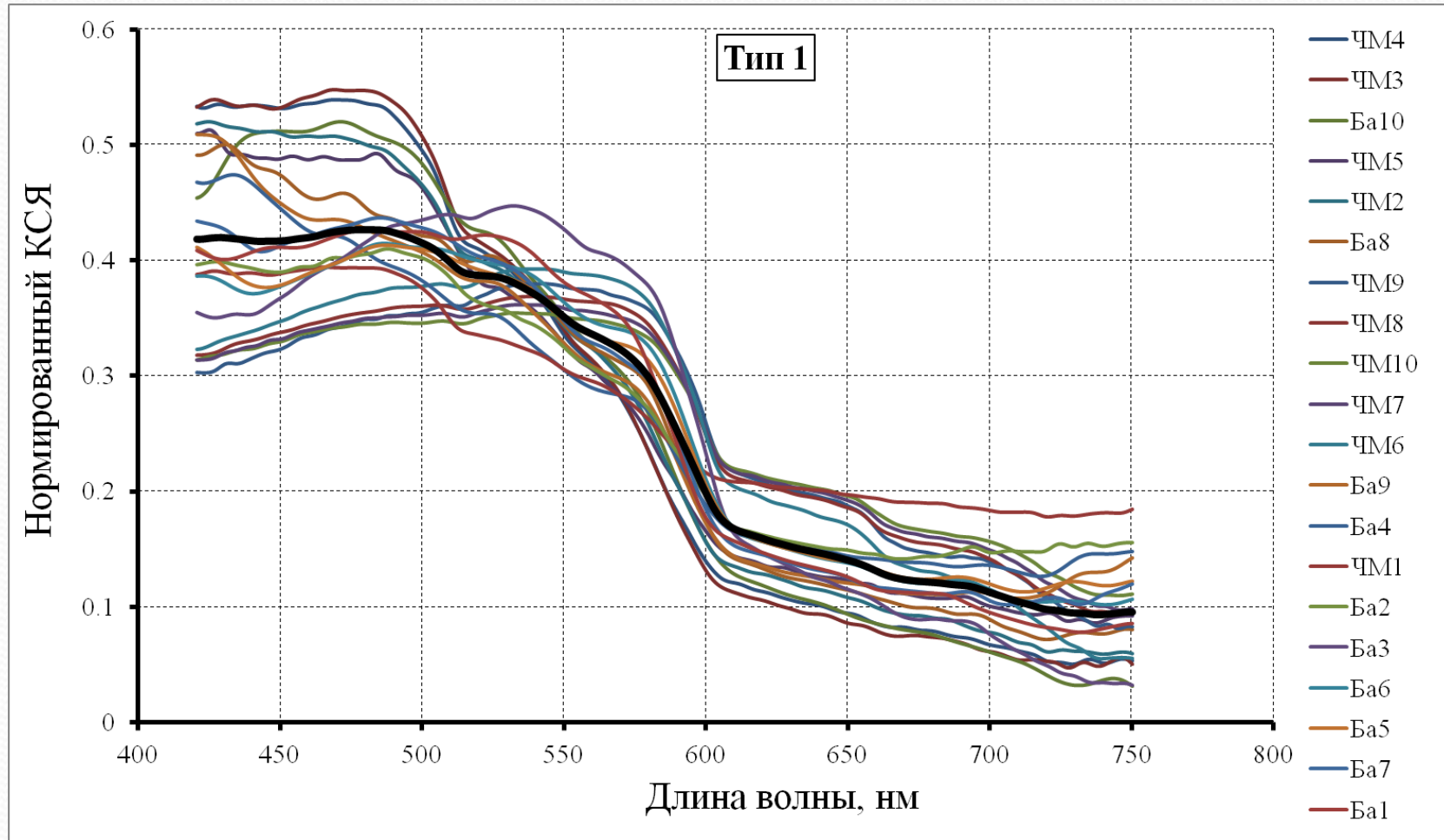


Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектроскопии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»



Спектры КСЯ вод первого типа

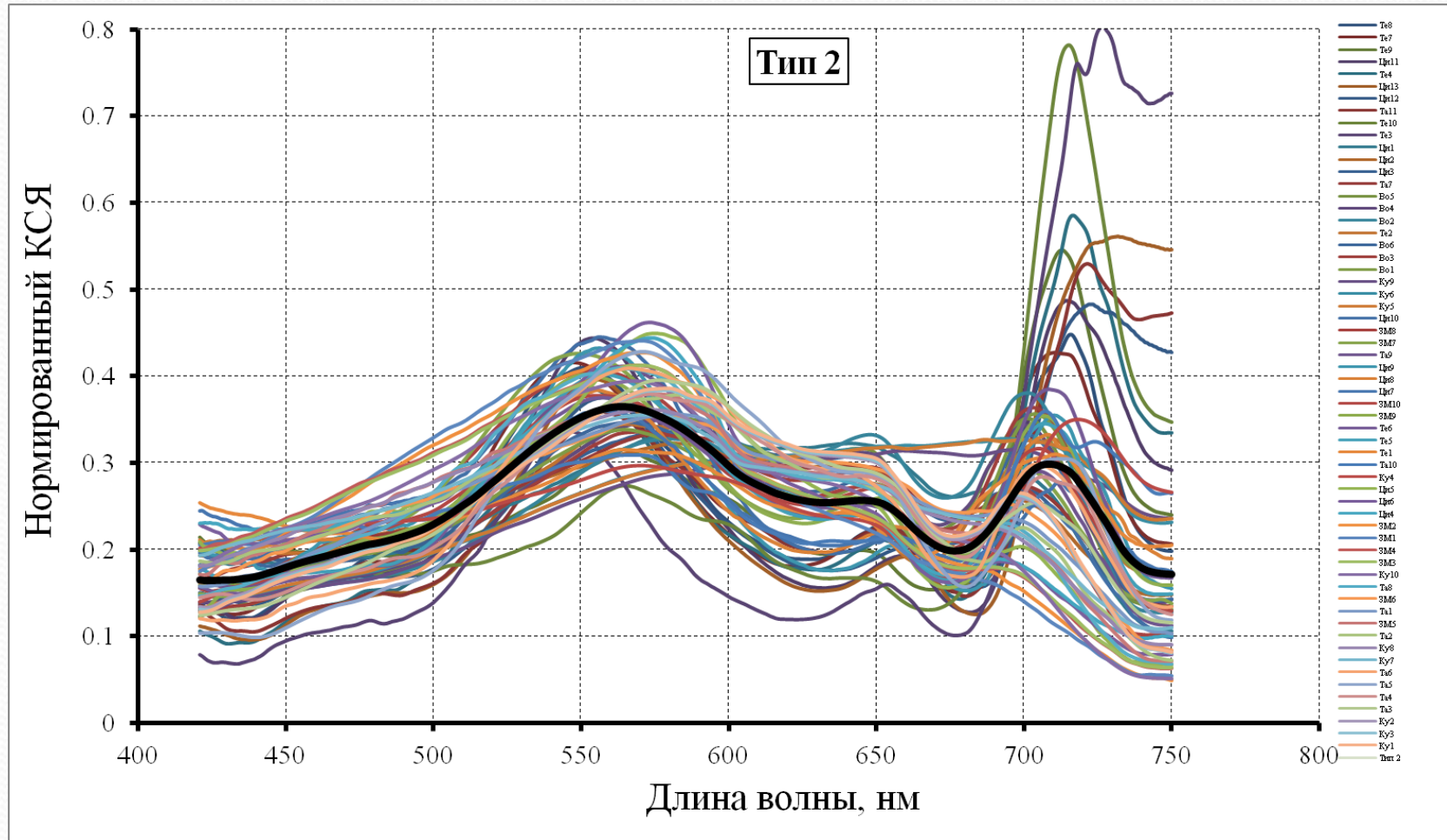
Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектрометрии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»





Спектры КСЯ вод второго типа

Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектроскопии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»





Классификация водных экосистем по СКСЯ

Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектроскопии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»

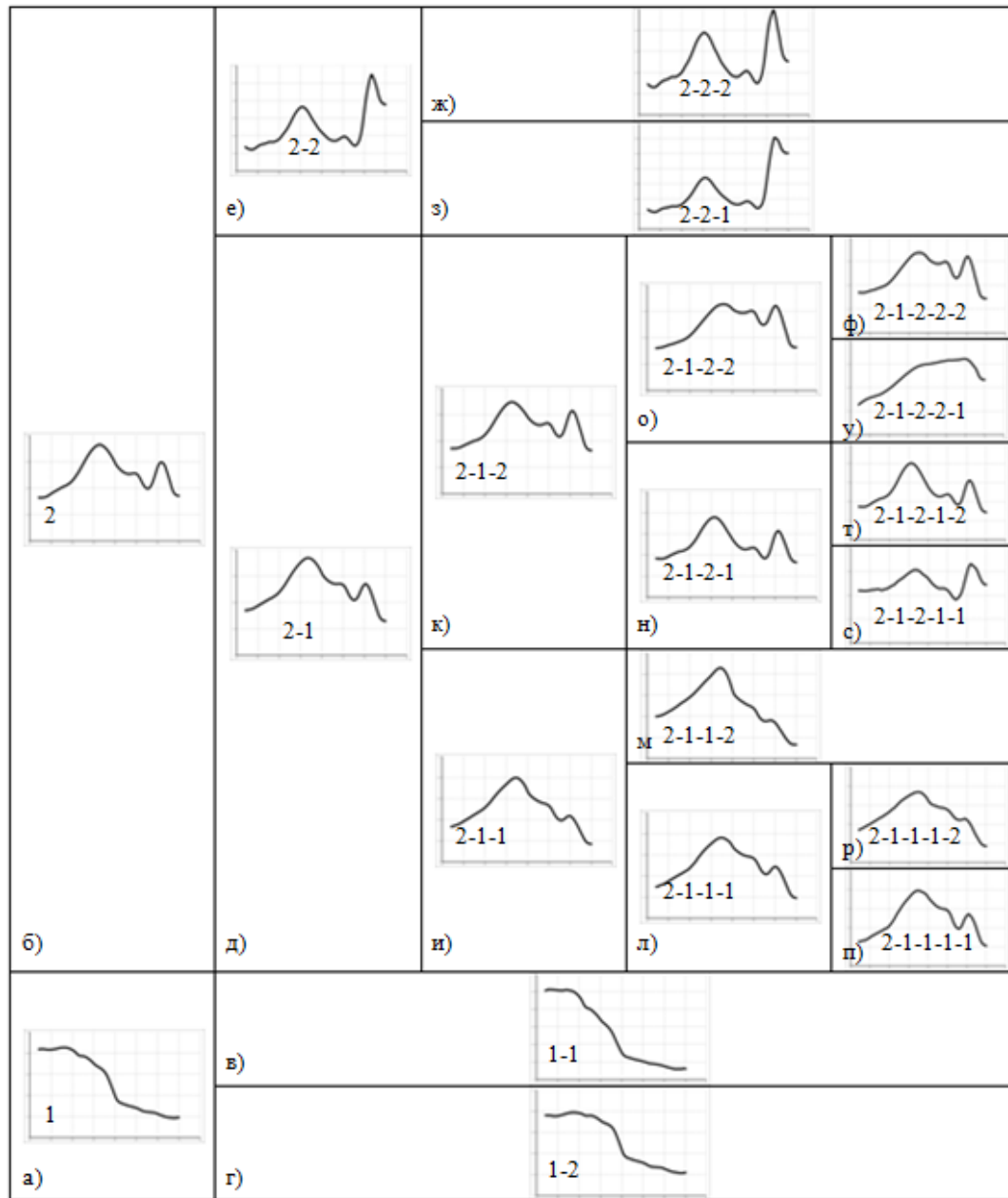




Таблица Характеристики вод второго типа

Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектроскопии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»

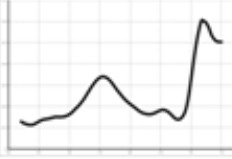
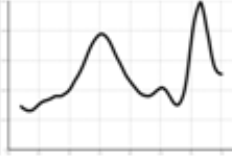
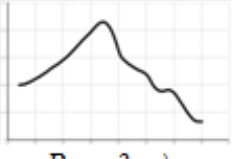
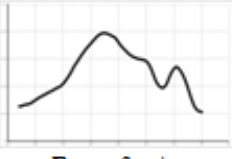
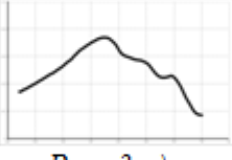
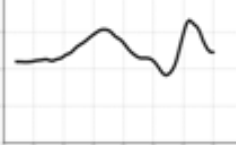



В соответствии с рис.3	Водный объект, дата	$C_{chl\ a}$, мкг/дм ³	C_{ees} , мкг/дм ³	Категории трофности	Обозначение типа СКСЯ
 <p>Рис. 3 ж)</p>	Ци13 29-09-18	163,94		6	2.ГТ.С3,(М2.Т6) 2-2-1
	Ци12 29-09-18	144,79		6	
	Та11 02-10-2019	620,00	47,8	6	
	Те10 23-09-2020	1114,4	20,7	6	
	Те3 16-07-2020	1522,4	40,0	6	
 <p>Рис. 3 з)</p>	Те8 22-07-2020	126,77	20,0	6	2.ГТ.С3,(М1.Т6) 2-2-2
	Те7 22-07-2020	145,21	13,8	6	
	Те9 23-09-2020	351,42	12,2	6	
	Ци11 29-09-18	59,10		6	
	Те4 16-07-2020	288,40	5,8	6	
 <p>Рис. 3 м)</p>	Ци5 20-05-2018	11,70		3	2.Н.Д.(М1.Т1-3) 2-1-1-2
	Ци6 20-05-2018	12,48		3	
	Ци4 20-05-2018	6,88		3	
	ЗМ2 13-02-2015	2,60		1	
	ЗМ1 13-02-2015	1,99		1	
	ЗМ4 13-04-2015	5,73		2	
	ЗМ3 13-04-2015	4,01		2	
Ку10 03-06-2009			1		
 <p>Рис. 3 н)</p>	Та6 29-03-2016	55,16		4	2.Н.Д.(М2.Т3-4) 2-1-1-1-1
	Та5 29-03-2016	37,90		4	
	Та4 29-03-2016	13,20		4	
	Та3 29-03-2016	27,90		3	
	Ку2 06-04-2009			3	
	Ку3 06-04-2009			3	
	Ку1 06-04-2009			3	
 <p>Рис. 3 п)</p>	Та8 28-06-2016	14,08		3	2.Н.Д.(М2.Т2-3) 2-1-1-1-2
	ЗМ6 20-05-2015	10,00		3	
	Та1 29-03-2016	3,90		2	
	ЗМ5 20-05-2015	6,49		2	
	Та2 29-03-2016	7,30		3	
	Ку8 03-06-2010			2	
	Ку7 03-06-2010			2	



Таблица Характеристики вод второго типа (продолжение)

Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектроскопии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»

 Рис. 3 с)	Те1 27-10-2020 Та10 28-06-2016 Ку4 06-04-2009	150,77 89,40	21,7	5 6 6	2.Н.С3.(М2.Т5-6) 2-1-1-1
 Рис. 3 м)	Ци10 29-09-2018 ЗМ8 27-08-2015 ЗМ7 27-08-2015 Та9 28-06-2016 Ци9 29-09-2018 Ци8 29-09-2018 Ци7 29-09-2018 ЗМ10 15-08-2015 ЗМ9 15-08-2015 Те6 10-08-2020 Те5 10-08-2020	16,64 14,94 21,45 32,60 56,86 38,46 86,22 67,82	23,5 17,1	5 4 5 5 5 5 5 5 5	2Н.С3.(М2.Т4-5) 2-1-2-1-2
 Рис. 3 у)	Ку9 01-06-2009 Ку6 02-06-2010 Ку5 02-06-2010		350* 96,5*	н/о н/о н/о	2.Н.С3.(М3.Т7) 2-1-2-2-1 Оценить трофность невозможно
 Рис. 3 ф)	Ци1 17-05-2018 Ци2 18-05-2018 Ци3 18-05-2018 Та7 28-06-2019 Во5 26-07-2011 Во4 26-07-2011 Во2 03-08-2011 Те2 27-10-2020 Во6 26-07-2011 Во3 03-08-2011 Во1 03-08-2011	13,79 14,48 19,98 22,98 40,20 40,20 40,30 143,12 40,20 66,36 73,25	26,3	3 3 3 3 5 5 5 5 5 5	2.Н.С3.(М2.Т3-5) 2-1-2-2-2



Типичные средние КСЯ поверхностных водных объектов

Б.Л. Сухарук, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектроскопии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»

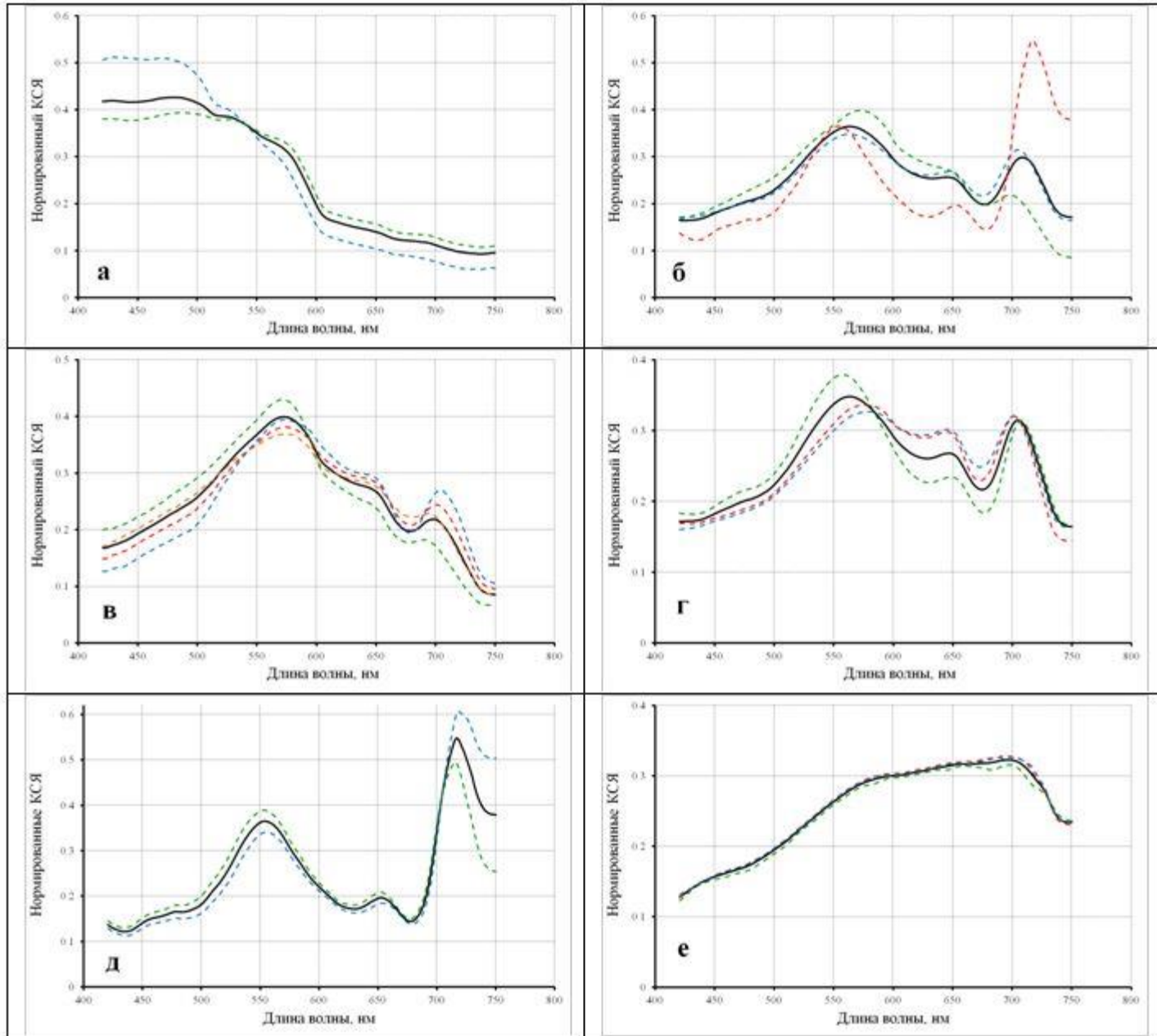




Таблица – Оптические критерии разделения СКСЯ по форме

Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектроскопии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»

Обозначение типа СКСЯ (состояние)	$C_{chl\ a}$, мкг/дм ³	C_{oc2} , мкг/дм ³	Категории трофности	Критерии типа СКСЯ
Тип 1	–	–	–	$\rho_{<600} \gg \rho_{>600}$
Тип 2	3-1500	10-350	1-6	$\rho_{<600} \approx \rho_{>600}$
2НД	3-55	10-50	1-4	$\rho_{625} > \rho_{650}$
2НСз	13-143	10-30	3-5	$\rho_{625} \leq \rho_{650}$
2ГЭ	60-1500	5-50	6	$\rho_{700} \gg \rho_{560}$
2ГМ	–	90-350	–	$\rho_{450} < \rho_{560} < \rho_{625} < \rho_{675} < \rho_{700}$

Выводы

Анализ экспериментальных данных, полученных в результате комплексных работ за период с 2009 по 2020 гг., позволил выполнить систематизацию спектрометрической информации с привлечением химической и биологической опоры, выделить типичные СКСЯ, соответствующие нормальному развитию пресноводных экосистем.

Предложена типизация СКСЯ, полученных со спектральным разрешением около 2 нм или, измеренных, как минимум, на длинах волн 450, 560, 625, 650, 675, 700, 750 нм.

Предложено рассматривать форму СКСЯ, ρ_λ , как **новый вид измерительной информации** для характеристики водных объектов.

На основании многолетних экспериментов и литературных данных, связывающих форму СКСЯ с формой удельных (селективных и неселективных) СПП, представлены критерии различимости СКСЯ по их соотношению на нескольких длинах волн:

$\rho_{<600} \gg \rho_{>600}$ – деление на воды I – II типы.

Для вод 2 типа (в основном, для юга России):

$\rho_{700} \gg \rho_{560}$ – характеристика гиперэвтрофных водных объектов: класс 2.ГЭ;

$\rho_{625} \leq \rho_{650}$ – показатель нормального функционирования (развития) экосистем водных объектов с преобладанием синезеленых: класс 2.Н.СЗ;

$\rho_{625} \geq \rho_{650}$ – показатель нормального функционирования (развития) экосистем с преобладанием диатомовых: класс 2.Н.Д;

$\rho_{450} < \rho_{560} < \rho_{625} < \rho_{675} < \rho_{700}$ – критерий гипермутных вод, 2.ГМ, показывает невозможность (некорректность) определения типичного для вод 2 типа фитопланктона.

На основании изменения разности $\rho_{560} - \rho_{600}$ выделено 3 градации мутности.

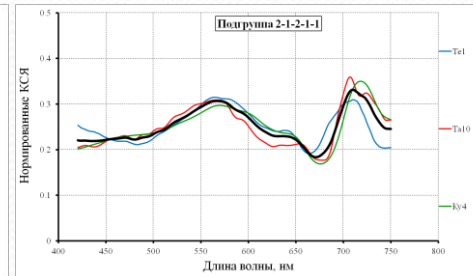
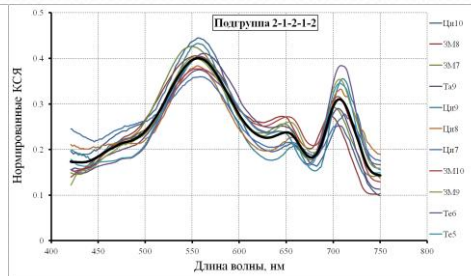
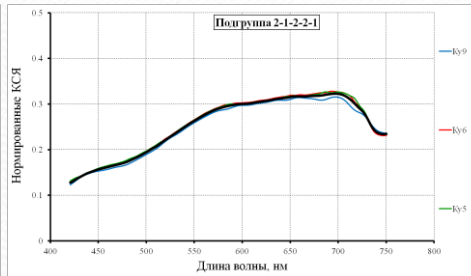
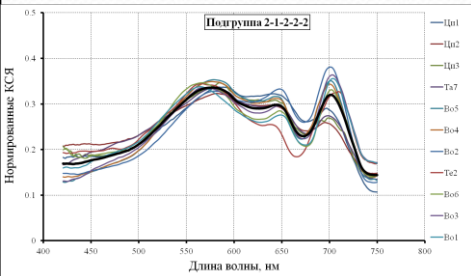
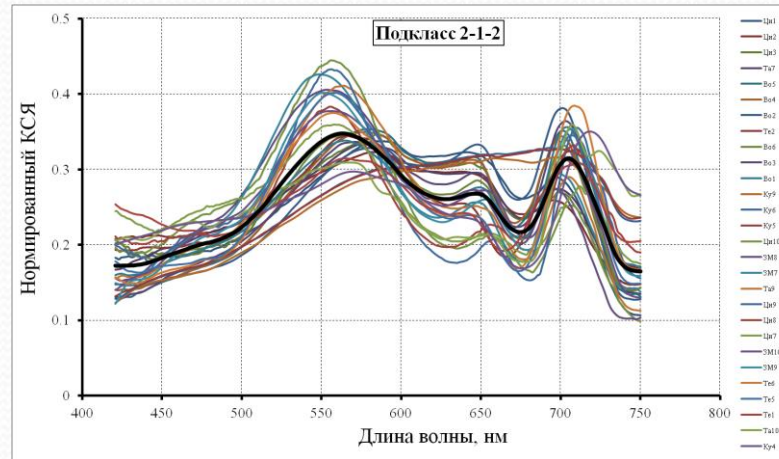
На основании изменения разности $\rho_{700} - \rho_{675}$ выделено 6 градаций трофности.

A photograph of a lighthouse situated on a small, rocky island in the middle of a body of water. The lighthouse is a tall, cylindrical structure with a lantern room at the top. The sky is filled with soft, white clouds, and the water is a calm, light blue-green color. The overall scene is peaceful and scenic.

Благодарю за внимание



Спектры КСЯ вод второго типа группы 2-1-СЗ





R_{rs} верхнего уровня для ст. 14 и восьми соседних пикселей в сравнении с СКСЯ нижнего уровня

Б.Л. Сухоруков, Н.В. Решетняк / Состояние пресноводных экосистем по данным дистанционной спектрометрии // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ»