

Классификация поверхностных вод по данным дистанционной спектроскопии видимой области

Б. Л. Сухоруков^{1,2}, Н. В. Решетняк¹

¹ *Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, 344090, Россия
E-mail: nvr-phys@yandex.ru*

² *Институт водных проблем РАН, Южный отдел
Ростов-на-Дону, 344090, Россия
E-mail: bls-phys@yandex.ru*

Проанализированы экспериментальные данные многолетних спектроскопических измерений, полученные на водных объектах России в период с 2009 по 2020 г. Дистанционную гиперспектральную съёмку проводили с различных платформ нижнего уровня с высоты от 2 до 30 м. Основным анализируемым показателем выбраны спектры коэффициентов спектральной яркости (СКСЯ) восходящего от воды излучения в видимой области спектра, 420–750 нм, со спектральным разрешением 1,8 нм. Построен граф классификации СКСЯ по форме спектров по методу Варда (*англ.* Ward's method) (дивизимная кластеризация). Представлены средние СКСЯ для каждого класса и каждой группы, соответствующих дендрограмме. Интерпретация СКСЯ каждой из групп основана на знании спектральных особенностей оптически активных (видимых) компонентов водной экосистемы. Классификация СКСЯ по чисто спектральной информации позволяет выделить три класса спектров, очевидно различающихся по форме. Дальнейшая кластеризация осуществляется внутри этих классов с привлечением опорных данных, полученных из аналитических определений мутности воды и трофности водных экосистем. Для вод 2-го типа по спектральным особенностям всего выделено 9 групп СКСЯ. Предложено компактное обозначение каждой из групп.

Ключевые слова: поверхностные воды, дистанционная спектроскопия, коэффициент спектральной яркости, фитопланктон, хлорофилл, водная экосистема, кластеризация, дендрограмма

Одобрена к печати: 25.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-214-226

Введение

Дистанционный мониторинг качества и состояния различных природных и искусственных образований в различных областях электромагнитного спектра организован в развитых странах мира начиная с середины прошлого века. Конечный результат наблюдений за изучаемыми показателями заключается в анализе результатов, полученных при решении обратной задачи — восстановлении физико-химических свойств объекта по его спектральному образу. Наиболее сложно выявить ареалы спектрально слабо различимых частей или областей выбранного объекта, к которым можно отнести определение стадий вегетации сельскохозяйственных культур, степени эвтрофирования или оценку состояния экосистем водоёмов.

Появилось понимание необходимости разработки специальной мульти- и гиперспектральной аппаратуры, устанавливаемой на спутниках Земли, способной предоставлять требуемую для решения подобных задач природоресурсную информацию. Но и после появления необходимой спектральной аппаратуры последующая обработка гипер- и мультиспектральных данных, а также представление результатов интерпретации этой информации в виде, удобном для понимания узких специалистов — экологов, биологов, химиков, в полной мере не решена до настоящего времени.

Цель работы — проанализировать дистанционно полученную спектроскопическую информацию, собранную на водных объектах Российской Федерации, и рассмотреть возможность выделения ограниченного количества типичных по форме спектров коэффициента спектральной яркости (СКСЯ) поверхностных вод. Такая классификация в мониторинге со-

стояния водных объектов необходима для разработки подходов к оперативной оценке состояния водных экосистем.

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

Известно, что основная измеряемая дистанционно величина, по которой можно оценивать параметры подстилающей поверхности, — яркость восходящего излучения. Но так как на эту величину сильно влияют и погодные условия, и освещённость, то в качестве основной характеристики зондируемых объектов выбирают именно коэффициент спектральной яркости (КСЯ).

На практике при дистанционной съёмке водных объектов (ВО) вычисляют спектр КСЯ (СКСЯ), равный отношению спектров яркости восходящего от воды излучения к соответствующему спектру яркости эталона (ортогортной белой пластины), расположенного над водной поверхностью (Копелевич, 1983; Шифрин, 1983; Mobley et al., 1999):

$$\rho(\theta, \varphi, \lambda) = L_{\omega}(\theta, \varphi, \lambda) / E_s(\lambda),$$

где L_{ω} — яркость восходящего от воды излучения в направлении датчика, определяемом полярным (θ) и азимутальным (φ) углом; E_s — облучённость, $E_s = \pi L_r$; L_r — яркость излучения, отражённого от эталона. В дальнейшем не будем указывать геометрические условия съёмки, а только длину волны СКСЯ (λ) в видимой области от 400 до 750 нм, например ρ_{700} .

Материалы и методы

Результаты синхронных измерений СКСЯ ВО России и концентрации видимых компонентов собраны в базу данных видимого диапазона (420–750 нм со спектральным разрешением 1,8 нм) за период с 2005 по 2022 г. с периодичностью около 15 дней (Сухоруков и др., 2018). Первичные измерения проводили портативным спектрометром S41 фирмы Laser LS, спектральный диапазон — 389–808 нм, спектральное разрешение — 1,8 нм. В базе данных представлены СКСЯ нижнего уровня, полученные с высоты от 2 до 30 м (в относительных единицах). Информация базы данных может быть использована для решения широкого перечня прикладных задач, включая построение биооптических моделей (Сухоруков и др., 2020), так как кроме СКСЯ в ней содержатся и данные аналитических определений концентрации хлорофилла *a* фитопланктона (в мкг/дм³), полученные в синхронно отобранных пробах воды в лабораторных условиях. Отбор осуществляли с глубины около 0,5 м на участке водного объекта, попадающего в поле зрения спектрометра. Время «рассинхронизации» спектрометрической съёмки и отбора проб на этом уровне в большинстве случаев составило от 1 до 3 мин.

Спектры яркости регистрировали в соответствии с требованиями руководящего документа Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) (РД 52.24.729.2010..., 2010) согласно схемам, описанным в работах (Сухоруков и др., 2020; Mobley et al., 1999). Для исключения случайных погрешностей каждый спектр восходящего от воды излучения и эталона снимали 5–7 раз в течение 1–2 мин. При эксплуатации спектрометра обнаружены значительные шумовые искажения на краях указанного спектрального диапазона как с длинноволновой, так и с коротковолновой стороны, поэтому для обработки результатов измерений берётся информация из 398 каналов. Диапазон спектра, реально используемый при исследовании водных объектов, — от 420 до 750 нм.

Для удобства сравнения формы спектров данные преобразовывали к виду нормированных на площадь под графиком и умноженных на 100 СКСЯ (Сухоруков и др., 2000; Spyraikos et al., 2018):

$$\rho(\lambda_i) = 100 \times \frac{\rho(\lambda_i)}{[\rho(\lambda_1) + \rho(\lambda_2) + \rho(\lambda_3) + \dots + \rho(\lambda_N)]},$$

где N — количество каналов.

Спектрометрическую съёмку проводили на Цимлянском вдхр., оз. Байкал, Чёрном море и Таганрогском зал. — с борта судна с высоты около 2–3 м; на р. Волге и Северном вдхр. р. Темерник — с гидротехнических сооружений с высоты 3–10 м, на реках Дон и Кубань — с мостовых переходов с высоты 5–30 м. СКСЯ рек Кубань, Волга, Чёрного моря и оз. Байкал представлены в ограниченном объёме.

Выбранные для статистического анализа нормированные СКСЯ приведены на *рис. 1*.

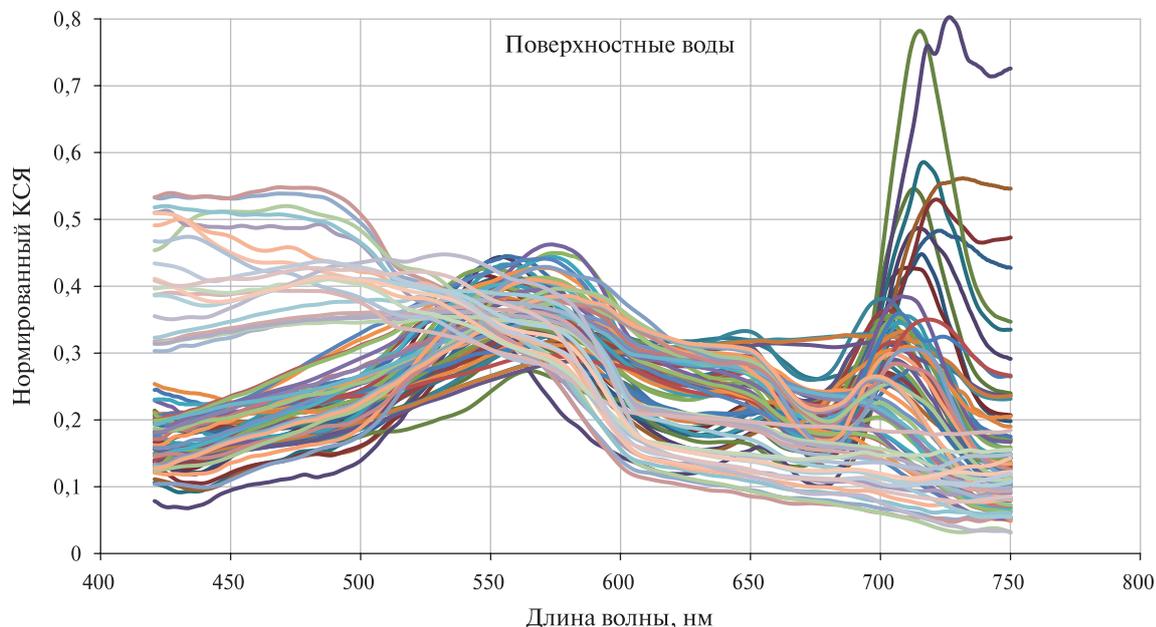


Рис. 1. Типичные спектры КСЯ для отдельных внутренних вод России

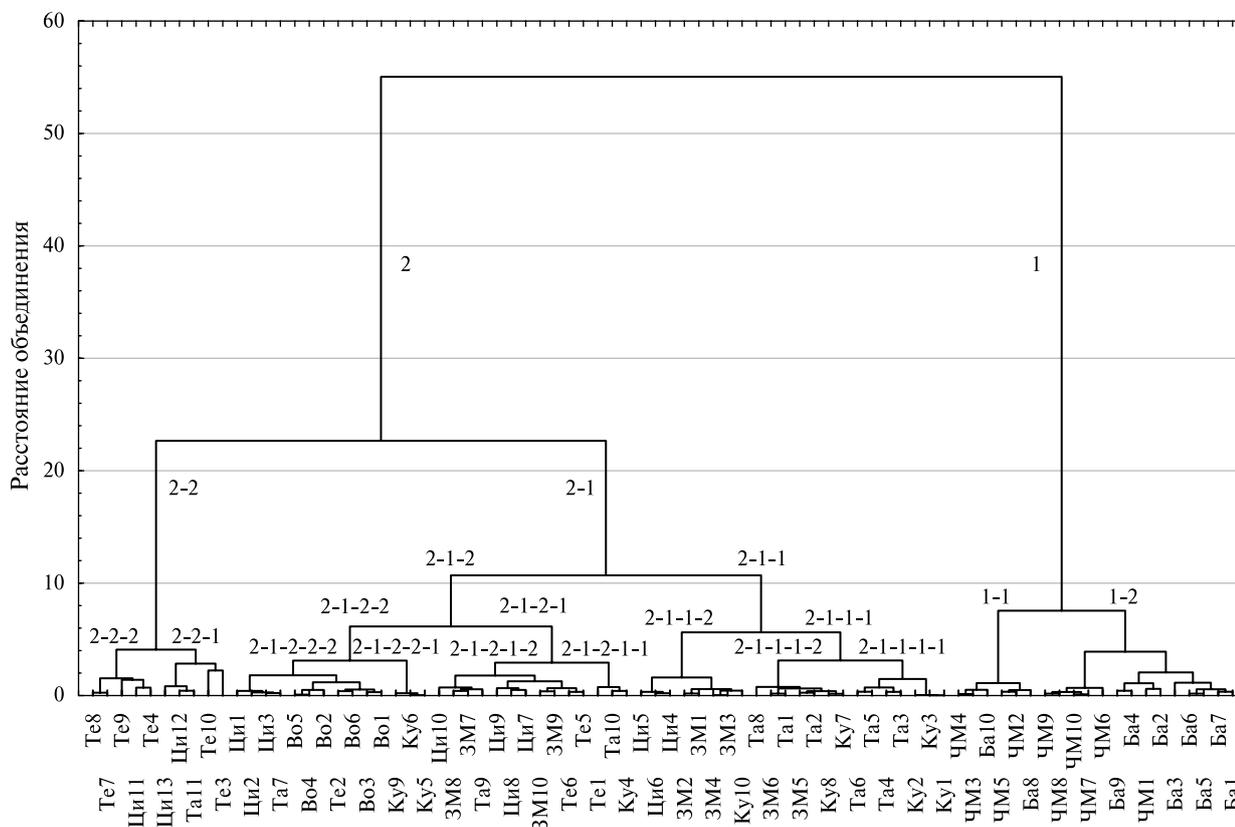


Рис. 2. Дендрограмма кластерного анализа типичных для водных объектов России СКСЯ

На первом этапе для классификации СКСЯ сформировали массив из 80 нормированных СКСЯ, полученных на разных ВО за период 2009–2020 гг. (см. *рис. 1*).

Результат кластеризации массива СКСЯ по методу Варда (*англ.* Ward-Method), дивизимному методу кластеризации с использованием стандартного пакета Statistica-6 (Халафян, 2009), представлен на *рис. 2* (см. с. 216) в виде дендрограммы (дерева классификации).

По оси *У* отложена числовая характеристика — расстояние объединения СКСЯ по форме. Чем меньше расстояние объединения, тем более схожи СКСЯ и тем меньше сумма квадратов разностей величин СКСЯ. У двух СКСЯ, полученных на одной станции, расстояние объединения минимально и не превышает 0,1–0,3. У «несхожих» СКСЯ расстояние объединения достигает 50 и выше. Расстояние объединения противоположно «сходству». Для одинаковых СКСЯ «сходство» равно 1.

По оси *X* приведена привязка СКСЯ к водным объектам и использованы следующие сокращения: Ба — Байкал, Чм — Чёрное море, Та — Таганрогский зал. Азовского моря, ЗМ — западный мост р. Дон, Ци — Цимлянское вдхр., Те — р. Темерник (приток р. Дон), Ку — р. Кубань, Во — р. Волга.

Полученные результаты

Интерпретация полученного результата кластеризации заключается в объяснении структуры дерева классификации в понятиях, очевидных для предметной отрасли: мониторинга ВО и функционирующих в них экосистем. Считают, что в мониторинге определяют концентрацию основных химических и биологических компонентов экосистем, включённых в процесс их метаболизма. Мы ставим перед собой более скромную, но необходимую на начальном этапе задачу: интерпретировать структуру полученного дерева на основе очевидного различия формы СКСЯ.

На дендрограмме отчётливо выделяются группы СКСЯ, принадлежащих Чёрному морю и оз. Байкал, и группы спектров, принадлежащих рекам и водохранилищам. Разделение ВО по СКСЯ на воды 1-го и 2-го типа условно позволяет считать воды 1-го типа «прозрачными малопродуктивными», воды 2-го типа — «мутными высокопродуктивными». Условность использования критериев разделения типов вод по форме СКСЯ заключается в том, что известны случаи, когда в прозрачных водах отмечалась высокая продуктивность (Lee, Tang, 2022; Vazyulya et al., 2023), и наоборот, в мутных водах на определённых этапах (фазах) развития экосистемы фиксируется кратковременная пониженная продуктивность.

Для дальнейшего пояснения смысла деления СКСЯ по форме рассчитаем средние величины нормированных СКСЯ для каждой ветви дерева, представленного на *рис. 2*. Результаты приведены на *рис. 3* (см. с. 218).

На *рис. 3а* и *б* приведены средние СКСЯ для расстояния объединения более 50. Для СКСЯ вод 1-го типа характерно наличие «спектрального разнообразия» в синей области спектра и отсутствие значимых изменений в структуре после 600 нм. Для вод 2-го типа основные спектральные различия наблюдаются в диапазоне длин волн от 500 до 750 нм, в красной области спектра. Критерий разделения вод на 1-й и 2-й типы по оптическим показателям (СКСЯ): $\rho_{<600} \gg \rho_{>600}$ (для вод 1-го типа).

Водам 1-го типа соответствуют СКСЯ, формально разделённые на два класса, 1-1 и 1-2, для расстояния объединения, равного 6 (см. *рис. 2*). Средние СКСЯ этих классов приведены на *рис. 3в* и *г*, их отличие проявляется в смещении широкого максимума на длине волны 400–450 нм в длинноволновую сторону. В нашу задачу не входит детальный анализ спектральной структуры СКСЯ вод 1-го типа в связи с ограниченным объёмом имеющихся в нашем распоряжении спектров, но выделение этих кластеров, хорошо известных по литературным данным, подтверждает корректность используемого нами метода кластеризации.

В процессе описания результатов кластеризации СКСЯ вод 2-го типа для крупных кластеров удобно использовать понятие классов и подклассов, для более мелких — групп и подгрупп.

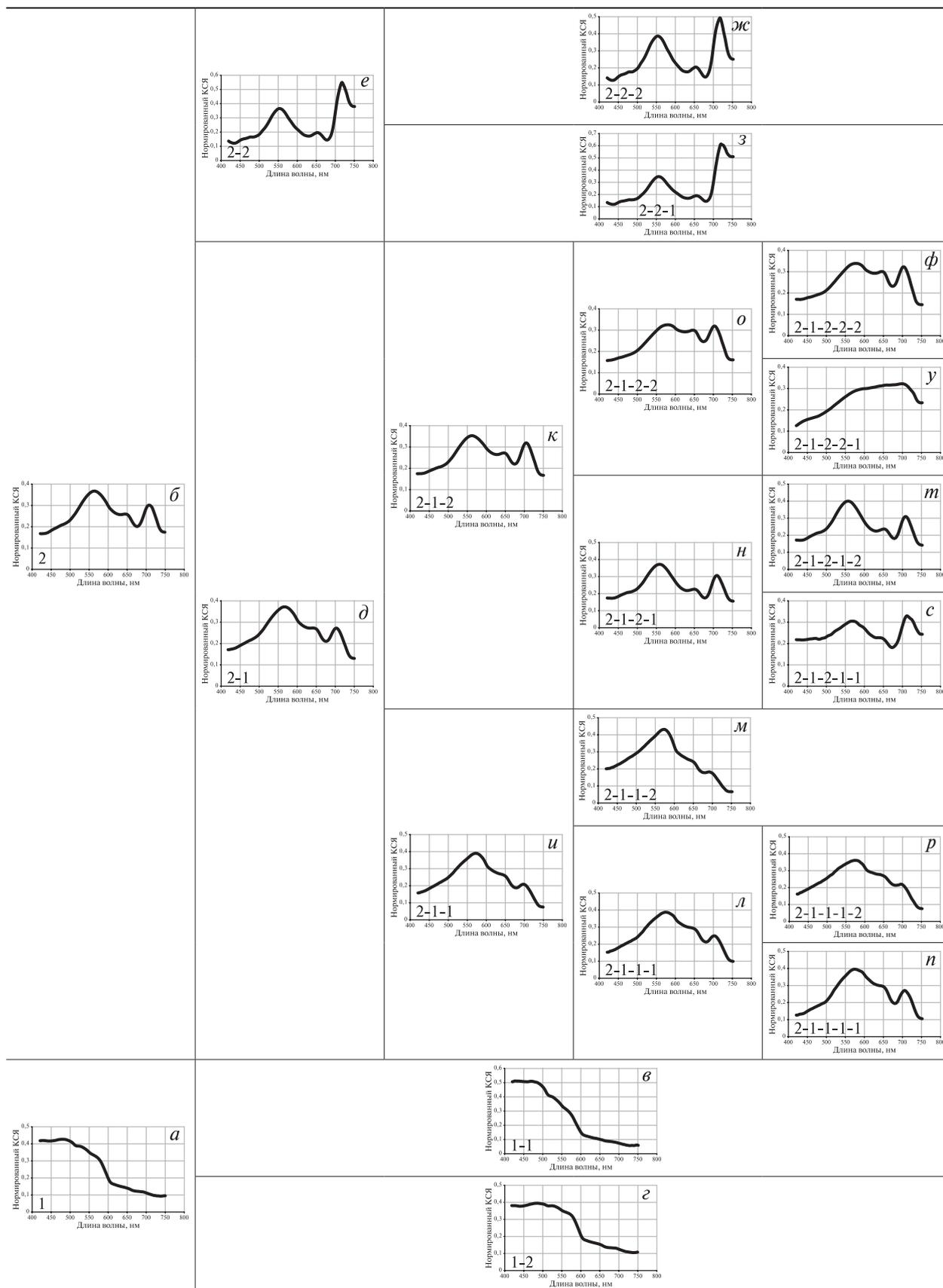


Рис. 3. Средние спектры КСЯ для кластеров в соответствии с дендрограммой

Водам 2-го типа соответствуют СКСЯ, разделённые на классы 2-1 и 2-2 с расстоянием объединения 20 (см. рис. 2), средние СКСЯ которых представлены на рис. 3д, е.

На рис. 3д приведён средний СКСЯ класса 2-1, содержащего более 2/3 всех анализируемых спектров.

Средний СКСЯ класса 2-2 (см. рис. 3е) выделяется формой максимума на длине волны около 700 нм, превышающего по величине главный максимум на длине волны вблизи 560 нм: $\rho_{700} \gg \rho_{560}$.

СКСЯ, входящие в кластер класса 2-2, делятся на два подкласса 2-2-1 и 2-2-2 для расстояния объединения около 4 (см. рис. 2), средние СКСЯ которых представлены на рис. 3ж, з. Для обоих этих подклассов $\rho_{700} \gg \rho_{560}$.

Форма СКСЯ на рис. 3ж отличается формой максимума на длине волны 700 нм: $\rho_{750} \approx \rho_{700}$, тогда как для СКСЯ класса 2-2 подкласса 2-2-2 (см. рис. 3з) характерно $\rho_{750} \ll \rho_{700}$.

СКСЯ кластера класса 2-1 (см. рис. 3д) делятся на два подкласса 2-1-1 и 2-1-2 для расстояния объединения, равного 9 (см. рис. 2), средние СКСЯ которых представлены на рис. 3и и к.

На различие форм СКСЯ подклассов 2-1-1 и 2-1-2 следует обратить особое внимание. Принципиальное различие этих СКСЯ состоит в наличии и отсутствии минимума на длине волны около 625 нм. Эта особенность будет сопровождать в дальнейшем деление этих подклассов на группы и подгруппы. Для подкласса 2-1-1 — $\rho_{625} < \rho_{650}$, для подкласса 2-1-2 — $\rho_{625} > \rho_{650}$.

Более мелкое разделение подклассов 2-1-1 и 2-1-2 на группы и подгруппы проявляется в виде двух особенностей: незначительном изменении «остроты» главного максимума (на длине волны около 560 нм), а также в соотношении максимумов на 560 и 700 нм и их смещении.

В соответствии с рекомендациями деления исходного массива при дивизимной кластеризации массив делят на кластеры до тех пор, пока получают кластеры, структура которых прозрачна (очевидна) для интерпретатора, а более мелкое деление не несёт дополнительной содержательной информации. В результате удаётся выделить 9 групп СКСЯ, средние которых значительно отличаются своей формой и приведены на рис. 3ж, з, м, н–ф.

Представленное на рис. 3 разделение СКСЯ по форме в общих чертах совпадает с результатами работы (Spyrakos et al., 2018), полученными при кластеризации СКСЯ ВО практически всех континентов. Такое совпадение в разделении оптических образов водных объектов, представленных в виде СКСЯ, полученных различными математическими методами, очевидно неслучайно и позволяет использовать полученный результат в качестве фундамента для решения сформулированной выше задачи.

Интерпретация полученных результатов

Механизм формирования СКСЯ хорошо известен из отечественной литературы (Голубицкий и др., 1974; Зеге, 1982), что даёт основание для интерпретации СКСЯ по особенностям их формы с учётом знания показателей гидробиологии и гидрохимии, полученных из синхронной опорной информации.

Концентрация взвешенных веществ ($C_{\text{вв}}$) в водах 1-го типа, по данным (Morel, Prieur, 1977), не превышает 0,5–1 мг/дм³. Концентрация хлорофилла *a* фитопланктона ($C_{\text{хл}a}$) составляет не более 1 мкг/дм³. Этот тип СКСЯ отчётливо выделяется на дендрограмме. Для него характерны «спектральные изменения» в синей области спектра и минимальные значения СКСЯ после 600 нм (см. рис. 3а, в, г). Форма модельных СКСЯ, рассчитанных по формулам из работы (Сухоруков и др., 2000) с указанными концентрациями $C_{\text{хл}a}$ и $C_{\text{вв}}$, подтверждает экспериментальные данные. Очевидный критерий различия вод 1-го и 2-го типов: $\rho_{<600} \gg \rho_{>600}$.

Для вод 2-го типа характерен СКСЯ со средним, представленным на рис. 3б. Известно, что отличительная особенность вод 2-го типа состоит в высоких концентрациях суммарных взвешенных веществ и фитопланктона: $C_{\text{вв}}$ может достигать сотен миллиграмм на кубический дециметр, $C_{\text{хл}a}$ — тысяч микрограмм на кубический дециметр. Дальнейшая интерпретация проводится на основе именно этих показателей, составляющих основу опорной информации,

а также с учётом классификации СКСЯ по форме, напрямую связанной с трофностью водного объекта (Сухоруков и др., 2017).

Прежде всего, и по дендрограмме, и из сравнения *рис. 3д, е* видно, что воды 2-го типа имеют два существенно различающихся по форме СКСЯ класса: 2-1 и 2-2.

СКСЯ класса 2-2 (см. *рис. 3е*) занимает особое место в систематике СКСЯ. Форма СКСЯ этого класса типична для зелёной растительности более, чем для ВО. Данный класс можно назвать классом с ярко выраженной гиперэвтрофностью (условно классом 2.ГТ). Внутреннее его деление на два подкласса: 2-2-1 и 2-2-2 — скорее условно и характеризуется наличием или отсутствием плёнки или «ковра» колоний и живого и отмершего фитопланктона.

В класс 2-1 (см. *рис. 3д*) попадает подавляющее большинство СКСЯ. При всём разнообразии форм СКСЯ данного класса это «нормально развивающаяся (функционирующая) экосистема». Изменения концентраций и $C_{\text{хл}a}$, и фикоцианина ($C_{\text{фц}}$) находятся в пределах возможных сезонных изменений фитопланктона. Этот класс условно обозначим как 2.Н.

Из дендрограммы и *рис. 3и, к* видно, что класс 2-1 делится на два подкласса с очевидными различиями в форме СКСЯ.

СКСЯ подкласса 2-1-1 (см. *рис. 3и*), в отличие от всех остальных, включая «средний» (см. *рис. 3б*), не имеет минимума на длине волны 625 нм, что свидетельствует о минимальной концентрации синезелёных водорослей (цианобактерий), и содержит минимальное количество фикоцианина фитопланктона. При этом по величине ρ_{700} можно оценивать значения $C_{\text{хл}a}$ (за исключением трёх СКСЯ, на которых остановимся при описании соответствующей группы). Условно обозначим этот достаточно обширный подкласс как 2.Н.Д.

Подкласс 2-1-2 (см. *рис. 3к*) без детального обсуждения спектральных особенностей СКСЯ можно условно обозначить как 2.Н.СЗ, так как отчётливо видно, что на всех СКСЯ этого подкласса (кроме нескольких, р. Кубань (см. *рис. 3у*)) наблюдается типичный минимум на длине волны около 625 нм, что свидетельствует о присутствии в экосистеме ВО значительного количества синезелёных водорослей (цианобактерий).

Интерпретацию причин дальнейшего разделения кластеров на более мелкие удаётся выполнить при параллельном сравнении СКСЯ в диапазонах длин волн 560–600 и 700–675 нм. Первый диапазон связан с изменением концентрации и состава взвешенных веществ, второй — с изменением концентрации и видового состава фитопланктона.

В связи с тем, что проконтролировать изменение состава взвешенных веществ достаточно трудно (изменяется плотность и крупность частиц взвеси), предложено характеризовать различия $\rho_{560} - \rho_{600}$ по степени увеличения мутности. Мутность в значительной степени связана с концентрацией взвешенных веществ $C_{\text{вв}}$. Слабо мутную (с концентрацией $C_{\text{вв}}$ до 10 мг/дм³) обозначим М1, мутную (с $C_{\text{вв}}$ от 10 до 50 мг/дм³) — М2 и гипермутную (с $C_{\text{вв}}$ выше 50 мг/дм³) — М3.

Трофность оцениваем по значениям $\rho_{700} - \rho_{675}$, связанным с $C_{\text{хл}a}$ в соответствии с работой (Сухоруков и др., 2017) шестью градациями от 1 до 6, Т1–Т6.

Подкласс 2-2-1. Средние СКСЯ приведены на *рис. 3ж*. Спектральный критерий этого подкласса — ($\rho_{700} \approx \rho_{750}$) \gg ρ_{560} ; $\rho_{625} < \rho_{650}$. Такие СКСЯ получают на водоёмах с ковром фитопланктона на поверхности воды со значениями $C_{\text{хл}a}$ от 144,79 до 1522,4 мкг/дм³. В этот подкласс попадают СКСЯ Таганрогского зал., зафиксированные 02.10.2019, Цимлянского вдхр. конца сентября 2018 г. и р. Темерник за 16.07.2020 и 23.09.2020. Сравнение с классификацией состояний по трофности (Сухоруков и др., 2017) показывает, что трофность экосистем на этих станциях увеличивается и относится к гиперэвтрофной. Обозначение данного подкласса — 2.ГТ.СЗ.(М2.Т6).

Подкласс 2-2-2. Средние СКСЯ приведены на *рис. 3з*. Спектральный критерий этого подкласса — $\rho_{700} \gg \rho_{560}$; $\rho_{750} \approx \rho_{560}$; $\rho_{625} < \rho_{650}$. Мутность воды уменьшается до М1, но $C_{\text{хл}a}$ — от 126,77 до 351,42 мкг/дм³. В этот подкласс попадают СКСЯ Цимлянского вдхр., зафиксированные 29.09.2018, и р. Темерник за июль и сентябрь 2020 г. Сравнение с классификацией состояний по трофности (Сухоруков и др., 2017) показывает, что трофность экосистем на этих станциях увеличивается и относится к гиперэвтрофной. Обозначение данного подкласса — 2.ГТ.СЗ.(М1.Т6).

Введение градаций по $C_{\text{вв}}$, $C_{\text{хл а}}$ позволяет понять смысл обозначения группы 2-1-1-2 = 2.Н.Д.(М1.Т1-3) (см. рис. 3м). Спектральный критерий этой группы — $\rho_{625} > \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = 0,08-0,13$; $(\rho_{700} - \rho_{675}) = -0,03...-0,05$. Для этой группы СКСЯ значения $C_{\text{хл а}}$ от 1,99 до 12,5 мкг/дм³ — минимальны, с наиболее прозрачной (наименее мутной) водой. В эту группу попадает СКСЯ р. Кубани, но полученный в начале лета, до периода таяния ледников Кавказа.

Подгруппа 2-1-1-1-1 (средние СКСЯ приведены на рис. 3н) относится к подклассу 2.Н.Д. со значениями $C_{\text{хл а}}$ от 13,2 до 55,2 мкг/дм³. Мутность воды увеличивается до М2. В эту подгруппу попадают СКСЯ Таганрогского зал., зафиксированные 29.03.2009, и р. Кубани, полученные 06.04.2009. Сравнение с классификацией состояний по трофности (Сухоруков и др., 2017) показывает, что трофность экосистем на этих станциях увеличивается и относится к мезотрофной и эвтрофной, окончательное обозначение данной подгруппы — 2.Н.Д.(М2.Т3-4). Спектральный критерий указанной подгруппы — $\rho_{625} > \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = 0,03-0,05$; $(\rho_{700} - \rho_{675}) = 0,05-0,13$.

Подгруппе 2-1-1-1-2 со средним СКСЯ, приведённым на рис. 3р, соответствуют более высокие значения $C_{\text{хл а}}$: от 3,9 до 14,1 мкг/дм³. Соответственно, её обозначение — 2.Н.Д.(М2.Т2-3). Сравнение с классификацией состояний по трофности (Сухоруков и др., 2017) показывает, что в эту подгруппу уже не попадают СКСЯ 1-й категории, относящиеся к олиготрофным водным объектам. СКСЯ 2–3-й категории указывает на принадлежность этих вод к олиготрофно-мезотрофным и мезотрофным. Спектральный критерий данной подгруппы — $\rho_{625} > \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = 0,02-0,09$; $(\rho_{700} - \rho_{675}) = -0,02...-0,03$. Обратим внимание на то, что в эту же группу попадают и СКСЯ р. Кубани, полученные 03.06.2010. Воды такие же малопродуктивные, но мутность увеличивается.

Подгруппа 2-1-2-1-1 (средние СКСЯ приведены на рис. 3с). Значения $C_{\text{хл а}}$ — от 89 до 150 мкг/дм³. Мутность воды увеличивается до М2. Спектральный критерий этой подгруппы — $\rho_{625} < \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = 0,02-0,06$; $(\rho_{700} - \rho_{675}) = 0,10-0,18$. В данную подгруппу попадают СКСЯ Таганрогского зал. за 28.06.2019, р. Темерник за 27.10.2020 и Таганрогского зал., полученные в конце июня 2016 г. Сравнение с классификацией состояний по трофности показывает (Сухоруков и др., 2017), что трофность экосистем на указанных станциях увеличивается и относится к эвтрофной-полиэвтрофной и гиперэвтрофной. Обозначение данной подгруппы — 2.Н.СЗ.(М2.Т5-6).

Подгруппа 2-1-2-1-2 отличается тем, что в неё попадают СКСЯ (средние СКСЯ приведены на рис. 3т) многих водных объектов: Цимлянского вдхр., р. Дон, Таганрогского зал., р. Темерник. Эти данные получены в августе–сентябре — в период летней гомотермии. Обозначение данной подгруппы — 2.Н.СЗ.(М2.Т4-5). Спектральный критерий — $\rho_{625} < \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = 0,08-0,18$; $(\rho_{700} - \rho_{675}) = 0,07-0,21$.

Особо выделим *подгруппу 2-1-2-2-1* с уникальными по форме СКСЯ (средние СКСЯ приведены на рис. 3у), зарегистрированными на р. Кубани во время таяния ледников (в июне). Концентрацию $C_{\text{вв}}$ оценивали по данным, полученным на сети Росгидромета, которая оказалась в 2009 г. равной 350 мг/дм³, а в 2010 г. — 96,8 мг/дм³. Для сравнения, в р. Дон за весь период наших наблюдений $C_{\text{вв}}$ не превышала 30 мг/дм³. Тип этих вод — гипермутные воды с неопределяемой трофностью (2.Н.СЗ.(М3.Т?)). Спектральный критерий данной подгруппы — $\rho_{625} < \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = -0,02...-0,01$. Оценивать трофность по значению $(\rho_{700} - \rho_{675})$ не имеет смысла, так как в СКСЯ исчезает «селективность», характерная для любых водных объектов 2-го типа.

Подгруппа 2-1-2-2-2 (средние СКСЯ приведены на рис. 3ф). Значения $C_{\text{хл а}}$ — от 13,72 до 143,12 мкг/дм³. Мутность воды увеличивается до М2. В эту подгруппу попадают СКСЯ Таганрогского зал. за 28.06.2019, Цимлянского вдхр. середины мая 2018 г., р. Темерник за 27.10.2020 и р. Волги, полученные в конце июля и начале августа 2011 г. Сравнение с классификацией состояний по трофности показывает (Сухоруков и др., 2017), что трофность экосистем на этих станциях увеличивается и относится к мезотрофной и эвтрофной-полиэвтрофной. Обозначение данной подгруппы — 2.Н.СЗ.(М2.Т3-5). Спектральный критерий — $\rho_{625} < \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = 0,01-0,05$; $(\rho_{700} - \rho_{675}) = 0,02-0,15$.

Заключительная интерпретация параметров классификации поверхностных вод по форме представлена в *таблице*.

Характеристики вод 2-го типа

Водный объект, дата	$C_{xлa}$, мкг/дм ³	$C_{вв}$, мкг/дм ³	Категории трофности	Обозначение и критерии типа СКСЯ
Ци13, 29.09.2018	163,94		6	2.ГТ.СЗ.(М2.Т6)
Ци12, 29.09.2018	144,79		6	$\rho_{625} < \rho_{650}$; $(\rho_{700} \approx \rho_{750}) \gg \rho_{560}$
Та11, 02.10.2019	620,00	47,8	6	
Те10, 23.09.2020	1114,40	20,7	6	
Те3, 16.07.2020	1522,40	40,0	6	
Те8, 22.07.2020	126,77	20,0	6	
Те7, 22.07.2020	145,21	13,8	6	2.ГТ.СЗ.(М1.Т6) $\rho_{625} < \rho_{650}$; $\rho_{700} \gg \rho_{560}$; $\rho_{750} \approx \rho_{560}$
Те9, 23.09.2020	351,42	12,2	6	
Ци11, 29.09.2018	59,10		6	
Те4, 16.07.2020	288,40	5,8	6	
Ци5, 20.05.2018	11,70		3	
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	
Та6, 29.03.2016	55,16		4	2.Н.Д.(М2.Т3-4) $\rho_{625} > \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = 0,03-0,05$; $(\rho_{700} - \rho_{675}) = 0,05-0,13$
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	
Та8, 28.06.2016	14,08		3	
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	
Те1, 27.10.2020	150,77	21,7	5	2.Н.СЗ.(М2.Т5-6) $\rho_{625} < \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = 0,02-0,06$; $(\rho_{700} - \rho_{675}) = 0,10-0,18$
Та10, 28.06.2016	89,40		6	
Ку4, 06.04.2009			6	
Ци10, 29.09.2018	16,64		5	2Н.СЗ.(М2.Т4-5) $\rho_{625} < \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = 0,08-0,18$; $(\rho_{700} - \rho_{675}) = 0,07-0,21$
ЗМ8, 27.08.2015	14,94		4	
ЗМ7, 27.08.2015	21,45		5	
Та9, 28.06.2016			5	
Ци9, 29.09.2018	32,60		5	
Ци8, 29.09.2018	56,86		5	
Ци7, 29.09.2018	38,46		5	
ЗМ10, 15.08.2015			5	
ЗМ9, 15.08.2015			5	
Те6, 10.08.2020	86,22	23,5	5	
Те5, 10.08.2020	67,82	17,1	5	
Ку9, 01.06.2009		350,0*	н/о	2.Н.СЗ.(М3.Т?) Оценить трофность невозможно. $\rho_{625} < \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = -0,02...-0,01$
Ку6, 02.06.2010		96,5*	н/о	
Ку5, 02.06.2010			н/о	

Водный объект, дата	$C_{\text{хл } a}$, мкг/дм ³	$C_{\text{вв}}$, мкг/дм ³	Категории трофности	Обозначение и критерии типа СКСЯ
Ци1, 17.05.2018	13,79		3	2.Н.СЗ.(М2.Т3-5)
Ци2, 18.05.2018	14,48		3	$\rho_{625} < \rho_{650}$; $(\rho_{560} - \rho_{600}) = 0,01-0,05$; $(\rho_{700} - \rho_{675}) = 0,02-0,15$
Ци3, 18.05.2018	19,98		3	
Та7, 28.06.2019	22,98		3	
Во5, 26.07.2011	40,20		5	
Во4, 26.07.2011	40,20		5	
Во2, 03.08.2011	40,30		5	
Те2, 27.10.2020	143,12	26,3	5	
Во6, 26.07.2011	40,20		5	
Во3, 03.08.2011	66,36		5	
Во1, 03.08.2011	73,25		5	

Примечание: $C_{\text{хл } a}$ и $C_{\text{вв}}$ — значения концентрации хлорофилла *a* фитопланктона и концентрации взвешенных веществ, определённые аналитическими методами в пробах воды; * — значения концентрации, взятые из наблюдений на сети Росгидромета для данного водного объекта в данный период времени.

Заключение

Таким образом, на основе кластеризации многолетней спектроскопической информации выполнена классификация СКСЯ и её последующая интерпретация. Для вод 1-го типа (морских, оз. Байкал) типичный спектр представлен на *рис. За*. Для вод 2-го типа (мутных, продуктивных) выделено три класса, очевидно различающихся по форме СКСЯ. Средние спектры этих классов приведены на *рис. Зе, к, и*. Установлены критерии различимости СКСЯ по спектроскопическим данным. Эти классы СКСЯ соответствуют гиперэвтрофным водам 2-го типа (2.ГТ), водам 2-го типа с повышенным содержанием синезелёных или диатомовых водорослей (2.Н.СЗ и 2.Н.Д).

В процессе кластеризации на начальном этапе с очевидностью не выделяются СКСЯ для вод с повышенной мутностью, кластер которых можно было бы обозначить как 2.ГМ. По нашей классификации эти уникальные спектры относятся к группе 2.Н.СЗ.(МЗ.Т?). Причина выделения их на последнем этапе кластеризации, по-видимому, заключается в критериях разделения, заложенных в методе Варда, не настроенном на выявление уникальных кривых.

Классификация, содержащая средние СКСЯ более мелких кластеров-групп, представлена на *рис. Зж, з, ф, у, с, т, м, н, р* — всего 9 типичных форм. Здесь к разделению кластеров по ярко выраженным спектральным признакам (вышеуказанным трём классам) добавляется разделение по менее выраженным признакам, связанным со знанием показателей опорной информации. Тот факт, что указанные показатели учитываются лишь на нижних этапах кластеризации, подчёркивается тем, что показатели и M_x , и T_x приводятся в скобках. Оценивают градации изменения мутности от 1 до 3 по форме главного максимума на длине волны в области 560 нм и трофности от 1 до 6 по величине максимума в области 700 нм.

Исходя из имеющихся у нас данных СКСЯ и ввиду отсутствия дополнительных оснований, которые можно было бы получить из анализа опорной химической и (или) биологической информации для дальнейшего разбиения кластеров (классов, групп и т.д.) на настоящем этапе развития направления дистанционного мониторинга водных экосистем, можно сделать вывод, что дальнейшее уточнение представленной классификации нецелесообразно. Включение в предлагаемую классификацию СКСЯ характерных для мелководных участков водных объектов или ветлендов, ранее опубликованных нами (Сухоруков, Решетняк, 2018), требует дальнейшего обсуждения.

Выводы

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

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

На основании многолетних экспериментов и литературных данных, связывающих форму СКСЯ с формой удельных (селективных и неселективных) спектров показателя поглощения, представлены критерии различимости СКСЯ по их соотношению на нескольких длинах волн: $\rho_{<600} \gg \rho_{>600}$ — деление на воды 1–2-го типов по оптическим данным.

Для вод 2-го 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 синезелёных (класс 2.Н.СЗ); $\rho_{625} > \rho_{650}$ — 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) оценки типичной для вод 2-го типа трофности ВО.

На основе изменения разности $\rho_{560} - \rho_{600}$ выделено три градации мутности: более 0,08 — М1; от 0,07 до 0,02 — М2; менее 0,01 — М3. На основе изменения разности $\rho_{700} - \rho_{675}$ — 6 градаций трофности: более 0,25 — Т6; от 0,24 до 0,14 — Т5; от 0,13 до 0,06 — Т4; от 0,05 до 0,01 — Т3; от 0,00 до 0,01 — Т2 и менее 0,02 — Т1.

Литература

1. Голубицкий Б. М., Левин И. М., Танташев М. В. Коэффициент яркости полубесконечного слоя морской воды // Изв. Акад. наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1974. Т. 10. № 11. С. 1235–1238.
2. Зеге Э. П. Инженерные методы расчета световых полей в условиях многократного рассеяния: Распространение света в дисперсной среде. Минск: Наука и техника, 1982. С. 84–105.
3. Копелевич О. В. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 171 с.
4. РД 52.24.729.2010. Дистанционная спектрометрическая съемка водных объектов в видимом диапазоне волн с мостовых переходов. Ростов н/Д, 2010. 27 с.
5. Сухоруков Б. Л., Решетняк Н. В. Глава III/47: Развитие метода дистанционной спектроскопии применительно к задаче оценки состояния водных экосистем и классификации акваландшафтов // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. В 5 т. Т. 3 / под ред. акад. РАН Сычёва В. Г., Мюллера Л. М.: Изд-во ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», 2018. С. 224–228. DOI: 10.25680/9000.2018.56.65.240.
6. Сухоруков Б. Л., Гарбузов Г. П., Никаноров А. М. Оценка экологического состояния водных объектов по спектрам коэффициента яркости // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 5. С. 579–588.
7. Сухоруков Б. Л., Ковалева Г. Е., Новиков И. В. Оценка трофности водных объектов по данным дистанционной спектроскопии высокого разрешения видимого диапазона // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 1. С. 79–90. DOI: 10.7868/S0321059617010199.
8. Сухоруков Б. Л., Новиков И. В., Ковалёва Г. Е., Решетняк Н. В. База спектрометрических данных высокого разрешения по водным объектам юга России. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2018620272. Рег. 14.02.2018.
9. Сухоруков Б. Л., Решетняк Н. В., Ковалева Г. Е. Биооптическая модель Нижнего Дона для оценки концентрации хлорофилла *a* фитопланктона по дистанционной спектрометрической информации // Наука Юга России. 2020. Т. 16. № 2. С. 41–50. DOI: 10.7868/S25000640200205.
10. Халафян А. А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. М.: Бином, 2009. 522 с.
11. Шифрин К. С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 280 с.
12. Lee Z., Tang J. The Two Faces of “Case-1” Water // J. Remote Sensing. 2022. V. 2022. Article 9767452. DOI: 10.34133/2022/9767452.
13. Mobley C. D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. // Applied Optics. 1999. V. 38(36). P. 7442–7455. DOI: 10.1364/ao.38.007442.

14. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color // *Limnology and Oceanography*. 1977. V. 22. No. 4. P. 709–722.
15. Spyarakos E., O'Donnell R., Hunter P. D. et al. Optical types of inland and coastal waters // *Limnology and Oceanography*. 2018. V. 63. No. 2. P. 846–870. DOI: 10.1002/lno.10674.
16. Vazyulya S., Deryagin D., Glukhovets D. et al. Regional Algorithm for Estimating High Coccolithophore Concentration in the Northeastern Part of the Black Sea // *Remote Sensing* 2023. V. 15. Article 2219. DOI: 10.3390/rs15092219.

Classification of surface waters according to remote spectrometry data of visible range

B. L. Sukhorukov^{1,2}, N. V. Reshetnyak¹

¹ *Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don 344090, Russia*
E-mail: nvr-phys@yandex.ru

² *Water Problems Institute RAS, South Division, Rostov-on-Don 344090, Russia*
E-mail: bls-phys@yandex.ru

The experimental data of long-term spectrometric measurements obtained on water bodies of Russia in the period from 2009 to 2020 are analyzed. Remote hyperspectral fieldwork was carried out from various platforms of the lower level from heights of 2 to 30 m. The main analyzed indicator was the spectrum of remote sensing reflectance (R_{rs}) of the radiation ascending from water in the visible region of the spectrum, 420–750 nm, with a spectral resolution of 1.8 nm. A classification graph of R_{rs} was constructed according to the shape of the spectra using the Ward's method (divisive clustering). Average R_{rs} for each class and each group corresponding to the dendrogram are presented. The interpretation of R_{rs} of each of the groups is based on the knowledge of spectral features of optically active (visible) components of the aquatic ecosystem. The classification of R_{rs} according to purely spectral information makes it possible to single out three classes of spectra that obviously differ in shape. Further clustering is carried out within these classes using reference data obtained from analytical determination of water turbidity and trophicity of aquatic ecosystems. For waters of the second type, according to the spectral features, a total of 9 groups of R_{rs} were distinguished. A compact notation for each of the groups is proposed.

Keywords: surface waters, remote spectrometry, remote sensing reflectance, phytoplankton, chlorophyll, water ecosystem, clustering, dendrogram

Accepted: 25.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-214-226

References

1. Golubitskii B. M., Levin I. M., Tantashev M. V., Luminance coefficient of a semi-infinite layer of sea-water, *Izvestiya Akademii nauk SSSR, Ser. Fizika atmosfery i okeana*, 1974, Vol. 10, No. 11, pp. 1235–1238 (in Russian).
2. Zege E. P., *Inzhenernye metody rascheta svetovykh polei v usloviyakh mnogokratnogo rasseyaniya. Rasprostranenie sveta v dispersnoi srede* (Engineering methods for calculating light fields under multiple scattering conditions. Propagation of light in a dispersed medium), Minsk: Nauka i tekhnika, 1982, pp. 84–105 (in Russian).
3. Kopelevich O. V., *Optika okeana. T. 1. Fizicheskaya optika okeana* (Ocean Optics. Vol. 1. Physical Ocean Optics), Moscow: Nauka, 1983, 371 p. (in Russian).
4. RD 52.24.729.2010. *Distsionnaya spektrometricheskaya s'emka vodnykh ob'ektov v vidimom diapazone voln s mostovykh perekhodov* (RD 52.24.729.2010. Remote spectrometric survey of water bodies in the visible wavelength range from bridge crossings), Rostov-on-Don, 2010, 2 p. (in Russian).

5. Sukhorukov B. L., Reshetnyak N. V., Chapter III/47: Development of a Method of Remote Spectrometry for Assessing the State of Aquatic Ecosystems and Classification of Aquatic Landscapes, In: *Novel Methods and Results of Landscape Research in Europe, Central Asia and Siberia, in 5 vol., Vol. 3, Landscape Monitoring and Modelling*, V. G. Sychev, L. Mueller (eds.), Moscow: Publ. House FSBSI “Pryanishnikov Institute of Agrochemistry”, 2018, pp. 224–228 (in Russian), DOI: 10.25680/9000.2018.56.65.240.
6. Sukhorukov B. L., Garbuzov G. P., Nikanorov A. M., Assessment of the state of water bodies by the spectra of the brightness coefficient, *Vodnye resursy*, 2000, No. 5, pp. 579–588 (in Russian).
7. Sukhorukov B. L., Kovaleva G. E., Novikov I. V., Assessing the trophic state of water bodies by high-resolution remote spectrometry in visible band, *Water Resources*, 2017, Vol. 44(1), pp. 117–127.
8. Sukhorukov B. L., Novikov I. V., Kovaleva G. E., Reshetnyak N. V., *Baza spektrometricheskikh dannykh vysokogo razresheniya po vodnym ob'ektam yuga Rossii* (Database of high-resolution spectrometric data on water bodies in the south of Russia), Certificate of state registration of database No. 2018620272 (RU), Reg. 14.02.2018 (in Russian).
9. Sukhorukov B. L., Reshetnyak N. V., Kovaleva G. E., Bio-optical model of the Lower Don for assessing the phytoplankton chlorophyll a concentration by remote sensing spectrometric information, *Nauka Yuga Rossii*, 2020, Vol. 16, No. 2, pp. 41–50 (in Russian), DOI: 10.7868/S25000640200205.
10. Khalafyan A. A., *STATISTICA 6. Statisticheskii analiz dannykh* (STATISTICA 6. Statistical data analysis), Moscow: Binom, 2009, 522 p. (in Russian).
11. Shifrin K. S., *Vvedenie v optiku okeana* (Introduction to Ocean Optics), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 280 p. (in Russian).
12. Lee Z., Tang J., The Two Faces of “Case-1” Water, *J. Remote Sensing*, 2022, Vol. 2022, Article 9767452, DOI: 10.34133/2022/9767452.
13. Mobley C. D., Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements, *Applied Optics*, 1999, Vol. 38(36), pp. 7442–7455, DOI: 10.1364/ao.38.007442.
14. Morel A., Prieur L., Analysis of variations in ocean color, *Limnology and Oceanography*, 1977, Vol. 22(4), pp. 709–722.
15. Spyrakos E., O'Donnell R., Hunter P. D. et al., Optical types of inland and coastal waters, *Limnology and Oceanography*, 2018, Vol. 63(2), pp. 846–870, DOI: 10.1002/lno.10674.
16. Vazyulya S., Deryagin D., Glukhovets D. et al., Regional Algorithm for Estimating High Coccolithophore Concentration in the Northeastern Part of the Black Sea, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, Article 2219, DOI: 10.3390/rs15092219.