

# Связь оптических характеристик с экологическим состоянием природных вод

А.А. Тимофеев, А.А. Бузников, А.В. Андреева, А.В. Буданов,  
А.Л. Есипов, В.В. Панфилов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),  
197376 Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5  
E-mail: [altimofeev@list.ru](mailto:altimofeev@list.ru)*

Представлены результаты по установлению корреляционных зависимостей между концентрацией компонентов природных вод и комбинациями спектральных яркостей отраженного солнечного излучения. Получены уравнения регрессии для восстановления концентрации указанных компонентов по данным дистанционного зондирования.

## Введение

При современных возможностях получения данных дистанционного зондирования в различных областях спектра, очевидна ценность и необходимость разработки алгоритмов получения по этим данным информации о свойствах изучаемых объектов. Одно из применений таких алгоритмов – экологический мониторинг территорий. Для его осуществления необходимы количественные данные о физическом и химическом состоянии природных объектов. В свою очередь, для получения этих данных необходимо установление корреляционных зависимостей между оптическими параметрами восходящего излучения и концентрацией компонентов, содержащихся в исследуемых природных образованиях и влияющих на их экологическое состояние.

Целью работы являлось исследование связи оптических характеристик природных вод с концентрацией компонентов, влияющих на качество вод для использования этих данных в дистанционном зондировании при определении экологического состояния акваторий.

Исследование проводилось в южной части озера Сайма в Финляндии, на берегу которого расположено несколько целлюлозно-бумажных комбинатов, являющихся источниками загрязнения.

При обработке экспериментальных данных использовался корреляционный анализ для установления связи между спектральной яркостью вод и содержанием оптически активных компонентов в водоеме. Следует отметить, что, как показали ранее проведенные исследования [1, 2], при определенных условиях становится возможным установить не только те компоненты, которые непосредственно влияют на восходящее излучение, но и компоненты, которые не оказывают на него непосредственного влияния. Основным условием такой оценки является постоянство гидродинамических процессов, определяющих распространение и трансформацию химико-биологических полей в водоеме, при постоянных источниках загрязнений.

## Объект исследования

Южная Сайма представляет собой часть большой озерной системы, названной Большая Сайма, и занимает площадь 620 км<sup>2</sup>. Гидрологический режим западной части Южной Саймы, носящей название Западная Малая Сайма, где находятся основные источники загрязнения, определяется Вехкатайпальской наносной станцией, сооруженной в 1936 г. на узком перешейке, разделяющем открытые воды Южной Саймы от Малой Саймы. Эта станция десятикратно увеличивает естественное течение вдоль южного побережья на восток. Индустриальные сточные воды распространяются от целлюлозно-бумажных комбинатов "Каукас" в Лаппеенранта и "Йоутсено Пульп" по направлению к р.Вуоксе. К этим водам добавляются сточные воды

предприятий "Энсо-Гутпейп" в Иматре. Естественная вода в Южной Сайме прозрачная, олиготрофная, слегка окрашенная гумусом. В мелководных районах наблюдаются процессы эвтрофикации.

### Методика исследований

Исследование на озере Сайма проводилось в августе 2003 года, после того как на ЦБК «Кавказ» произошли непредусмотренные сбросы сточных вод, что привело к ухудшению экологического состояния прибрежной зоны по сравнению с 1993 годом, когда проводились последние исследования [3].

Для измерения спектра отраженного водой солнечного излучения использовался полевой фотоэлектрический спектрометр (ПФС), разработанный на основе спектрографа РСС-3 [4] на кафедре КЭОП СПбГЭТУ. Измерения проводились с катера в шести точках озера, часть из которых расположена в чистых водах, а другие – вблизи источников загрязнения. Это дало возможность сравнить спектральные характеристики чистых и загрязненных вод. Условия проведения измерений были: преимущественно сплошная облачность и волнение не более 1–2 баллов.

В точках измерений забирались пробы воды для лабораторного анализа. Расчет коэффициентов спектральных яркостей (КСЯ) производился в диапазоне 400...700 нм с шагом 8 нм по методике, изложенной в [5].

Лабораторные исследования проб воды проводились в химической Лаборатории охраны вод озера Сайма и включали определение следующих показателей качества воды: цветности, мутности, натрия, общего фосфора, общего азота, растворенного кислорода, химического кислородного потребления, электропроводности, рН.

Спектры отраженного излучения регистрировались под углом 45° к водной поверхности и под углами 45, 90, 135° относительно плоскости солнечного вертикала с одного и с другого борта, а также в надир. Для получения статистически значимых измерений, в каждом направлении регистрировалось в среднем по 15 спектров.

### Результаты исследования

Для получения статистически значимых данных и более эффективной обработки данные спектральных измерений в симметричных относительно плоскости солнечного вертикала направлениях были усреднены. После этого состояние вод в каждой точке оценивалось путем анализа трех усредненных спектров, зарегистрированных в разных направлениях. Каждая точка на спектральных зависимостях КСЯ является результатом 20 измерений (рис. 1).

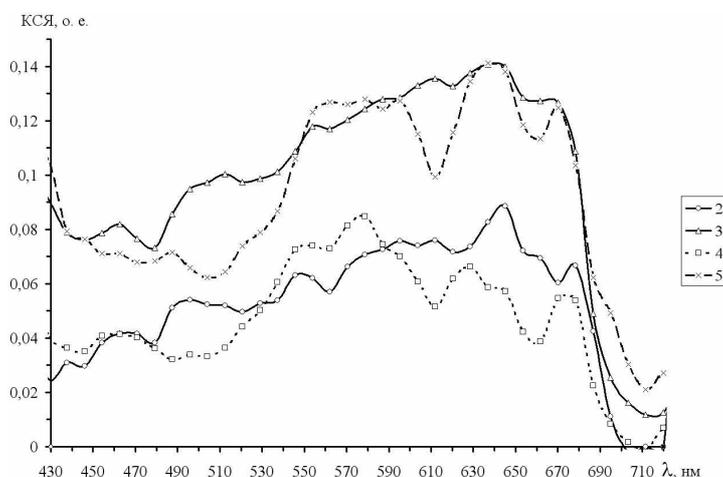


Рис. 1. Коэффициенты спектральной яркости в точках измерений

Анализ полученных данных для установления взаимосвязи химических параметров воды и комбинаций коэффициентов спектральной яркости во всех четырех точках проводился с применением корреляционного метода. КСЯ определялись по формуле

$$R(\lambda) = (I_{\text{отр}} - I_{\text{T}}) / (I_{\text{пад}} - I_{\text{T}}),$$

где  $R(\lambda)$  – КСЯ;  $I_{\text{отр}}$  – показания прибора при измерении отраженного потока излучения, мкА;  $I_{\text{T}}$  – темновой ток прибора, мкА;  $I_{\text{пад}}$  – показания прибора при измерении падающего потока излучения, мкА. При измерении падающего потока излучения на объектив спектрометра надевался молочный светофильтр, а сам прибор направлялся в зенит.

Корреляционный анализ лабораторно определенных параметров качества воды и всех возможных комбинаций КСЯ вида  $R(\lambda_1) / R(\lambda_2)$ , проводился для каждого направления съемки (45, 90, 135°) во всем диапазоне измерений.

В корреляционном анализе главным критерием оценки являлся коэффициент корреляции выборки ( $\rho$ ), который представляет собой отношение ковариации двух наборов данных ( $\text{cov}(x,y)$ ) к произведению их стандартных отклонений ( $\sigma_x \sigma_y$ ) и рассчитывается по формуле

$$\rho_{x,y} = \text{cov}(x,y) / (\sigma_x \sigma_y),$$

где

$$\sigma_x^2 = \sum (x_i - \mu_x)^2 / n$$

и

$$\sigma_y^2 = \sum (y_i - \mu_y)^2 / n.$$

Здесь  $x_i, y_i$  – элементы выборок  $x, y$ ;  $\mu_x, \mu_y$  – арифметические средние выборок  $x, y$ ;  $n$  – число точек в выборке.

В процессе анализа отсеивались все комбинации, коэффициент корреляции которых с параметрами воды меньше 0,95. После этого были выбраны те комбинации, для которых коэффициент корреляции более 0,95 сохраняется при всех направлениях съемки.

Таблица 1. Результаты лабораторных анализов проб воды

Точка	$O_2$ , мг/л	$N_2$ , мкг/л	$P$ , мкг/л	$Na$ , мг/л	$t$ , °C	Мутность, FTU	Удельная про- водимость, мСм/м	pH	Химическое кислородное потребление, мг/л
2	4,9	530	38	21	18,7	2,8	16	7	12
3	8,6	470	37	16	17,3	2,3	13,7	7,4	11
4	9,2	390	21	9,6	17,1	1,7	9,4	7,5	8,1
5	9,9	300	7	5,7	14,2	0,49	6,8	7,3	6,8

Для проведения корреляционного анализа были выбраны: кислород ( $O_2$ ), азот ( $N_2$ ), фосфор ( $P$ ) и натрий ( $Na$ ). В результате анализа установлены информативные параметры спектра отраженного солнечного излучения, коррелирующие с концентрацией тестируемых компонентов во всех направлениях измерений:

$O_2$ :  $R_{488}/R_{670}$

$N_2$ :  $R_{612}/R_{670}$ ,  $R_{670}/R_{612}$ ,  $R_{670}/R_{512}$ ,  $R_{670}/R_{504}$ ,  $R_{670}/R_{496}$

$P$ :  $R_{670}/R_{612}$

$Na$ :  $R_{504}/R_{670}$ ,  $R_{512}/R_{670}$ ,  $R_{612}/R_{670}$ ,  $R_{670}/R_{488}$

Как видно, КСЯ на  $\lambda = 670$  нм присутствует в каждой из выбранных комбинаций либо как числитель, либо как знаменатель. Такая статистика свидетельствует о большой информативности излучения на этой длине волны. Вторая часто встречающаяся длина волны –  $\lambda = 612$  нм. Для трех из четырех элементов комбинация  $R(612)/R(670)$  или  $R(670)/R(612)$  является хорошо коррелирующей с концентрацией содержащегося

ся в воде вещества. Коэффициент корреляции концентрации кислорода с комбинацией  $R(612)/R(670)$  равен 0,91.

Зависимость концентрации вещества  $y$  от комбинаций КСЯ  $x = R(\lambda_1) / R(\lambda_2)$  можно с разной достоверностью аппроксимации  $r^2$  описать линейной  $y = ax + b$  или параболической  $y = cx^2 + dx + e$  функциями.

Коэффициенты таких уравнений вместе с достоверностями аппроксимации и коэффициентами корреляции приведены в табл. 2 – 5 для кислорода, азота, фосфора, натрия соответственно. На рис. 2 - 9 представлены графические зависимости концентрации этих веществ от выбранных комбинаций КСЯ, снятых под углами 45° и 90°.

Таблица 2. Коэффициенты уравнений регрессии для кислорода ( $R_{487}/R_{670}$ )

Угол, ...°	$\rho$	$a$	$b$	$r^2$	$c$	$d$	$e$	$r^2$
45	-0,996	-6,49	12,95	0,991	-3	-1,34	11,05	1
90	-0,983	-17,43	19,84	0,965	-39,56	38,86	0,35	0,987
135	-0,960	-8,25	14,24	0,922	-12,25	10,82	7,46	0,996

Таблица 3. Коэффициенты уравнений регрессии для азота ( $R_{670}/R_{612}$ )

Угол, ...°	$\rho$	$a$	$b$	$r^2$	$c$	$d$	$e$	$r^2$
45	-0,989	-254,29	695,12	0,978	64,79	-401,72	771,4	0,983
90	-0,998	-506,24	935,25	0,996	-5,86	-494,17	929,2	0,996
135	-0,983	-298,34	734,56	0,966	219,94	-794,76	995,34	0,992

Таблица 4. Коэффициенты уравнений регрессии для фосфора ( $R_{670}/R_{612}$ )

Угол, ...°	$\rho$	$a$	$b$	$r^2$	$c$	$d$	$e$	$r^2$
45	-0,956	-36,29	64,66	0,914	-10,92	-11,46	51,81	0,921
90	-0,965	-72,21	98,88	0,93	-83,25	99,26	13	0,955
135	-0,966	-43,29	71,03	0,934	3,83	-51,92	75,56	0,934

Таблица 5. Коэффициенты уравнений регрессии для натрия ( $R_{612}/R_{670}$ )

Угол, ...°	$\rho$	$a$	$b$	$r^2$	$c$	$d$	$e$	$r^2$
45	0,976	17,79	-5,24	0,952	-7,4	33,93	-13,25	0,965
90	0,993	34,22	-21,68	0,985	-6	46,57	-27,86	0,986
135	0,986	22,46	-9,94	0,972	4,91	12,42	-5,12	0,975

Для оценки концентрации химических компонентов в воде озера можно использовать линейную зависимость, для чего достаточно измерить спектр отражения и параллельно провести химический анализ всего в двух точках озера. По этим данным можно определить коэффициенты линейных уравнений для заданных компонентов и далее уже определять концентрацию этих компонентов в любой точке озера, используя только данные спектральных измерений восходящего излучения. Если необходима повышенная точность, можно использовать уравнение параболы, но ее использование дает заметное отличие от линейной зависимости только применительно к кислороду.

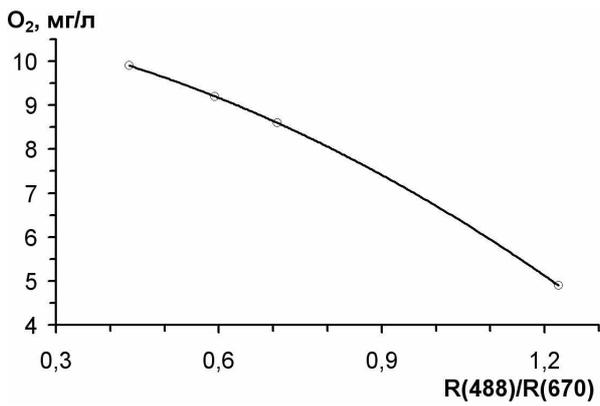


Рис. 2. Регрессионная зависимость концентрации кислорода для направления съёмки 45°

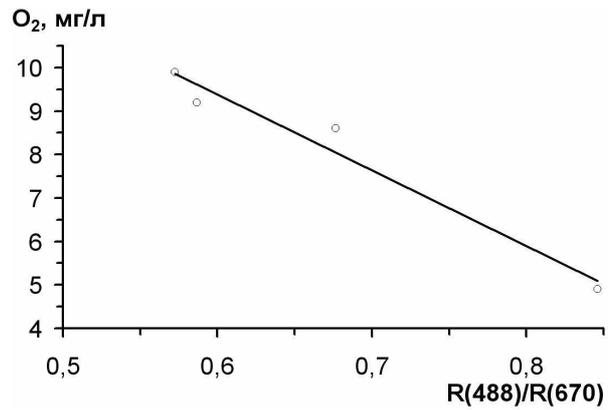


Рис. 3. Регрессионная зависимость концентрации кислорода для направления съёмки 90°

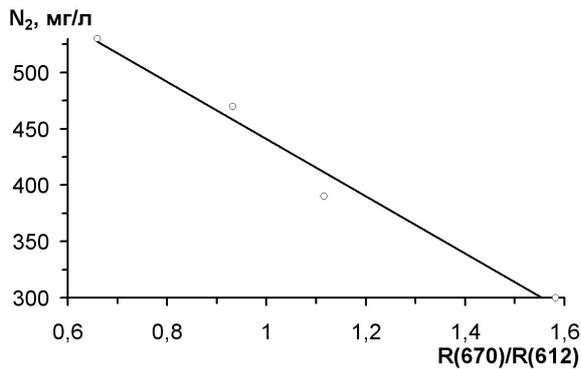


Рис. 4. Регрессионная зависимость концентрации азота для направления съёмки 45°

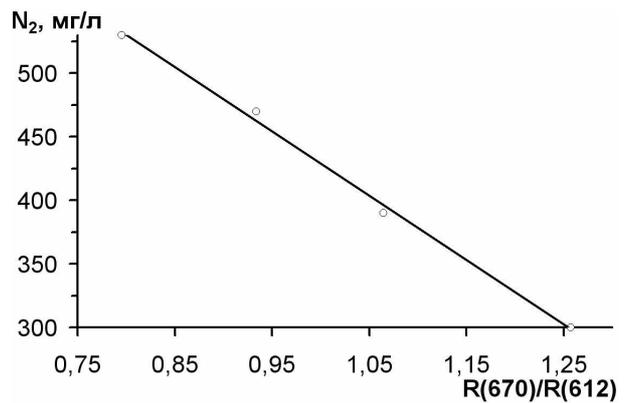


Рис. 5. Регрессионная зависимость концентрации азота для направления съёмки 90°

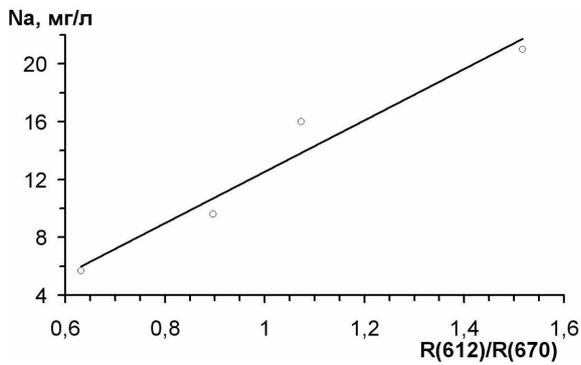


Рис. 6. Регрессионная зависимость концентрации натрия для направления съёмки 45°

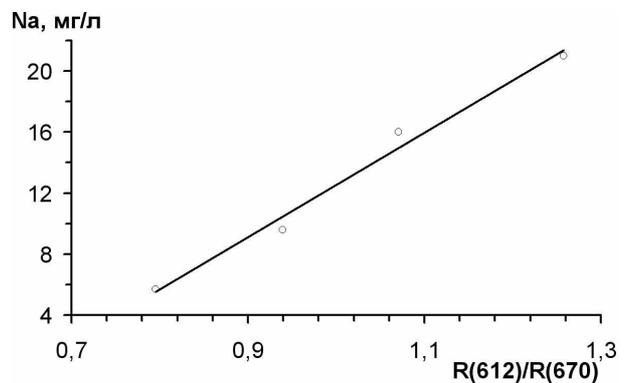


Рис. 7. Регрессионная зависимость концентрации натрия для направления съёмки 90°

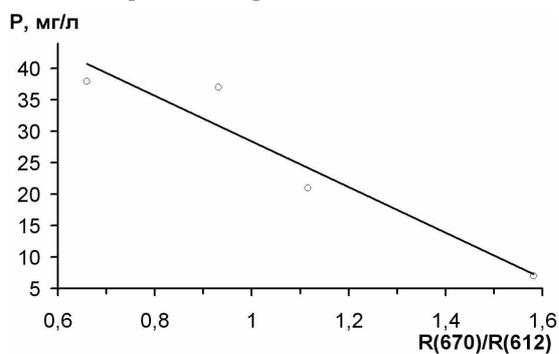


Рис. 8. Регрессионная зависимость концентрации фосфора для направления съёмки 45°

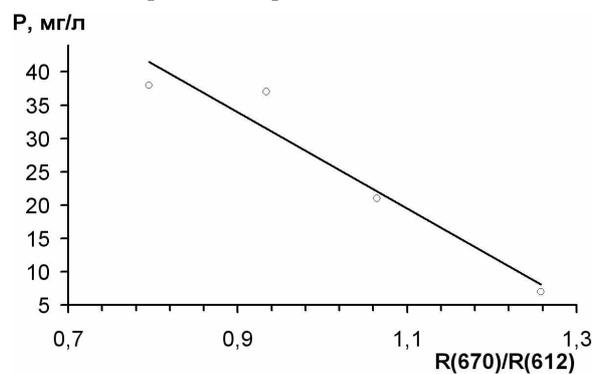


Рис. 9. Регрессионная зависимость концентрации фосфора для направления съёмки 90°

## Заключение

В результате анализа установлено, что в общем случае наибольшая корреляция достигается с комбинациями КСЯ, измеренными в направлении  $90^\circ$  к плоскости солнечного вертикала. Хотя для отдельного вещества в каждом направлении существует несколько комбинаций с корреляцией более 0,99 и в среднем около 50 комбинаций с корреляцией более 0,95. Выбранные авторами комбинации отличаются тем, что в каждой используется КСЯ на  $\lambda = 670$  нм и в большинстве КСЯ на  $\lambda = 612$  нм, что сокращает число длин волн, на которых необходимо произвести измерения, и может быть удобным. Вместе с тем, как уже отмечено, в случае необходимости есть довольно широкий выбор направлений съемки и высококоррелированных с концентрацией данного вещества комбинаций КСЯ, позволяющих установить между последними линейную зависимость.

Проведенное исследование показало возможность создания модели восстановления параметров качества природных вод по спектрам отраженного излучения. Определены комбинации коэффициентов спектральных яркостей, наиболее хорошо коррелирующих с концентрацией химических компонентов в воде. Причем подобраны такие комбинации, в которых используются КСЯ всего на трех различных длинах волн для определения концентрации четырех веществ. Полученные линейные и параболические уравнения зависимостей концентрации от этих комбинаций позволяют методом дистанционного зондирования с достаточной точностью контролировать распределение содержания химических элементов по всей площади акватории. Большое число высоко коррелирующих с концентрациями комбинаций КСЯ дает довольно много вариантов выбора нескольких из них в качестве рабочих. Результаты анализа свидетельствуют о том, что для каждого вещества есть свой диапазон наилучших углов съемки, но в общем случае наибольшее число подходящих комбинаций КСЯ для определения концентрации компонентов наблюдается при измерении спектров под углами от  $45^\circ$  до  $90^\circ$  к плоскости солнечного вертикала.

## Литература

1. *Береговой Г. Т., Бузников А. А., Кондратьев К. Я. и др.* Исследование природной среды с пилотируемых орбитальных станций // М.: Гидрометеиздат, 1972. 259 с.
2. *Kondratyev K. Ya., Buznikov A. A., Pokrovsky O. M.* Global Change and Remote Sensing // Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons. Praxis Publishing, 1996. 368 p.
3. *Бузников А. А., Лахтанов Г. А., Лайне П. и др.* Разработка моделей качества воды для дистанционного зондирования озерной системы Сайма // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 6. С.104-110.
4. *Бузников А. А., Орлов В. М.* Ручной спутниковый спектрограф РСС-3 для спектрографирования Земли // Тр. XI Всесоюз. совещ. по актинометрии. Ч. II: Приборы и методы наблюдений. Таллин, 1980. С.131-134.
5. *Бузников А.А., Лахтанов Г.А., Мокиевский К.А. и др.* Комплексное использование спектральных яркостных и поляризационных характеристик восходящего излучения в дистанционном зондировании внутренних водоемов // Исслед. Земли из космоса, 1992. № 2. С. 24-29.