

# ОХРАНА ВОД СУШИ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-10-4

УДК 502.51

## АДАПТИВНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ И СПЕКТРОЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВОДНОЙ СРЕДЫ

Д.ф.-м.н., проф. **Ф.А. Мкртчян**

(Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва)

## ADAPTIVE MICROWAVE AND SPECTROELLIPSOMETRIC TECHNOLOGIES FOR DIAGNOSTICS OF THE WATER MEDIA

**F.A. Mkrtychyan**

**Ключевые слова:** водная среда, водная поверхность, дистанционный мониторинг, радиояркостная температура, спектроэллипсометрия, классификация, идентификация.

**Key words:** water medium, water surface, remote monitoring, radio brightness temperature, spectroellipsometry, classification, identification.

В данной работе предлагается адаптивные микроволновые и спектроэллипсометрические технологии для диагностики водной среды. Ожидаемые от данной работы результаты позволят оперативно оценивать температуру, минерализацию (соленость), волнение водной поверхности, концентрацию неорганических и органических веществ и т.д. с обеспечением прогнозных оценок и выделением аномальных участков. Описана компактная измерительно-информационная многоканальная спектроэллипсометрическая система для мониторинга качества водной среды, основанная на совместном использовании спектроэллипсометрии и алгоритмов обучения, классификации и идентификации. Спектроэллипсометрическая система может использоваться в различных областях, где следует оценить качество воды или выявить наличие определенного набора химических элементов. Система решает эти проблемы путем мониторинга водной среды в режиме реального времени. Приведены некоторые экспериментальные данные и расчеты. Оценка точности системы осуществляется для водоохранилищ, расположенных в Южном Вьетнаме.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научно-го проекта № 19-07-00443\_а»

*In this paper, we propose adaptive microwave and spectroellipsometric technologies for the diagnosis of the aquatic environment. The results expected from this work will allow one to quickly evaluate temperature, mineralization (salinity), water surface roughness, concentration of inorganic and organic substances, etc. with the provision of predictive estimates and the allocation of abnormal areas. A compact measuring and informational multi-channel spectroellipsometric system for monitoring the quality of the aquatic environment is described, based on the combined use of spectroellipsometry and training, classification and identification algorithms. The spectroellipsometric*

*system can be used in various fields where water quality should be assessed or a specific set of chemical elements should be detected. The system solves these problems by monitoring the aquatic environment in real time. Some experimental data and calculations are presented. System accuracy assessment is carried out for reservoirs located in South Vietnam.*

*«The reported study was funded by RFBR according to the research project № 19-07-00443-a».*

## **Введение**

В последнее время интенсивно ведутся работы по методическому и аппаратному обеспечению дистанционных исследований окружающей среды. Создаются аппаратные комплексы для обеспечения зондирования земных покровов и акваторий. Разрабатываются методы и алгоритмы компьютерного анализа двумерных изображений земной поверхности. Ведется работа по построению моделей формирования этих двумерных полей и решаются задачи классификации явлений, анализа изображений на изучаемом пространстве.

Современный этап развития экспериментальных радиофизических и оптических методов исследования окружающей среды характеризуется переходом от пассивного сбора информации об изучаемом объекте к постановке целенаправленных экспериментов. Первостепенное значение при осуществлении таких экспериментов приобретают организации массового сбора информации об изучаемой системе, оперативность ее обработки и достоверная интерпретация данных наблюдений[1, 8, 18,19].

Оценка физико-химических параметров (ФХП) водных систем является предметом многих исследований, направленных на создание технических и алгоритмических средств измерения и обработки данных о состоянии водной среды. Особую актуальность в последние годы приобрели дистанционные технологии, позволяющие получать оперативные сведения о водных объектах и характеризующиеся высокой производительностью. Наибольший эффект достигается при использовании многоканальных систем дистанционного зондирования, когда за счет применения необходимой совокупности алгоритмических средств удается значительно повысить достоверность интерпретации данных наблюдений и успешно решать задачи оценки качества воды. Процедура синтеза автоматизированной системы обработки данных многоканальных измерений качества воды включает создание комплекса аппаратных, алгоритмических, модельных и программных средств сбора и анализа информации с учетом уровней ее достоверности и полноты.

Разрабатываются методы и алгоритмы компьютерного анализа двумерных изображений земной поверхности. Ведется работа по построению моделей формирования этих двумерных полей и решаются задачи классификации явлений, анализа изображений на изучаемом пространстве.

Уже созданные методы и алгоритмы обладают способностью преодолевать такие трудности, как отрывочность и нестационарность информации, наличие малых статистически неоднородных выборок.

В настоящее время основной тенденцией в построении крупных проблемно-ориентированных информационных систем является использование распределенных баз данных и знаний, использование ЭВМ различных классов и

производителей, использование локальных и глобальных сетей. При этом возникают сложности в использовании информации баз данных и знаний, реализованных на различных СУБД и программного обеспечения, разработанного на разных платформах.

Преодоление указанных сложностей основано на применении технологии открытых информационных систем, использующей стандартные интерфейсы между всеми программно-аппаратными компонентами среды. Важнейшим этапом является построение профиля - набора согласованных стандартов для данной области применения.

С практической точки зрения, важным является синтез комплексной системы сбора и обработки информации об окружающей среде, объединяющей дистанционные и контактные измерения, составляющие основу систем геоинформационного мониторинга.

Основной смысл концепции геоинформационного мониторинга состоит в соединении в систему средств сбора данных, методов их обработки, математических моделей природных объектов, компьютерных средств реализации алгоритмов и моделей с широким спектром сервисного обеспечения при визуализации результатов мониторинга.

### **Общая характеристика дистанционных радиофизических методов**

Для исследования природной среды дистанционные методы приобретают все более важное значение. Эти методы основаны на регистрации собственного или отраженного и рассеянного электромагнитных излучений.

Дистанционное зондирование с летательных аппаратов (ИСЗ, самолеты и т.д.) осуществляются в различных спектральных диапазонах - световых, инфракрасных (ИК) и микроволновых (СВЧ) [1,2,3,4,8,10,11,13].

В зависимости от природы регистрируемого электромагнитного излучения применяются как активные, так и пассивные методы зондирования. Активные методы основаны на анализе отраженных от исследуемых объектов сигналов и используют зависимости между характеристиками обратного рассеяния и физическими параметрами объектов. Пассивные методы основаны на приеме собственного излучения исследуемых объектов. Измеряемые характеристики поля излучения тесно связаны с физическими и геометрическими свойствами природных объектов.

Основной недостаток радиофизических методов дистанционного зондирования - это сравнительно низкая пространственная разрешающая способность по сравнению с оптическим методом.

В радиодиапазонах высокое разрешение достигается в специализированных и дорогих радиосистемах, а в остальных случаях, достигается лишь грубое разрешение. Поэтому радиофизические методы дистанционного зондирования из космоса применимы в основном для участков Земли с большой пространственной однородностью. Для более высокого разрешения используются самолеты.

В соответствии с классификацией радиофизических методов дистанционного зондирования радиотехнические приборы также делятся на два класса: приборы активного зондирования - радиолокаторы, и приборы пассивные - радиометры.

Радиолокаторы излучают амплитуду отраженного или рассеянного сигнала, его частоту, время прохода, фазу, поляризацию. Все эти измерения обладают ограниченной точностью. Определяющим является отношение сигнал/шум, точнее, отношение энергии сигнала за время его обработки к спектральной плотности шумов.

В дистанционном зондировании в основном используются следующие радиолокаторы.

1. Скаттерометры - приборы, предназначенные для измерения мощности обратно рассеянного сигнала. С их помощью определяют, например, скорость приводного ветра, плотность биомассы растительного покрова и т.д.

2. Альтиметры - приборы, предназначенные для измерения времени прихода отраженных от поверхности импульсов. Основные назначения альтиметров - изучение топографии поверхности.

3. Радиолокаторы подповерхностного зондирования предназначены для измерения времени прихода импульсов, отраженных от границ слоя грунта. Применяются в основном для измерения толщины льдов.

4. Радиолокаторы бокового обзора и радиолокатора с синтезированной апертурой для получения радиоизображений земной поверхности.

В качестве пассивного средства дистанционного зондирования используются СВЧ-радиометры. Они могут регистрировать мощность радиоизлучения, его поляризацию и в некоторых случаях его спектральный состав. Во всех случаях измеряется мощность излучения. Поэтому основной характеристикой приборов является чувствительность. Радиометры "чувствуют" изменения энергии излучения порядка  $-1.4 \cdot 10^{-25}$  Дж, т.е. позволяют регистрировать весьма малые вариации интенсивности излучения, порождаемые изменениями температуры или изменениями излучательной способности.

Высокая чувствительность СВЧ - радиометров позволяет их успешное применение для решения различных задач дистанционного зондирования.

### **Оптические методы в мониторинге водных систем**

В отличие от микроволновой области электромагнитного спектра видимый диапазон используется более эффективно в системах мониторинга водных объектов. Это связано с тем, что энергия солнечного излучения или искусственных световых потоков интенсивно взаимодействует с водной средой. Разные участки спектра солнечного излучения поглощаются водой по-разному. Минимум поглощения света наблюдается на длине волны 470 нм, в голубой части спектра, энергия которой уменьшается вдвое уже на глубине 47 м [6]. Оптические свойства среды характеризуются также и показателем преломления, непостоянство которого в пространстве приводит к возникновению рассеянного излучения. В зависимости от соотношения между длиной волны света  $\nu$  и линейными размерами оптической неоднородности  $d$  интенсивность рассеяния может меняться. При  $d < \nu$  доля света, рассеянная неоднородностью, увеличивается. При  $d > \nu$  коэффициент рассеяния становится равным двум.

Природа оптических неоднородностей достаточно разнообразна. В одних случаях неоднородности возникают за счет инородных тел, имеющих в среде (частицы, пузырьки воздуха в воде). В других случаях вследствие флуктуации плотности вещества и ориентации молекул в ней создаются сгустки и разрежения диэлектрической проницаемости (или показателя преломления), что приводит к появлению молекулярного рассеяния.

Наличие в воде растворенных веществ порождает флуктуации их концентрации в разных участках пространства, что также вызывает дополнительное молекулярное рассеяние. Наконец, в реальных морских объектах вследствие многих причин наблюдается перемещение (турбулентность) водных масс разной темпе-

ратуры и плотности, что приводит к крупномасштабным (по сравнению с длиной волны света) оптическим неоднородностям, на которых также рассеивается радиация. Собственно вода и ее компоненты (соли, растворенные органические вещества, взвеси) играют разную роль в общих процессах поглощения и рассеяния, световой волны. Присутствие солей в воде приводит к таким малым изменениям показателя преломления, что молекулярное рассеяние на флуктуациях плотности дает практически ничтожный вклад по сравнению с чистой водой. Дополнительное молекулярное рассеяние, основанное на флуктуациях концентрации солей, как это показано в работе [6], незначительно. Таким образом, введение солей в воду не меняет рассеивательной способности последней. Многие авторы, используя искусственно приготовленный солевой раствор, соответствующий по своему составу морской воде, провели исследование влияния растворенных в воде солей на поглощательную способность солевого состава. Результаты проведенных экспериментов приводят к выводу, что указанные выше соли почти не изменяют поглощения в видимой области спектра [6]. При перемещении в сторону коротких длин волн показатель поглощения солей монотонно возрастает.

Столб воды открытого океана высотой 10м поглощает от 33 до 80 % энергии голубого света в голубой части спектра в зависимости от чистоты воды. В среднем столб океанической воды высотой 10м поглощает около 55 % энергии голубой части света, в то время как такой же столб прибрежной воды от 94% до 99%. Даже в наиболее чистой океанической воде только 1% световой энергии проникает ниже 100 м.

В весовом отношении растворенные органические вещества составляют меньшую долю, чем неорганические соли. Поэтому они, как и соли, не изменяют характеристик светорассеяния воды. Однако поглощательная способность у них может быть значительной. По химическому составу желтое вещество представляет собой гуминовые кислоты – продукты разложения планктоновых организмов. Оно образуется из углеводов. Как правило, величина показателя поглощения желтого вещества убывает по экспоненциальному закону с ростом длины волны света, резко возрастающая в коротковолновой части спектра [6].

При фотометрировании моря в надир достаточное представление о влиянии первичных гидрооптических характеристик на спектр выходящего излучения дает теория двухпоточкового приближения, на основании которой коэффициент диффузного отражения моря  $R$  рассчитывается как  $R = \sigma_H / 2\chi\lambda$ , где  $\sigma_H$  - показатель рассеяния назад,  $\chi\lambda$  - показатель поглощения света на длине волны  $\lambda$ , средой. Показатель  $\sigma_H$  в первом приближении является диффузного отражения моря неселективным по спектру, поэтому спектральный ход коэффициента  $R \sim 1 / \chi\lambda$ . Поглощение света морской водой складывается из трех основных компонентов:  $\chi = \chi_{\text{пигм}} + \chi_{\text{орг}} + \chi_{\text{воды}}$ , где  $\chi_{\text{пигм}}$  – показатель поглощения света пигментами фитопланктона (хлорофиллами и каротинонидами),  $\chi_{\text{орг}}$  - показатель поглощения света растворенным веществом органического происхождения (желтым веществом),  $\chi_{\text{воды}}$  - показатель поглощения света чистой водой. В дальнейшем членом  $\chi_{\text{орг}}$  будем пренебрегать, поскольку наибольшие концентрации желтого вещества приходятся на прибрежные воды, в открытом же океане концентрация желтого вещества изменяется сравнительно слабо [6]. К кому же при  $\lambda > 430\text{нм}$ , вклад  $\chi_{\text{орг}}$  в общее поглощения будет сравнительно невелик.

В многоканальных спектроэллисометрах с линейками и матрицами фотоприемников оптимальным является использование вращающихся поляризационных элементов (поляризатора, компенсатора или анализатора). Нами развивается новый подход в спектроэллисометрии – спектроэллисометрия с бинарной модуляцией состояния поляризации, с использованием оригинального бинарного модулятора поляризации, эффективно заменяющего известные дорогостоящие поляризационные элементы. Отсутствие движущихся поляризационных элементов и компактность спектроэллисометра с бинарной модуляцией состояния поляризации (СЭБМ) позволяет использовать его для измерений в полевых условиях. Использование малогабаритной импульсной ксеноновой лампы с очень большим ресурсом работы позволило реализовать более компактный и надежный one body вариант спектроэллисометра.

### **Чувствительность поля излучения к вариациям физико-химических параметров в отсутствии морского волнения**

Выполненные рядом авторов [5,11] теоретические и экспериментальные исследования СВЧ-излучения водных объектов в условиях изменения их температуры и степени минерализации при спокойной поверхности подтверждают справедливость основных теоретических результатов, достоверность разработанных и разбитых радиационных моделей.

Краткая сравнительная характеристика эффективности дистанционных методов, основанных на измерениях собственного и рассеянного электромагнитного излучения водной поверхности (в общем случае излучения системы "океан-атмосфера") в оптическом, ИК и радиодиапазонах дана, в частности, в [5,11] отмечается, что на характеристики спектра рассеянного излучения в оптическом диапазоне влияют хлорофилл, нефтяные загрязнения, покрывающие водную поверхность, пенообразования, твердые частицы, выносимые водами рек, а при определенных условиях освещенности - степень шероховатости поверхности при волнении.

Основным параметром, оказывающим определяющее влияние на интенсивность собственного излучения водной поверхности в ИК-диапазоне, является ее температура.

Характеристики рассеянного морем СВЧ, УКВ и КВ излучения определяются главным образом особенностями спектра волнения.

Особенностью собственного излучения водной поверхности в СВЧ-диапазоне является чувствительность поля к вариациям большого числа параметров, прежде всего таких как температура, природная соленость, степень загрязнения воды многими химическими веществами, например, кислотами, щелочами, бытовыми стоками; пенообразования и некоторые характеристики волнообразований.

Разработанные к настоящему времени методы зондирования основаны, как правило, на использовании данных измерений в нескольких участках спектра соответствующего диапазона волн. При этом в ИК-радиометрии такой подход обеспечивает получение более точных оценок одного параметра-температуры. При радиолокационном зондировании этот подход позволяет получить более детальные оценки параметров спектра волнения.

Примеры спектральных зависимостей производных яркостной температуры по термодинамической температуре  $dT^*/dT$ , солености  $dT^*/dS$ , приведены, соответственно на рис. 1 и рис. 2.

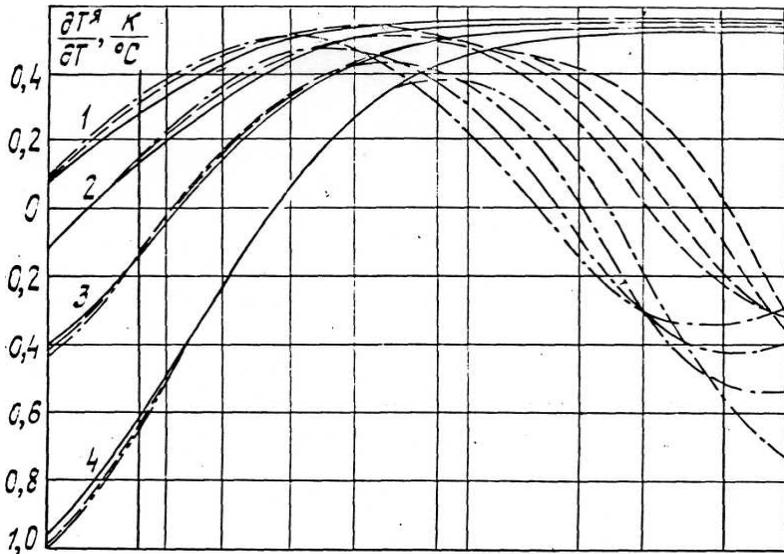


Рис. 1. Спектральная зависимость чувствительности поля СВЧ излучения к вариациям термодинамической температуры.

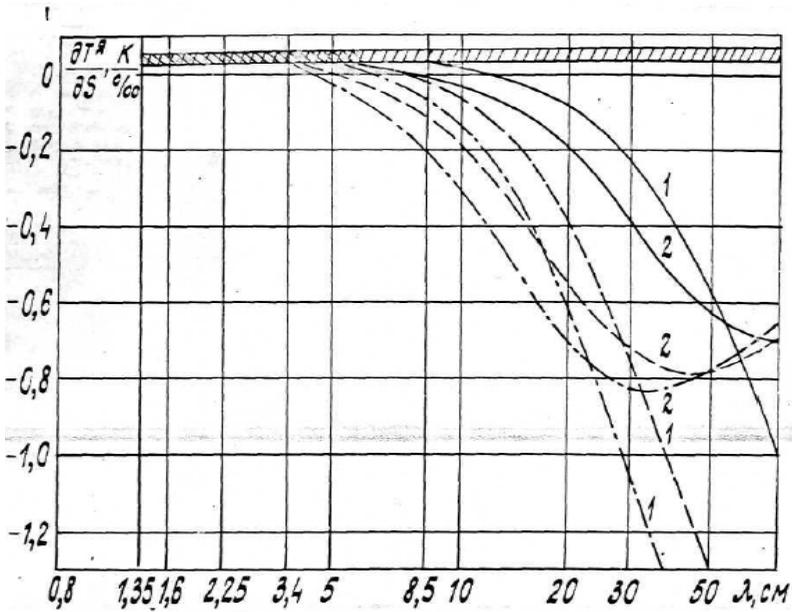


Рис. 2. Спектральная зависимость чувствительности поля СВЧ излучения к вариациям солености.

Из приводимых зависимостей следует, в частности, что в СВЧ-диапазоне волн чувствительность интенсивности излучения к вариациям температуры воды в 2-3 раза ниже этого показателя для ИК-диапазона волн, где он близок к единице. Чувствительность поля излучения к вариациям солености возрастает с увеличением длины волны.

Показано, что радиационные свойства всех основных солеобразующих компонент природных вод, зависят при прочих равных условиях от типа соли при сохранении одинакового характера температурной, минерализационной и спектральной зависимостей.

Как следует из данных лабораторных и летних натурных экспериментов замутненность воды твердыми минеральными частицами (грунта, ила) и внесение в водную среду планктона, водорослей, трав практически не оказывает влияния на радиационные характеристики акваторий.

### **Определение общей минерализации, температуры и степени химического загрязнения по данным микроволновых измерений**

Анализ эффективности определения физико-химических параметров (ФХП) водоемов по данным СВЧ-радиометрических измерений показал, что при небольших вариациях температуры и минерализации оценки их величины могут быть сделаны на основе одноканальных измерений в сантиметровом (для  $T_0$ ) и дециметровом (для  $S$ ) диапазонах.

В основе методики, базирующейся на наличии априорной (опорной) информации о ФХП в 2-х и более точках водоема (реперах), лежит измерение вариаций сигналов относительно реперов и расчет текущих значений температуры, минерализации с помощью соотношений, учитывающих форму радиационно-минерализационной зависимости на дециметровых волнах, например, для  $0 < S < 15$  г/л  $T_y = -K_1 S^2 + K_2$ ; для  $10 < S < 60$  г/л  $T_y = K_3 S + K_4$ ; для  $50 < S < 300$  г/л  $T_y = K_5 + K_6(400 - S)^2$ ; для температуры в диапазоне  $10^\circ < T < 30^\circ \text{C}$   $T_y = K_7 + K_8 T_0$ .

Из приведенных выражений следует, что при наличии данных измерений в двух реперных участках соленость воды в произвольной точке определяется достаточно простым образом по результатам одноканальных измерений [5, 11].

При отсутствии необходимого объема априорной информации или контактных данных оценки солености водоема могут быть сделаны на основе измерений в сантиметровом и дециметровом диапазонах волн и полученной ранее или уточненной для данного типа водоема радиационно-геофизической зависимости путем решения системы как минимум 2-х алгебраических уравнений.

Радиационно-минерализационная зависимость в широком диапазоне концентрации является существенно нелинейной. Схематическое изображение этой зависимости представлен на рис.3. На рис.3 видно, что на зависимость могут быть выделены три характерных участка, соответствующие различным диапазонам концентрации, два из которых хорошо аппроксимируются квадратичной зависимостью, а один линейной.

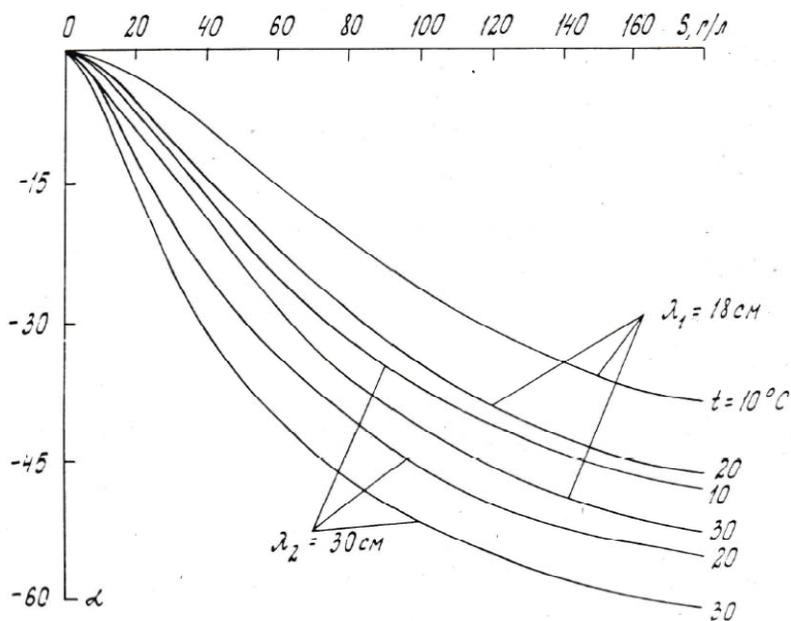


Рис. 3. Минерализационная зависимость радиояркого контраста на волнах дециметрового диапазона при различных значениях температуры.

При этом необходимо учитывать вариации химического состава вод акваторий. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что разница между интенсивностями излучения растворов электролитов в сантиметровом и дециметровом диапазонах волн зависит только от общей минерализации и инвариантна к изменениям соотношения между концентрациями компонент.

### Спектроэллипсометрическая экспертная система для контроля водной среды

Спектроэллипсометрическая экспертная система для контроля водной среды (СЭСКВС) состоит из измерительной подсистемы (Рис.4) и программного обеспечения. Структура системы включает в себя компактный многоканальный спектроэллипсометр (МСЭ), информационный интерфейс с компьютером (ИИК), компьютерное программное обеспечение (STW) и расширенную базу данных (РБД). STW реализует ряд алгоритмов для обработки потоков данных от МСЭ и обеспечивает сервисные функции визуализации и контроля измерений. РБД состоит из наборов стандартных спектральных изображений водных сред, представленных точками в многомерном векторном пространстве индикаторов, предварительно рассчитанных на основе обучающих выборок [12, 14, 15, 16, 17].

Принцип, лежащий в основе СЭСКВС, основан на фиксации изменений светового потока МСЭ и их оцифровке. Дальнейшая обработка этих данных для повышения их эффективности определяется STW с помощью алгоритмов, способных распознавать спектральные изображения. Степень адаптируемости процедуры распознавания определяется уровнем накопленных знаний о флуктуациях

интенсивности и поляризационных свойствах света, отраженного от поверхности воды или рассеянного и преломленного в водной среде. STW позволяет, в случае неопределенной идентификации спектральных изображений, принимать экспертное решение на основе визуального анализа спектрального изображения. Эта процедура реализуется в диалоговом режиме с СЭСКВС, и, если решение принято, оператор может зафиксировать его в базе данных в виде стандарта для последующего появления аналогичных спектральных изображений[7,16,17,20].

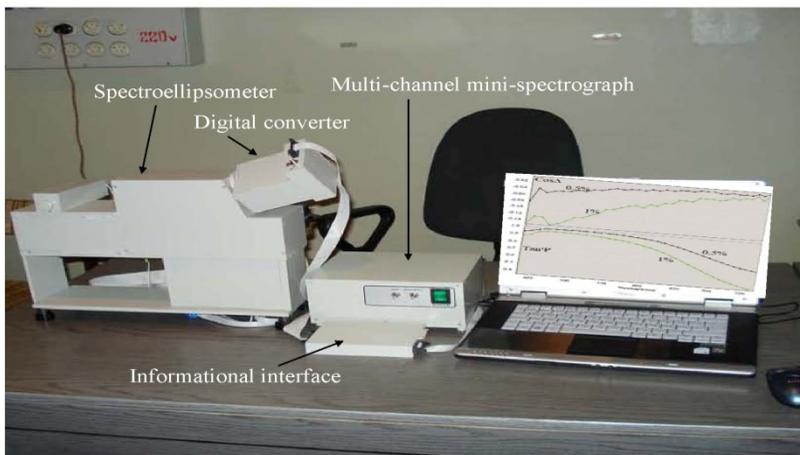


Рис. 4. Общий вид спектроэллипометрической системы

Принципиальная схема блока ПКП, обеспечивающего процедуру идентификации, представляет собой некоторое преобразование  $\Phi$  (рис. 5, табл. 1). Оператор ЭС определяет начальные данные  $v_i$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ , а также решает какие параметры  $\mathbf{u}_i = (u_{i1}, \dots, u_{ir})$  будут рассчитаны на основе измерений  $\{\xi_i^j\}$ . Сервисный блок ИИК дает возможность сформировать вектор  $\mathbf{u}_i$  из статистических характеристик рядов  $\{\xi_i^j\}$  или использовать непосредственные измерения. Априорная информация характеризует тип распределения  $f_a(\mathbf{u}_i)$ . Функция

$$L_i = \sum_{j=1}^m f_{a1}(u_i^j) / f_{a0}(u_i^j)$$

сравнивается с ее предельными значениями  $L_{i,min}$  и  $L_{i,max}$ . На первом этапе эти величины выбираются достаточно произвольно, но затем они изменяются до достижения максимальной точности распознавания гипотез  $H_0$  и  $H_1$ . Мы имеем  $L_{i,min} \rightarrow L_{i,min}^*$  и  $L_{i,max} \rightarrow L_{i,max}^*$ . Величины  $L_{i,min}^*$  и  $L_{i,max}^*$  запоминаются в РБД.

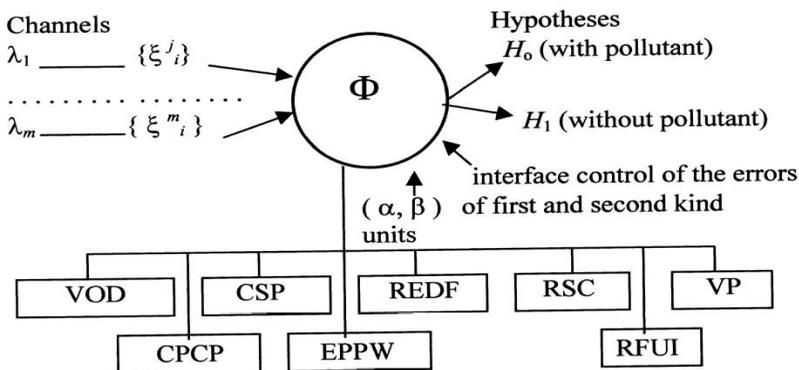


Рис. 5. Концептуальная блок-схема процедуры идентификации типов пятен загрязнения на поверхности воды. Обозначения приведены в таблице 1.

После процедуры обучения экспертная система ограничивается только объемом измерений, установленным оператором, и исходит из статистической достоверности и режима реального времени. Оператор имеет две возможности для регулирования этого режима: установление объема серии  $\{\xi_j^i\}$  или определение времени их накопления. Обычно последняя характеристика выбирается равной одной секунде. Рис. 5 объясняет эту процедуру. Оператор объединяется с блоками СЭСКВС, посредством интерфейса ИИК «человек-машина», который обеспечивает выборочный контроль операций во всех блоках.

Таблица 1.

**Описание блоков СЭСКВС схематично показано на Рисунке 5.**

Блоки	Характеристика блоков
VOD	Визуализация данных измерения (спектры, статистические параметры, эмпирические и теоретические функции распределения)
CSP	Расчет статистических параметров и других характеристик, формирование векторного пространства $\{u_i\}$
EPPW	Оценка параметров последовательного анализа Вальда при принятии решений
REDF	Реконструкция эмпирических функций распределения
RFUI	Реконструкция функций пользовательского интерфейса с программным обеспечением для вмешательства в режим работы экспертной системы на любом этапе.
RSC	Реализация статистического критерия оценки теоретической функции распределения
VP	Процедуры визуализации

В случае нефтяного пятна на поверхности воды система анализирует ее толщину, возраст, источник и геометрию. Наиболее информативные измерения здесь сделаны при длинах волн 398 нм, 439 нм и 480 нм. В случае растворенных или взвешенных компонентов в воде система оценивает их концентрацию и на основе данных в РБД о гидродинамических параметрах водоема рассчитывает их пространственное распределение с использованием методов, которые обрабатывают двумерные изображения.

Спектроэллипсометрические измерения дают спектры, которые рассматриваются как спектральные изображения водных растворов. Пространство спектральных изображений формируется в процессе обучения, реализуемого в лабораторных условиях, когда спектральные изображения и химический анализ выполняются одновременно. Процедура идентификации для распознавания спектрального изображения водного раствора выполняется с использованием РБД, где спектры и их производные хранятся во время процедуры обучения. Стандарт позиции РБД приведен в таблице 2.

Таблица 2.

**Структура стандартного спектрального изображения водного раствора.**

Номер эталона	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$B$
1	$A_{11}$	$A_{21}$	$A_{31}$	$A_{41}$	$A_{51}$	$A_{61}$	$A_{71}$	$A_{81}$	$A_{91}$	$B_1$
.....										
$n$	$A_{1n}$	$A_{2n}$	$A_{3n}$	$A_{4n}$	$A_{5n}$	$A_{6n}$	$A_{7n}$	$A_{8n}$	$A_{9n}$	$B_n$

Обозначения:  $A_1$  – площадь под спектральной кривой,  $A_2$  - максимальное значение спектральной кривой,  $A_3$  - минимальное значение спектральной кривой,  $A_4$  - расстояние между длинами волн с минимальным и максимальным значениями спектральной кривой соответственно;  $A_5$  – максимальное значение первой производной спектральной кривой;  $A_6$  - максимальное значение второй производной спектральной кривой;  $A_7$  - число максимумов спектральной кривой;  $A_8$  - среднее значение спектральной кривой;  $A_9$  - длина волны, соответствующая среднему значению спектральной кривой;  $B$  - концентрация химического элемента.

Идентификация спектрального изображения для неизвестного водного раствора осуществляется путем сравнения его вектора-идентификатора с элементами РБД. В зависимости от используемого оптического устройства спектральное изображение водного раствора может быть представлено одним или двумя векторными идентификаторами, рассчитанными с использованием правила, описанного в таблице 2. Окончательная идентификация осуществляется с помощью поиска в РБД векторных идентификаторов, имеющих минимальное расстояние, из рассматриваемого вектора-идентификатора  $Q = \{X_1, \dots, X_n\}$  данного водного раствора. Расстояние между векторами-идентификаторами рассчитывается по следующей формуле:

$$\delta = \min_n \rho(Q - Q_n) = \frac{1}{2n} \min_i \left[ \sum_{j=1}^n |X_j - A_j^i| + \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_j - A_j^i)^2} \right] \quad (1)$$

Использование (1) дает лучший результат по сравнению с применением других известных критериев близости между спектральными кривыми. Именно, поэтому в этом случае существует минимальный риск пропустить ситуацию с опасным загрязнением водоема. В общем случае обычно используются следующие методы:

- *Кластерный анализ.* В этом случае формируются кластеры двух типов для  $\text{Cos}\Delta$  и  $\text{Tan}\Psi$ , где  $\Delta$  и  $\Psi$  - эллипсометрические углы, соответствующие комплексным коэффициентам отражения амплитуды для двух разных поляризаций. Решение принимается по взвешенным значениям (1).

- Алгоритм расхождения между спектрами. В этом случае находятся два спектра, минимально удаленных от испытуемого. Решение принимается с учетом минимального значения этого расстояния.
- Алгоритм расхождения между эталонными векторами. В этом случае решение принимается с учетом минимальной  $\delta$ .
- Решение обратной задачи. Этот алгоритм основан на линейной зависимости оптического спектра от концентрации химических элементов в водном растворе. В этом случае решается субопределенная система линейных алгебраических уравнений.

### Результаты экспериментов

СЭСКВС использовался в различных лабораторных и in-situ условиях. В таблице 3 приведены экспериментальные результаты, которые дают возможность сравнить вышеупомянутые алгоритмы. Как следует из этих результатов, при использовании алгоритма из таблицы 2 снижается риск получения высокой ошибки при идентификации решения. Мы видим, что риск иметь высокую погрешность - это рост с увеличением концентрации химического элемента. Это обусловлено тем, что расхождение между спектрами уменьшается с увеличением концентрации химических веществ. В этом случае необходимо расширить базу спектральных эталонов[15,17,20]..

Таблица 3.

### Сравнительная оценка алгоритмов распознавания спектральных изображений водных растворов.

Объект для изучения	Алгоритм идентификации и его ошибка (%)			
	Кластерный анализ	Расхождение между спектрами	Расхождение между вектор-эталонами с использованием уравнения (1)	Решение обратной задачи
CuSO <sub>4</sub>	15	12	8	7
NaCl	17	11	7	5
NaHCO <sub>3</sub>	16	10	5	5
NH <sub>4</sub> OH	21	13	9	6
ZnSO <sub>4</sub>	22	12	8	6
Potassium iodite	13	10	6	4
Na+Cu+Zn+Mn+glucose	18	9	9	8
Furaciline	23	11	5	5
Bifidumbacterium	14	10	4	4

СЭСКВС использовался для контроля качества воды в лагуне Нуок Нгот около Хунг Лак (Вьетнам) - 14°9'0"N; 109°10'59.99"E, река Сайгон в районе города Хошимин, а также водохранилища в провинции Бариа. Территория лагуны была разделена на десять участков, расположение которых было равномерно распределено с севера на юг. В каждом из этих мест было проведено одно измерение с помощью СЭСКВС, и одновременно был взят образец воды. Местоположение 1 имело координаты 14°10'N, 109°10'E. Местоположение 10 соответствовало устью лагуны. Таблица 4 позволяет оценить точность СЭСКВС. Предполагается, что пробы воды были оценены с очень высокой точностью[9,12].

**Сравнение данных, полученных с помощью СЭСКВС и измерений на месте в лагуне Нуок Нгот.**

Место	Соленость воды (‰)		Мутность (мг/л)		рН		PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (мг/л)	
	СЭСКВС	На месте	СЭСКВС	На месте	СЭСКВС	На месте	СЭСКВС	На месте
1	30.15	33.5	12.40	10	7.04	7.82	0.033	0.03
2	23.14	26.0	24.78	21	7.71	7.79	0.034	0.03
3	26.48	29.1	29.70	27	7.66	7.58	0.068	0.45
4	27.37	32.2	26.88	24	8.01	7.78	0.023	0.02
5	28.53	31.7	45.59	47	7.29	7.84	0.042	0.04
6	28.40	26.3	29.97	27	7.22	7.52	0.082	0.10
7	27.50	25.7	23.94	21	7.45	7.30	0.067	0.35
8	26.16	25.4	34.58	38	7.21	7.75	0.023	0.02
9	26.54	30.5	48.45	51	7.09	7.71	0.023	0.02
10	20.95	26.5	60.48	63	7.63	7.00	0.039	0.05
Средняя ошибка, %	10.7		11.0		6.0		27.4	

### Выводы

Основная цель работы - создать в будущем компактные информационные системы для мониторинга качества водной среды и исследовать их потенциальную эффективность. Эти системы основаны на совместном применении микроволновых и спектроскопических методов и алгоритмов обучения, классификации и идентификации. Реализация этой цели потребует совместного использования инженерных и алгоритмических инструментов, обеспечивающих измерения обработку данных в реальном масштабе времени. Технология комбинированного использования СВЧ, спектроскопии и алгоритмов обнаружения и классификации позволит создать оригинальную систему аппаратных, алгоритмических, модульных и программных средств сбора и обработки данных о водной среде с функциями прогноза и принятия решений.

### Литература

1. Арманд Н.А., Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А. Методы обработки данных радиофизического исследования окружающей среды. М.: Наука, 1987, 270 с.
2. Арманд, Н.А., В.Ф. Крапивин, Ф.А. Мкртчян. GIMS-технология как новый подход к информационному обеспечению изучения среды. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, № 3, 1997, с. 31-50.
3. Афанасьев Ю.А., Нелепо Б.А., Селиванов А.С. и др. Программа экспериментов "Космос – 1500".// Исследование Земли из космоса. 1985, № 3, с. 3 - 8.
4. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974, 212 с.
5. Гранков А.Г., Шутко А.М. Оценки эффективности определения параметров морской поверхности СВЧ-радиометрическим методом.//Радиотехника, 1980, т. 35, № 5, с. 38-41.
6. Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л.: 1980, Гидрометеиздат, 248 с.

7. Ковалев В.И., Руковишников А.И. Компактный многоканальный спектроэллипсометр для Ex Situ и In Situ измерений.// Приборы и техника эксперимента. 2003, № 2, с.164-165.

8. Мкртчян Ф.А. Оптимальное различение сигналов и проблемы мониторинга. М.: Наука, 1982, 186 с.

9. Нгуен Хуан Ман, Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А., Климов В.В., Ковалев В.И., Руковишников А.И., Солдатов В.Ю. Измерения и идентификация водных растворов на основе спектроэллипсометра. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, № 2, 2011, с. 3-22.

10. Нелепо Б.А., Коротаев Г.К., Суетин В.С., Терехин Ю.В. Исследование океана из космоса. Киев: Наукова думка, 1985, 168 с.

11. Шутко А.М. Микроволновая радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. Москва, Наука, 1986, 188с.

12. Cao Van Phuong, Nguyen Boi Khue, Dang Manh Cuong, Nguyen Ngoc Tan, Krapivin V.F., Mkrтчyan F.A., and Soldatov V.Yu. Synthesis of geocological information-modeling systems. Proceedings of the Popov A.S. Russian Society for Radiotechnics, Electronics, and Communication. Serie: "Engineering Ecology", 5, 2009, pp. 18-22.

13. Hisida K.J., Kisino M. On the albedo of radiation of the sea surface.-Oceanogr. Japan Soc. 21, 1965, pp. 148-153.

14. Krapivin V.F., F.A. Mkrтчyan Expert System for the Operative Environmental Diagnostics. Proceedings 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2009, 2-5 June 2009, Hanover, Germany, 2009, pp. 345-151.

15. Mkrтчyan F.A., V.F. Krapivin, V.I. Kovalev, V.V. Klimov. An Adaptive Spectroellipsometer for Ecological Monitoring. *Microwave and Optical Technology Letters*. Volume 51, Issue 11, 2009, pp. 2792-2795.

16. Mkrтчyan F.A., V.F. Krapivin V.I. Kovalev and V.V. Klimov. An Adaptive Spectroellipsometric Identifier for Ecological Monitoring of the Aquatic Environment. *PIERS Proceedings*, Cambridge, USA, 2010, pp. 365 – 368, July 5-8.

17. Mkrтчyan F.A., V.F. Krapivin. An adaptive monitoring system for identify of the spots of pollutants on the water surface. // *World Environment*, 3(5), 2013, pp. 165-169.

18. Mkrтчyan, F.A., Varotsos, C.A. A New Monitoring System for the Surface Marine Anomalies// *Water Air Soil Pollut.*, Vol. 229, Issue 8, No. 273, 2018, pp. 1-10.

19. Mkrтчyan F.A., Shapovalov S.M.. Some aspects of remote monitoring systems of marine ecosystems// *Russian Journal Of Earth Sciences*, Vol. 18, Es4001, 2018, pp. 1-10.

20. Varotsos, C.A., Krapivin, V.F. & Mkrтчyan, F.A., New Optical Tools for Water Quality Diagnostics// *Water Air Soil Pollut.*, Volume 230, Issue 8, August 2019, (2019) 230:

## References

1. Armand, N.A., V.F. Krapivin, F.A. Mkrтчyan. Methods of data processing of radiophysical research of an environment, Nauka, 1987, Moscow, 270.

2. Armand, N.A., V.F. Krapivin, F.A. Mkrтчyan. GIMS-technology as new approach to the information support of the environment study. Problems of the Environment and Natural Resources, No.3, 1997, pp. 31-50.

3. Afanasyev Yu.A., B.A. Nelepo, A.S. Selivanov and others(1985). The program of experiments "Cosmos - 1500". // The study of the Earth from space. No. 3, 1985, pp. 3 - 8.

4. Basharinov A.E., F.S. Gurvich, S.T. Egorov. Radio emission of the Earth as a planet. Moscow: Nauka, 1974, 212 p.
5. Grankov A.G., A.M. Shutko. Estimates of the effectiveness of determining the sea surface parameters by microwave radiometric method. // *Radio Engineering*, Vol. 35, No. 5, 1980, pp. 38-41.
6. Erlov N.G. Optics of the sea. L.: Gidrometeoizdat, 1980, 248 p.
7. Kovalev V.I., Rukovishnikov A.I. Compact multi-channel spectroellipsometer for Ex Situ and In Situ measurements. // *Instruments and experimental technique*. 2003, No. 2, p. 164-165.
8. Hisida K.J., Kisino M. On the albedo of radiation of the sea surface.-*Oceanogr. Japan Soc.* 21, 1965, pp. 148-153.
9. Mkrtchyan, F.A. (1982) Optimal distinction of signals and monitoring problems, Nauka, Moscow, 1982, 185 p.
10. Nelepo B.A., G.K. Korotaev, V.S. Suetin, Yu. V. Terekhin. The study of the ocean from space. Kiev: Naukova Dumka, 1985, 168 p.
11. Shutko A.M. Microwave radiometry of the water surface and soil. Moscow, Nauka, 1986, 188 p.
12. Cao Van Phuong, Nguyen Boi Khue, Dang Manh Cuong, Nguyen Ngoc Tan, Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A., and Soldatov V.Yu. Synthesis of geoeological information-modeling systems. Proceedings of the Popov A.S. Russian Society for Radiotechnics, Electronics, and Communication. Serie: "Engineering Ecology", 5, 2009, pp. 18-22.
13. Krapivin V.F., F.A. Mkrtchyan. Expert System for the Operative Environmental Diagnostics. Proceedings 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2009, 2-5 June 2009, Hanover, Germany, 2009, pp. 345-151.
14. Mkrtchyan F.A., V.F. Krapivin, V.I. Kovalev, V.V. Klimov. An Adaptive Spectroellipsometer for Ecological Monitoring. *Microwave and Optical Technology Letters*. Volume 51, Issue 11, 2009, pp. 2792-2795.
15. Nguyen Xuan Man, Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A., Klimov V.V., Kovalev V.I., Rukovishnikov A.I., and Soldatov V.Yu. Measurements and identification of the water solutions basing on the spectroellipsometer. *Problems of Environment and Natural Resources*, 2, 2011, pp. 3-22.
16. Mkrtchyan F.A., V.F. Krapivin V.I. Kovalev and V.V. Klimov. An Adaptive Spectroellipsometric Identifier for Ecological Monitoring of the Aquatic Environment. *PIERS Proceedings*, Cambridge, USA, 2010, pp. 365 – 368, July 5-8.
17. Mkrtchyan F.A., V.F. Krapivin. An adaptive monitoring system for identify of the spots of pollutants on the water surface. // *World Environment*, 3(5), 2013, pp. 165-169.
18. Mkrtchyan, F.A., Varotsos, C.A. A New Monitoring System for the Surface Marine Anomalies// *Water Air Soil Pollut.*, Vol. 229, Issue 8, No. 273, 2018, pp. 1-10.
19. F. A. Mkrtchyan, S. M. Shapovalov. Some aspects of remote monitoring systems of marine ecosystems// *Russian Journal Of Earth Sciences*, Vol. 18, Es4001, 2018, pp. 1-10.
20. Varotsos, C.A., Krapivin, V.F. & Mkrtchyan, F.A., New Optical Tools for Water Quality Diagnostics// *Water Air Soil Pollut*, Volume 230, Issue 8, August 2019, (2019) 230.