

СБАЛАНСИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ГЕОЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕРА СЕВАН

Д-р физ.-мат. наук, проф. **В.Ф. Крапивин**,
д-р физ.-мат. наук, проф. **Ф.А. Мкртчян**
(Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: vkrapivin_36@mail.ru)
д-р экономич. наук **С.А. Геворгян**
(Армянский государственный экономический университет, г. Ереван)

BALANCED MONITORING OF THE SEVAN LAKE GEOECOLOGICAL SYSTEM

V.F. Krapivin, F.A. Mkrtychyan, S.A. Gevorgyan

Ключевые слова: озеро Севан, модель, мониторинг, алгоритм, прогноз.

Key words: Sevan Lake, model, monitoring, algorithm, forecast.

Предложена структура геоэкологической информационно-моделирующей системы озера Севан (ГИМСОС) с функциями сбалансированного мониторинга и прогнозирования состояния геоэкологической системы, включая диагностику качества водной среды с применением спектрофотометрических измерений в реальном режиме времени. Система построена по блочному типу с использованием набора алгоритмов обработки данных мониторинга, поступающих эпизодически во времени и фрагментарных по пространству (трассовые и точечные наблюдения). ГИМСОС обеспечивает обработку, сортировку, запоминание и хранение информации, моделирование физико-химических и экологических процессов, оценку текущего состояния геоэкологической системы и расчет последствий при реализации сценария антропогенного воздействия. Данная работа в теоретической части выполнена по Госзаданию № 0030-2019-0008, а в прикладной части по гранту РФФИ № 19-07-00443.

The structure of geoeological information-modeling system of the Sevan Lake (GIMSSL) with the functions of a balanced monitoring and forecasting the state of the geoecosystem including the diagnosis of the quality of the aquatic environment with the use of spectrophotometric measurements in real time. The system is based on a block type with a set of monitoring data processing algorithms, occasionally coming in time and fragmentary in space (trace and point of observation). GIMSSL provides processing, sorting, storing and storage of information, modeling of physical-chemical and ecological processes, assessment of the current state geoecosystem and calculation of the consequences of the implementation of the scenario of human impact.

Введение

Озеро Севан - самое крупное озеро на Кавказе и одно из крупнейших пресноводных высокогорных озер мира [1]. До искусственного снижения уровня воды площадь озера составляла 1416 км², максимальная глубина - 84 м средняя - 47 м, объем содержащейся в озере воды был 58.5 км³, а площадь водосборного бассей-

на - 3475 км². Длина озера была 75 км, средняя ширина – 19 км, максимальная – 37 км. С начала снижения уровня площадь озера на протяжении 70 лет постепенно сокращалась, более быстрыми темпами до 1981 г., затем наступил период так называемой условной стабилизации уровня, продолжавшийся до конца 2001 г., за это время уровень сначала поднялся на 0,9 м (1981-1990 гг.), а затем спустился на 1,68 м (1991-2001 гг.). В 2002 г. при уровне воды около 1897,5 м площадь озера составляла 1240 км², объем воды - 32,92 км³. С 2002 г. наблюдается постепенный рост уровня озера. К концу 2010 года уровень достиг отметки 1899,71 метров. Озеро Севан со всех сторон окаймлено горными хребтами. Границей его бассейна на западе и юге является водораздел бассейна р. Аракс, а в остальной части - бассейна р. Кура. Окружающие озеро ландшафты отличаются красотой и разнообразием – горные степи переходят в альпийские луга и горные леса. А горные вершины до начала лета находятся под снегом. В озеро Севан впадают 28 рек, причем все небольшие, длина самой крупной р. Масрик не достигает и 50 км. Вытекает из озера р. Раздан, приток Аракса.

С постройкой Разданского каскада ГЭС уровень воды озера в среднем ежегодно с 1949 по 1962 г. понижался на 1 м. В течение двадцатипятилетнего периода было использовано 38 миллиардов кубометров воды, что уменьшило объем озера на 30% с 58,5 до 39,3 млрд. м³. С сокращением площади озера открылись прибрежные части дна, остров Севан на северо-западе озера сомкнулся с берегом, превратившись в полуостров. К концу 1950-х гг. вскрылся ряд факторов, свидетельствующих о несовершенстве первоначального плана по снижению уровня озера. Освободившиеся земли оказались неплодородными, и их освоение не приносило прибыли. Построенные на р. Раздан гидроэлектростанции более не могли удовлетворить нуждам народного хозяйства Армении, было принято решение о развитии в регионе теплоэнергетики, а затем атомной энергетики, в результате мощности Севан-Разданского каскада оказывались невостребованными. Кроме того, в условиях увеличивающегося потребления водных ресурсов озеро Севан оставалось единственным резервным источником пресной воды в республике, тогда как, согласно проведенным расчетам, другие источники к концу XX века могли быть исчерпаны. В тоже время Академией наук Армянской ССР в 1947-1961 гг. были выполнены новые теоретические, экспериментальные и натурные исследования озера. В результате было принято решение о пересмотре проекта по снижению уровня озера. В 1961 г. был опубликован доклад АН Армянской ССР о необходимости прекращения спуска уровня, который к этому периоду успел опуститься на 13,7 м. Поскольку водами только впадающих в о. Севан рек восстановить его прежний запас воды и его уровень было невозможно, было принято решение о постоянном дополнительном сбросе в озеро с юга вод из бассейна р. Арпы по тоннелю длиной 49 км, который необходимо было построить под Вардениским хребтом. Было подсчитано, что в этом варианте максимальный спуск уровня воды составит 18 м. Строительство тоннеля было завершено к 1981 г., после чего была начата переброска в озеро Арпинской воды из водохранилища Кечут. В результате реализации проекта снижение уровня воды озера было временно приостановлено на отметке 1898 м. При этом площадь Малого Севана составляла 328 км², а Большого - 916 км².

В начале 1990-х гг. в Армении разразился энергетический кризис, вызванный остановкой в стране атомной электростанции, для выхода из кризиса пришлось воспользоваться энергоресурсами о. Севан. Поддержание жизни людей обошлось еще в 6,1 миллиардов куб. м воды или в три метра уровня озера, который снизил-

ся до 1896.8 м. Экосистема озера Севан снова подверглась опасности. Начиная с 1998 г. вода о. Севан более не используется на энергетические цели. В зимний период 1998-1999 гг. удалось накопить значительное количество ресурсов для Севано- Разданского каскада, что позволило более не использовать озерную воду для нужд энергосистемы. К началу 2000-х гг. уровень воды оз. Севан стабилизировался на уровне 20 м ниже исходного, и, благодаря введению политики рационального водопользования, направленной на восстановление экологического баланса о. Севан, начал постепенно повышаться. С 2002 г. наблюдается рост уровня озера, составляющий от 25 до 45 см в год. Было принято решение сначала поднять уровень на 3 м, после чего провести дополнительные исследования. В соответствии с планом к 2031 году уровень озера должен вырасти до 1903.5 метра. Основные характеристики качества вод озера Севан определяются тем, что он является пресноводным водоемом, реакция воды щелочная, рН составляет 8.8-9.9. В составе катионов наблюдается доминирование магния над кальцием. В естественном состоянии воды о. Севан отличались высокой прозрачностью (13-14 м), и в течение всего года были богаты кислородом.

Для озера были характерны низкая окисляемость (около 2 мг/л), круглогодичное отсутствие соединений азота, полное отсутствие соединений железа, аномальное содержание соединений фосфора. С падением уровня озера произошло повышение общей минерализации воды с 555 до 700 мг/л. Кроме того, снижение уровня привело к падению концентрации кислорода, прежде всего, в придонных слоях. Концентрация снизилась с 8.4 мг/л на уровень 1959 г. до 5.76 мг/л в 1980-х гг., что было обусловлено развитием гипоксического кислородного дефицита, продолжающегося в Большом Севане около двух месяцев в году. К 2000-гг. на озере стали периодически образовываться бескислородные зоны, кислородное голодание, сопровождалось выделениями метана и сероводорода. Кроме того, со спуском воды уменьшились ее прозрачность (до 3-4 м) и щелочность, повысилась концентрация железа и азота. Концентрации минерального и общего азота возросли в 30 раз (с 0.01 до 0.32 г/м³), что сопровождалось ростом интенсивности освоения биогенного вещества водорослями и способствовало их активному развитию. В последние десятилетия, особенно в 1990-е гг. показатели общего качества воды значительно ухудшились и из-за попадания в озеро неочищенных сточных вод.

Начиная с 2003 г. финансовую поддержку социальных программ в Армении, а также программы по восстановлению о. Севан оказывают Глобальный Экологический Фонд и Мировой Банк. Согласно плану по восстановлению озера в течение 30 лет его уровень должен быть повышен на 6.5 метров и достигнет значения, наблюдавшегося в 1957 г. Подъем уровня уже начался и достаточно быстрыми темпами. Однако, при быстром повышении уровня остается проблема дополнительного биогенного загрязнения озера за счет залива земель, которые к настоящему времени находятся под искусственным лесом. В этой связи проводятся работы по расчистке от леса заливаемых земель, однако уже сейчас ясно, что их темпы оказываются недостаточными. Кроме сведения леса необходим также демонтаж зданий, построенных в последние десятилетия на территории, которую ранее занимало озеро.

В данной работе предлагается принципиально новый подход к организации оперативного мониторинга качества воды в о. Севан на основе применения ГИМС-технологии [2-7].

ГИМС-технология в мониторинге экосистемы озера Севан

Геоэкосистема озера Севан относится к сложным объектам, имеющих огромное хозяйственное значение и мониторинг которых необходим не только для оценки их текущего состояния, но и для прогнозирования динамики развития всей совокупности процессов в зоне их влияния. Это важно в условиях, когда процесс деградации региональной социально-экологической системы развивается, и нет данных о сокращении потоков загрязняющих веществ в воды о. Севан. Поэтому проблема синтеза системы геоинформационного мониторинга региона о. Севан требует решения огромного спектра задач, входящих в компетенцию многих областей знания. Комплексный характер этой проблемы обусловлен совокупностью разнородных и разноплановых теоретических и прикладных исследований, которые ведутся в рамках многих программ исследования окружающей среды. Основная цель всех подобных исследований состоит в ответе на единственный базовый вопрос: какова должна быть структура и режим работы системы наблюдения за элементами окружающей среды Севанского региона, чтобы обеспечивались надежные оценки ее текущего состояния и прогноз ее развития на ближайшее и перспективное будущее. В данной работе предлагается подход к решению этой задачи путем адаптации ГИМС-технологии [2-7] к условиям мониторинга Севанского региона. Принципиальная схема ГИМС-технологии применительно к данной проблеме представлена на рис. 1.

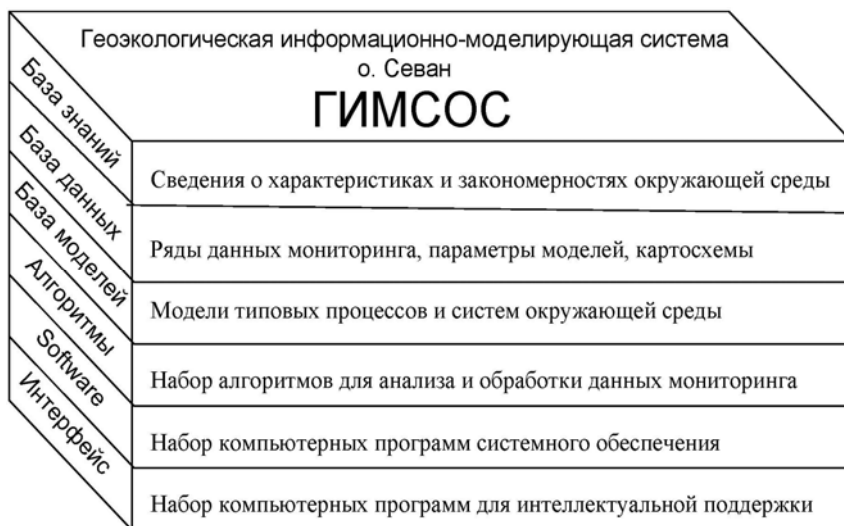


Рис. 1. Архитектура ГИМСОС.

Состояние аквагеосистемы о. Севан характеризуется большим разнообразием параметров, определяющих динамику функционирования не только непосредственно экосистемы озера, но и прилегающих территорий. Среди них, такие как характеризующие тип почвы и растительности, водный режим территории, солевой состав почво-грунтов, уровень залегания грунтовых вод, структура расположения антропогенных объектов и многие другие. В принципе, требуемая информация об указанных параметрах может быть получена с различной степенью достоверности и производительности из данных наземных наблюдений, дистанционных измерений и из банков данных географических информационных систем (ГИС), где содержится априорная информация, накопленная в прошлые годы.

Проблема, возникающая перед лицом, ответственным за принятие соответствующего решения, заключается в получении ответов на следующие вопросы:

(1) какие приборы целесообразно использовать для проведения наземных и дистанционных измерений?

(2) какие финансовые средства выделить для проведения наземных и дистанционных измерений?

(3) как сбалансировать количество наземных измерений и объем дистанционных данных с учетом их информационного содержания и стоимости?

(4) какие математические модели пространственно-временных изменений параметров природных объектов в зоне влияния озера Севан целесообразно использовать для интерполяции и экстраполяции данных контактных и дистанционных наблюдений с целью уменьшения объема (количества) последних и, соответственно, уменьшения стоимости работы в целом, а также для получения прогноза функционирования наблюдаемого объекта?

ГИМС - технология позволяет ответить на поставленные вопросы путем адаптации ее функций к предистории функционирования объекта мониторинга. С этой целью на территории аквагеосистемы озера Севан выделяются пространственные пиксели Ω_{ij} ($\varphi_i < \varphi \leq \varphi_{i+1}$; $\lambda_j < \lambda \leq \lambda_{j+1}$), где φ и λ географические широта и долгота соответственно. Размеры пикселей на начальном этапе организации мониторинга выбираются исходя из имеющихся архивных данных. В дальнейшем эти размеры могут быть уточнены с учетом результатов эксплуатации ГИМСОС. Основной принцип функционирования ГИМСОС охарактеризован на схеме рис. 2. Одним из базовых блоков ГИМСОС является имитационная модель динамики загрязнений в озере Севан (ИМДЗОС), принципиальная схема которой представлена на рис. 3.

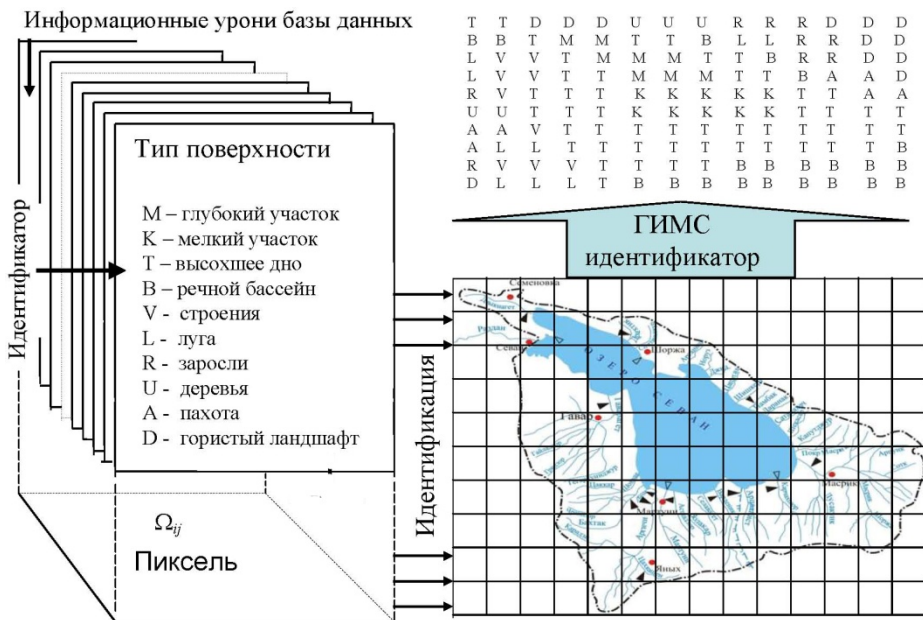


Рис. 2. Информационные уровни базы данных ГИМСОС и схема их картографической идентификации.

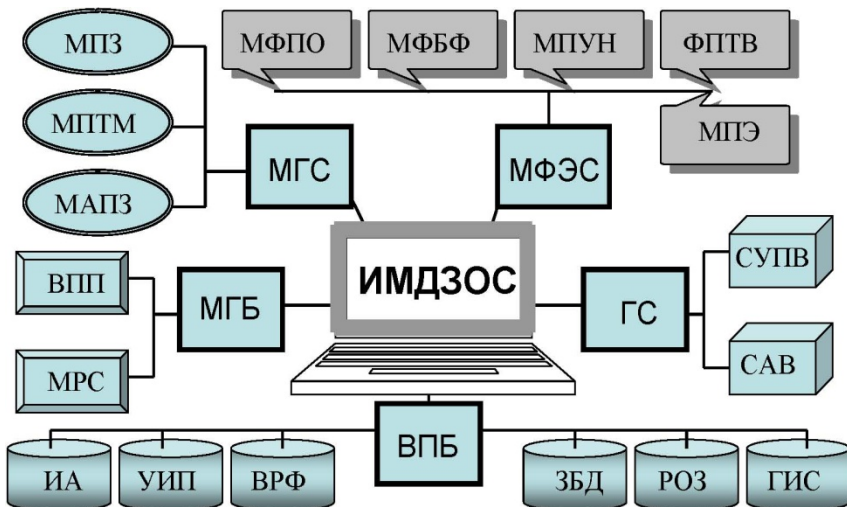


Рис. 3. Блок-схема ИМДЗОС. Обозначения даны в табл. 1.

Имитационная модель динамики загрязнений в озере Севан (ИМДЗОС)

Функционирование ИМДЗОС может поддерживаться глобальной биосферной и климатической моделями [5], на выходе которых могут быть получены температура и возможно другие характеристики окружающей среды Севанского региона (рис. 2). Здесь существует несколько вариантов использования этих данных. Пользователь выбирает, ориентируясь на собственный опыт, использовать ли выходные данные климатической модели в полном объеме, заменив ими данные, рассчитываемые в глобальной модели, или ограничиться некоторыми из них. В случае отсутствия климатической модели пользователь формирует сценарий климатической ситуации и подключает его к ИМДЗОС. Входными для ИМДЗОС являются данные об источниках загрязнителей на суше в прибрежной зоне озера Севан, климатические данные и карты течений. Источниками этой информации являются прогнозные оценки на основе многолетних рядов данных контактных и дистанционных измерений. Наиболее сконцентрированным и полным источником данных об озере Севан и прилегающих территориях являются базы данных ИКС ЭМ (Инфо-коммуникационная система экологического мониторинга).

Таблица 1

Перечень блоков ИМДЗОС

Блок	Описание блока
САВ	Сценарии антропогенного воздействия на экосистему озера Севан.
МАПЗ	Модель атмосферного переноса загрязнений.
МФЭС	Модель функционирования экосистемы озера Севан.
УИП	Управление информационными потоками между блоками ИМДЗОС и базой данных
МГС	Модель гидрохимии озера Севан.
МГБ	Модель гидрологии бассейна озера Севан.
МПТМ	Модель поступления тяжелых металлов в пищевые цепи экосистемы.
МФПО	Модель формирования поля освещенности.
МФБФ	Модель формирования биогенного фона.
МПУН	Модель поступления углеводородов нефти в пищевые цепи.
ИА	Идентификация и адаптация ИМДЗОС
МРС	Модель речного стока в бассейн озера Севан.
ГС	Генератор сценариев.
МПЗ	Модель поступления загрязнений в озеро Севан.
МПЭ	Модель потоков энергии в трофической пирамиде экосистемы озера Севан.
ФПТВ	Формирование поля температуры воды.
ВПБ	Вспомогательные программные блоки.
ВРФ	Визуализация результатов функционирования ИМДЗОС
ВПП	Восприятие прогнозов погоды
ЗБД	Занесение в базу данных результатов эпизодических измерений качества воды.
РОЗ	Решение обратной задачи спектроэллипсометрии
ГИС	ГИС зоны влияния на озеро Севан.
СУПВ	Сценарии управления потоками воды в зоне озера Севан

Центральным блоком ИМДЗОС является МГБ, который реализует схему рис. 4. Согласно ГИМС-технологии эта схема реализуется в каждом пикселе Ω_{ij} . В зависимости от размеров этих пикселей определяются требования к базе данных. Потоки воды на границах бассейна о. Севан определяются блоком ВПП или задаются в блоке СУПВ в виде сценария с возможным учетом имеющихся метеорологических прогнозов, а также при оценке последствий изменения этих потоков.

Базовой функцией ИМДЗОС является расчет пространственного распределения конкретного загрязнителя $F(\varphi, \lambda, t)$ на основе многоканальных данных мониторинга с учетом особенностей режимов их поступления и реакции экосистемы. В ряде работ предложена принципиально новая технология диагностики водной среды, позволяющая в режиме on-line оценивать содержание различных химических элементов в водной среде. Применение этой технологии в гидрохимическом мониторинге озера Севан позволит значительно повысить достоверность оценки качества воды и значительно снизит экономические затраты на мониторинг. Эта технология основана на спектральном анализе с использованием радиометрических и оптических сенсоров [3-7]. Применение радиометров микроволнового диапазона с их размещением на беспилотных летающих носителях и использование алгоритмов восстановления двумерных изображений по трассовым измерениям создает условия для оперативного обнаружения пятен нефтепродуктов и других образований негативного характера на поверхности озера. Использование спектральных оптических измерений с применением обучаемых спектрофотометрических и спектроскопических систем позволяет исключить использование химических лабораторий и значительно сократить время принятия решения о качестве водной среды. На рис. 5 и 6 представлены образцы таких систем. Для использования МОКСС необходимо брать образцы водной среды. МФАИМС рассчитана на измерения в реальном времени.

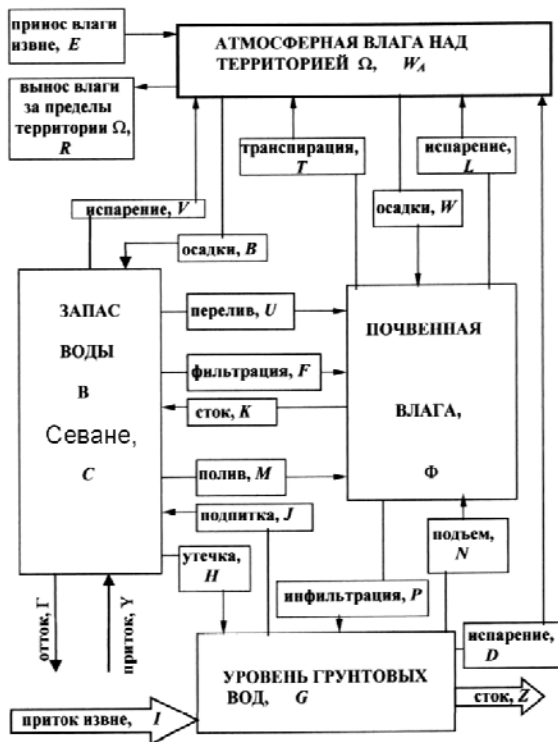


Рис. 4. Блок-схема типовой модели водного баланса в каждом пикселе ограниченной территории.

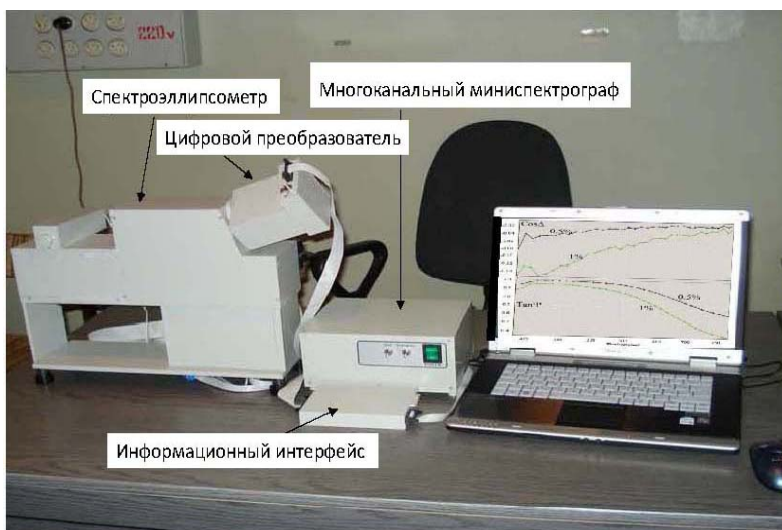


Рис. 5. Многоканальная обучающаяся компактная спектроэллипсометрическая система (МОКСС) с 35-элементной линейкой фотодиодов. Источник света - галогенная лампа. Спектральный диапазон-380-800 нм. Минимальное время измерения спектров эллипсометрических параметров Ψ и Δ - 0.6 сек. Точность измерения эллипсометрических параметров Ψ и Δ по воспроизводимости 0.003 и 0.01 градуса, соответственно. Долговременная стабильность Ψ и Δ - 0.01 градуса. Точность измерения оптического пропускания жидкостей и поворота плоскости поляризации: 0.05% и 0.001 градуса, соответственно. Точность определения показателя преломления -0.001.

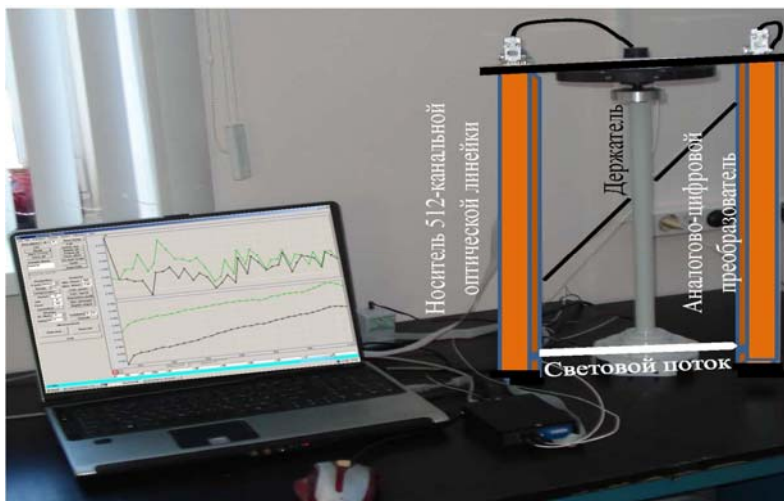


Рис. 6. Общий вид многофункциональной адаптивной информационно-моделирующей системы (МФАИМС) с использованием светодиодов для гидрохимических исследований. Информационно-моделирующие элементы представлены на рис. 7.



Рис. 7. Концептуальная структурная схема МФАИМС, ориентированная на оценку физико-химических характеристик водных объектов и других жидкостей в реальном времени.

Создание МОКСС и МФАИМС оказалось возможным благодаря технологии совместного использования спектрометрии и алгоритмов идентификации и распознавания спектральных образов [8-10]. Алгоритмическое обеспечение МОКСС и МФАИМС основано на комплексном использовании методов распознавания и классификации дискретных образов, формируемых на базе спектров соответственно, регистрируемых за устанавливаемое оператором время. Полученные спектры являются источниками рядов статистических параметров и различных характеристик, объединяемых в векторные пространства для последующего сопоставления с эталонными образцами, хранящимися в памяти компьютера. Технология этого сопоставления зависит от многообразия методов идентификации [3,5,6].

Организация оперативного мониторинга озера Севан может быть основана на оснащении существующей службы системами МОКСС и МФАИМС, режим использования которых определяется ГИМС-технологией путем адаптивного поиска мест и времени измерения с учетом необходимой точности прогноза.

Список литературы (References)

1. Meybeck M., Akopian M., Andreassian V. What happened to Lake Sevan? *SIL News*, 1997. 30 June 1997. P. 7-10.
2. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu. *New Ecoinformatics Tools in Environmental Science: Applications and Decision-making*. Springer, London, U.K., 2015. 903 pp.
3. Haarbrink R., Krapivin V.F., Krisilov A., Krisilov V., Novichikhin E.P., Shutko A.M., Sidorov I. *Intelligent data processing in global monitoring and security*, ITHEA, Sofia-Kiev, 2011, 410 pp.
4. Kaevitser V.I., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. A new information-modeling technology for monitoring environment in the Okhotsk Sea. *Proceedings of the 28-th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice. 17-21 February 2013*. Mombetsu, Hokkaido, Japan. The Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association, Mombetsu, Hokkaido, Japan. 2013. P. 295-299.
5. Krapivin V.F. and Shutko A.M. *Information technologies for remote monitoring of the environment*. Chichester U.K.: Springer/Praxis, 2012. 498 pp.
6. Krapivin V.F., Mkrtychyan F.A. Spatial simulation model of dynamics of the Arctic Basin pollution // *Proceedings of the 27th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice. 19-24 February, 2012*. Mombetsu, Hokkaido, Japan. Mombetsu: The Okhotsk Sea & Cold Ocean Association, 2012. P. 65-68.
7. Mkrtychyan F.A., Krapivin V.F., Kovalev V.I., and Klimov V.V. An Adaptive multi-channel spectroellipsometer for ecological monitoring // *ISPRS Hannover Workshop 2011. High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. June 14-17, 2011, Hannover, Germany*, pp. 143-147.
8. Nitu C., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. *Information-Modeling Technology for Environmental Investigations*. MATRIX ROM, Bucharest, Romania, 2013, 621 pp.
9. Nitu C., Krapivin V.F., and Pruteanu E. *Ecoinformatics: Intelligent Systems in Ecology*. - Magic Print, Onesti, Bucharest, Rumania. – 2004. - 411 pp.
10. Mkrtychyan F.A., Krapivin V.F., Kovalev V.I., Klimov V.V., Nguyen Si Hong, and Bui Quoi Nghia. An adaptive spectroellipsometric technology for the precise real-time monitoring of the water systems. *Proceedings of the First Workshop "Environmental Informatics and Education"*, HoChiMinh City, 6/2006, Institute of Environment and Resource, pp. 124-130.