

# ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-10-1

УДК 502/504:001.8

## МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ И МОДЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ДВУМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ

(на примере мониторинга аквагеосистемы Аральского моря)

д.ф.-м.н. **В.Ф. Крапивин**

(Институт радиотехники и электроники РАН, г. Москва)

к.т.н. **И.И. Потапов**

(Всероссийский институт научной и технической информации РАН, г. Москва)

## METHODICS FOR THE COMBINED USE OF ALGORITHMS AND MODELS TO RECONSTRUCT THE TWO-DIMENSIONAL IMAGES OF LAND COVERS

**V.F. Krapivin, I.I. Potapov**

**Ключевые слова:** мониторинг, аппроксимация, алгоритм, Аральское море.

**Keywords:** monitoring, approximation, algorithm, Aral Sea.

Предложена новая схема организации мониторинга земных покровов, основанная на комплексном применении алгоритмов и моделей для реконструкции двумерных изображений. Используются метод дифференциальной аппроксимации, метод гармонических функций и метод рандомизации. Предложенная схема мониторинга включает два чередующихся этапа: измерение и моделирование. На основе данных наблюдений и измерений характеристик объекта мониторинга с помощью указанных алгоритмов восстанавливается полный образ элемента окружающей среды. С помощью модели осуществляется прогноз состояния объекта. Оценка расхождения между прогнозом и измеренным состоянием объекта используется для внесения изменений в модель или в режим измерений. На примере мониторинга аквагеосистемы Аральского моря показано, что такая схема обеспечивает экономию материальных средств и позволяет решать задачи управления водными ресурсами.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (Грант РФФИ № 19-07-00443).

A new scheme for the land covers monitoring was proposed. It is based on the combined application of algorithms and models to reconstruct the two-dimensional images. Method of differential approximation, method of harmonic functions and randomization method are used. Monitoring scheme proposed includes two stage: measurements and modelling. Total image is reconstructed with the base of measurement data using the above mentioned algorithms. The forecast of monitoring object state is realised by

*means of model. An assessment of discrepancy between the real object state and the forecasting state is used to change a monitoring regime or model parameters. An example of the Aral sea aquageosystem monitoring is discussed to show that monitoring scheme proposed gives a possibility to save the material resources and to solve the problems of the water resources control.*

## ВВЕДЕНИЕ

Аральское море расположено в Туранской низменности Средне-Азиатского региона. До 1961 г. Аральское море представляло собой достаточно стабильный водоем с вековыми колебаниями уровня воды в пределах  $\pm 3$  м и сезонными  $\pm 25$  см и являлось одним из наиболее крупных внутриконтинентальных замкнутых солоновато-водных водоемов земного шара. В южной части моря располагается равнинное пространство площадью более 11 тыс. кв. км современной и древней дельты р. Аму-Дарьи, южнее переходящее в барханные песчаные массивы Заунгузских Каракумов. На востоке Аральское море граничит с пустынной равниной Кызылкумов с общим уклоном в сторону моря. Здесь характерными рельефами являются бугристо-грядовые пески с широкими сухими руслами древних притоков Сырдарьи и Амударьи. На севере и северо-западе береговая линия моря ограничивается барханными песками предгорий Мугоджар.

Климатические условия функционирования моря определяются охарактеризованным выше его окружением. Колебания температур в зоне моря могут достигать  $78^{\circ}\text{C}$ . Средняя январская температура составляет  $-14^{\circ}\text{C}$ , иногда опускается до  $-33^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура в июле равна  $+26^{\circ}\text{C}$ , достигая в отдельные годы уровня  $+45^{\circ}\text{C}$ . Вообще климатическая обстановка в Приаралье характеризуется изменчивостью, не связываемой с антропогенными процессами. Так за период 1951-1960 гг. межгодовая изменчивость температуры воздуха колебалась от  $4^{\circ}\text{C}$  до  $6^{\circ}\text{C}$ , а в период с 1971 по 1980 гг. зимняя температура оказалась ниже нормы на  $5.5^{\circ}\text{C}$ . За последующие годы наметилась тенденция к переходу годового режима температуры на континентальный характер. Имеющиеся показатели отклонений средних температур от многолетних норм позволяют при формулировке синоптических сценариев задавать интервалы климатической неопределенности.

Сумма годовых осадков над морем колеблется около 100 мм, тогда как испарение оценивается величиной 1250 мм/год (т.е. ежегодно с поверхности моря испаряется слой воды в 90 см). Температурный режим самого моря характеризуется колебаниями температуры воды от  $20-25^{\circ}\text{C}$  летом до  $-0.7^{\circ}\text{C}$  зимой, когда значительная акватория моря покрывается льдом. Так как море становится мелководным, то прогревание и охлаждение воды в нем иногда достигает дна.

Располагаясь среди пустынь, море постоянно находится под воздействием ветра. Осенью и зимой дуют северо-восточные ветры, приносящие холодный воздух из Сибири, весной и летом дуют юго-западные ветры, приносящие влагу с Атлантики, Средиземного моря и Каспия. Роза ветров и их скорости являются важными параметрами, учет которых при анализе водного баланса Аральского моря должен осуществляться с наибольшей тщательностью.

Составляющие водного баланса Арала обсуждаются многими авторами [1-9]. Еще в 1968 году, когда только наметились отрицательные тенденции в водном балансе рала, в работе Корнакова и др. [6] был дан исчерпывающий анализ его

основных элементов. В то время потери стока в дельте р. Амударьи составляли  $9.1 \text{ км}^3 / \text{год}$ , а с учетом водозабора на орошение ниже г. Нукус эти потери достигали  $10.7 \text{ км}^3 / \text{год}$ , или 23.3 % от стока Амударьи. У различных авторов эти оценки изменяются и поэтому при моделировании водного баланса задание входных оценок связано с некоторой неопределенностью. Во всяком случае оценка среднего многолетнего (1934-1960 гг.) притока в дельту Амударьи близка к величине  $47 \text{ км}^3 / \text{год}$ . Для р. Сырдарья эта величина равна  $15.2 \text{ км}^3 / \text{год}$ .

Контроль за водным балансом территории влияния Аральского моря связан с большими материальными затратами, так как в этом регионе отсутствует стационарная сеть станций наблюдения за природной средой. Поэтому в данном исследовании рассматривается методика организации мониторинга, использующая совокупное применение эпизодических наблюдений и моделирования процессов преобразования водных элементов территории.

### НОВАЯ МЕТОДИКА ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА

Для комплексного анализа водного баланса территорий Приаралья применим ГИМС-технология [9], ключевым звеном которой является математическая модель контролируемого объекта или процесса. Именно сочетание эмпирической и теоретической частей ГИМС - технологии позволяет оперативно оценивать текущие и прогнозные изменения окружающей среды исследуемого региона. ГИМС-технология любую подсистему окружающей среды рассматривает как элемент природы, взаимодействующий через биосферные, климатические и социально-экономические связи с глобальной системой *Природа / Общество*. Для конкретного объекта мониторинга создается модель, описывающая это взаимодействие и функционирование различных уровней пространственно-временной иерархии всей совокупности процессов в окружающей среде, влияющих по предварительным оценкам на состояние объекта. Модель охватывает характерные для данной территории процессы природного и антропогенного характера и в начале своей разработки опирается на существующую информационную основу. Структура модели ориентируется на адаптивный режим ее использования с последующей эпизодической коррекцией ее параметров или ее блоков.

В результате соединения системы сбора информации об окружающей среде, модели функционирования геоэкосистемы данной территории, системы компьютерного картографирования и средств искусственного интеллекта синтезируется единая ГИМС территории, обеспечивающая прогнозные оценки последствий реализации техногенных проектов и другие оценки функционирования геоэкосистемы.

Для Аральской зоны реализация ГИМС-технологии требует выделения характерных элементов природно-антропогенной системы, функционирующей в этой зоне. Эта процедура реализуется через множество двумерных матричных структур - идентификаторов, в символьной форме описывающих географическую конфигурацию зоны, распределение почвенно - растительных формаций, дислокацию антропогенных объектов, положение характерных синоптических зон, топографию местности и конфигурацию водных артерий территории.

Для уравнений водного баланса Приаралья важными являются элементы земных покровов, влияние которых на испарение и поверхностный сток проявляется через их характеристики. Идентификатор  $A_1 = \| a_{ij} \|$  определяет конфигурацию территории, которая учитывается в модели водного баланса. Не нарушая общности, примем постоянную географическую сетку размерами  $\Delta\varphi$  по широте  $\varphi$  и  $\Delta\lambda$  по долготе  $\lambda$ . Тогда идентификатор  $A_1$ , заложенный в базу данных ГИМС, бес-

печивает гибкий учет участков территорий в зоне Аральского моря, которые будут приниматься во внимание. Идентификатор  $A_2 = \| a_{ij, 2} \|$  задает пространственное распределение элементов земных покровов, осуществляя их символическую привязку к составляющим водного баланса территории.

В период с 1972 г. по 1990 г. на территории Средней Азии осуществлялись регулярные сеансы дистанционного мониторинга с применением микроволновой, оптической и ИК - технологий зондирования [1,2,7]. При этом путем синхронного использования аэрокосмических и наземных средств проводились исследования региональных биогеоценозов. Материалы радиолокационных, радиотепловых, фотографических, оптоэлектронных съемок и измерений легли в основу базы дистанционных данных, которая включает информацию о различных характеристиках земных покровов, гидрометеорологических процессов и атмосферы. В частности, база данных содержит сведения об особенностях микро и макрорельефов, типе флористического фона, степени увлажнения и засоления почвогрунтов, подповерхностных аномалиях (пустоты, линзы грунтовых вод и др.), состоянии атмосферы. В базу данных входят оценки зависимостей отражательной и излучательной способностей подстилающей поверхности в различных диапазонах длин волн от вариаций физико-химических и геофизических параметров элементов окружающей среды. Эти данные использовались при решении задач идентификации на основе соответствующих алгоритмов пространственно-временной интерполяции.

База данных содержит сведения о радиояркостных контрастах по всей территории Средней Азии. При этом в качестве элементов территории выделены замкнутые системы водоемов, накопители дренажных вод, комплексы искусственных и естественных озер, увлажненные солончаки и такыры. Опыт ее формирования показал, что только за счет дистанционных измерений с борта самолета-лаборатории возможна оперативная оценка влагосодержания атмосферы по контуру всей территории Каспийско-Аральской системы. А эпизодические трассовые измерения над внутренними территориями позволяют уточнять распределение земных покровов и уровень залегания грунтовых вод.

Водный баланс непосредственно Аральского моря рассчитывался многими исследователями. Но в этих расчетах учитывались корреляции и оценки, усреднявшиеся по большим территориям, прилегающим к котловине Арала. Совершенно очевидно, что отмеченная выше нестационарность климатической обстановки и изменчивость структуры земных покровов требуют более подробного отражения в уравнениях водного баланса роли детального описания климатических параметров и морфологии элементов, участвующих в испарении воды.

## **АЛГОРИТМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ**

Выбор ряда численных алгоритмов, которые бы позволяли по отрывочным измерениям восстанавливать двумерные распределения параметров водного баланса и других необходимых для моделирования характеристик окружающей среды зоны формирования составляющих этого баланса рассмотрен в работах [7,9]. Предложено несколько алгоритмов, обладающих различными точностями и особенностями применения. Среди них алгоритм восстановления динамических параметров методом дифференциальной аппроксимации. Предположим, что в режиме мониторинга измеряются  $N$  характеристик системы  $x_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) в моменты времени  $t_s$  ( $s = 1, \dots, M$ ). Формальную зависимость между  $x_i(t)$  представим в виде системы дифференциальных уравнений с неизвестными коэффициентами  $\{a_{ijk}, b_{ij}\}$ :

$$dx_i / dt = \sum_{k,j=1}^N [a_{ijk} x_j(t)x_k(t) + b_{ij}x_j(t)]$$

Задавая начальные условия:  $x_i(0)$ , ( $i = 1, \dots, N$ ) задачу восстановления значений  $x_i(t)$  в любой момент времени на интервале наблюдения  $[0, T]$  сводим к обычной задаче Коши для системы обыкновенных уравнений. Единственным препятствием к ее решению является неопределенность коэффициентов  $a_{ijk}$  и  $b_{ij}$ . В этом случае поступим традиционным путем, т.е. введем меру расхождения между рассчитанными значениями  $x_i(t_s)$  и измеренными оценками  $\hat{x}_i(t_s)$ :

$$E = \sum_{s=1}^M \left\{ \sum_{i=1}^N [x_i(t_s) - \hat{x}_i(t_s)]^2 / N \right\} / M, \text{ где } 0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_M \leq T.$$

Тогда множество коэффициентов  $\{a_{ijk}, b_{ij}\}$  может быть определено как решение следующей оптимизационной задачи:

$$E_0 = \min E(a_{ijk}, b_{ij})$$

Поиск минимума функции  $E$  сводится к традиционной задаче динамического программирования.

Возможны два режима использования этого алгоритма, когда трассы полета самолета-лаборатории параллельны или имеют одно азимутальное направление на маяк. Пусть в некоторых точках  $A_i$  фиксируется набор яркостных температур  $T_{я}^j = (T_{я, A1}^j, \dots, T_{я, An}^j)$  в стандартные моменты времени  $t_j$  ( $j=1, \dots, M$ ). Тогда можно образовать матрицу  $\|T_{я, Ail}^j\|$ , в пределах которой с помощью алгоритма дифференциальной аппроксимации осуществляется сведение измерений к единому моменту времени. Далее остается решить обратную задачу по определению геофизических параметров.

Достаточно эффективным оказывается метод гармонических функций для восстановления данных микроволновой радиометрии в замкнутой области. Согласно оценкам Крапивина [7] радиояркостная температура земных покровов в зоне Аральского моря является гармонической функцией и, следовательно, ее определение внутри замкнутого контура сводится к типичной краевой задаче Дирихле. На границе  $\Gamma$  области  $G$  задается непрерывная функция  $\tilde{T}_j = \tilde{T}_j(u)$ , где  $u = \varphi + i\lambda$  - комплексная координата точки  $(\varphi, \lambda) \in \Gamma$ . Требуется найти функцию  $T_j$  гармоническую внутри  $G$  и принимающую заданные значения  $\tilde{T}_j$  на  $\Gamma$ . Такая функция согласно теории функций комплексного переменного является вещественной частью некоторой аналитической функции  $\Phi(z)$ , которая имеет вид интеграла Коши:

$$\Phi(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{\mu(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta$$

с вещественной плотностью  $\mu(\zeta)$ , где  $\zeta \in \Gamma$ ;  $z = \varphi + i\lambda$  - произвольная точка внутри  $G$ . Устремляя  $z$  к некоторой точке  $u$  контура  $\Gamma$  и с учетом соотношений  $Re \varphi(u) = \tilde{T}_j(u)$  и  $Im(d\zeta / (\zeta - u)) = -\cos(r, n) d\sigma / r$ , где  $r$  - расстояние от  $\zeta$  до  $u$  (направление выбирается от  $\zeta$  к  $u$ ,  $d\sigma$  - элемент длины на  $\Gamma$ ;  $n$  - внешняя нормаль к  $\Gamma$ ). Для  $\mu(u)$  получим интегральное уравнение Фредгольма:

$$\mu(u) - \frac{1}{\pi} \int_{\Gamma} \mu(\zeta) \frac{\cos(r, n)}{r} d\sigma = 2\tilde{T}_j(u)$$

с непрерывным ядром  $\cos(r, n)/r$ , которое разрешимо при любой правой части. Решив это уравнение, находим  $\varphi(z)$  и, следовательно,

$$T_j(\varphi, \lambda, \eta, \theta, t) = Re \varphi(z).$$

Совместное применение методов дифференциальной аппроксимации и гармонических функций полностью решает задачу восстановления данных трассовых измерений и построения карты территории  $G$ .

Для идентификации геофизических параметров применяется приближенный метод решения обратной задачи. Пусть в момент  $t_i$  на выходе каждого измерительного устройства (радиометра) фиксируются величины  $Z_{ij}$  ( $i=1, \dots, M; j=1, \dots, n$ ) такие, что  $Z_{ij} = T_j + \xi_{ij}$ . Здесь  $T_j$  - реальное значение  $j$ -го параметра (радиоярковая температура на длине волны  $\lambda_j$ ),  $\xi_{ij}$  - шумовая составляющая. Поиск корреляции сводится к определению зависимости  $T_j = f_j(X)$ , где  $X = (x_1, \dots, x_m)$  - геофизические параметры. Существует множество приемов поиска функции  $f$ . Как правило в качестве критерия согласия используется среднеквадратическое отклонение [1]. Однако, такой критерий не может отражать дисперсионные характеристики шумовой составляющей в измерениях. Поэтому рассмотрим поставленную задачу именно с этой позиции. Пусть функция  $f$  является линейной и тогда имеем систему  $n \geq m$  уравнений:  $A_{ij} (X = T + \Xi$ . Ищется такое решение этой системы, которое имеет минимальную дисперсию.

Возникающие трудности из-за нестационарности рядов данных измерений преодолеваются с помощью алгоритма рандомизированной линейно-ломанной аппроксимации, который позволяет выделять квазистационарные участки.

## ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Блок-схемы и уравнения математических моделей, которые позволяют в рамках принимаемой пространственной дискретизации Аральского региона параметризовать процессы испарения, осадков, поверхностного стока, инфильтрации и атмосферного переноса влаги описаны в [9]. В результате создан взаимосвязанный ряд моделей, обеспечивающий выполнение вычислительных экспериментов по оценке динамических характеристик изменчивости водного баланса Аральского моря в зависимости от климатических и антропогенных параметров.

Рассмотрим имитационную модель гидрофизических полей Аральского моря (*SMAHF*) как элемент общей модели Аральского региона [9]. *SMAHF* включает блоки сбора информации, первичной обработки и накопления данных мониторинга, имитации функционирования водного режима аквагеосистемы Арала, прогнозирования ее состояния, оценки невязки между измеренными и прогнозируемыми состояниями, принятия решения по планированию измерений и управлению водохозяйственными мероприятиями, сервисного обеспечения при оперировании с входной и выходной информацией [2,5]. Схематически функциональная структура *SMAHF* представлена на рис. 1 и в табл. 1 и 2.

Модель аквагеосистемы Арала является базовым элементом *SMAHF*, обеспечивающим за счет структурного и параметрического изменения адаптацию режима мониторинга. Функциональное наполнение модели представлено в табл.1.

Схема водного баланса зоны влияния Каспийского и Аральского морей представлена в работе [9]. Для компьютерного аналога этой схемы примем географическую сетку дискретизации территории региона  $\Xi$  на квазиоднородные участки  $\Xi_{ij}$  с размерами  $\Delta\varphi$  по широте и  $\Delta\lambda$  по долготе, где величины  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\lambda$  являются свободными параметрами, выбираемыми в соответствии с базой данных. Каждый участок  $\Xi_{ij}$  характеризуется типом флористического фона  $\alpha_{ij}$  и почвы  $\beta_{ij}$ , поверхностным увлажнением  $\Phi_{ij}$  и глубиной залегания грунтовых вод  $M_{ij}$ .

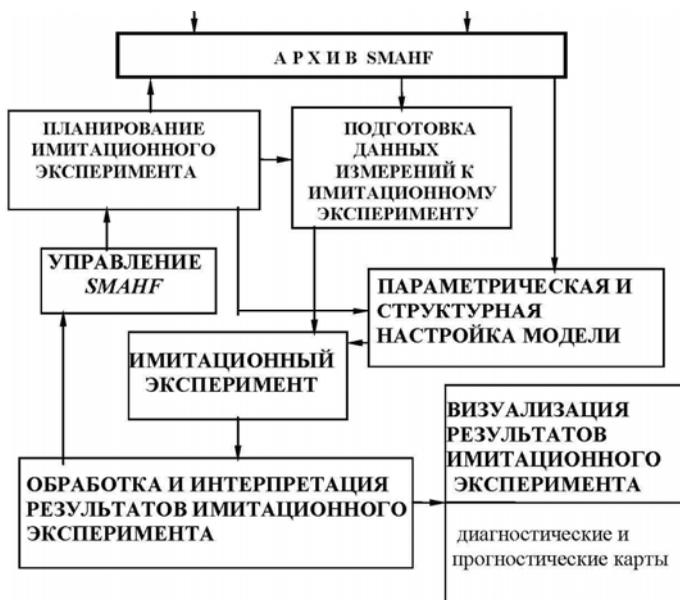


Рис. 1. Схема информационных потоков при функционировании *SMAHF*

Таблица 1.

### Блоки *SMAHF*

Блок	Характеристика функций блока
<i>FIC</i>	Формирование начальных условий для модели с учетом многолетних изменений гидрогеофизических характеристик Аральского моря. Выбор шагов дискретизации пространства по широте и долготе. Определение шага дискретизации времени.
<i>MSC</i>	Модель сезонных изменений уровня Аральского моря
<i>MSF</i>	Модель формирования структуры течений в Аральском море
<i>MTS</i>	Модель пространственно-временного распределения температуры и солености воды.
<i>MWD</i>	Модель формирования поля плотности воды.
<i>SCT</i>	Имитация процесса конвективного перемешивания водной массы моря.
<i>RCR</i>	Обеспечение режима структурной и параметрической коррекции блоков <i>SMAHF</i> с учетом результатов моделирования.

Проецирование сетки  $\Delta\varphi \times \Delta\lambda$  на карту территории  $\Xi$  дает совокупность геофизически неоднородных объектов, обменные процессы водой между которыми подчинены балансовым соотношениям. В каждой ячейке  $\Xi_{ij}$  площадью  $\sigma_{ij}$  функционирование рассматриваемой системы представляется подмножеством потоков  $\{H_k\}$ , выделяемым матричными идентификаторами  $\{A_j\}$ , которые согласно ГИМС-технологии отражают информационную структуру базы данных. Параметризация потоков  $H_k$  и управление имитационным экспериментом выполняется комплексом программного обеспечения, охарактеризованным в табл. 2.

Таблица 2.

### Программное обеспечение модели

Идентификатор блока модели	Характеристика блока
<i>STANDARD</i>	Калибровка и масштабирование входной информации
<i>FILTER</i>	Фильтрация входных данных
<i>APPROX</i>	Реконструкция двумерных распределений в виде карто-схем за счет интерполяции измерений по пространству.
<i>EULER</i>	Эйлеровская модель переноса атмосферной влаги.
<i>CHOICE</i>	Интерфейс с базой данных.
<i>FLAWS</i>	Параметрические описания потоков $H_k$ ( $k=1, \dots, 38$ ).
<i>SCENAR</i>	Синтез сценариев.
<i>MAP</i>	Картографическое представление результатов имитационных экспериментов.
<i>IBMEN</i>	Привязка структуры $\{\Xi_{ij}\}$ к географической карте с помощью идентификаторов $\{A_j\}$ .
<i>PROC</i>	Блок контроля за ходом имитационного эксперимента и управления формами визуального представления его результатов.
<i>ARAL</i>	Модель гидрофизического режима Аральского моря.
<i>KBG</i>	Модель гидрофизического и гидрохимического режимов залива Кара-Богаз-Гол.

Описанная совокупность моделей позволяет связать в единую систему все потоки влаги, которые могут циркулировать на территории Приаралья и которые могут приходиться через ее границу. Для вычислительного эксперимента на основе этой системы моделей требуется большой объем данных. Сократить этот объем можно за счет учета многочисленных корреляций, построенных многими авторами для описания связей между геофизическими параметрами и элементами водного баланса региона.

### ИМИТАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения имитационных экспериментов требуются сценарии изменения климатических и антропогенных ситуаций в Аральском регионе. На их основе строятся прогнозы изменения водных ресурсов этого региона и даются рекомендации по режиму мониторинга Аральской аквасистемы. В принципе имеющихся данных о динамике водного баланса в прошлом достаточно, чтобы достоверно отразить историю динамики главных элементов водного баланса Арала и экстраполировать эту динамику в условиях сохранения наметившихся тенденций. Однако ясно, что методика экстраполяции данных предыдущих лет не может быть вполне объективной и тем более ответить на вопрос о возможности существования режимов воздействия на элементы водного баланса, которые бы изменили эти тенденции.

Развитая модель водного баланса Аральского региона позволяет рассмотреть различные гипотетические ситуации по воздействию на водный баланс территории  $\Xi$  с целью поиска способов его позитивного изменения с переводом из современного неудовлетворительного состояния в стабильный и приемлемый по народно-хозяйственным и гидрометеорологическим критериям режим функционирования.

Для проведения вычислительных экспериментов в качестве территории  $\Xi$  рассмотрим регион, ограниченный географическими координатами  $[41^\circ, 47^\circ]\text{N}$  и  $[50^\circ, 70^\circ]\text{E}$ . Зададим  $\Delta\varphi=\Delta\lambda=10'$ . Наполнение идентифика-торов  $\{A_i\}$  осуществим по данным литературных источников и на основе электронной базы дистанционных данных. Для формирования множества сценариев рассмотрим гипотетические антропогенные управления водным режимом. Основная цель компьютерного эксперимента состоит в выборе такого сценария, который бы наилучшим образом обеспечивал стабильный перевод гидрологического режима территории  $\Xi$  в состояние с компенсацией приращения уровня Каспия на  $14 \text{ см/год}$  и снижением его уровня на  $1 \text{ см/год}$ , а также возрождения основных параметров Арала на уровне 1960 г.

Анализ данных динамики уровней Каспия и Арала показывает существование нарушенного равновесия в гидрологическом режиме между ними. Сложившаяся к концу 20-го столетия гидрометеорологическая ситуация на территории  $\Xi$  не может быть переведена в другое равновесное состояние без антропогенного управления. Нормализовать уровень Каспия можно за счет увеличения оттока его воды в другие резервуары. Это возможно путем принудительного изъятия каспийской воды и размещения ее в участках солончаков и впадин на восточном побережье Каспийского моря, имеющих более низкий по сравнению с морем уровень ( $-25.7 \text{ м}$ ). К таким элементам прибрежного ландшафта относятся сор Мертвый Култук ( $-27 \text{ м}$ ), сор Кайдак ( $-31 \text{ м}$ ), котловина КБГ ( $-32 \text{ м}$ ), впадины Карагие ( $-132 \text{ м}$ ), Каунды ( $-57 \text{ м}$ ), Карын Арык ( $-31 \text{ м}$ ), Чагала-Сор ( $-30 \text{ м}$ ) и др. Технология переброски каспийской воды в эти участки  $\Xi$  здесь не обсуждается. Заметим лишь, что во многих случаях для этого необходимы лишь открытые каналы для самостоятельного движения воды. Конечно, здесь возникают дополнительные проблемы обеспечения устойчивости параметров окружающей среды. Например, для залива КБГ необходимо не нарушить гидрохимические процессы и рельеф дна. Для других элементов  $\Xi$  следует искать технологии переброски каспийской воды, которые обеспечивали бы распреснение солончаков и накопление в прибрежных впадинах пресной или слабо минерализованной воды.

Если указанная процедура обводнения реализована частично или полностью, то увеличивается испарение каспийской воды. Испарившаяся влага переносится на другие территории в соответствии с неуправляемой синоптической обстановкой. По многолетним данным о ветровой обстановке в западной части  $\Xi$  существуют периоды времени с устойчивой благоприятной розой ветров. Направления  $W$ ,  $NW$  и  $SW$  имеют высокую повторяемость. Следовательно, атмосферный перенос каспийской воды в котловину Арала возможен в устойчивом режиме. Задача состоит в организации принудительного осаждения этой воды или оценки естественного возрастания осадков. В модели эта процедура отнесена к разряду сценария.

Рассмотрим сценарий реализации естественных трендов элементов водного баланса Аральского региона. Для этого дополнительно уже к принятым оценкам многих параметров зафиксируем антропогенную составляющую. Размеры современного и планируемого безвозвратного водопотребления оценены по литературным источникам. Чтобы ученьшить возможные неопределенности параметров моделей испарения примем оценки  $H_{20} = 6 \text{ км}^3/\text{год}$  для Сырдарьи и  $H_{20} = 8 \text{ км}^3/\text{год}$  для Амударьи.

Теперь рассмотрим сценарий принудительного обводнения указанных выше территорий на восточном побережье Каспийского моря. Результат моделирования приведен на рис. 2.

Над акваторией Каспия формируется поток атмосферной влаги  $\text{км}^3/\text{сут}$ . Искусственные испарители обеспечивают дополнительно к этому потоку  $0.2 \text{ км}^3/\text{сут}$ . Как следует из результатов расчетов при устойчивом западном ветре за неделю искусственных дождей в район

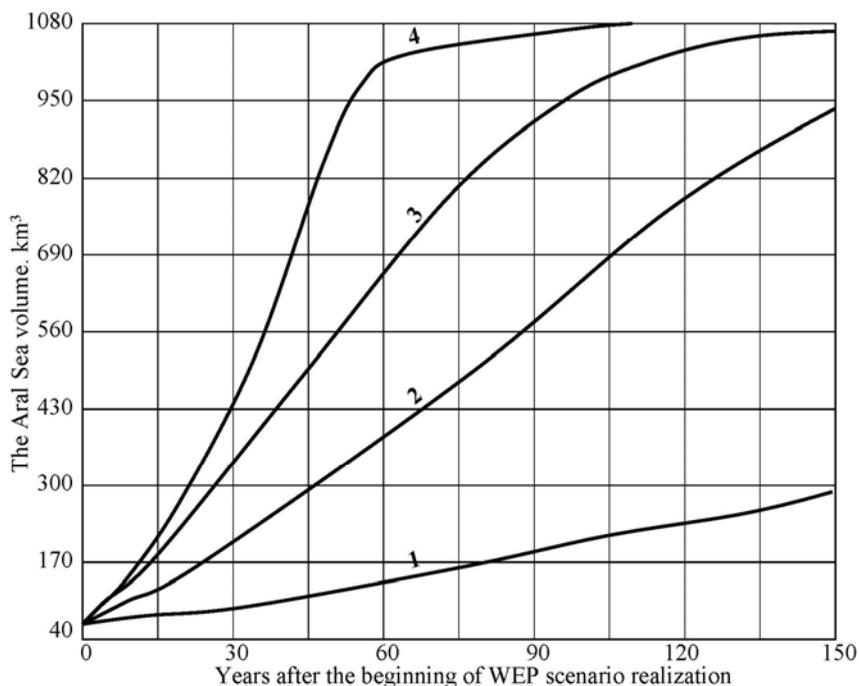


Рис.2. Возможная динамика объема Аральского моря ( $\text{км}^3$ ) в результате воздействия принудительных испарителей на гидрологический режим территории Аральско- Каспийской аквагеосистемы начиная с 1998 г. и при естественных трендах элементов ее водного баланса. Реализован сценарий WEP (Water Evaporation Precipitation).

Арала поступает годовой объем осадков 1960 г., а уровень моря поднимается на 0.3 м. За 80 суток летнего периода объем Арала пополняется на  $120 \text{ км}^3$  воды, т.е. его уровень поднимается на 3.3 м. В случае, если повторяемость *W*, *NW* и *SW* ветров на территории между Каспием и Аралом не менее 40% или 50% с суммарной продолжительностью 80 и более суток в году, то уровень Арала по состоянию на 1960 г. будет достигнут за 8 или 9 лет соответственно. При продолжительности этой розы ветров в 60 суток указанный результат будет достигнут только через 12-15 лет. При этом предполагается, что повторяемость восточных ветров на  $\Xi$  не превышает 15%. Вклад избыточной атмосферной влаги с Каспия в увеличение речного стока дает около  $40 \text{ км}^3/\text{год}$  с выполнением соотношения  $34 < H_7 < 50 \text{ км}^3/\text{год}$ .

В распределении осадков над восточной и центральной частями территории  $\Xi$  наблюдается устойчивое повышение осадков соответственно на 8% и 12%, что обеспечивает приведенную на рис. 2 динамику объема Аральского моря. Положительный баланс влагопереноса на восточной границе  $\Xi$  возрастает на 4%, что стимулирует нарастание речного стока в Туранскую низменность. При ветрах от *SW* до *W* и *NW* количество осадков в котловине Арала инвариантно, восточный ветер оказывается в основном нейтральным или на 4-7% увеличивает количество осадков в зоне Арала за счет возвратной атмосферной влаги. Указанная инвариантность осадков обеспечивает возможность регулирования режимов обводнения засушливых территорий. В частности, при *SE* ветре избыточное испарение каспийской воды может давать запас влаги для принудительного обводнения засушливых степей в Калмыкии и Ставропольском краях.

Безусловно здесь возникает вопрос о достоверности всех этих расчетов. Нелинейность уравнений используемых моделей не позволяет произвести какие-либо теоретические оценки устойчивости и точности имитационных модельных результатов. Также слишком многие факторы не были учтены. Поэтому в качестве подтверждения некоторого уровня достоверности представляется возможным привести сопоставление имитационных (теоретических) расчетов и опубликованных в литературе оценок параметров. Пример такого сопоставления с данными наблюдений за площадью и глубиной зал. КБГ показывает, что *SMANF* позволяет рассчитывать эти величины с точностью до 25%. Видно, что модель достаточно правдоподобно восстанавливает историю динамики некоторых характеристик залива Кара-Богаз-Гол.

Внедрение ГИМС-технологии облегчает решение задачи организации регулярного мониторинга указанного региона. Это возможно за счет согласованного использования средств наблюдения и математических моделей. Примерная схема информационной системы показана на рис.3. Эта система используется службами мониторинга зоны Арала и прилегающих территорий для экспертного сопоставления эпизодических оценок отдельных элементов водного баланса с результатами моделирования. Результатом такого сопоставления могут быть коррекции отдельных составляющих модели водного баланса или дополнительные измерения. В целом реализация схемы рис. 3 возможна при использовании регулярных спутниковых измерений площадей различных типов земных покровов, температуры, содержания влаги в атмосфере, скорость и направление ветра, соленость водоемов.

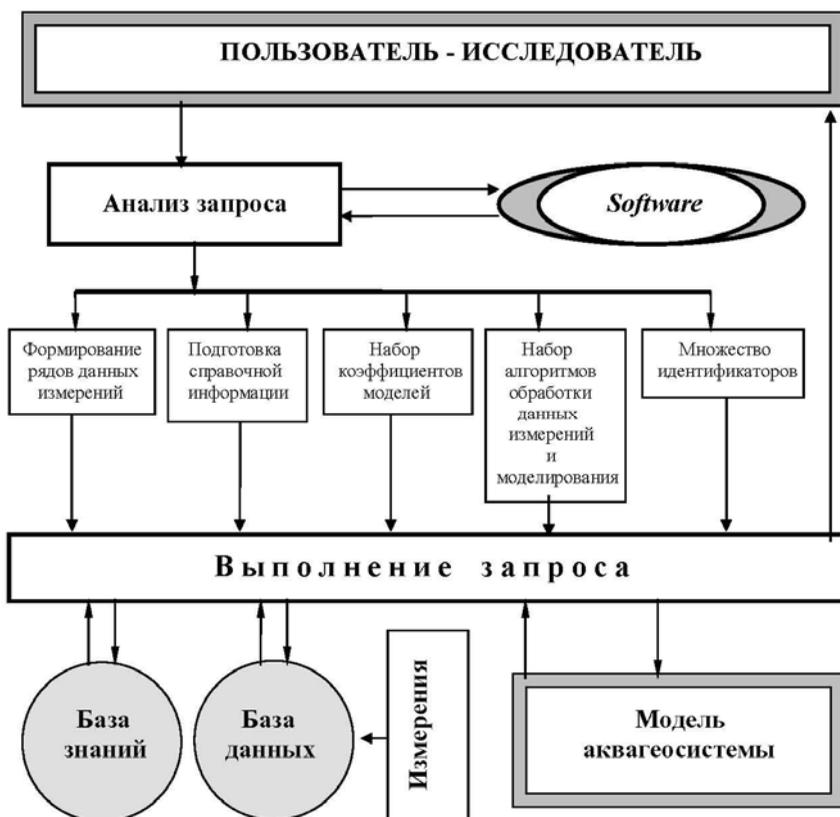


Рис. 3. Примерная схема диалогового режима использования алгоритмического обеспечения диалогового режима использования гидрофизического эксперимента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бородин Л.Ф., Крапивин В.Ф. Дистанционные измерения характеристик земной поверхности.- *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*.-1998, № 7.- С. 38 - 54.
2. Бородин Л.Ф., Крапивин В.Ф., Гольфельд Г.Б., Назарян Н.А. Поиск и идентификация чрезвычайных экологических и техногенных ситуаций.- *Пробл. окр. среды и природных ресурсов*.1997, № 10.- С. 2-19.
3. Бортник В.Н., Чистяева С.П. Аральское море. Л.: Гидрометеиздат.- 1990.- 195 с.
4. Голицын Г.С. Подъем уровня Каспийского моря как задача диагноза и прогноза региональных изменений климата.- *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*.- 1995, т. 31, № 3.- С. 385-391.
5. Григорьев А.А., Жогова М.А. Мощные пылевые выносы в Приаралье в 1985-1990 гг. - *Докл. РАН*.-1992, т. 324, № 3.- С. 672-675.

6. Корнаков В.И., Боровец С.А., Бостанджогло А.А. и др. Водный баланс и прогноз снижения уровня Аральского моря. Ташкент: СЛОГИДРОПРОЕКТ.-1968.- 103 с.
7. Крапивин В.Ф. Радиоволновый экологический мониторинг. В кн.: *Экологическая диагностика*, под ред. В.В. Клюева, М.: Знание.- 2000ю.- С. 295-311.
8. Кукса В.И. Южные моря в условиях антропогенного стресса. С. П.: Гидрометеоиздат.- 1994.- 369 с.
9. Krapivin V.F. and Phillips G.W. A remote sensing based expert system to study the Aral-Caspian aquageosystem water regime .- *Remote Sensing and Environment*.- 2001, vol.75.- Pp. 201-215.