

ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ОХРАНА ВОД СУШИ, МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

УДК 502.51

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГИДРОФИЗИКИ И УСЛОВИЙ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЗОНЕ АРАЛЬСКОЙ АКВАГЕОСИСТЕМЫ

Канд. физ.-мат. наук **В.Ю. Солдагов**¹,
канд. техн. наук **И.И. Потапов**²,
д-р физ.-мат. наук **В.Ф. Крапивин**¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

² Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва

ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL HYDROPHYSICS METHODS AND CONDITIONS OF THEIR USE IN THE ARAL AQUAGEOSYSTEM ZONE

V.Yu. Soldatov, I.I. Potapov, V.F. Kravivin

Аральское море, водный баланс, мониторинг, радиометрия, модель.

Aral Sea, water balance, monitoring, radiometry, model.

Обсуждена гидрологическая проблема в зоне влияния Аральского моря. Охарактеризованы алгоритмические и инструментальные средства контроля водными потоками в этой зоне. Отмечена роль дистанционного мониторинга с использованием микроволнового диапазона. Указаны особенности геофизических процессов формирования водного баланса Аральской котловины. Сформулирована модель этого баланса. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (Грант № 16-01-00213).

It is discussed hydrophysical problem of Aral Sea influence zone. Algorithmic and instrumental tools are characterized to be used for the control of the water flows in this zone. Remote sensing monitoring role is shown with the use of microwave range. Specific characteristics of geophysical processes are shown for the water balance formation in the Aral basin. A model of this balance is proposed.

Введение

Проблема катастрофического обмеления Аральского моря в результате антропогенного вмешательства в гидрологию региона обсуждается многими авторами, создано множество моделей и алгоритмов для решения этой проблемы, но решений по этому вопросу не принято [1-53]. Попытки увязать эту проблему с изменением глобального климата не привели к конкретным выводам и рекомендациям. С распадом СССР возможности заинтересованных сторон в решении проблемы значительно снизились, и решением проблемы занимается природа. Безусловно, гидрологии Средней Азии и Каспийского моря тесно связаны. Поэтому в данной работе рассматривается задача создания методики стабилизации и оптимизации гидрологических потоков в котловине Арала за счет использования естественных потоков влаги.

Реально эффективными рекомендации стабилизации водного баланса Аральского моря могут быть только на основе применения технологии геоэкологических информационно-моделирующих систем (ГИМС), которая развивает технологию Big Data [53]. Более того, мониторинг зоны влияния на Аральское море может сопровождаться ситуациями неопределенности и даже неустранимой неопределенности. Поэтому необходимо разработать алгоритмы преодоления этих ситуаций. ГИМС-технология предлагает подходы к решению этой проблемы.

Экспериментальные исследования и формирование базы данных об элементах окружающей среды зоны Аральского моря

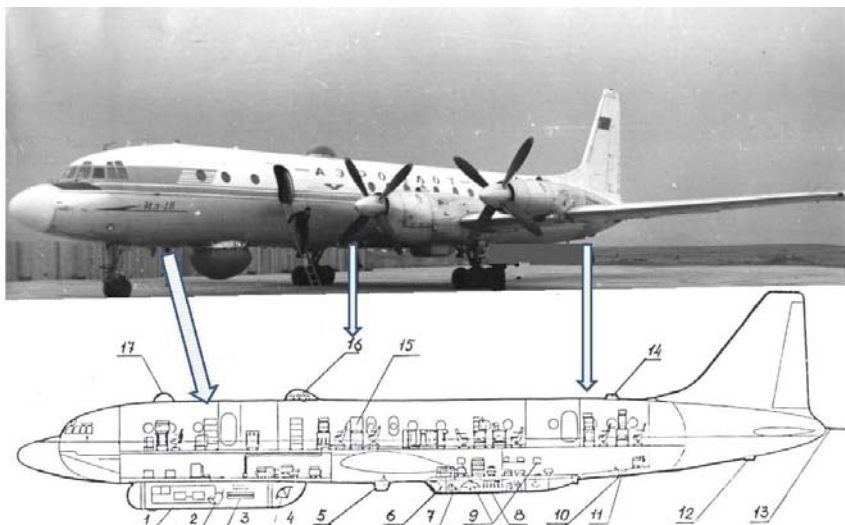


Рис. 1. Схема расположения антенных систем и фотолоуков на самолете-лаборатории ИЛ-18.

Антенны: 1,3 – радиолокаторов с синтезированной апертурой диапазона 2м и 10 см.; 2,6 – трассовых поляриметров диапазона 0.8 и 2.25 см.; 4 – шестиканального сканирующего поляриметра диапазонов 0.8; 1.35 и 2.25 см; 8 – трассовых радиометров диапазонов 0.8; 1.35; 2.25; 10; 20 и 27 см; 7,9 – прецизионного высотомера и интерферометра бокового обзора на волне 2.2 см; 13 – станции подповерхностного зондирования дециметрового диапазона. Фотолоуки: 5,10,12 – широкоформатного и кадрового телевидения, аэрофотоаппарата; 11, 14 – аппаратуры миллиметрового диапазона; 16 – трассовых радиометров диапазона 0.8; 1.35 и 2.25 см; 15 – гравиметрическая и инерциальная аппаратура; 17 – астролюк.

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 [10-12, 50-52]. В качестве платформы-носителя использовался специально оборудованный и адаптированный ИЛ-18 (рис. 1). 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 многократно использовались при решении задач идентификации на основе ряда алгоритмов анализа больших данных [53].

При качественных радиолокационных исследованиях отражательных свойств протяженных природных образований дешифровочным признаком может служить удельная эффективная поверхность рассеивания (ЭПР). Этот параметр определяет общий фон радиолокационного изображения (РЛ-изображения) местности и позволяет сравнительно легко обнаруживать на снимке участки с аномальными отражательными свойствами. Однако, затруднено использование понятия ЭПР при попытках количественного сопоставления РЛ-изображений различных участков местности или РЛ-снимков одной и той же территории, полученных в различные моменты времени. Для количественной интерпретации РЛ-снимков использовались текстурные особенности и спектр-структуру изображений, обусловленных особенностями локальных параметров соответствующей подстилающей поверхности. Оба этих компонента имеют свои статистические характеристики, при этом статистика первого порядка спектр-структуры и текстурной составляющей описываются многомерной плотностью вероятности, моментами второго порядка и автокорреляционной функцией, которые отражают взаимосвязь между интенсивностью сигналов в соседних элементах кадра. Пространственный радиус корреляции текстуры РЛ-снимка в предельном случае сравним с разрешающей способностью измерителя и существенно образом зависит от крупномасштабных вариаций рельефа, биомассы растительности и параметров других элементов ландшафта. Следовательно, статистика первого порядка текстуры может изменяться даже в пределах одного снимка и одного класса объектов.

СВЧ-радиометрические измерения показали наличие типовых спектров радиояркостной температуры. Спектры радиояркостности с положительными значениями первых разностей типичны для некоторых типов льдов, водоемов с неглубоко расположенными зарослями водорослей, для молодых (горячих) лавовых потоков и полей, бетонных покрытий и некоторых типов сухих почвогрунтов. Монотонно убывающие спектры характерны для увлажненных почвогрунтов, акваторий, подтопленного леса, покрытых растительностью водоемов, рисовых чеков и др. Спектры со знако-переменными значениями первых приращений присущи многослойным интерферирующим структурам, гетерогенным образованиям типа торфяников и кромкам лесных пожаров.

Поляризационные и дисперсионные характеристики радиотеплового поля оказываются значимыми величинами при аэрокосмических исследованиях акваторий, бетонных и грунтовых взлетно-посадочных полос, а также других природных и антропогенных образований с гладкой поверхностью. Такие образования использовались в качестве калибровочных СВЧ-реперов.

Синхронные дистанционные и наземные измерения интенсивности излучения радиотеплового поля солончаков на волнах 1.35, 2.25 и 20 см показали, что солончак имеет обширные и устойчивые (от сезона к сезону) области с небольшими вариациями радиояркостной температуры. По контуру солончака наблюдается

резкое уменьшение радиояркостной температуры на длинах волн 0.8 и 2.25 см, а ее минимальное значение достигается в дециметровом диапазоне в центральной части солончака. В качестве эталона использовалось плато Устюрт, сравнение с поляризационными эффектами которого позволяет осуществлять надежную классификацию земных покровов.

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.

Пример записей радиояркостных контрастов с борта самолета-лаборатории ИЛ-18 приведены на рис. 2 и 3.

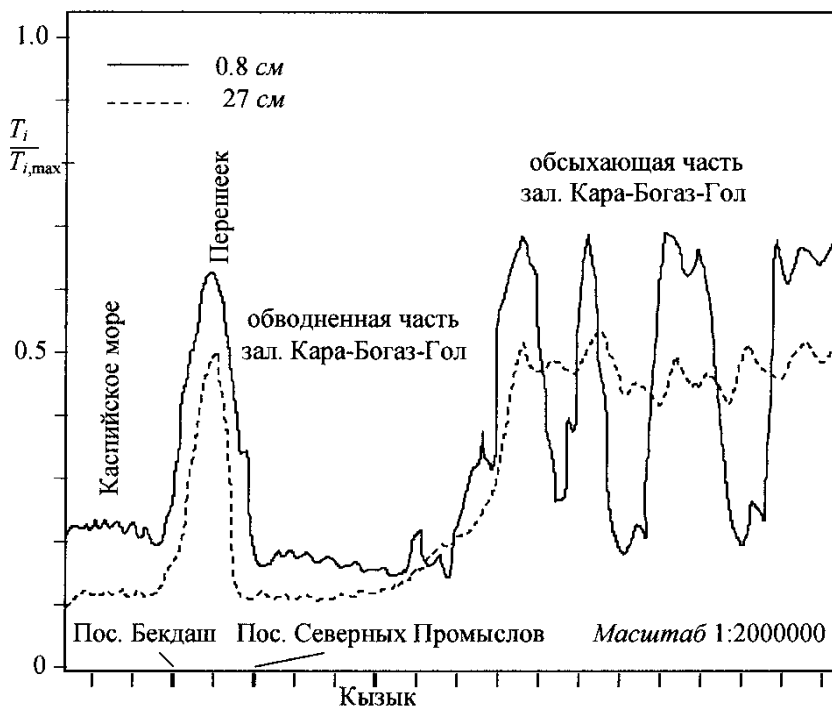


Рис. 2. Нормированные регистрограммы записей на борту самолета-лаборатории ИЛ-18 радиояркостных контрастов в районе залива Кара-Богаз-Гол по трассе от пос. Бекдаш к пос. Северных Промыслов.

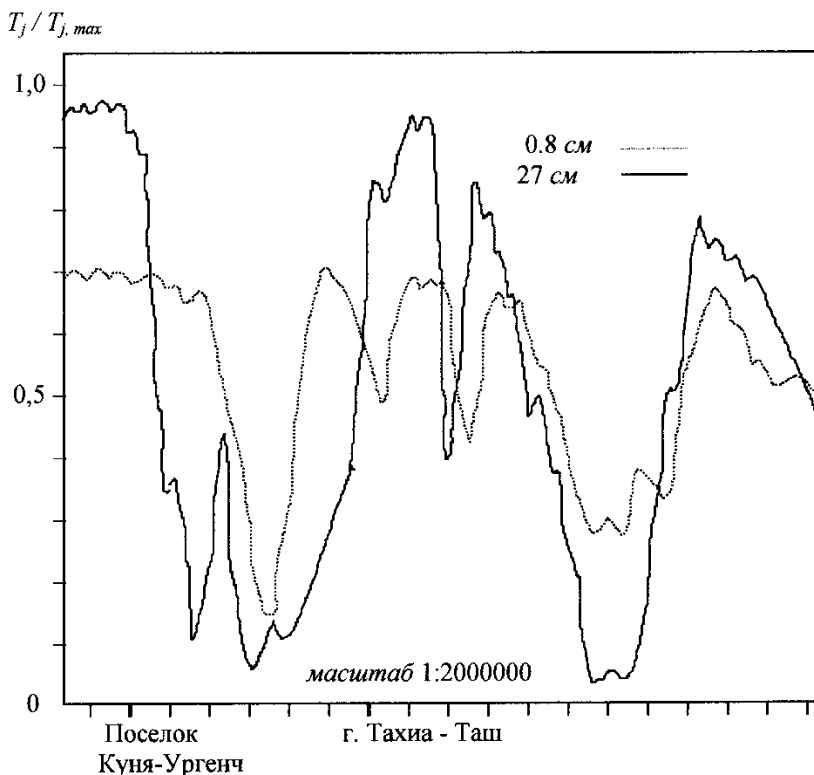


Рис. 3. Фрагмент базы данных: нормированные радиояростные контрасты в зоне русла р. Аму-Дарьи южнее г. Нукус по курсу, проходящему через поселок Куня-Ургенч и г. Тахиа-Таш.

Характеристика динамики параметров аквагеосистемы Арала и геофизических процессов формирования водного баланса

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 ± 3 м. и сезонными ± 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. Амударьи, 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°C. Средне январская температура составляет -14°C, иногда опускаясь до -33°C. Средняя температура в июле равна +26°C, достигая в отдельные годы уровня +45°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°C до 6°C, а в период с 1971 по 1980 гг. зимняя температура оказалась ниже нормы на 5.5°C. За последующие годы наметилась тенденция к переходу годового режима температуры на континентальный характер. В табл. 1 приводятся некоторые показатели отклонений средних температур от многолетних норм. Эти величины позволяют при формулировке синоптических сценариев задавать интервалы климатической неопределенности.

Таблица 1

Отклонения от нормы средних температур (°C) воздуха по сезонам в Приаралье [8,27].

Зона	Весна	Лето	Осень	Зима
Аральское море	1.4	0.4	-0.1	0.5
Монсыр	0.6	0.2	1.1	1.3
Казалинск	0.9	0.6	1.5	-0.1
Карак	0.8	0.2	0.8	0.3
Чабанказган	1.1	0.6	0.7	-1.5
Муйнак	0.9	0.5	-0.3	-0.6
Чирик-Рабат	0.9	0.5	1.0	0.4
Кунград	1.4	1.4	1.1	-0.1
Косбулак	1.3	0.8	0.0	0.0

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 115 см.). Температурный режим самого моря характеризуется колебаниями температуры воды от 20-25°C летом до -0.7°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. На рис. 4 схематически отражены розы ветров над акваторией Арала. Согласно оценкам Бортника и Чистяевой [13] средняя годовая скорость ветра колеблется в зависимости от территории между значениями 3-7 м/с. Район Аральского моря характеризуется большой дисперсией скоростей ветра, которые могут стабильно достигать 30 м/с. Например, на западном побережье в среднем за год такие скорости наблюдаются в течение более 50 суток, что очень важно для рассматриваемого в данной работе сценария восстановления уровня Арала.

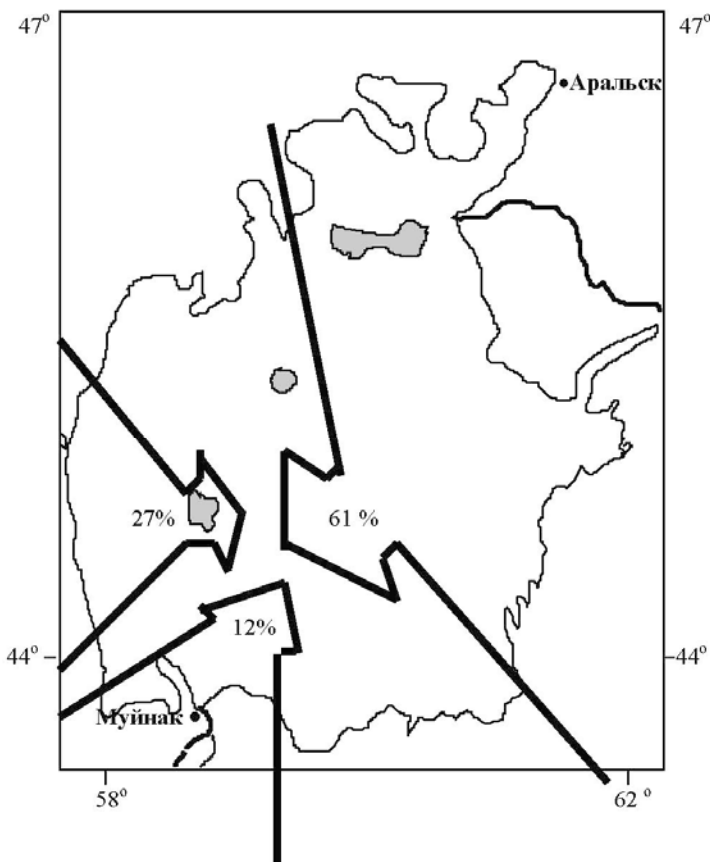


Рис. 4. Характерные направления ветров в зоне Аральского моря и их повторяемость [8].

Составляющие водного баланса Арала обсуждаются многими авторами [1-52]. Еще в 1968 году, когда только наметились отрицательные тенденции в водном балансе Арала, в работе Корнакова и др. (1968) 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. Сырдарьи эта величина равна $15.2 \text{ км}^3/\text{год}$.

По мнению Кука [27] толчком к катастрофическому развитию процесса антропогенного опустынивания в Приаралье послужило совмещение избыточных водозаборов с засушливым периодом и маловодьем рек 1974-1977 гг. Произошел резкий спад речного стока с увеличившимся испарением как с акватории моря,

так и с прилегающих территорий. Уже к концу 1980 г. суммарная площадь обсохших водоемов только в дельте Амударьи достигла 310 км². Начался процесс трансформации земных покровов с преобладанием переходов гидроморфных, болотных и луговых почв в солончаковые и такыровидные. Площадь озер на дельтовых равнинах Аральского региона изменялась от 400 тыс. га в 1960 г. до 120 тыс. га в 1970 г. и пришла к почти полному исчезновению к концу 20-го столетия. Общая картина изменения элементов водного баланса Аральского моря представлена в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Средние многолетние значения водного баланса Аральского моря для отдельных периодов. В числителе указаны объемы элементов водного баланса (км³), в знаменателе см слоя воды [8,27].

Период	Приход		Расход (испарение)	Водный баланс	Изменение уровня, см	Невязка баланса
	Речной сток	Осадки				
1911/1960	56,0/84,7	9,1/13,8	66,1/100,0	-1,0/-1,5	0,1	-1,6
1961/1970	43,3/68,5	8,0/12,7	65,4/103,5	-14,1/-22,3	-21,0	-1,3
1971/1980	16,7/29,3	6,3/11,0	55,2/96,8	-32,2/-56,5	-57,6	1,1
1981/1985	2,0/4,1	7,1/14,7	45,9/96,2	-36,8/-77,4	-80,0	2,6
1986/1988	10,8/28,0	6,2/15,4	47,0/116,3	-30,0/-72,9	-65,6	-7,3

Таблица 3

Динамика притока воды в Аральское море, км³/год [8,27].

Год	Амударья	Сырдарья	Всего	Год	Амударья	Сырдарья	Всего
1959	40,0	18,3	58,3	1974	6,2	1,9	8,1
1960	37,8	21,0	58,8	1975	10,0	0,6	10,6
1961	29,2	-	29,2	1976	10,3	0,5	10,8
1962	29,1	5,7	34,8	1977	7,2	0,4	7,6
1963	29,9	10,6	40,5	1978	18,9	-	18,9
1964	36,5	14,9	51,4	1979	10,9	2,9	13,8
1965	25,2	4,6	29,8	1980	8,3	-	8,3
1966	33,1	9,5	42,6	1981	5,9	-	5,9
1967	28,6	8,6	37,2	1982	0,04	-	0,04
1968	28,9	7,2	36,1	1983	2,3	-	2,3
1969	55,1	17,5	72,6	1984	7,9	-	7,9
1970	28,7	9,8	38,5	1985	2,4	-	2,4
1971	15,3	8,1	23,4	1986	0,4	-	0,4
1972	15,5	6,9	22,4	1987	10,0	-	10,0
1973	33,4	8,9	42,3	1988	16,0	7,0	23,0

Адаптация технологии крупномасштабного геофизического эксперимента к условиям Аральской зоны

Область географических информационных систем (ГИС) является наиболее развитой частью природного мониторинга. ГИС лежит на стыке компьютерной картографии с базами данных и дистанционным зондированием. Элементами ГИС являются компьютерная сеть, база данных, сеть передачи данных и система

отображения реальной ситуации на дисплее компьютера. Многочисленные примеры ГИС позволяют утверждать, что ГИС-технология обеспечивает удобное для массового пользователя средство контроля за состоянием объекта мониторинга и служит эффективным механизмом объединения многофакторной информации об объекте. Однако ГИС-технология имеет серьезные ограничения, когда речь идет о сложных задачах природного мониторинга, требующих создания динамичного образа среды в условиях отрывочных данных по пространству и во времени. Основной недостаток ГИС - технологии состоит в том, что она не ориентирована на многоплановый прогноз состояния объекта мониторинга. А именно такой класс задач поставлен в данной работе.

Важный шаг в развитии ГИС - технологии сделан в работе Крапивина [26], где теоретически обоснована и практически применена ГИМС - технология. Эта технология устраняет многие недостатки ГИС - технологии и дает возможность синтеза систем мониторинга с функциями прогноза. Ключевым звеном ГИМС - технологии 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.

Состояние природных объектов характеризуется большим разнообразием параметров. Среди них такие как характеризующие тип почвы и растительности, водный режим территории, солевой состав почво-грунтов, уровень залегания грунтовых вод 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, где содержится априорная информация, накопленная в прошлые годы. Проблема, возникающая перед ответственным за принятие соответствующего решения, заключается в получении ответов на следующие вопросы:

- какие приборы целесообразно использовать для проведения наземных и дистанционных измерений;
- как сбалансировать количество наземных измерений и объем дистанционных данных с учетом их информационного содержания и стоимости;
- какие математические модели пространственно-временных изменений параметров природных объектов 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.

Любая подсистема окружающей среды рассматривается 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 геоэкоисотемы данной территории, системы компьютерного картографирования и средств искусственного интеллекта синтезируется единая ГИМС территории, обеспечивающая прогнозные оценки последствий реализации техногенных проектов и другие оценки функционирования геоэкоисотемы. 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 $A_1 = \|a_{ij,1}\|$ определяет конфигурацию территории, которая учитывается в модели водного баланса. Не нарушая общности, примем постоянную географическую сетку размерами $\Delta\varphi$ по широте φ и $\Delta\lambda$ по долготе λ . Тогда идентификатор A_1 , заложенный в базу данных ГИМС, обеспечивает гибкий учет участков территорий в зоне Аральского моря, которые будут приниматься во внимание:

$$a_{ij,1} = \begin{cases} 1 & \text{если участок территории включается в водный баланс;} \\ 0 & \text{если участок территории не учитывается в водном балансе.} \end{cases}$$

Идентификатор $A_2 = \|a_{ij,2}\|$ задает пространственное распределение элементов земных покровов, осуществляя их символьную привязку к составляющим водного баланса территории. В табл. 4 перечислены характерные элементы покровов в зоне, учитываемой идентификатором A_1 .

Таблица 4

Определение элементов идентификатора A_2 .

Тип земной поверхности	Идентификатор
Открытая водная поверхность озера	<i>a</i>
Орошаемая территория	<i>b</i>
Участок реки	<i>c</i>
Заболоченный участок	<i>d</i>
Высохшее русло реки	<i>e</i>
Древесно-кустарниковая растительность	<i>f</i>
Такыр	<i>g</i>
Солончак	<i>h</i>
Степь	<i>t</i>
Участок моря	<i>p</i>
Песок	<i>n</i>
Тростниковые заросли	<i>m</i>
Пастбищная растительность	<i>o</i>

Особенности моделирования составляющих водного баланса Аральского региона

Водный баланс непосредственно Аральского моря рассчитывался многими исследователями [12, 16, 22, 23, 31, 36]. 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.

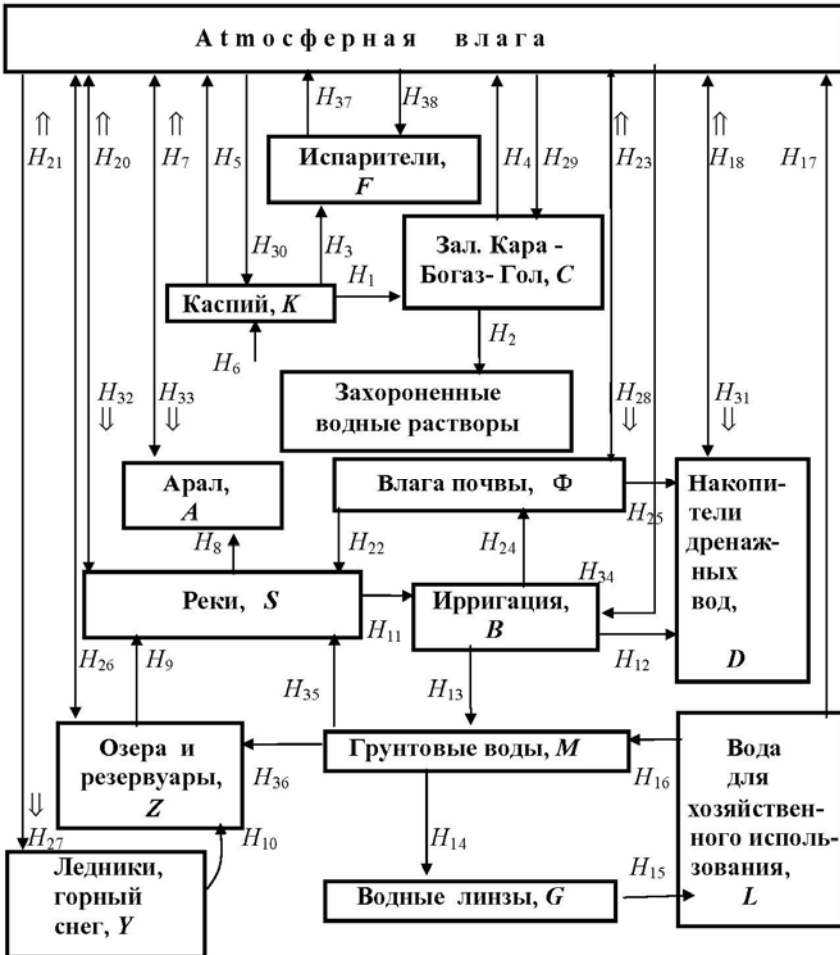


Рис. 5. Блок-схема модели водного баланса ограниченной территории.

Основой модели водного баланса Аральского региона может быть типовая модель регионального баланса влаги на ограниченной территории, представленного схемой рис. 5. Каждая территория зоны Арала может иметь часть речной сети, водоемов и участков суши. Согласно ландшафтно-гидрологическому принципу для построения имитационной модели в зоне функционирования гидрологической системы необходимо выделение фаций, что связано с типизацией флористического фона, конкретный вид которого обуславливается микрорельефом, типом и свойствами почвы, поверхностным увлажнением, глубиной залегания грунтовых вод и другими факторами. Так что в общем случае территория Ω_L характеризуется наличием m фаций, а вводная сеть имеет n однородных участков. С учетом этого согласно схеме рис 5 формируется замкнутая система балансовых уравнений водного баланса.

В представленном виде привязка модели к другим регионам осуществляется через переменные $E, R, Y_i, \Gamma_i, I, Z$. Кроме того при анализе конкретной ситуации могут быть дополнительно учтены конфигурация водовода и уровень водоема. Необходимые уравнения записываются исходя из условия баланса объема воды. Функциональные представления для всех потоков схемы рис. 5 могут быть записаны на основе законов гидродинамики и с учетом имеющейся экспериментальной информации. Приток и отток влаги можно определить по данным дистанционного мониторинга. В промежутках между измерениями используется информация о скорости ветра и атмосферной влаге на наветренной границе региона. Сведения об осадках и стоке входят в информационные каталоги гидрометеослужб. На основе этих данных могут быть построены соответствующие блоки модели. Модель формирования стока должна учитывать топографию водосбора и пространственное распределение его почвенных характеристик и особенностей растительных покровов. Определение параметров этих зависимостей можно осуществить на основе экспериментальных измерений, устанавливающих для данного типа почвы и растительности связь между интенсивностью осадков, скоростью впитывания воды в почву и водопрочностью ее структуры. Так для такыров, например, сток равен осадкам. Это довольно грубое приближение может быть значительно уточнено, так как радиометрические методы позволяют классифицировать почвенную влагу, по крайней мере на три типа: прочносвязанную, рыхлосвязанную и свободную воду. Связанная вода представляет собой пленочную влагу, адсорбированную поверхностью частиц грунта толщиной пленки в 6-8 молекулярных слоев. Содержание связанной воды в песчаных почвах 2-3%, глинистых и лессовых почвах - 30-40%. Связанная вода недоступна усвоению растениями, не растворяет соли. В рассматриваемых здесь моделях эти особенности учтены при определении соответствующих коэффициентов испарения и транспирации.

Таким образом, система балансовых уравнений с функциональными описаниями потоков воды в исследуемом регионе при заданных на момент t_0 начальных значениях позволяет рассчитать для $t \geq t_0$ характеристики водного режима всего региона. Начальные значения обеспечиваются разовой съемкой этих данных системой мониторинга. Регулярность таких съемок зависит от требуемой точности прогноза и может решаться по методике планирования режима мониторинга. На основе синтеза модели и системы дистанционного зондирования может быть организован мониторинг практически любой орошаемой агроэкосистемы. При этом неизбежно возникают задачи идентификации полученных измерений на борту летательного аппарата со значениями геофизических, экологических и гидрологических параметров.

В заключение заметим, что описанный здесь детерминистический подход к моделированию влагооборота в зоне Арала нельзя рассматривать как единственно возможным. Такой подход дает лишь средние тенденции в изменении компонентов влагооборота. Получение же их распределений и осуществление вероятностного прогноза может быть обеспечено только на основе динамико-стохастических моделей водного баланса.

Литература

1. Абдудалиев Ф.Б., Ходжибаев Н.Н., Умаров У.У., Измайлов И.И. Методы математического моделирования гидрогеологических процессов. М., Недра, 1972, 64 с.
2. Аладин Н.В., Хлебович В.В. Гидробиологические проблемы Аральского моря. Л.: Изд-во АН СССР, 1989, 150 с.
3. Антонов В.В., Мироненко В.А. Вопросы анализа фильтрационной неоднородности водных пластов. Водные ресурсы, 1977, №1. с. 95-105.
4. Арманд Н.А., Бортник В.Н., Мкртчян Ф.А., Либерман Б.М., Назарян Н.А., Шаров А.М. Методология прогнозирования временной изменчивости характеристик аквагеосистемы зал. Кара-Богаз-Гол по данным радиофизического мониторинга// Проблемы освоения пустынь, 1987, № 3, с. 46-50.
5. Асарин А.Е. Осадки на поверхности Аральского моря. Проблемы освоения пустынь, 1975, №1, с. 58-61.
6. Блинов Л.К. Гидрохимия Аральского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1956, 252 с.
7. Богданов Н.М., Костюченко В.П. Засоленность подпогрунтов осушившегося дна Аральского моря. Изв. АН СССР, серг. Географическая, 1978, №2, с.35-45.
8. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. -М.: Научный мир.- 2009. -691 с.
9. Бородин Л.Ф., Бортник В.Н., Крапивин В.Ф., Кузнецов Н.Т., Куликов Ю.Н., Минаева Е.Н. К оценке изменений, разработке моделей функционирования и дистанционного мониторинга аква- и геосистем в бассейне Аральского моря.// Проблемы освоения пустынь, 1987, № 1.с. 71-79.
10. Бородин Л.Ф., Крапивин В.Ф., Буй Т.Л. Применение ГИМС-технологии к организации мониторинга аквагеосистемы Арал-Каспий// Пробл. окружающей среды и природных ресурсов, 1996, № 10, с. 46-61.
11. Бортник В.Н. Солевой баланс вод Аральского моря при падении его уровня. Труды ГОИН, 1979, вып.143, с.18-25.
12. Бортник В.Н., Лопатина С.А., Крапивин В.Ф. Имитационная система для изучения гидрофизических полей Аральского моря // Метеорология и гидрология, 1994, № 9, с. 102-106.
13. Бортник В.Н., Чистяева С.П. Аральское море. Л.: Гидрометеиздат, 1990, 195 с.
14. Виноградова А.В., Мамедов Э.Д. Изменения климата и ландшафтов междуречья Амударья и Сырдарья. Аральский кризис: Историко-географическая ретроспектива. М.: НИКЦ, "Арал", 1991, с. 66-75.
15. Владимирова Т.И. Формирование стока Амударья и Сырдарья и влияние хозяйственной деятельности на его суммарные потери. В кн.: Вопросы гидрологии суши. Л: Гидрометеиздат, 1982. с.10-18.
16. Голицын Г.С. (1995). Подъем уровня Каспийского моря как задача диагноза и прогноза региональных изменений климата.// Физика атмосферы и океана, 1995, Т. 31. № 3. С. 385-391.

17. Городецкая М.Е., Кесь А.С. Прогноз изменения рельефа Приаралья в связи с перспективами его освоения. Проблемы освоения пустынь, 1986, №3, с. 35-43.
18. Григорьев А.А. Крупномасштабные изменения природы Приаралья по наблюдениям из космоса // Проблемы освоения пустынь, 1987, №1, с. 16-22.
19. Друмева Л.Б., Цыцарин А.Г. Современный солевой состав Азовского и Аральского морей. Метеорология и гидрология. 1984. №3, с. 112-115.
20. Духовный В.А., Розаков Р.М., Рузиев И.Б., Косназаров К.К. Проблемы Аральского моря и природоохранные мероприятия. Проблемы освоения пустынь, №6, 1984, с.3-15.
21. Житомирская О.М. Климатическое описание района Аральского моря. Л. Гидрометеоздат. 1964. 67 с.
22. Зайков Б.Д. Современный и будущий водный баланс Аральского моря. Тр. НИУ ГУГМС. 1946, сер 4 вып. 39. С. 25-59.
23. Зайков Б.Д. Водный баланс и уровень Аральского моря в связи со строительством Главного Туркменского канала. Тр. ГГИ, 1952, вып. 16. 44 с.
24. Залетаев В.С., Кукса В.И., Новыкова Н.М. Некоторые экологические аспекты Аральской проблемы. Водные ресурсы. 1991, №5. с. 143-154.
25. Косарев А.Н. Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во МГУ, 1975, 271 с.
26. Крапивин В.Ф. Радиоволновый экологический мониторинг. В кн.: Экологическая диагностика, под ред. В.В. Клюева, М.: Знание, 2000, с. 295-311.
27. Кукса В.И. Южные моря в условиях антропогенного стресса. С. П.: Гидрометеоздат, 1994, 369 с.
28. Курочкина Л.Я. Кузнецов Н.Т. Экологические аспекты антропогенного опустынивания Приаралья. Пробл. освоения пустынь. 1986, №5, с.68-74.
29. Львов, В.П. О соотношениях солевых составов вод Аральского моря и подземных вод Приаралья. (К вопросу о подземной составляющей водного и солевого баланса Аральского моря). Тр. ГИОН, 1970, вып. 101. с. 87-100.
30. Маев. Е.Г. Маева С.А., Карпычев Ю.А. Аральское море в голоцене. Аральский кризис: Историко-географическая ретроспектива. М. НИКЦ "Арал", 1991, с. 76-86.
31. Маева С.А. Изменения уровня Аральского моря за последние тысячелетия. Изд. Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1991 №1. с.124-132.
32. Матмуратов Дж. Изменения климата и загрязнение окружающей среды в Каракалпакии. В кн.: Аральский кризис (историко-географическая ретроспектива). М. 1991. 309 с. С.87-100.
33. Океанологические таблицы Каспийского, Аральского и Азовского морей. М. Гидрометеоздат, 1964, 140 с.
34. Пичников А.В. Физико-географические последствия антропогенного опустынивания в Приаралье. В сб.: Аральский кризис. М.: 1991, с.28-47.
35. Рубинова Ф.Э. Влияние водных мелиораций на сток и гидрохимический режим рек бассейна Аральского моря. Тр. САНИИ 1987. вып. 124(205), 160 с.
36. Самойленко В.С. Состояние вопроса о водном балансе и колебаниях уровня Аральского моря. Тр. ГОИН. 1955, вып.20. с. 127-166
37. Семенов О.Е., Тулина Л.П., Чичасов Г.Н. Об оценке антропогенных воздействий на экологические условия Приаралья. Вестник АН КазССР. 1988, №12. с. 27-35.

38. Семенов О.Е., Тулина Л.П., Чичасов Г.Н. Об изменении климата и экологических условий Приаралья. В кн.: Мониторинг природной среды в бассейне Аральского моря (проблем разработки). С.Петербург, Гидрометеиздат. 1991. 216 с. С.150-176.
39. Смирнова К.И. Сверхдолгосрочный прогноз уровня Аральского моря. Тр. Гидрометцентра СССР, 1976, вып.164, с.38-44.
40. Ходжибаев Н.Н., Миралиев Д.У. О количестве подземных вод, участвующих в питании Аральского моря. В кн.: Математическое моделирование для решения гидрогеологических задач, Ташкент, 1971, с.59-83.
41. Цинзенлинг В.В. Орошение на Амударье. М.: Упр. Водного хозяйства Средней Азии, 1927. 808 с.
42. Цыцарин А.Г. Современное состояние элементов гидрологического режима Аральского моря. Тр. ГОИН.1991. Вып. 183. с.72-92.
43. Цыцарин А.Г., Бортник В.Н. Современные проблемы Аральского моря и перспективы их решения// В сб.:Мониторинг природной среды в бассейне Аральского моря, С.-П.: Гидрометеиздат, 1991, с. 216-220.
44. Черненко И.М. Моделирование фильтрации артезианских вод в котловину Аральского моря // Изв. ВУЗов, Геология и Разведка, 1981, № 10, с. 82-88.
45. Черненко И.М. О подземном водопритоке, солевом балансе и проблеме Арала. Проблемы освоения пустынь, 1972, №2, с.32-42.
46. Шеховцов А.А., Бортник В.Н. современное геоэкологическое состояние низовьев Сыдарье и Амударьи и Аральского моря. Метеорология и гидрология. 1991. №10,с. 112-116.
47. Шнитников А.В. Прошлое и будущее Арала с позиции больших ритмов климата. В кн.: Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. Л. Гидрометеиздат, 1959.Т. 7, с.47-57.
48. Шнитников А.В. Динамика водных ресурсов бассейна Арала в свете его климатических трансгрессий. – Тр. Лаборатория озероведения, 1961, т. 14, с. 10-88.
49. Шульц В.Л. Шалатова Л.И. Водный баланс Аральского моря. Научные труды ТАШГУ сер.географ.науки, 1964, кв.32, вып. 269. с. 33-58.
50. 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, V.75, pp. 201-215.
51. Krapivin V.F., ShutkoA.M., Chukhlantsev A.A., Golovachev S.P. Simulation System for Investigation of the Aral-Caspian Water Regime, The Journal of Terrestrial Observation, 2008, V. 1, N. 1, pp. 60-69.
52. Rochon G.L., Krapivin V.F., Mkrtychyan F.A. Symulation system to study the Aral-Caspian water regime. Proceedings of the IX International Symposium «Engineering Ecology - 2017». Moscow, 5–7 December, 2017. The Moscow Sciences Engineering A.S. Popov Society for Radio, Electronics and Communication, Moscow, 2017, pp. 99-104.
53. Varotsos CA and Krapivin V.F. A new big data approach based on geoeological information-modeling system. Big Earth Data, 2017, V. 1, No. 1-2, pp. 47-63.