

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВОДНОГО БАЛАНСА БИОСФЕРЫ К ОЦЕНКЕ ВОДНОГО РЕЖИМА СИСТЕМЫ АРАЛ-КАСПИЙ

Д-р. физ.-мат. наук, проф. В.Ф. Крапивин¹, д-р. физ.-мат. наук, проф. Ф.А. Мкртчян, канд. техн. наук. И.И. Потанов², канд. физ.-мат. наук В.Ю. Солдатов¹

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московская обл.

² Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва

На основе анализа многочисленных данных о параметрах аквагеосистемы Аральского моря и связанных с ней территорий создается база данных, включающая характеристики стационарных и динамических процессов, оказывающих влияние на элементы водного баланса Аральской котловины. Выявлены наиболее информативные параметры для синтеза математических моделей гидрофизических и гидрологических процессов, а также в создании информационного интерфейса между этими моделями и базой данных. Указаны численные алгоритмы, которые бы позволяли по отрывочным измерениям восстанавливать двумерные распределения параметров водного баланса и других, необходимых для моделирования, характеристик окружающей системы Арал-Каспий. Описана блок-схема водного баланса и приведены уравнения математических моделей, которые позволяют в рамках принимаемой пространственной дискретизации Аральского региона параметризовать процессы испарения, осадков, поверхностного стока, инфильтрации и атмосферного переноса влаги. Предложен сценарий изменения водных ресурсов этого региона. Эта работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (Грант РФФИ № 19-07-00443-а).

Ключевые слова: водный баланс, испарители, модель, алгоритм, база данных, сценарий, экономические потери, прогноз

ECONOMICAL AND GEOPHYSICAL ASPECTS OF THE APPLICATION OF GLOBAL MODEL OF THE BIOSPHERE WATER BALANCE TO THE ASSESSMENT OF THE ARAL-CASPIAN SYSTEM WATER REGIME

V.F. Kravivin, F.A. Mkrtchyan, I.I. Potanov, V.Yu. Soldatov

Database is created using numerous data about the Aral Sea aquageosystem and adjacent zone parameters including the characteristics of stationary and dynamical processes that influence on the elements of

water balance in the Aral Sea basin. The most informative parameters are shown to be used for the synthesis of mathematical models for hydrophysical and hydrological processes as well as under the creation of information interface between these models and database. Numerical algorithms are shown for spatial reconstruction of distribution of water balance and other environmental characteristics of the Aral-Caspian system basing on the fragmentary measurements. A block-scheme of water balance is described and equations for mathematical models are given that gives possibility to parameterize processes of evaporation, precipitation, surface runoff, infiltration and atmospheric moisture transport under considered spatial discretization. Scenario for change of the water resources of this region is proposed. This study was realized under the support by the Russian Fund for Basic Researches (Grant RFBR № 19-07-00443-a).

Keywords: water balance, evaporators, model, algorithm, database, scenario, economical losses, prognosn

Введение

Крупно-масштабные гидрофизические исследования требуют развития методов комплексной обработки данных о природных объектах и процессах, обладающих различным физическим, химическим и биологическим характером, а также имеющих неоднородное пространственное распределение. Экспериментальные данные в таком исследовании носят отрывочный по пространству и фрагментарный во времени характер. Это в полной мере относится к рассматриваемой здесь гидрофизической системе зоны влияния Аральского моря [1,3,6,32].

Вариации распределения атмосферных осадков на обширных территориях от степей Ставрополья и Калмыкии до горных массивов Памира и Тянь-Шаня во многом предопределяются крупномасштабными пространственно-временными изменениями потоков атмосферной влаги с акваторий Каспийского и Аральского морей, залива Кара-Богаз-Гол (КБГ), крупных водохранилищ и накопителей коллекторно-дренажных стоков, солончаков и других типовых испарителей поверхностных и грунтовых вод на территории Центральной Азии [28,35,38].

Проблема водного баланса в Центральной Азии является предметом многочисленных публикаций, ибо с ней связаны нежелательные явления типа пылевых и соляных бурь, наводнений и засух, снежных лавин в горах, оползней и селей, других гидрологических бедствий и техногенных катастроф. Также важной является задача обеспечения влагой 129 млн. га пустынных пастбищ Центральной Азии, из которых используются лишь 48%.

Наконец, существует и плохо изучена корреляционная связь между водным балансом Центральной Азии и глобальными изменениями окружающей природной среды. Прежде всего, повышение уровня Каспия и обмеление Арала, деградация многих других уникальных водоемов типа озера Балхаш и залива Кара-Богаз-Гол, рассматриваемые как взаимосвязанные события, являются планетарным бедствием, так как влекут за собой катастрофические последствия для безопасности населения и окружающей среды обширных сопредельных территорий [4,5,16].

Для прикаспийских и среднеазиатских регионов площадные и гидрологические параметры акваторий Каспийского и Аральского морей, других открытых водоемов и водоводов являются важными источниками пополнения объемов атмосферной влаги, перемещение которой в господствующем

направлении ветра запад-восток способствует наращиванию объемов ледников и снежников Памира и Тянь-Шаня, что, с одной стороны, повышает и стабилизирует сток основных рек региона, создает благоприятные условия для обеспечения экологической безопасности населения, предотвращения пылевых и соляных бурь, решения насущных проблем Арала, приаральских и других областей Центральной Азии, но, с другой стороны, приводит к сходу снежных лавин, возникновению оползней и селей.

С позиций экологической комфортности населения и перспектив многопланового развития прикаспийского и среднеазиатского регионов наиболее благоприятными были 1950-60 гг. Уровень Каспия колебался с -28 до -28,5 м, его акватория занимала от 370 до 375 км². По имеющимся оценкам в 1994 г. площадь зеркала Каспия достигла 420 км² с тенденцией к увеличению, а объем испарившейся воды превысил уровень 1960 г. почти на 50 км³/год. Более половины этого количества приходится на северную мелководную часть моря. Ожидается, что при возросшем уровне Каспия (3 м с 1978 г.) могут возникнуть нагонные процессы, волны от которых будут проникать на десятки километров от береговой линии, снижая глубину залегания минерализованных грунтовых вод, разрушая защитные сооружения, смывая в море вредные отходы и ядовитую (типа серы) продукцию предприятий по добыче и переработке углеводородного сырья. По состоянию на 2018 г. уровень Каспия оценивается величиной 27,16 м. ниже уровня океана, максимальная глубина составляет 1025 м., а площадь равна 371 тыс. км².

Предварительные оценочные расчеты показали возможность на базе сложившейся в прикаспийском и среднеазиатском регионах гидрометеорологической ситуации уже в ближайшее время:

- стабилизировать уровень Каспия за счет регулирования испарения каспийской воды объемом порядка 60 км³/год со специально обводненных солончаков и впадин восточного побережья моря;

- стимулировать избыточные (относительно 1960 г.) осадки суммарным объемом около 110 км³/год в рационально выбранных пунктах регионов путем принудительной конденсации (rainmaking технология) паровоздушных и жидко-капельных компонентов атмосферного воздуха и облачности. Искусственные осадки можно реализовать в районах западной и южной частей Аральского моря (53 м), озера Судочье (50 м), русла Узоя, Саракамышской котловины (-38 м), Казахлышора (- 28 м), Карашор (- 25 м) и др., над определенными участками восточного склона водораздела Чаграйское плато северный чинк Устюрта - Западный чинк Устюрта - Куландаг - Каямдаг - хребет Копет Капланкыр.

Экспертный уровень выдвинутой идеи здесь обосновывается на основе применения ГИМС-технологии [23,24], что выдвигает следующие задачи:

- создание теоретико-информационной модели формирования потоков атмосферной влаги в прикаспийском и среднеазиатском регионах, оценка потенциального количества атмосферных осадков в локальных точках при различных климатических сценариях;

- выбор участков солончаков и впадин прибрежной полосы Каспийского моря, пригодных для обводнения по технологии, учитывающей гидрологическое и хозяйственное значение этих элементов ландшафта;

- обработка и представление исходных материалов в виде динамичных электронных пространственно-временных тематических карт, архива и базы данных экспериментов (натурных и компьютерных).

Формирование базы данных об элементах окружающей среды зоны Аральского моря

В период с 1972 г. по 1990 г. на территории Центральной Азии осуществлялись регулярные сеансы дистанционного мониторинга с применением микроволновой, оптической и ИК - технологий зондирования [2,23]. 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 специальных алгоритмов [21]. Измерения осуществлялись с помощью самолета-лаборатории ИЛ-18 (рис. 1).

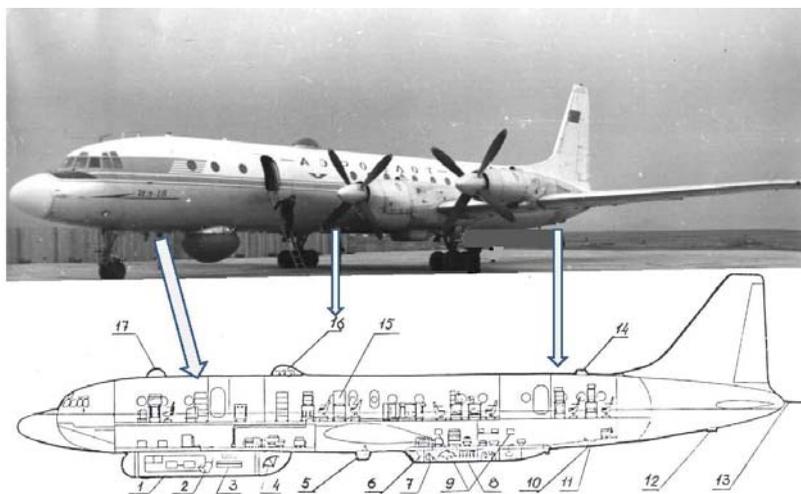


Рис. 1. Схема расположения антенных систем и фотолюков на самолете-лаборатории ИЛ-18 (Бородин и др., 1982, 1987).

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 декаметрового диапазона. Фотолюки: 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.

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 (РА-изображения) местности и позволяет сравнительно легко обнаруживать на снимке участки с аномальными отражательными свойствами. Однако, затруднено использование понятия ЭПР при попытках количественного сопоставления РА-изображений различных участков местности или РА-снимков одной и той же территории, полученных в различные моменты времени. Для количественной интерпретации РА-снимков использовались текстурные особенности и спектр-структуры 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 РА-снимка в предельном случае сравним с разрешающей способностью измерителя и существенным 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 кромок лесных пожаров [23].

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 Центральной Азии. При этом в качестве элементов территории выделены замкнутые системы водоемов, накопители дренажных вод, ком-

плексы искусственных и естественных озер, увлажненные солончаки и takyры. 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. Дополнительные уточняющие данные были заимствованы из многочисленных публикаций [12, 18].

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-рябовые пески с широкими сухими руслами древних притоков Сыр Дарьи и Аму Дарьи. 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 $+26^{\circ}\text{C}$, 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°C до 6°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. В табл. 1 приводятся некоторые показатели отклонений средних температур от многолетних норм. Эти величины 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 115 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, при-

носящие 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 [20,26,29,39]. На рис. 2 схематически отражены розы ветров над акваторией Арала. Согласно оценкам Бортника и Чистяевой [3] 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.

Таблица 1

Отклонения от нормы средних температур (°С) воздуха по сезонам в Приаралье

Зона	Весна	Лето	Осень	Зима
Аральское море	1,39	0,43	-0,09	0,48
Монсыр	0,61	0,19	1,12	1,29
Казалинск	0,92	0,65	1,47	-0,12
Карак	0,78	0,23	0,83	0,28
Чабанказган	1,12	0,62	0,68	-1,47
Муйнак	0,89	0,49	-0,27	-0,56
Чирик-Рабат	0,93	0,48	1,01	0,44
Кунград	1,42	1,39	1,02	-0,13
Косбулак	1,35	0,81	0,03	0,03

Составляющие водного баланса Арала обсуждаются многими авторами. Еще в 1968 году, когда только намелились отрицательные тенденции в водном балансе Арала, в [12, 31] был дан исчерпывающий анализ его основных элементов. В то время потери стока в дельте р. Аму Дарьи составляли 9,1 км³/год, а с учетом водозабора на орошение ниже г. Нукус эти потери достигали 10,7 км³/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 км³/год. Для р. Сырдарья эта величина равна 15,2 км³/год

По мнению многих экспертов [15,33,34,44,45] 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 Аму Дарьи 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.

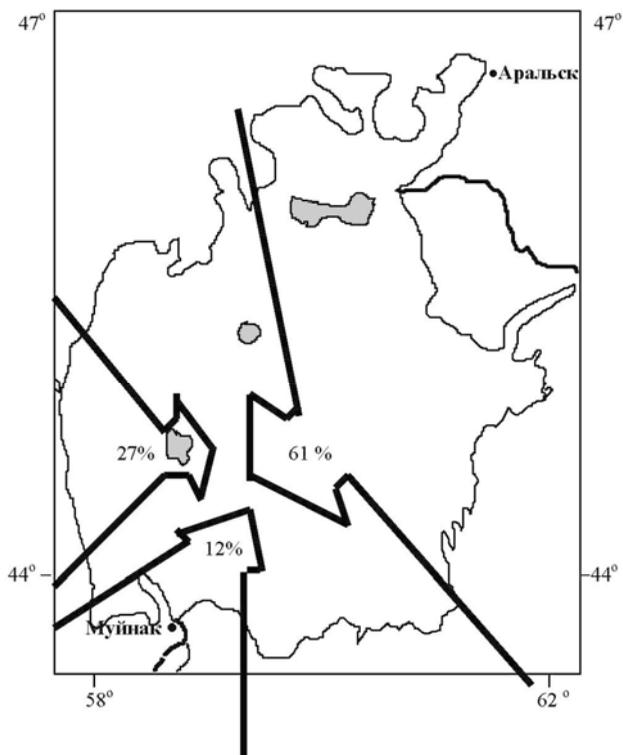


Рис. 2. Характерные направления ветров в зоне Аральского моря и их повторяемость [3].

Адаптация технологии крупномасштабного геофизического эксперимента к условиям Аральской зоны

Рассмотрим систему Арал-Каспий как подсистему окружающей среды, взаимодействующей через биосферные, климатические и социально-экономические связи с глобальной системой природа/общество и используем глобальную модель водного баланса биосферы [19, 43,44]. Для этого создается модель, описывающая это взаимодействие и функционирование различных уровней пространственно-временной иерархии всей совокупности процессов в окружающей среде, влияющих по предварительным оценкам на состояние системы. 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 геосистемы данной территории, системы компьютерного картографирования и средств искусственного интеллекта синтезируется единая геэкологическая информационно-моделирующая система (ГИМС) территории, обеспечивающая прогнозные оценки последствий реализации техногенных проектов и другие оценки функционирования геосистемы. 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 символической форме описывающих географическую конфигурацию зоны, распределение почвенно-растительных формаций, дислокации 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:

$$a_{ij,1} = \begin{cases} 1 & \text{если участок территории учитывается в модели регионального} \\ & \text{водного баланса,} \\ 0 & \text{если участок территории не учитывается в модели регионального} \\ & \text{водного баланса} \end{cases}$$

Идентификатор $A_2 = ||a_{ij,2}||$ задает пространственное распределение элементов земных покровов, осуществляя их символическую привязку к составляющим водного баланса территории. В рассматриваемой реализации выделяются следующие элементы земной поверхности: участок моря, открытая водная поверхность водоема, орошаемая территория, участок реки, заболоченный участок, высохшее русло реки, древесно-кустарниковая растительность, такыр, солончак, степь, песок, тростниковые заросли, пастбищная растительность.

Особенности моделирования составляющих водного баланса Аральского региона

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 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.

Основой модели водного баланса Аральского региона может быть типовая модель регионального баланса влаги на ограниченной территории,

представленного схемой рис. 3. 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. 3 замкнутая система балансовых уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial W_A(t, \phi, \lambda)}{\partial t} + V_\phi \frac{\partial W_A(t, \phi, \lambda)}{\partial \phi} + V_\lambda \frac{\partial W_A(t, \phi, \lambda)}{\partial \lambda} = r_c(E_1 - P_1) + \sum_{i=2}^7 (E_i - P_i) \quad (1)$$

$$\frac{\partial W_{AS}(t)}{\partial t} = F_3 + F_4 + F_5 + P_6 - E_6 \quad (2)$$

где r_c – корректирующий коэффициент (≈ 0.065), отражающий роль Каспия в водном балансе Арала, $V=(V_\phi, V_\lambda)$ – компоненты скорости ветра (км/сутки).

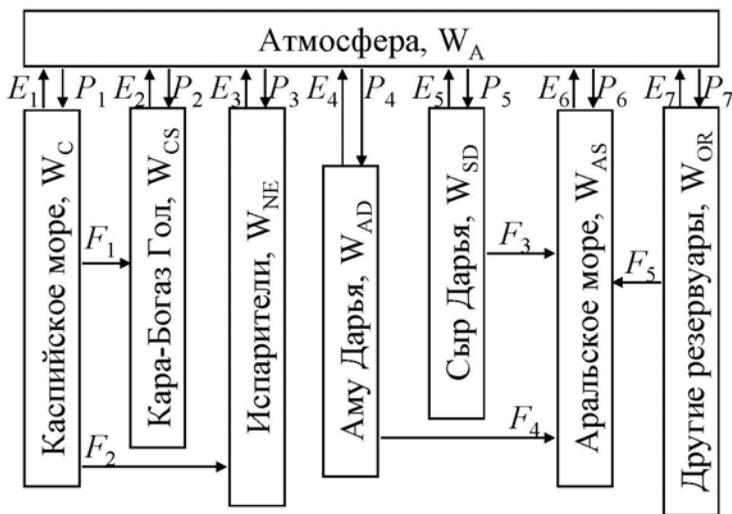


Рис. 3. Блок-схема типовой модели водного баланса Аральского бассейна [20].

Согласно схеме рис. 3 аналогично (1) и (2) составляются балансовые уравнения для других компонентов водного баланса. Решение этих уравнений осуществляется по географической сетке $\Delta\phi \times \Delta\lambda$ при $(\phi, \lambda) \in [40^\circ, 47^\circ] \cup [52^\circ, 63^\circ]$; Функциональные представления потоков на рис. 3 описаны во многих работах [7,9,11,14,42]. В зоне Аральского моря наблюдается оп-

ределенное отклонение от традиционных закономерностей соотношения испарения с осадками. Действительно, возрастание испарения с Каспийского моря и КБГ не приводит к повышению осадков над котловиной Арала. В частности, при существующих климатических условиях достаточно точной является следующая аппроксимация:

$$P_6 = 0,000972E_2^2 - 0,464E_2 + 56,981.$$

В табл. 2 приведены некоторые оценки потоков воды, которые позволяют частично проанализировать соотношения между основными потоками воды в регионе Арала. В целом, элементы водного баланса региона достаточно детально изучены. Некоторые данные приведены в табл. 3-5. К сожалению, каждая из независимых республик Центральной Азии имеет определенные самостоятельные оценки роли антропогенных факторов на имеющиеся в этом регионе негативные процессы. Несмотря на созданную в 1992 г. Межгосударственную координационную водохозяйственную комиссию Центральной Азии, изъятие водного стока Аму Дарьи и Сыр Дарьи возрастает. Это связано с ростом численности населения и увеличением поливных площадей. В период 1917-2018 гг. площадь орошаемой пашни возросла почти в 4 раза с 3 до 11 млн га. При этом численность населения возросла в 5 раз и превысила 70 млн. человек. Ожидается, что к 2040 г. обеспеченность населения водой снизится на 25% и составит примерно 1,5 тыс. м³ в год на человека вместо 2,1 тыс. м³/год/чел. Также следует учитывать наличие таких потребителей водных ресурсов Центральной Азии, как Иран и Афганистан. Следует ожидать, что, например, Афганистан может увеличить потребление водных ресурсов из Аму Дарьи до 3-4 тыс.м³/год/чел. Наконец, следует отметить сохранившуюся и остающуюся неизменной тенденцию к сокращению речного стока в Арал [6,32].

Таблица 2

Основные элементы водного баланса Аральского моря.
Обозначения: $\sigma_{CS}=371000 \text{ km}^2$, $\sigma_{KBG}=18000 \text{ km}^2$, $\sigma_{OR}=50000 \text{ km}^2$.

Месяц	Испарение, мм/месяц			Осадки, мм/месяц		
	E_1/σ_{CS}	E_2/σ_{KBG}	E_7/σ_{OR}	P_1/σ_{CS}	P_2/σ_{KBG}	P_7/σ_{OR}
I	59	81	56	122	15	12
II	58	88	61	97	13	10
III	61	99	72	60	8	6
IV	64	112	88	66	9	7
V	67	139	103	71	10	9
VI	89	204	126	102	13	10
VII	106	206	134	116	15	12
VIII	103	211	127	129	17	13
IX	68	141	105	158	21	16
X	60	129	93	269	35	17
XI	58	103	71	175	23	15
XII	52	91	57	124	16	13

Таблица 3

Роль стран Центральной Азии в водном балансе Аральского моря

Бассейн	Площадь		Страна, использующая водный ресурс	Площадь страны в бассейне, км ²	% от всей площади бассейна	% всей площади страны
	км ²	% от площади Центральной Азии				
Сыр Дарья	531 650	11	Казахстан	345 000	64,9	12,7
			Кыргызстан	110 570	20,8	55,3
			Таджикистан	15 680	2,9	11,0
			Узбекистан	60 400	11,4	13,5
Аму Дарья	1 023 610	22	Афганистан	166 000	16,2	25,4
			Кыргызстан	7 800	0,8	3,9
			Таджикистан	125 450	12,3	88,0
			Туркменистан	35 973	35,1	73,7
Теджен-Мургаб	181 010	4	Афганистан	80 000	44,0	12,3
			Туркменистан	102 010	56,0	20,9
Бассейн Аральского моря	1 737 270	37	Афганистан	246 000	14,2	37,7
			Казахстан	345 000	19,9	12,7
			Кыргызстан	1 183 70	6,8	59,2
			Таджикистан	141 130	8,1	99,0
			Узбекистан	425 030	24,5	95,0
			Туркменистан	461 740	26,6	94,6

Таблица 4

Элементы водного баланса Аральского моря [25].

Страна	Речной бассейн		Бассейн Аральского моря	
	Сток Сыр Дарьи, км ³ /год	Сток Аму Дарьи, км ³ /год	Речной сток, км ³ /год	%
Казахстан	2,426	-	2,426	2,1
Кыргызстан	26,850	1,604	28,454	24,4
Таджикистан	1,005	55,73	56,735	48,6
Туркменистан	-	1,53	1,530	1,3
Узбекистан	6,167	5,056	11,223	9,6
Афганистан	-	14,500	14,500	12,4
Иран	-	0,86	0,860	0,9
Китай	0,755	-	-	0,7
Итого	37,203	79,280	116,483	100

Таблица 5

Хронология обмеления Аральского моря [32,35]

Год	Средний уровень, м	Площадь, км ²	Объем, км ³	Соленость, г/л
1960	53,4	66 900	1 090	10
1971	51,1	60 200	925	11
1976	48,3	55 700	763	14
1989	39,7	39 734	364	29
1993	37,1	33 642	300	34
2000	36,5	24 155	183	51

Модельный прогноз уровня Аральского моря

Представленная выше модель водного баланса Аральского моря позволяет оценить возможности его восстановления за счет перераспределения водных ресурсов Центральной Азии. Основная проблема современного времени состоит в том, что даже при наличии такого сценария для перераспределения необходимо согласие пяти независимых республик [30]. Распад СССР снял вопрос о переброске вод сибирских рек в Центральную Азию [31, 33,40]. Теперь проблема спасения Арала приобрела международный характер [17,45]. Действительно, условия жизни населения стран Центральной Азии с изменением глобального климата будут только ухудшаться по причине расширения пустынных территорий и уменьшения водных ресурсов в расчете на одного жителя. Отсутствие дополнительных внешних источников воды эта тенденция будет расширяться на прилегающие регионы.

Согласно последним решениям ООН начинает программу 'Building the resilience of communities affected by the Aral Sea disaster through the Multi-partner Human Security Fund for the Aral Sea' (http://www.undp.org/content/uzbekistan/en/home/operations/poverty_reduction/un-joint-programme-building--the--resilience-of-communities-affe.html).

Цель этой программы состоит в расширении работ, проводимых в уже существующей программе «Sustaining Livelihoods Affected by the Aral Sea Disaster» и разработка совместной стратегии управления водными ресурсами Центральной Азии. Очевидно, что предлагаемый здесь сценарий может служить одним из элементов такой стратегии.

На рис. 4 представлены результаты моделирования, из которых следует, что принципиально задача возрождения Арала может быть решена примерно за 100 лет без существенных ограничений для экономического развития независимых республик Центральной Азии.

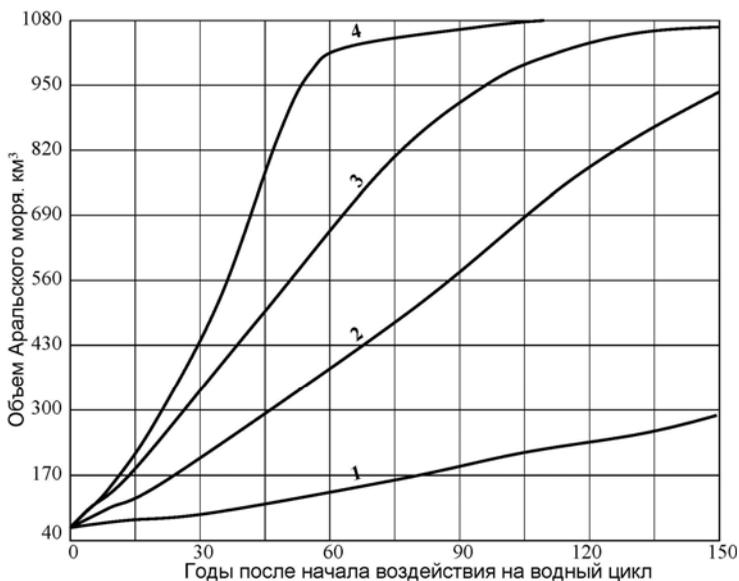


Рис. 4. Результаты прогнозирования изменения объема Аральского моря при различных воздействиях на гидрологический цикл Средней Азии с использованием испарителей Каспийской воды и rainmaking технологии.

Обозначения: 1 – в качестве испарителя используется КБГ, 2 – наряду с КБГ используются другие испарители, 3 – дополнительно к 2 уменьшается забор речного стока на 5%, 4 – наряду с 2 уменьшается забор речного стока на 10% и в зоне Арала применяется rainmaking технология.

Заключение

Проблема спасения Арала широко обсуждается многими авторами, каждый из которых пытается найти ключ к разрешению данной проблемы. Водный баланс Центральной Азии в значительной степени зависит от антропогенных составляющих. Известно, что в ирригационных системах теряется около 50% речной воды, забираемой для полива. Поэтому здесь имеется возможность сократить забор воды из Аму Дарьи и Сыр Дарьи за счет

применения новых технологий полива, например, капельного. Предусмотренное в предлагаемом здесь сценарии сокращение забора воды на 10% вполне реализуемо. Техническая реализация перемещения Каспийской воды в природные испарители также не требует больших финансовых затрат. Конечно, возникает проблема динамики уровня Каспия. Для полного изучения последствий реализации предложенного сценария необходимо проведение имитационных экспериментов с учетом трансграничных эффектов, отражающих речные стоки в Каспий и атмосферные переносы влаги с пограничных регионов, особенно с гористых территорий [8,10,16,22,2736,37,41].

В рамках программы ООН возможно рассмотрение проблемы водного баланса Центральной Азии с применением глобальной модели климат-природа-общество [23,43,44]. В этом случае водный цикл на территории Центральной Азии будет рассматриваться как элемент глобального круговорота воды, что позволит значительно увеличить точность оценок, подобных приведенным на рис. 4.

Литература

1. *Аладдин Н.В., Хлебович В.В.* Гидробиологические проблемы Аральского моря. Труды зоологического института РАН, том 199, Ленинград, 1989, 148 с.

2. *Бородин А.Ф., Крапивин В.Ф., Крылова М.С., Кузнецов Н.Т., Куликов Ю.Н., Минаева Е.Н.* Многоцелевые самолеты-лаборатории в мониторинге зон влияния ирригационных систем. География и природные ресурсы. 1982. №3. С. 31-37.

3. *Бортник В.Н., Чистяева С.П.* Аральское море. Гидрометеоздат, Ленинград, 1990, 195 с.

4. *Antipova E., Zyryanov A., McKinney D., Satinsky A.* 2002. Optimization of Syr Darya water and energy uses. Water International, 2002, V. 27, No.4, pp. 504-516.

5. *Atmujazova O.A.* Health and ecological consequences of the Aral Sea crisis. Proceedings of the 3rd World Water Forum "Regional Cooperation in Shared Water Reservoirs in Central Asia". Kyoto, 16-23 March, 2003, pp. 1-6.

6. *Belyaev A.V.* Water Balance and Water Resources of the Aral Sea Basin and Its Man-Induced Changes. GeoJournal, 1995, V.35, No. 1, pp. 17-21.

7. *Bras R.L.* Hydrology. Addison-Wesley, New York, 1990, 643 pp.

8. *Chen X., Bai J., Luo G., Li J., and Li B.L.* Changes in land use/land cover and ecosystem services in Central Asia during 1990-2009. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, V.5, No.1, pp. 116-127.

9. *Chow V.T., Maidment D.R., and Mays L.W.* Applied hydrology. McGraw – Hill Book Company, New York, 1988, 566 pp.

10. *Chumchean S. and Buntbai W.* Testing efficacy of rainmaking activities in the northeast of Thailand. Proceedings of the 10th WMO Scientific Conference on Weather Modification, 4-6 October 2011, Bali, Indonesia. WMO, pp. 185-188.

11. *Davie T.* Fundamentals of hydrology. Routledge, New York, 2008, 200 pp.

12. *Dukhovny V. and Sokolov V.* Lessons on cooperating building to manage water conflicts in the Aral Sea Basin. Scientific-Information Center of the Interstate Commission for Water Coordination in Central Asia. UNESCO, 2003, 50 pp.

13. *Dukhovny V.A. and Stulina G.* Strategy of trans boundary return flow use in the Aral Sea Basin. Desalination, 2001, V. 139, pp. 299-304.

14. *Fernandes L.C., Paiva C.M., and Filho O.C.R.* Evaluation of six empirical evapotranspiration equations – case study: Campos dos Goytacazes/ Revista Brasileira de Meteorologia, 2012, V.27, No.3, pp. 272-280.
15. *Filimonova M. and Trubetskova M.* Calculation of evaporation from the Caspian Sea surface. Proceedings of the International Symposium on Stochastic Hydraulics, 23 and 24 May 2005, Nijmegen, The Netherlands, 2005, pp. 63-65.
16. *Gong H., Peng D., Wen J., Cai Z., Wang T., Hu Y., Yaxin Ma Y., and Xu J.* Research on trend of warm-humid climate in Central Asia. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2017, V.74, pp. 1-7.
17. *Issanova G., Abudumaili J., Galayeva O., Semenov O., and Bazarbayeva T.* Aeolian transportation of sand and dust in the Aral Sea region. Int. J. Environ. Sci. Technol., 2015, No.12, pp. 3213–3224.
18. *Klein I., Gessner U., and Kuenzer C.* Regional land cover mapping and change detection in Central Asia using MODIS time-series. Applied Geography, 2012, V.35, No.1-2, pp. 219-234.
19. *Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Phillips G.W.* Global environmental change. Springer, London, 2002, 316 pp.
20. *Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Varotsos C.A.* Natural Disasters as Interactive Components of Global Ecodynamics. - Springer/Praxis. Chichester, UK., 2006, 578 p.
21. *Krapivin V.F.* On approximate solution of initial value problems for integro-differential equations with quasilinear differential operator and generalized Volterra operator // Časopis pro pěstování matematiky (Praha), 1969. V. 94. P. 21-33.
22. *Krapivin V.F., Nitu C., Mkrtchyan F.A., Soldatov V.Yu., Dobrescu A.S.* 2018. Information-instrumental tools of microwave and optical environmental monitoring. The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, 2018, V. 18, No.1, pp. 11-18.
23. *Krapivin V.F. and Shutko A.M.* Information technologies for remote monitoring of the environment. Springer/Praxis, Chichester, U.K., 2012, 492 pp.
24. *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.
25. *Kuzmits B.* Cross-bordering water management Central Asia: Amu Darya project. Working Paper Series 66. University of Bonn, Bonn, Germany, 2006, 22 pp.
26. *Lambrecht A., Mayer C., Aizen V., Floricioiu D., and Surazakov A.* The evolution of Fedchenko glacier in the Pamir, Tajikistan, during the past eight decades. Journal of Glaciology, 2014, V.60, No.220, pp. 233-244.
27. *Leroy S.A.G., Marret F., Giralt S., Bulatov S.A.* Natural and anthropogenic rapid changes in the Kara-Bogaz Gol over the last two centuries reconstructed from palynological analyses and a comparison to instrumental records. Quaternary International, 2006, V. 150, pp. 52–70
28. *Lioubimtseva E.* Impact of climate change on the Aral Sea and its basin. In: P. Micklin, N.V. Aladin and I. Plotnikov (Eds). The Aral Sea. The devastation and partial rehabilitation of a great lake. Springer-Verlag, Berlin, 2014, pp. 405-427.
29. *Marchenko S.S., Gorbunov A.P., and Romanovskiy V.E.* Permafrost warming in the Tien Shan Mountains, Central Asia. Global and Planetary Change, 2007, V.56, pp. 311-327.
30. *Micklin P.P.* The fate 'Siberial': Soviet water politics in the Gorbachev era. Journal Central Asian Survey, 1987, V.6, No.2, pp. 67-88.

31. *Micklin P.P.* Desiccation of the Aral Sea: A Water Management Disaster in the Soviet Union.” *Science*, 1988, V. 241, No. 4870, pp. 1170-1176.
32. *Micklin P.P.* The Aral Sea disaster. *Annu. Rev. Earth Planet. Science*, 2007, V.35, pp. 47-72.
33. *Micklin P.P.* The Siberian water transfer scheme. Chapter 16 in *PP. Micklin et al. (Eds). In: The Aral Sea. Springer Earth System Sciences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2014, pp.381-404.
34. *Micklin P.P.* The future Aral Sea: hope and despair. *Environmental Earth Sciences*, 2016, V.75, No.9, pp. 1-15.
35. *Micklin P., Aladin N.V., and Plotnikov I. (Eds)* The Aral Sea: The devastation and partial rehabilitation of a Great Lake. *Springer/Praxis, Chichester UK*. 2014, 453 pp.
36. *Panin G., Solomonova I.V., and Vyruchalkina T.Yu.* Regime of water balance components of the Caspian Sea. *Water resources*, 2014, V.41, No.5, pp. 505-511.
37. *Pelley J.* Does cloud seeding really work? *Chemical and Engineering News*, 2016, V.92, No.22, pp. 18-21.
38. *Raghunath H.M.* Hydrology: principles, analysis, design. *New Age International Publishers, New Delhi*, 2006, 460 pp.
39. *Salas J.D., Govindaraju R.S., Anderson M., Arabi M., France’s F., Suarez W., Lavado-Casimiro W.S., and Timothy R. Green T.R.* Introduction to Hydrology. In: *Handbook of Environmental Engineering, Vol. 15: Modern Water Resources Engineering*. Edited by: L.K. Wang and C.T. Yang, *Springer Science+Business Media, New York*, 2014, pp. 1-126.
40. *Salay J.* The Soviet Union river diversion project. *Uppsala Papers in Economic History, Research Project No. 17, Department of Economic History, Uppsala University*, 1988, 32 pp.
41. *Sitterson J., Knightes C., Parmar R., Wolfe K., Muche M., Avant B.* An overview of rainfall-runoff model types. *EPA, Athens, Georgia, USA*, 2017, 30 pp.
42. *Small E.E. and Sloan L.C.* Simulating the water balance of the Aral Sea with a coupled regional climate-lake model. *Journal of Geophysical research*, 1999, V.104, No.D6, pp. 6583-6602.
43. *Varotsos C.A. 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.
44. *Varotsos C.A., Nitu C., Krapivin V.F.* Global ecoinformatics: Theory and applications. *Matrix Rom, Bucharest, Romania*, 2018, 351 pp.
45. *Wiggs, G.F.S., O’Hara, S. L., Wegerdt, J., Van Der Meer, J., Small, I., & Hubbard, R.* The Dynamics and Characteristics of Aeolian Dust in Dryland Central Asia: Possible Impacts on Human Exposure and Respiratory Health in the Aral Sea Basin. *The Geographical Journal*. 2003, V.169, No.2, pp. 142-157.