

Ж. С. Мустафаев¹, А. Т. Козыкеева², А. М. Камалиев³

¹Д.т.н., профессор, профессор кафедры «водные ресурсы и мелиорация»
(Казахский национальный аграрный университет, Алматы, Казахстан)

²Д.т.н., доцент, профессор кафедры «водные ресурсы и мелиорация»
(Казахский национальный аграрный университет, Алматы, Казахстан)

⁴Магистр, докторант PhD кафедры «водные ресурсы и мелиорация»
(Казахский национальный аграрный университет, Алматы, Казахстан)

ОЦЕНКА ВОДОПОТРЕБНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ ВОДОСБОРА БАСЕЙНА РЕКИ ШУ

Аннотация. На основе многолетних информационно-аналитических материалов Кыргызгидромета (Кыргызской Республики) и Казгидромета (Республики Казахстан), охватывающих 1930–2017 годы, выполнено прогнозирование дефицита водопотребности сельскохозяйственных культур O_p и экологической водопотребности угодий $O_{pi}^э$ с учетом изменения климата на водосборах бассейна реки Шу в пространственно-временном масштабе. Ожидается, что их количественные значения до 2050 года увеличатся с 8,0 до 27,0 % при переходе от горной территории к равнинной.

Ключевые слова: климат, водосбор, река, бассейн, изменение, оценка, температура воздуха, атмосферные осадки, коэффициент естественного увлажнения, гидротермический показатель, дефицит водопотребления, экологическая норма, сельскохозяйственная культура, угодья.

Введение. В Центральной Азии и Казахстане вследствие продолжающихся глобальных изменений климата ожидаются изменения естественной тепло- и влагообеспеченности почвенного и растительного покровов ландшафтов, которые приведут к росту дефицита водопотребности сельскохозяйственных угодий и сокращению водных ресурсов, влекущих за собой снижение средобразующих или экологических функций речных бассейнов.

Теоретическое обоснование нормы водопотребности сельскохозяйственных угодий может быть приведено на основе закона сохранения энергии, так как рассмотрение процесса влагообмена между деятельностью поверхности участка суши и воздухом немислимо без связи с теплообменом. Как любой физический процесс изменений и превращений, теплообмен в конкретной точке пространства за известный промежуток времени характеризуется балансом прихода и расхода энергии, являющихся функциональной деятельностью климатических показателей региона. Поэтому следствием глобального изменения климата является формирование цепочки взаимосвязанных процессов.

Цель исследований – на основе анализа и оценки уровня наблюдаемых и ожидаемых климатических изменений на водосборах бассейна реки Шу определить степень воздействия их на формирование водопотребности сельскохозяйственных угодий для эффективных действий по адаптации к климатическим изменениям водного и сельского хозяйств региона.

Объект исследований – река Шу, главная река Северного Кыргызстана. Образуется при слиянии рек Кочкор и Жуванарык. Общая площадь водосборов бассейна – 68 тыс. км², 57 % этой территории приходится на Кыргызстан и 43 % – на Казахстан. Среди главных притоков Шу – реки Чон-Кемин и Курагаты. На равнинной территории русло реки разделяется на несколько рукавов – Гуляевские (Фурмановские) и Уланбельские разливы, аккумулирующие зимний сток, и Камкалинские разливы, аккумулирующие весенний сток.

Материалы и методы исследования. Основными исходными данными являются ряды среднемесячной температуры и относительной влажности воздуха и атмосферных осадков с 1931 по 2017 год, базирующиеся на многолетних информационно-аналитических материалах Кыргызгидромета (Кыргызской Республики) и Казгидромета (Республики Казахстан) по метеорологическим станциям, расположенным на водосборах бассейна трансграничной реки Шу [1, 2].

В обоснование нормы водопотребности сельскохозяйственных угодий или культур положен принцип энергетической сбалансированности тепла и влаги с учетом природных режимов.

На основе многолетних экспериментальных и теоретических исследований связи суммарного испарения с такими метеорологическими показателями, как температура и влажность воздуха, скорость ветра, солнечная радиация (радиационный баланс), разработаны различные модификации методики определения суммарной водопотребности сельскохозяйственных культур и угодий.

Теоретической основой биоклиматического метода, широко используемого водохозяйственными организациями и проектными институтами Республики Казахстан, является определение соотношения между суммарным испарением и испаряемостью, которые определяются по формуле Н. Н. Иванова [3]:

$$E_o = 0,0018 \cdot (25 + t)^2 (100 - \alpha),$$

где E_o – месячная испаряемость, мм; t – средняя месячная температура воздуха, °С; α – средняя месячная относительная влажность воздуха, %. Считается доказанным, что расход воды сельскохозяйственным полем при оптимальном увлажнении почвы подчиняется физическому закону испарения, т.е. роль деятельной поверхности (почвенного и растительного покровов) в регулировании влагообмена сводится в этом случае к минимуму, а суммарное водопотребление (суммарное испарение, эвапотранспирация) определяется в основном термическим состоянием приземного слоя атмосферы. Таким образом, в методиках и расчетных моделях нормирования водопотребности на основе биоклиматического метода в качестве расчетной зависимости для определения испаряемости (E_o) используется модифицированная формула Н. Н. Иванова, которая имеет следующий вид [4]:

$$E_o = k_t \cdot d \cdot f(v) \cdot K_b \cdot K_o,$$

где $k_t = 0,0061(25 + t)^2 / e_a$ – энергетический фактор испарения, мм/мб; E_o – упругость насыщенного пара, соответствующая этой температуре (табличное число), мб; $d = e_a(1 - 0,01 \cdot a)$ – дефицит влажности воздуха, мб; $f(v) = 0,64(1 + 0,19 \cdot V_2)$ – функция, учитывающая влияние скорости ветра на испарение; V_2 – скорость ветра на высоте 2 м от поверхности земли, м/с; K_b – биологический коэффициент культуры; K_o – микроклиматический коэффициент.

В обоснование экологически приемлемых норм водопотребности сельскохозяйственных угодий использован комплексный гидротермический показатель («индекс сухости») \bar{R}_i , представляющий собой отношение радиационного баланса R_i к затратам тепла на испарение выпавших атмосферных осадков $L \cdot O_{ci}$ [5]:

$$\bar{R}_i = R_i / L \cdot O_{ci},$$

где L – удельная теплота парообразования, принятая постоянной и равной 2,5 кДж/см².

Этот показатель, характеризующий баланс энергии и в должной мере определяющий интенсивность протекания биохимических и геохимических процессов на суше, может быть положен в обоснование экологически приемлемых норм водопотребности сельскохозяйственных угодий. При условии орошения комплексный гидротермический показатель («индекс сухости») \bar{R}_{io} имеет следующий вид [6]: $\bar{R}_i = R_i / L \cdot (O_{ci} + O_{pi})$, где O_{pi} – оросительная норма сельскохозяйственных угодий, мм. Если решить это уравнение относительно оросительной нормы сельскохозяйственных угодий O_{pi} , тогда получим [7]: $O_{pi} = (R_i / L \cdot \bar{R}_{io}) - O_{ci}$, где \bar{R}_{io} – комплексный гидротермический показатель («индекс сухости») в условиях орошения. В качестве критерия за период вегетации сельскохозяйственных культур для среднемноголетних условий принято значение 0,90.

Результаты исследований. Для оценки изменения дефицита водопотребности сельскохозяйственных земель на водосборах бассейна реки Шу использован катенарный подход, который предполагает геоморфологическую схематизацию ландшафтных катен водосборов речных бассейнов, характеризующих зоны горного класса ландшафтов (элювиальная фация), предгорного подкласса ландшафтов (трансэлювиальная фация), предгорного равнинного подкласса ландшафтов (трансаккумулятивная фация) и равнинного класса ландшафтов (супераквальная и субаквальная фации) [8]. В среднем в водосборе бассейна реки Шу в период инструментальных наблюдений

(1981–2017 гг.) в сравнении с базовым (1941–1960 гг.) в горном классе ландшафтов (элювиальная фация, метеостанция «Тео-Ашуу») происходило снижение среднемесячных и годовых температур воздуха, которые приводили к похолоданию климата, увеличению атмосферных осадков, повышающих естественную влагообеспеченность природной системы. Начиная с предгорного класса ландшафтов (трансэлювиальная фация) до равнинного подкласса ландшафтов (субаквальная фация) наблюдается повышение среднемесячных и годовых температур воздуха и снижение атмосферных осадков, что привело к увеличению длительности биологического активного периода и аридизации климата. Это необходимо учитывать при комплексном обустройстве водосборов бассейна реки Шу [9, 10].

Таким образом, прогнозирование дефицита водопотребности сельскохозяйственных культур и экологической водопотребности угодий с учетом изменения климата на водосборах бассейна реки Шу в пространственно-временном масштабе проводилось по следующей формуле, учитывающей направленность изменения составляющих водного баланса орошаемых земель (\uparrow – увеличение, \downarrow – уменьшение составляющих водного баланса):

$$O_{pi} = \Delta E_{pi} = K_{\delta} \cdot K_o \cdot E_{\uparrow o} - \Delta W_i - O_{\downarrow cb} = E_{\uparrow v} - \Delta W_i - O_{\downarrow c},$$

$$O_{pi}^{\text{э}} = (R_{\uparrow i} / L \cdot \bar{R}_{io}) - O_{\downarrow c},$$

где ΔW_i – продуктивный запас влаги в расчетном слое почвы в начале вегетационного периода.

При этом базовая норма водопотребности сельскохозяйственных культур при оценке и прогнозировании нормы водопотребности сельскохозяйственных угодий на водосборах реки Шу по водохозяйственным бассейнам и природно-климатическим зонам до 2050 года принята на основе «Укрупненных норм водопотребности для орошения по природно-климатическим зонам СССР», разработанным Министерством мелиорации и водного хозяйства СССР [11], и по рекомендации Казахского научно-исследовательского института водного хозяйства «Нормирование орошения в водохозяйственных бассейнах Казахстана» [12], а экологическая норма водопотребности – по рекомендации Ж. С. Мустафаева и А. Д. Рябцева [11] (таблицы 1 и 2).

Таблица 1 – Ожидаемые среднееголетние дефициты водопотребности сельскохозяйственных культур (нетто) на водосборах бассейна реки Шу до 2050 года

Природно-климатические зоны	Коэффициент увлажнения K_y	Культуры	Среднееголетний дефицит водопотребности сельскохозяйственных культур O_p , мм			
			базовая	прогнозируемая		
				2030	2040	2050
1	2	3	4	5	6	7
Кыргызская экологическая система (Чуйская область)						
Элювиальная (горная)	<0,50	Многолетние травы	245	235	225	215
		Кукуруза на силос	145	139	133	127
		Картофель	180	172	166	158
		Овощи	245	235	225	215
		Яровые зерновые	105	101	97	92
		Сады и ягодники	190	182	174	167
Трансэлювиальная (предгорная)	0,50–0,30	Многолетние травы	550	568	575	595
		Кукуруза на силос	280	287	294	300
		Картофель	320	329	338	345
		Овощи	375	385	395	405
		Яровые зерновые	200	206	212	216
		Сады и ягодники	440	452	464	475
		Бахчевые	200	205	210	216

<i>Продолжение таблицы 1</i>						
1	2	3	4	5	6	7
		Кукуруза на зерно	345	354	363	372
		Озимая пшеница	140	144	148	151
Трансаккумулятивная (предгорная равнинная)	0,30–0,20	Многолетние травы	725	740	755	770
		Кукуруза на силос	415	423	431	440
		Картофель	485	495	505	515
		Овощи	585	597	609	620
		Яровые зерновые	315	322	328	335
		Сады и ягодники	645	658	671	685
		Бахчевые	340	347	354	360
		Кукуруза на зерно	505	515	525	535
		Озимая пшеница	255	260	265	270
		Сахарная свекла	625	638	649	660
				Соя	440	448
Казахстанская экологическая система (Жамбылская область)						
Элювиальная (горная)	<0,50	Многолетние травы	245	235	225	215
		Кукуруза на силос	145	139	133	127
		Картофель	180	172	166	158
		Овощи	245	235	225	215
		Яровые зерновые	105	101	97	92
		Сады и ягодники	190	182	174	167
Трансэлювиальная (предгорная)	0,50–0,30	Многолетние травы	550	568	575	595
		Кукуруза на силос	280	287	294	300
		Картофель	320	329	338	345
		Овощи	375	385	395	405
		Яровые зерновые	200	206	212	216
		Сады и ягодники	440	452	464	475
		Бахчевые	200	205	210	216
		Кукуруза на зерно	345	354	363	372
		Озимая пшеница	140	144	148	151
Трансаккумулятивная (предгорная равнинная)	0,30–0,20	Многолетние травы	725	740	755	770
		Кукуруза на силос	415	423	431	440
		Картофель	485	495	505	515
		Овощи	585	597	609	620
		Яровые зерновые	315	322	328	335
		Сады и ягодники	645	658	671	685
		Бахчевые	340	347	354	360
		Кукуруза на зерно	505	515	525	535
		Озимая пшеница	255	260	265	270
		Сахарная свекла	625	638	649	660
				Соя	440	448

Окончание таблицы 1						
1	2	3	4	5	6	7
Супераквальная (равнинная)	0,20–0,10	Многолетние травы	770	840	910	978
		Кукуруза на силос	450	457	464	571
		Картофель	565	616	667	718
		Овощи	670	730	790	851
		Яровые зерновые	355	387	419	450
		Сады и ягодники	730	797	864	930
		Бахчевые	400	437	474	510
		Кукуруза на зерно	550	600	650	700
		Озимая пшеница	295	321	348	375
		Подсолнечник	485	528	571	615
		Сахарная свекла	735	805	880	935
Соя	470	512	554	595		
Супераквальная (равнинная)	>0,10	Многолетние травы	660	706	752	800
		Кукуруза на силос	400	428	456	485
		Картофель	500	535	570	605
		Овощи	620	663	706	750
		Яровые зерновые	330	353	376	400
		Сады и ягодники	630	675	720	765

Таблица 2 – Ожидаемые среднеголетние дефициты экологической нормы водопотребности сельскохозяйственных угодий (нетто) на водосборах бассейна реки Шу до 2050 года

Природно-климатические зоны	Коэффициент увлажнения K_y	Среднеголетний дефицит экологической нормы водопотребности сельскохозяйственных угодий O_{pi}^9 , мм			
		базовая	прогнозируемая		
			2030	2040	2050
Кыргызская экологическая система (Чуйская область)					
Элювиальная (горная)	<0,50	165	158	152	145
Трансэлювиальная (предгорная)	0,50–0,30	345	355	365	375
Трансаккумулятивная (предгорная равнинная)	0,30–0,20	445	455	465	475
Казахстанская экологическая система (Жамбылская область)					
Элювиальная (горная)	<0,50	165	158	152	145
Трансэлювиальная (предгорная)	0,50–0,30	345	355	365	375
Трансаккумулятивная (предгорная равнинная)	0,30–0,20	445	455	465	475
Супераквальная (равнинная)	0,20–0,10	560	610	660	710
Супераквальная (равнинная)	>0,10	660	706	752	800

Выводы. Многофакторные прогнозные расчеты дефицита нормы водопотребности сельскохозяйственных культур и экологической нормы водопотребности сельскохозяйственных угодий в пространственно-временном масштабе, то есть с учетом изменения температур воздуха и атмосферных осадков, характеризующих энергетические ресурсы природной системы на водосборах бассейна реки Шу, показали, что до 2050 года их количественные значения в зоне горного класса ландшафтов (элювиальная фация) уменьшатся до 14,0 %, предгорного подкласса ландшафтов (трансэлювиальная фация) увеличатся до 8,0 %, предгорного равнинного подкласса ландшафтов

(трансаккумулятивная фация) – до 6,0 %, равнинного класса ландшафтов (супераквальная фация) – до 27 % и субаквальная фация – до 21 %, что приведет к формированию «водного стресса» и большим водохозяйственным проблемам, требующих принятия решений на межгосударственном уровне, направленных на урегулирование отношений в сфере водопользования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 13: Многолетние данные. Ч. 1-6, вып. 18: КазССР. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – Кн. 2. – 656 с.
- [2] Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 13: Многолетние данные. Ч. 1-6, вып. 32: Киргизская ССР. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 589 с.
- [3] Иванов Н.Н. Зоны увлажнения земного шара // Изв. АН СССР. Серия география и геофизика. – 1941. – № 3. – С. 15-32.
- [4] Данильченко Н.В. Биоклиматическое обоснование суммарного водопотребления и оросительных норм // Мелиорация и водное хозяйство. – 1999. – № 4. – С. 25-29.
- [5] Будыко М.И. Климат и жизнь. – Л.: Гидрометеоздат, 1971. – 470 с.
- [6] Айдаров И.П., Голованов А.И., Никольский Ю.Н. Оптимизация мелиоративных режимов орошаемых и осушаемых сельскохозяйственных земель (рекомендации). – М.: ВО «Агропромиздат», 1990. – 60 с.
- [7] Мустафаев Ж.С. Экологическое обоснование мелиорации сельскохозяйственных земель. – Saarbrucken, 2016. – 375 с.
- [8] Кирейчева Л.В., Козыкеева А.Т., Даулетбай С.Д. Комплексное обустройство реки Шу. – Saarbrucken, 2016. – 140 с.
- [9] Mustafayev Zh.S., Kozykeyeva A.T., Kamaliyev A.M. Climatic changes in the basin of the transboundary Shu river // News of the National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of agricultural sciences. – 2019. – Vol. 5, N 53. – P. 104-112.
- [10] Мустафаев Ж.С., Козыкеева А.Т., Камалиев А.М. Изменение климата бассейна трансграничной реки Шу // Актуальные проблемы наук о Земле. Исследование трансграничных регионов. – Брест: БрГУ им. А. С. Пушкина, 2019. – Ч. 1. – С. 226-229.
- [11] Укрепленные нормы водопотребности для орошения по природно-климатическим зонам СССР. – М., 1984. – 346 с.
- [12] Ибатуллин С.Р., Кван Р.А., Парамонов А.И., Балгабаев Н.Н. Нормирование орошения в водохозяйственных бассейнах Казахстана. – Тараз, 2008. – 122 с.
- [13] Мустафаев Ж.С., Рябцев А.Д. Адаптивно-ландшафтная мелиорация земель в Казахстане. – Тараз: BIGNEO Service, 2012. – 528 с.

REFERENCES

- [1] Scientific-applied reference on the climate of the USSR. Series 13: Perennial Data. Part 1-6, issue 18: KazSSR. L.: Gidrometeoizdat, 1989. Book. 2. 656 p. (in Russ.).
- [2] Scientific and applied reference to the climate of the USSR. Series 13: Perennial Data. Part 1-6, issue 32: Kyrgyz SSR. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 589 p. (in Russ.).
- [3] Ivanov N.N. Humidification zones of the globe // Izv. USSR Academy of Sciences. Series geography and geophysics. 1941. N 3. P. 15-32 (in Russ.).
- [4] Danilchenko N.V. Bioclimatic substantiation of total water consumption and irrigation norms // Land Reclamation and Water Management. 1999. N 4. P. 25-29 (in Russ.).
- [5] Budyko M.I. Climate and Life. L.: Gidrometeoizdat, 1971. 470 p. (in Russ.).
- [6] Aidarov I.P., Golovanov A.I., Nikolsky Yu.N. Optimization of reclamation regimes of irrigated and drained agricultural lands (recommendations). M.: VO Agropromizdat, 1990. 60 p. (in Russ.).
- [7] Mustafayev J.S. Environmental rationale for land reclamation. Saarbrucken, 2016. 375 p. (in Russ.).
- [8] Kireicheva L.V., Kozykeyeva A.T., Dauletby S.D. Complex arrangement of the Shu River. Saarbrucken, 2016. 140 p. (in Russ.).
- [9] Mustafayev Zh.S., Kozykeyeva A.T., Kamaliyev A.M. Climate changes in the basin of the transboundary Shu river // News of the National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of agricultural sciences. 2019. Vol. 5, N 53. P. 104-112.
- [10] Mustafayev Zh.S., Kozykeyeva A.T., Kamaliyev A.M. Climate change in the basin of the transboundary river Shu // Actual problems of Earth. Science research cross-border regions. Brest: BrSU named after A.S. Pushkin, 2019. Part 1. P. 226-229 (in Russ.).
- [11] Strengthened norms of water demand for irrigation in the climatic zones of the USSR. M., 1984. 346 p. (in Russ.).
- [12] Ibatullin S.R., Kwan R.A., Paramonov A.I., Balgabaev N.N. Rationing of irrigation in water basins of Kazakhstan. Taraz, 2008. 122 p. (in Russ.).
- [13] Mustafayev Zh.S., Ryabtsev A.D. Adaptively-landscape land reclamation in Kazakhstan. Taraz: BIGNEO Service, 2012. 528 p. (in Russ.).

Ж. С. Мұстафаев¹, Ә. Т. Қозықеева², А. М. Камалиев³

¹Техника ғылымдарының докторы, профессор, «Су ресурстары және мелиорация» кафедрасының профессоры (Қазақ ұлттық аграрлық университеті, Алматы, Қазақстан)

²Техника ғылымдарының докторы, доцент, «Су ресурстары және мелиорация» кафедрасының профессоры (Қазақ ұлттық аграрлық университеті, Алматы, Қазақстан)

³Магистр, «Су ресурстары және мелиорация» кафедрасының PhD докторанты (Қазақ ұлттық аграрлық университеті, Алматы, Қазақстан)

ШУ ӨЗЕННІҢ СУЖИНАУ АЛАБЫНЫҢ АЙМАҒЫНДАҒЫ АУЫЛШАРУАШЫЛЫҚ ЖЕРЛЕРДІҢ СУДЫ ТҰТЫНУ ШАМАСЫН БАҒАЛАУ

Аннотация. «Қырғызгидромет» (Қырғызстан Республикасы) және «Қазақгидромет» (Республика Қазақстан) мекемелерінің Шу өзенінің сужинау алабына орналасқан метеорологиялық бекеттердің 1930–2017 жылдар аралығын қамтитын көпжылдық ақпараттық-талдау мәліметтерінің негізінде, климаттың өзгеруін ескеретін орташа айлық ауа жылуының және атмосфералық жауын-шашынның сандық мөнін пайдалана отырып, ауылшаруашылық дақылдар жетіспейтін биологиялық суды тұтыну O_p және жерлердің экологиялық суды тұтыну (O_{pi}^o) шамасын анықтауға арналған бағдарламалар орындалған. Оның сандық мәндері таулы аймақтан жазықтық аймақтарға қарай 2050 жылға дейін 8,0 ден 27,0 % дейін өсуі мүмкін.

Түйін сөздер: климат, сужинау, өзен, бассейн, өзгеру, бағалау, ауа температурасы, атмосфералық жауын-шашын, табиғи ылғалдану көрсеткіші, гидротермикалық көрсеткіш, су тұтыну жетіспеушілігі, экологиялық норма, ауылшаруашылық дақыл, егістік.

Zh. S. Mustafayev¹, A. T. Kozykeyeva², A. M. Kamaliev³

¹Doctor of technical sciences, professor, professor of the department «Water Resources and Land Reclamation» (Kazakh National Agrarian University, Almaty, Kazakhstan)

²Doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department «Water Resources and Land Reclamation» (Kazakh National Agrarian University, Almaty, Kazakhstan)

³Master, PhD doctoral candidate «Water Resources and Land Reclamation» (Kazakh National Agrarian University, Almaty, Kazakhstan)

ASSESSMENT OF WATER DEMAND FOR AGRICULTURAL AREAS OF WATER DRAINAGE OF THE SHU RIVER BASIN

Abstract. Based on the long-term information and analytical materials «Kyrgyzhydromet» (the Kyrgyz Republic) and «Kazhydromet» (the Republic of Kazakhstan), covering 1930-2017, prediction is made the shortage of water demand of crops O_p and ecological water demand of land (O_{pi}^o), taking into account climate change in the catchment areas of the Shu River basin at the spatio-temporal scale. It is expected that their quantitative values increase from 8.0 to 27.0% of the mountain territory towards the plain.

Keywords: climate, catchment, river, basin, change, assessment, air temperature, precipitation, coefficient of natural moisture, hydrothermal indicator, water consumption deficit, environmental norm, agricultural crop, land.